

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
И УПРАВЛЕНИЯ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Кафедра информатики и управления в технических системах

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА
И ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА
РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
(ЭЛЕКТРОНИКА).
ПРАКТИКУМ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

**Методические указания
к выполнению лабораторных работ
для студентов направления подготовки
27.03.04 – Управление в технических системах**

Севастополь
СевГУ
2022

УДК 004.896:621.382(076.5)
ББК 32.816я73
Т38

Р е ц е н з е н т :

В. А. Карапетьян – доцент кафедры «Информатика и управление в технических системах», канд. техн. наук, доцент

Составитель: А. Е. Осадченко

Т38 Технические средства и элементная база робототехнических систем (Электроника). Практикум по дисциплине : методические указания для студентов направления подготовки 27.03.04 – Управление в технических системах / Севастопольский государственный университет, Институт информационных технологий и управления в технических системах, кафедра Информатики и управления в технических системах ; сост.: А. Е. Осадченко. – Севастополь : СевГУ, 2022. – 100 с. – Текст : электронный.

В практикуме приводятся описания лабораторных работ, целью которых является исследование характеристик полупроводниковых приборов с применением лабораторных стендов «Основы электроники-2».

Лабораторный практикум предназначен для студентов направления подготовки 27.03.04 – Управление в технических системах.

УДК 004.896:621.382(076.5)
ББК 32.816я73

Рассмотрены и утверждены на заседании кафедры «Информатика и управления в технических системах», протокол № 7 от 23 марта 2022 г.

Рекомендованы к изданию на заседании ученого совета Института информационных технологий и управления в технических системах, протокол № 6 от 18 апреля 2022 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ	5
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ	20
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ	36
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ	47
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ	67
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ	79
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	100

ВВЕДЕНИЕ

Практикум включает шесть лабораторных работ, охватывающие основные разделы изучаемой дисциплины. Первая лабораторная работа, посвящена исследованию характеристик диодов, стабилитронов, светоизлучающих диодов. Во второй и третьей лабораторных работах исследуются основные характеристики транзисторов. В четвертой лабораторной работе исследуются свойства логических элементов. Пятая лабораторная работа посвящена исследованию характеристик оптоэлектронных приборов.

В шестой лабораторной работе исследуются характеристики операционных усилителей.

Практикум содержит необходимые теоретические сведения, которые позволяют произвести исследования параметров различных полупроводниковых приборов, построить их вольтамперные характеристики и сделать выводы о применимости для решения практических задач.

Для выполнения всех требуемых исследований используется специализированные стенды «Основы электроники-2».

В практикуме приведены схемы экспериментов и последовательность действий студентов для их проведения.

Лабораторная работа № 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

1.1. Цель работы

Исследование характеристик диодов, стабилитронов, светоизлучающих диодов.

1.2. Краткие теоретические сведения

1.2.1. Диоды

Полупроводниковым диодом называют прибор, который имеет два вывода и один Р-N-переход [1, с.19]. Все полупроводниковые диоды можно разделить на две группы: выпрямительные и специальные. Выпрямительные диоды, как следует из самого названия, предназначены для выпрямления переменного тока. В зависимости от частоты и формы переменного напряжения они делятся на высокочастотные, низкочастотные и импульсные.

Специальные типы полупроводниковых диодов используют различные свойства Р-N-переходов; явление пробоя, барьерную емкость, наличие участков с отрицательным дифференциальным сопротивлением и др.

Конструктивно выпрямительные диоды делятся на плоскостные и точечные, а по технологии изготовления на сплавные, диффузионные и эпитаксиальные [1, с. 18].

Плоскостные диоды благодаря большой площади Р-N-перехода используются для выпрямления больших токов. Точечные диоды имеют малую площадь перехода и, соответственно, предназначены для выпрямления малых токов.

Выпрямительные диоды большой мощности называют силовыми. Материалом для таких диодов обычно служит кремний.

Вольтамперная характеристика выпрямительного диода имеет вид

$$I_d = I_S e^{\frac{U - I_d R}{\phi_T}}, \quad (1.1)$$

где I_S – величина обратного тока через Р-N-переход,

U – напряжение на Р-N-переходе,

ϕ_T – температурный потенциал;

R – сопротивление объема полупроводникового кристалла, которое называют последовательным сопротивлением.

Полупроводниковые диоды относятся к нелинейным элементам для анализа которых используют дифференциальное сопротивление в заданной области вольтамперной характеристики (ВАХ), которое равно отношению Алого приращения напряжения к приращению тока через элемент.

$$R_{\text{дифф}} = \frac{dU}{dI}. \quad (1.2)$$

Условное графическое обозначение полупроводникового диода, его структура и ВАХ приведены на рис. 1.1. Электрод диода, подключенный к области P, называют анодом, а электрод, подключенный к области N, – катодом.

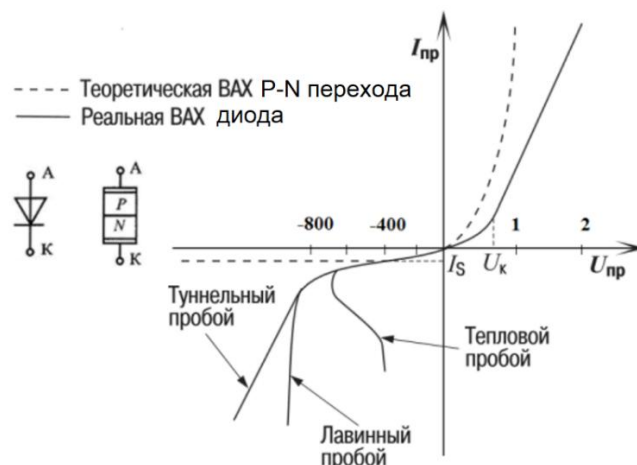


Рис. 1.1. Полупроводниковый диод и его ВАХ

Обратное напряжение ограничивается пробоем P-N-перехода. Пробой P-N-перехода возникает за счет лавинного размножения неосновных носителей. Существует три вида пробоев: туннельный, лавинный и тепловой. Туннельный и лавинный пробой представляют собой разновидности электрического пробоя и связаны с увеличением напряженности электрического поля в переходе.

Тепловой пробой определяется перегревом перехода.

При лавинном пробое P-N-перехода ток через переход ограничивается лишь сопротивлением питающей P-N-переход электрической цепи. Напряжение лавинного пробоя выпрямительных диодов может превышать 1000 В.

Для увеличения напряжения лавинного пробоя используются выпрямительные столбы, состоящие из ряда последовательно включенных диодов.

1.2.2. Диоды Шоттки

Для выпрямления сравнительно небольших напряжений высокой частоты широко используются диоды с барьером Шоттки (ДШ). В этих диодах вместо P-N-перехода используется контакт металлической поверхности с полупроводником [1, с. 22]. В месте контакта возникают обедненные носителями заряда слои полупроводника, которые называются запиорными. ДШ отличаются от диодов с P-N-переходом по следующим параметрам:

1. более низкое прямое падение напряжения;
2. имеют более низкое обратное напряжение;
3. более высокий ток утечки;
4. почти полностью отсутствует заряд обратного восстановления.

Условное графическое обозначение полупроводникового диода с барьером Шоттки, приведено на рис. 1.2.



Рис. 1.2. Полупроводниковый диод с барьером Шоттки

Две основные характеристики делают эти диоды незаменимыми при проектировании низковольтных высокочастотных выпрямителей: малое прямое падение напряжения и малое время восстановления обратного напряжения [1, с. 23]. Кроме того, отсутствие неосновных носителей, требующих времени на обратное восстановление, означает физическое отсутствие потерь на переключение самого диода.

В диодах с барьером Шоттки прямое падение напряжения является функцией обратного напряжения. Максимальное обратное напряжение современных диодов Шоттки составляет сотни вольт. При этом напряжении прямое напряжение диодов Шоттки меньше прямого напряжения диодов с P-N-переходом на 0,2...0,3 В.

Преимущества диода Шоттки становятся особенно заметными при выпрямлении малых напряжений. Например, диод Шоттки с максимальным обратным напряжением 45 В имеет прямое напряжение 0,4...0,6В, а при том же токе диод с P-N-переходом имеет падение напряжения 0,5... 1,0В. При понижении обратного напряжения до 15В прямое напряжение уменьшается до 0,3...0,4В. Применение диодов Шоттки в выпрямителе позволяет существенно уменьшить потери при работе на больших токах. Максимальная рабочая частота ДШ превышает 200 кГц при токах более 30 А.

1.2.3. Светодиоды

При пропускании электрического тока через P-N-переход в прямом направлении носители заряда могут рекомбинировать с излучением фотонов (из-за перехода электронов с одного энергетического уровня на другой). При использовании различных полупроводниковых материалов можно получить излучение в диапазоне от инфракрасного до ультрафиолетового. Схема включения светодиода приведена на рис. 1.3.

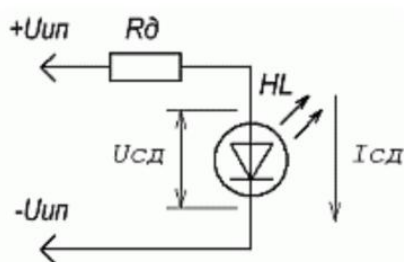


Рис. 1.3. Схема включения светодиода

Токоограничивающий добавочный резистор R_d , можно рассчитать по формуле

$$R_d = (U_{ип} - U_{сд.}) / I_{сд.}, \quad (1.3)$$

где R_d – сопротивление токоограничивающего резистора;

$U_{ип}$ – напряжение источника питания;

$U_{сд.}$ – падение напряжения на светодиоде;

$I_{сд.}$ – рабочий ток светодиода.

Мощность, рассеивающуюся на светодиоде и на добавочном резисторе R_d , можно рассчитать по формулам

$$P_{сд} = I_{сд.} U_{сд.} \quad P_d = R_d I_{сд.}^2 \quad (1.4)$$

1.2.4. Стабилитроны

Для поддержания постоянства напряжения в цепях питания электронной аппаратуры широко используются стабилитроны. Стабилитроны (диоды Зенера) – это полупроводниковые диоды, предназначенные для стабилизации напряжений.

Стабилитрон является разновидность полупроводникового диода, работающего при напряжении обратного смещения в режиме лавинного или туннельного пробоя. До момента наступления электрического пробоя P-N-перехода через стабилитрон течет очень малый ток утечки, а его сопротивление достаточно высокое. В момент пробоя ток через него резко увеличивается, а дифференциальное сопротивление стабилитрона снижается до малых величин.

За счет этого в режиме пробоя напряжение на стабилитроне изменяется не значительно в большом диапазоне обратных токов.

Схема стабилизатора напряжения показана на рис. 1.4, а ВАХ стабилитрона на рис. 1.5.

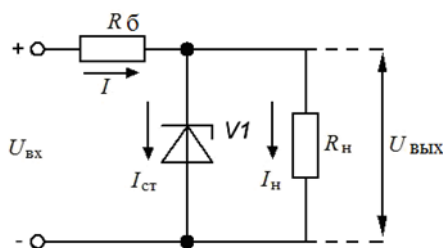


Рис. 1.4. Схема стабилизатора напряжения

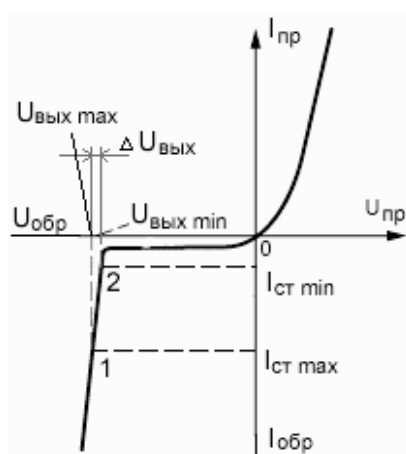


Рис. 1.5. ВАХ стабилитрона

Работа стабилизатора основана на том свойстве стабилитрона, что на рабочем участке вольтамперной характеристики (от $I_{ст. min}$ до $I_{ст. max}$) напряжение на стабилитроне практически не изменяется [1, с. 21].

В приведенной схеме, при изменении входного напряжения или тока нагрузки – напряжение на нагрузке R_n изменяется незначительно (оно остаётся таким же, как и на стабилитроне), вместо этого изменяется ток через стабилитрон. Так как $U_{\text{вх}} = U_{\text{вых}} + I_{R_b} R_b$, то для случая $R_n \gg R_b$

$$U_{\text{вх}} \approx U_{\text{вых}} + I_{\text{ст}} R_b. \quad (1.5)$$

Излишки входного напряжения гасятся балластным резистором R_b , величина падения напряжения на этом резисторе зависит от тока через него, а ток через него зависит, в том числе, от тока через стабилитрон $I_{ст}$, и таким образом, получается, что изменение тока через стабилитрон регулирует величину падения напряжения на балластном резисторе.

Для нормальной работы такого стабилизатора необходимо, чтобы ток $I_{ст}$, протекающий через стабилитрон, не был меньше, чем $I_{ст. min}$, и не больше, чем $I_{ст. max}$. При изменении тока, протекающего через стабилитрон в этих пределах, на нем и на подключенной параллельно ему нагрузке R_n напряжение, называемое напряжением стабилизации $U_{ст}$ стабилитрона, изменяется незначительно.

Одним из важнейших параметров стабилизатора является коэффициентом стабилизации ($K_{ст}$), количественно равный отношению относительного изменения напряжения на входе стабилизатора ($\Delta U_{вх}/U_{вх}$) к относительному изменению напряжения на его выходе ($\Delta U_{вых}/U_{вых}$)

$$K_{ст.} = \frac{\Delta U_{вх} U_{вых}}{\Delta U_{вых} U_{вх}}. \quad (1.6)$$

Приближенное значение потерь на стабилитроне (рассеиваемая мощность) в режиме стабилизации можно рассчитать по формуле

$$P_{ст.} \approx I_{ст.} U_{ст.}. \quad (1.7)$$

1.3. Технические средства для выполнения работы

Модуль **ДИОДЫ** и модуль **МУЛЬТИМЕТРЫ** на стендах **ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ – 2**.

1.4. Порядок выполнения лабораторной работы

1.4.1. Снятие вольтамперной характеристики резистора

Снятие вольтамперной характеристики резистора производится по схеме, показанной на рис. 1.6.

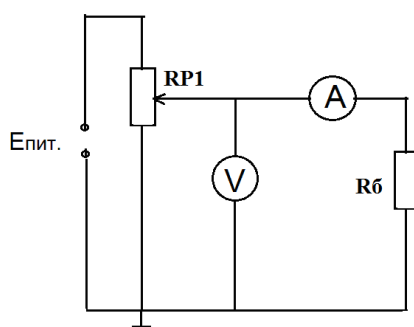


Рис. 1.6. Схема снятия вольтамперной характеристики резистора

Для выполнения работы необходимо осуществить следующие действия:

1. Модуль питания стенда (220 В) **QF1** установить в положение **ВЫКЛЮЧЕНО**.
2. В модуле **ДИОДЫ** извлечь из гнезд все перемычки (рис. 1.7).

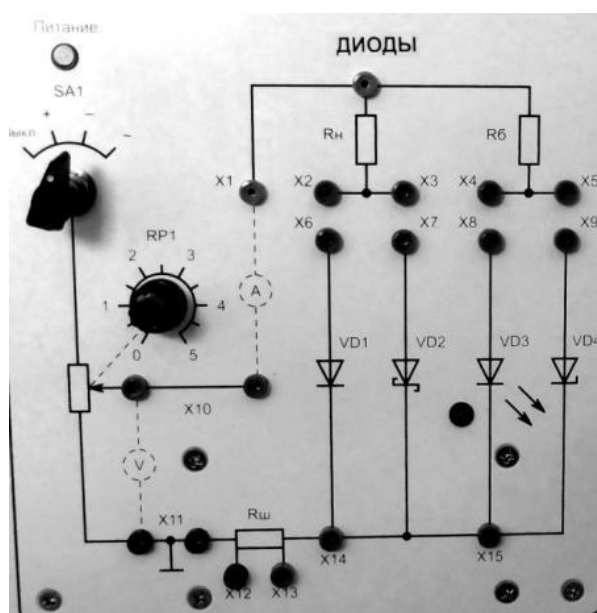


Рис. 1.7. Вид модуля **ДИОДЫ** перед началом работы

3. Установить переключатель **SA1** в положение **Выкл.**

4. Ручку потенциометра **RP1** повернуть против часовой стрелки в крайнее положение.

5. На модуле **МУЛЬТИМЕТРЫ** установить переключатели режима измерения:

- для левого мультиметра измерение напряжения в диапазоне 20 В;
 - для правого мультиметра режим измерения тока в диапазоне 200 мА
- (рис. 1.8).

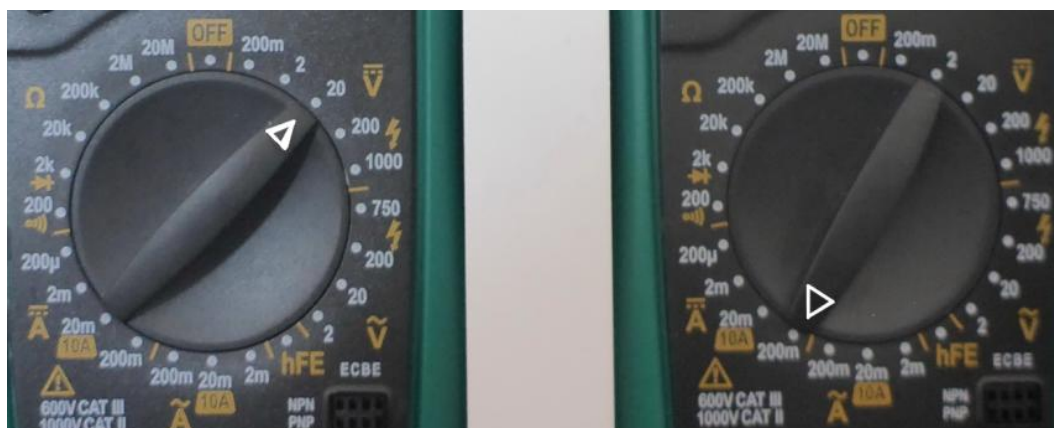


Рис. 1.8. Вид модуля **МУЛЬТИМЕТРЫ** перед началом работы

6. Черный щуп левого мультиметра вставить в гнездо разъема **X11**.

7. Красный щуп левого мультиметра вставить в гнездо разъема **X10**.

8. Красный щуп правого мультиметра вставить в гнездо разъема **X10**.

9. Черный щуп правого мультиметра вставить в гнездо разъема **X1**.

10. Соединить перемычкой гнезда разъемов **X11** и **X2**.

11. Модуль питания стенда (220 В) **QF1** установить в положение **ВКЛЮЧЕНО**

12. Установить переключатель **SA1** в положение **+**.

13. Поворачивая ручку потенциометра **RP1** по часовой стрелке, и наблюдая показания левого мультиметра, установить величину напряжения на резисторе **Rн** равной 2 В. Занести в таблицу 1 величину тока через **Rн** согласно показаниям правого мультиметра.

14. Заполнить таблицу 1.1, изменяя величину напряжения на резисторе **Rн** с шагом 2 В.

Таблица 1.1 – Сила тока через **Rн** при положительных напряжениях на нем

U _н , В	0	2	4	6	8	10	12	14
I _н , мА								

15. Установить переключатель **SA1** в положение **-**.

16. Заполнить таблицу 1.2, изменяя величину отрицательного напряжения на резисторе **Rн** с шагом 2 В.

Таблица 1.2 – Сила тока через R_H при отрицательных напряжениях на нем

$U_{гн}, В$	0	-2	-4	-6	-8	-10	-12	-14
$I_{гн}, мА$								

1.4.2. Снятие вольтамперной характеристики диода

Снятие вольтамперной характеристики диода производится по схеме, показанной на рис. 1.9.

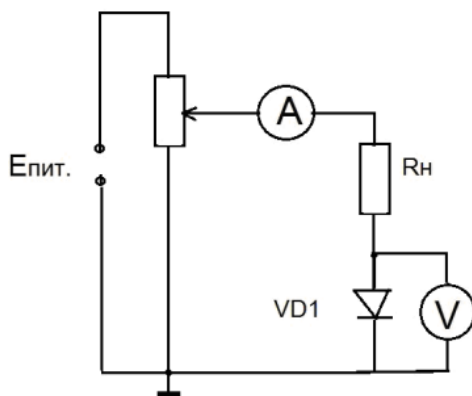


Рис. 1.9. Схема снятия вольтамперной характеристики диода

Для выполнения работы необходимо осуществить следующие действия:

1. Модуль питания стенда (220 В) **QF1** установить в положение **ВЫКЛЮЧЕНО**.

2. В модуле **ДИОДЫ** извлечь из гнезд все перемычки (рис. 1.7).

3. Установить переключатель **SA1** в положение **Выкл.**

4. Ручку потенциометра **RP1** повернуть против часовой стрелки в крайнее положение.

5. На модуле **МУЛЬТИМЕТРЫ** установить переключатели режима измерения:

- для левого мультиметра измерение напряжения в диапазоне 20 В;
- для правого мультиметра режим измерения тока в диапазоне 200 мА.

6. Черный щуп левого мультиметра вставить в гнездо разъема X11.

7. Красный щуп левого мультиметра вставить в гнездо разъема X3.

8. Красный щуп правого мультиметра вставить в гнездо разъема X10.

9. Черный щуп правого мультиметра вставить в гнездо разъема X1.

10. Соединить перемычкой гнезда разъемов X6 и X2.

11. Модуль питания стенда (220 В) **QF1** установить в положение **ВКЛЮЧЕНО**

12. Установить переключатель **SA1** в положение **+**.

13. Поворачивая ручку потенциометра **RP1** по часовой стрелке, и наблюдая показания левого мультиметра, установить величину напряжения на **VD1** равной 0,2 В. Занести в таблицу 1.3 величину тока через **VD1** согласно показаниям правого мультиметра.

14. Заполнить таблицу 1.3, изменяя величину напряжения на **VD1**.

Таблица 1.3 – Сила тока через VD1 при положительных напряжениях на нем

$U_{VD1}, \text{В}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6
$I_{VD1}, \text{мА}$	0								

15. Установить переключатель SA1 в положение -.

16. Заполнить таблицу 1.4, изменяя величину отрицательного напряжения на VD1 с шагом 2 В.

Таблица 1.4 – Сила тока через VD1 при отрицательных напряжениях на нем

$U_{VD1}, \text{В}$	0	-2	-4	-6	-8	-10	-12	-14
$I_{VD1}, \text{мА}$	0							

1.4.3. Снятие вольтамперной характеристики диода Шоттки

Снятие вольтамперной характеристики диода Шоттки производится по схеме, показанной на рис. 1.10.

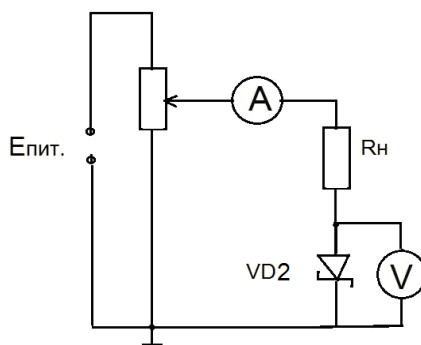


Рис. 1.10. Схема снятия вольтамперной характеристики диода Шоттки

Для выполнения работы необходимо осуществить следующие действия:

1. Модуль питания стенда (220 В) **QF1** установить в положение **ВЫКЛЮЧЕНО**.

2. В модуле **ДИОДЫ** извлечь из гнезд все перемычки (рис. 1.7).

3. Установить переключатель SA1 в положение **Выкл.**

4. Ручку потенциометра **RP1** повернуть против часовой стрелки в крайнее положение.

5. На модуле **МУЛЬТИМЕТРЫ** установить переключатели режима измерения:

- для левого мультиметра измерение напряжения в диапазоне 20 В;

- для правого мультиметра режим измерения тока в диапазоне 200 мА.

6. Черный щуп левого мультиметра вставить в гнездо разъема X11.

7. Красный щуп левого мультиметра вставить в гнездо разъема X2.

8. Красный щуп правого мультиметра вставить в гнездо разъема X10.

9. Черный щуп правого мультиметра вставить в гнездо разъема X1.

10. Соединить перемычкой гнезда разъемов X7 и X3.

11. Модуль питания стенда (220 В) **QF1** установить в положение **ВКЛЮЧЕНО**

12. Установить переключатель **SA1** в положение +.

13. Поворачивая ручку потенциометра **RP1** по часовой стрелке, и наблюдая показания левого мультиметра, установить величину напряжения на **VD2** равной 0,2 В. Занести в таблицу 1.5 величину тока через **VD2** согласно показаниям правого мультиметра.

14. Заполнить таблицу 1.5, изменяя величину напряжения на **VD2**.

Таблица 1.5 – Сила тока через **VD2** при положительных напряжениях на нем

$U_{VD2}, \text{В}$	0	0,2	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1
$I_{VD2}, \text{мА}$	0									

15. Установить переключатель **SA1** в положение -.

16. Заполнить таблицу 1.6, изменяя величину отрицательного напряжения на **VD2** с шагом 2 В.

Таблица 1.6 – Сила тока через **VD2** при отрицательных напряжениях на нем

$U_{VD2}, \text{В}$	0	-2	-4	-6	-8	-10	-12	-14
$I_{VD2}, \text{мА}$	0							

1.4.4. Снятие вольтамперной характеристики диода светодиода

Снятие вольтамперной характеристики светодиода производится по схеме, показанной на рис. 1.11.

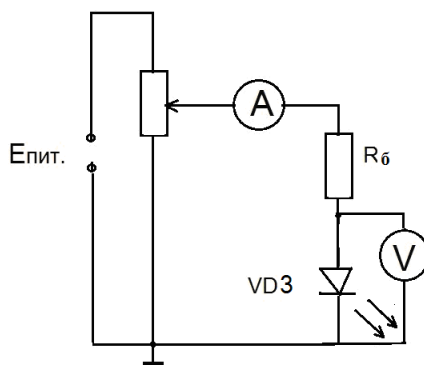


Рис. 1.11. Схема снятия вольтамперной характеристики светодиода

Для выполнения работы необходимо осуществить следующие действия:

1. Модуль питания стенда (220 В) **QF1** установить в положение **ВЫКЛЮЧЕНО**.

2. В модуле **ДИОДЫ** извлечь из гнезд все перемычки (рис. 1.7).

3. Установить переключатель **SA1** в положение **Выкл.**

4. Ручку потенциометра **RP1** повернуть против часовой стрелки в крайнее положение.

5. На модуле **МУЛЬТИМЕТРЫ** установить переключатели режима измерения:

- для левого мультиметра измерение напряжения в диапазоне 20 В;
- для правого мультиметра режим измерения тока в диапазоне 200 мА

6. Черный щуп левого мультиметра вставить в гнездо разъема X11.

7. Красный щуп левого мультиметра вставить в гнездо разъема X5.

8. Красный щуп правого мультиметра вставить в гнездо разъема X10.

9. Черный щуп правого мультиметра вставить в гнездо разъема X1.

10. Соединить перемычкой гнезда разъемов X8 и X4.

11. Модуль питания стенда (220 В) **QF1** установить в положение **ВКЛЮЧЕНО**

12. Установить переключатель **SA1** в положение +.

13. Поворачивая ручку потенциометра **RP1** по часовой стрелке, и соблюдая показания левого мультиметра, установить величину напряжения на светодиоде равной 0,4 В. Занести в таблицу 1.7 величину тока через VD3 согласно показаниям правого мультиметра.

14. Заполнить таблицу 1.7, изменяя величину напряжения на резисторе Rн.

Таблица 1.7 – Сила тока через VD3 при положительных напряжениях на нем

$U_{VD3}, \text{В}$	0	0,4	0,8	1,2	1,6	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4
$I_{VD3}, \text{мА}$	0											

15. Отметить в таблице напряжение, при котором начинается свечение светодиода.

16. Установить переключатель **SA1** в положение -.

17. Заполнить таблицу 1.8, изменяя величину отрицательного напряжения на VD3 с шагом 2 В.

Таблица 1.8 – Сила тока через VD3 при отрицательных напряжениях на нем

$U_{VD3}, \text{В}$	0	-2	-4	-6	-8	-10	-12	-14
$I_{VD3}, \text{мА}$	0							

1.4.5. Снятие вольтамперной характеристики диода стабилитрона

Снятие вольтамперной характеристики стабилитрона производится по схеме, показанной на рис. 1.12.

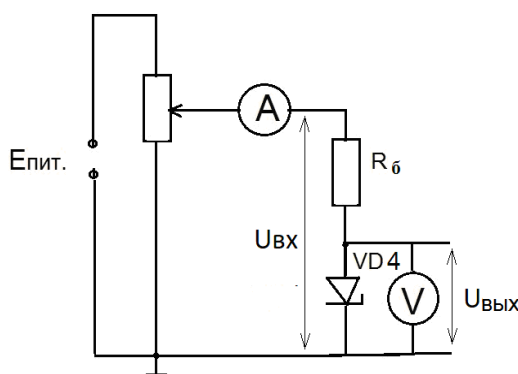


Рис. 1.12. Схема снятия вольтамперной характеристики стабилитрона

Для выполнения работы необходимо осуществить следующие действия:

1. Модуль питания стенда (220 В) **QF1** установить в положение **ВЫКЛЮЧЕНО**.

2. В модуле **ДИОДЫ** извлечь из гнезд все перемычки (рис. 1.7).

3. Установить переключатель **SA1** в положение **Выкл.**

4. Ручку потенциометра **RP1** повернуть против часовой стрелки в крайнее положение.

5. На модуле **МУЛЬТИМЕТРЫ** установить переключатели режима измерения:

- для левого мультиметра измерение напряжения в диапазоне 20 В;

- для правого мультиметра режим измерения тока в диапазоне 200 мА

6. Черный щуп левого мультиметра вставить в гнездо разъема **X11**.

7. Красный щуп левого мультиметра вставить в гнездо разъема **X4**.

8. Красный щуп правого мультиметра вставить в гнездо разъема **X10**.

9. Черный щуп правого мультиметра вставить в гнездо разъема **X1**.

10. Соединить перемычкой гнезда разъемов **X9** и **X5**.

11. Модуль питания стенда (220 В) **QF1** установить в положение **ВКЛЮЧЕНО**

12. Установить переключатель **SA1** в положение **+**.

13. Поворачивая ручку потенциометра **RP1** по часовой стрелке, и соблюдая показания левого мультиметра, установить величину напряжения на стабилитроне равной 0,4 В. Занести в таблицу 1.9 величину тока через **VD4** согласно показаниям правого мультиметра.

14. Заполнить таблицу 1.9, изменяя величину напряжения на стабилитроне с шагом 0,2 В.

Таблица 1.9 – Сила тока через **VD4** при положительных напряжениях на нем

$U_{VD4}, \text{В}$	0	0,2	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$I_{VD4}, \text{мА}$	0								

15. Установить переключатель **SA1** в положение **-**.

16. Заполнить таблицу 1.10, изменяя величину отрицательного напряжения на стабилитроне.

Таблица 1.10 – Сила тока через **VD4** при отрицательных напряжениях на нем

$U_{VD4}, \text{В}$	0	-3	-6	-6,7	-6,72	-6,74	6,76	-6,78	-6,8	-6,82	-6,84	-6,86	-6,88
$I_{VD4}, \text{мА}$	0												

1.5. Обработка экспериментальных данных

1. Используя данные таблиц 1.1 и 1.2 построить вольтамперную характеристику резистора R_n .

2. Рассчитать величину R_n .

3. Для каждого значения $U_{гн}$ рассчитать рассеиваемую мощность P_{Rn} .

4. Используя данные таблиц 1.3 и 1.4 построить вольтамперную характеристику диода.
5. Используя построенную ВАХ по формуле (1.2) рассчитать величину $R_{дифф}$. При U_d для своего варианта (таблица 1.11)
6. Для каждого значения U_d рассчитать рассеиваемую мощность P_d .
7. Используя данные таблиц 1.5 и 1.6 построить вольтамперную характеристику диода Шоттки.
8. Используя построенную ВАХ диода Шоттки, рассчитать величину $R_{дифф}$. При $U_{дш}$ для своего варианта (таблица 1.11)
9. Для каждого значения U_{VD2} рассчитать рассеиваемую мощность $P_{ДШ}$.
10. Используя данные таблиц 7 и 8 построить вольтамперную характеристику светодиода.
11. Используя построенную ВАХ светодиода, рассчитать величину $R_{дифф}$. При $U_{сд}$. Для своего варианта (таблица 1.11)
12. Для каждого значения $U_{сд}$. Рассчитать рассеиваемую мощность $P_{сд}$.
13. Рассчитать величину дополнительного сопротивления R_d для своего варианта $I_{сд}$ и $U_{пит}$ (таблица 1.11). $U_{сд}$ принимаем 2,5 В.
14. Рассчитать рассеиваемую мощность P_{Rd} . И $P_{сд}$. Для своего варианта $I_{сд}$ и $U_{пит}$. $U_{сд}$ принимаем 2,5 В.
15. Используя данные таблиц 1.9 и 1.10 построить вольтамперную характеристику стабилитрона.
16. Рассчитать величину $U_{вх}$. По формуле (1.5). R_b принимаем 1000 Ом.
17. Рассчитать величину $R_{дифф}$. Стабилитрона при $U_{ст}$. Для каждого значения $U_{СТ}$ рассчитать рассеиваемую мощность $P_{ст}$. По формуле (1.7).
18. Рассчитать величину $K_{ст}$. По формуле (1.6).
19. Рассчитать величину дополнительного сопротивления R_b для своего варианта $I_{ст}$. и $U_{пит}$ (таблица 1.11). ($U_{ст}$ принимаем 6,85 В).
20. Рассчитать рассеиваемую мощность P_{Rb} и $P_{ст}$. Для своего варианта $I_{ст}$. и $U_{пит}$. ($U_{ст}$. Принимаем 6,85 В).
21. Сделать выводы по результатам исследования ВАХ полупроводниковых приборов.

Таблица 1.11 – Исходные данные для проведения расчетов

№ варианта	$U_{л.}, В$	$U_{дш.}, В$	$U_{сд.}, В$	$I_{сд.}, I_{сд.}, мА$	$U_{пит.}, В$
1	0,5	0,3	1,8	7	9
2	0,6	0,4	1,9	8	10
3	0,7	0,5	2,0	9	11
4	0,8	0,6	2,1	10	12
5	0,9	0,7	2,2	11	13
6	1,0	0,8	2,3	12	14
7	1,1	0,9	1,8	13	15
8	1,2	1,0	1,9	14	16
9	1,3	0,3	2,0	7	17
10	1,4	0,4	2,1	8	18
11	1,5	0,5	2,2	9	19
12	1,6	0,6	2,3	10	20
13	0,5	0,7	1,8	11	9
14	0,6	0,8	1,9	12	10
15	0,7	0,9	2,0	13	11
16	0,8	1,0	2,1	14	12
17	0,9	0,3	2,2	7	13
18	1,0	0,4	2,3	8	14
19	1,2	0,5	1,8	9	15
20	1,3	0,6	1,9	10	16
21	1,4	0,7	2,0	11	17
22	1,5	0,8	2,1	12	18
23	1,6	0,9	2,2	13	19
24	0,5	1,0	2,3	14	20
25	0,6	0,3	1,8	7	21

1.6. Содержание отчета

Отчёт должен содержать:

- титульный лист;
- цель лабораторной работы;
- схемы экспериментов;
- таблицы и графики результатов;
- расчеты для своего варианта;
- выводы.

Отчёт по лабораторной работе должен быть выполнен в соответствии требованиями ГОСТ.

1.7. Порядок защиты работы

Защита производится при наличии отчета и состоит в объяснениях полученных результатов и ответах на контрольные вопросы.

1.8. Контрольные вопросы

1. Чем отличаются полупроводники типа Р и N?
2. Каковы свойства Р-N-перехода?
3. Объясните вид ВАХ Р-N-перехода?
4. Как снять по точкам ВАХ диода?
5. Что такое дифференциальное сопротивление диода?
6. Поясните вид ВАХ стабилитрона.
7. В чем отличие выпрямительного диода с Р-N-переходом и диода Шоттки?
8. В чем отличие ВАХ выпрямительного диода, диода Шоттки, стабилитрона и светодиода?
9. Как работает параметрический стабилизатор напряжения? Для чего служит балластный резистор?
10. Как изменится напряжение на выходе стабилизатора при повышении температуры?
11. При каком минимальном напряжении на входе стабилизатора еще возможна стабилизация напряжения?
12. От какого параметра зависит качество стабилизации напряжения?
13. Как рассчитать коэффициент стабилизации?
14. От чего зависит яркость свечения светодиода?
15. Какой элемент обязателен в схеме индикатора на светодиоде? Почему?
16. Как рассчитать параметры добавочного резистора для светодиода?
17. Как рассчитать рассеиваемую светодиодом мощность?

Лабораторная работа № 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

2.1. Цель работы

Исследование характеристик биполярных транзисторов.

2.2. Краткие теоретические сведения

2.2.1. Принцип работы биполярного транзистора

Биполярный транзистор является одним из основных активных элементов твердотельной электроники. Он широко применяется в цифровых и аналоговых радиоэлектронных устройствах генерации и усиления сигналов, а также в качестве электронного ключа в импульсных схемах.

Определение «биполярный» указывает на то, что работа транзистора основана на процессах, в которых принимают участие носители зарядов обоих знаков (электроны и дырки). Название «транзистор» произошло от английского словосочетания «transfer resistor» - преобразуемое (трансформируемое) сопротивление.

Структурно биполярный транзистор представляет собой полупроводниковый прибор, состоящий из трёх областей чередующегося типа электропроводности, которые создаются двумя p - n переходами в непосредственной близости один от другого (толщина базы значительно меньше диффузионной длины неравновесных носителей заряда) [1, с. 26]. Различают p - n - p и n - p - n транзисторы.

На рис. 2.1, изображена структура биполярного n - p - n транзистора, его условное обозначение на схемах и схема замещения. Транзистор можно представить как два последовательно соединенных полупроводниковых диода, включенных встречно.

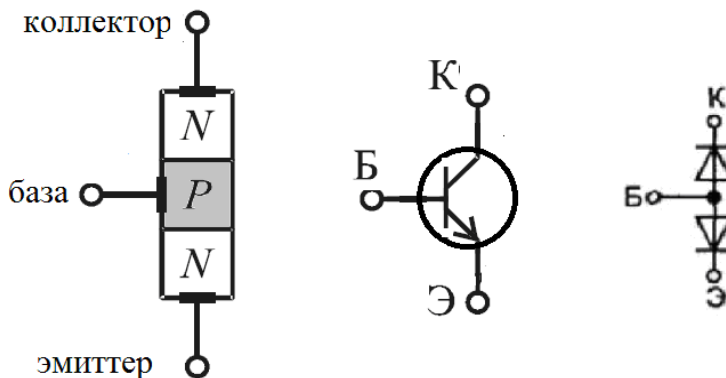


Рис. 2.1. Биполярный n - p - n транзистор

На рис. 2.2, изображена структура биполярного $p-n-p$ -транзистора, изображение на схемах и его схема замещения.

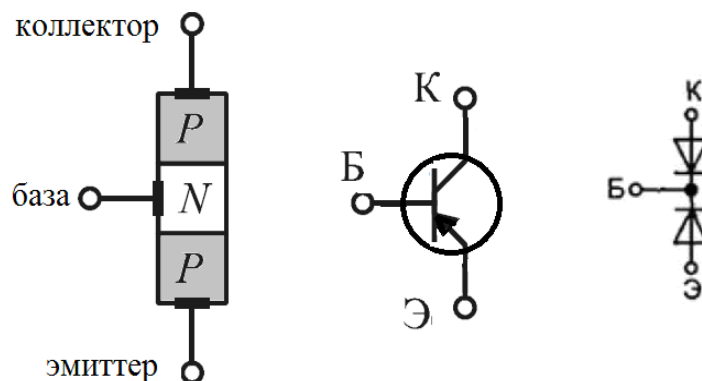


Рис. 2.2. Биполярный $p-n-p$ -транзистор

Центральная область транзистора, называемая базой, заключена между коллектором и эмиттером. Толщина базы мала и не превышает нескольких микрон. Переход между базой и эмиттером называется база-эмиттерным, а между базой и коллектором – база-коллекторным.

Симметричные структуры биполярных транзисторов, показанные на рис. 2.1 и рис. 2.2, являются идеальными. У реальных транзисторов площади обоих переходов существенно различаются. Это различие проиллюстрировано на рис. 2.3. переход n_1-p имеет гораздо меньшую площадь, чем n_2-p . Кроме того, у большинства транзисторов один из крайних слоев (а именно, слой с меньшей площадью — n_1) легирован гораздо сильнее, чем второй (n_2). Таким образом, транзистор является асимметричным прибором.

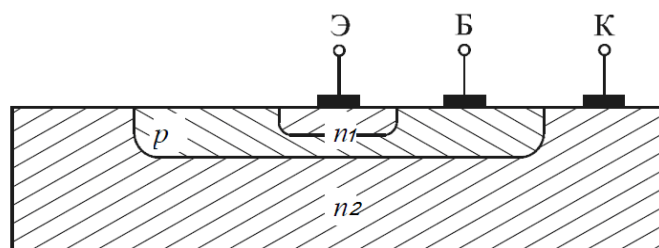


Рис. 2.3. Структура реального транзистора

Рассмотрим работу $n-p-n$ транзистора. При включении источника тока, как показано на рис. 2.4, переход эмиттер – база ($n-p$) находится в открытом состоянии, переход коллектор – база находится в закрытом состоянии. Ток через транзистор очень мал и обусловлен тепловым током через закрытый $p-n$ переход.

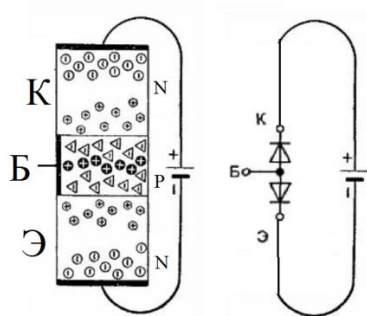


Рис. 2.4. Работа n-p-n транзистора

Если подать на базу относительно эмиттера некоторое небольшое напряжение в прямом направлении (рис. 2.5), то возникнет ток через Б-Э переход [2, с. 23].

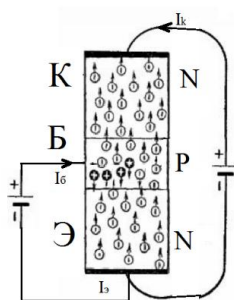


Рис. 2.5. Токи через транзистор

Под действием эмиттерного тока электроны попадают в базу с проводимостью p из эмиттера с проводимостью n . При этом часть электронов заполняют дырки, находящиеся в области базы и через базовый вывод протекает ток базы I_B . Так как база очень тонкая, электрическое поле коллектора, создаваемое потенциалом коллекторного источника питания, будет вытягивать большинство электронов в коллектор. Таким образом, почти все заряды, входящие через эмиттер, будут выходить через коллектор, а ток через вывод базы I_B будет намного меньше коллекторного тока I_K .

Следовательно, небольшое напряжение, приложенное к переходу база – эмиттер, способствует открыванию перехода база – коллектор, смещенному в обратном направлении. В этом состоит принцип работы биполярного транзистора. Транзистор p - n - p работает аналогично при изменении полярности источников питания.

Токи транзистора, связаны соотношениями:

$$I_K = \alpha I_E, \quad (2.1)$$

$$I_K = I_E - I_B.$$

Множитель α называют коэффициентом передачи тока эмиттера. У современных транзисторов $\alpha = 0,98$ – $0,997$.

Из равенств (2.1) следует, что

$$I_K = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_B = \beta I_B. \quad (2.2)$$

Множитель β называют **коэффициентом усиления тока базы**. Так как величина α близка к 1, то β может принимать большие значения. Для кремниевых n-p-n транзисторов коэффициент усиления тока базы может достигать 10^3 .

2.2.2. ВАХ биполярного транзистора

Рассмотрим транзистор, включенный по схеме, представленной на рис. 2.6.

Эта схема получила название «схема с общим эмиттером» (ОЭ), так как эмиттер является общим во входной и выходной цепях [2, с. 92].

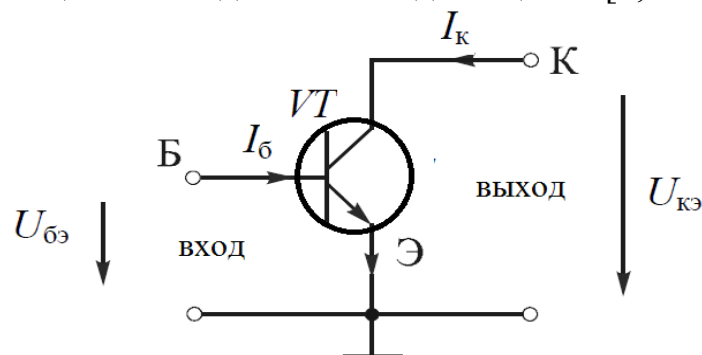


Рис. 2.6. Схема с общим эмиттером

Входными величинами являются напряжение база-эмиттер $U_{бэ}$ и ток базы I_b , а выходными – напряжение коллектор-эмиттер $U_{кэ}$ и ток коллектора I_k .

Входная характеристика биполярного транзистора – это зависимость тока базы I_b от напряжения база-эмиттер $U_{бэ}$ при фиксированном значении напряжения коллектор-эмиттер $U_{кэ}$: $I_b = f(U_{бэ})$ [2, с. 96].

Если $U_{кэ} = 0$ то поскольку база-эмиттерный переход смещён в прямом направлении – входная характеристика похожа на прямую ветвь ВАХ диода (рис. 2.7).

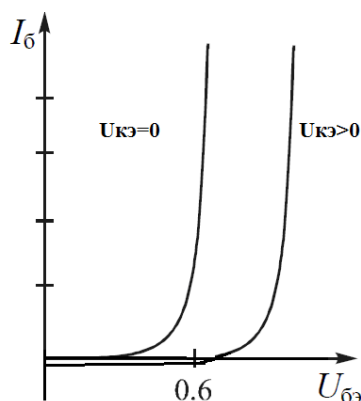


Рис. 2.7. Входная характеристика биполярного транзистора

При этом ток эмиттера и напряжение база-эмиттер связаны экспоненциальной зависимостью, описывающей вольтамперную характеристику диода, смещенного в прямом направлении

$$I_{\text{Э}} = I_{\text{Э0}} e^{U_{\text{БЭ}} / \varphi_T}, \quad (2.3)$$

где $I_{\text{Э0}}$ – обратный ток база-эмиттерного перехода, φ_T – температурный потенциал.

При $U_{\text{КЭ}} > 0$ возникает тепловой ток через закрытый база-коллекторный переход, который направлен встречно $I_{\text{Б}}$, что вызывает смещение входной характеристики транзистора вправо и вниз.

Учитывая (2.1), получаем связь между током коллектора и напряжением база-эмиттер

$$I_{\text{К}} = \alpha I_{\text{Э0}} e^{U_{\text{БЭ}} / \varphi_T}. \quad (2.4)$$

Из (2.4) следует, что ток коллектора зависит от напряжения $U_{\text{БЭ}}$ и не должен зависеть от $U_{\text{КЭ}}$, при условии, что $U_{\text{КЭ}}$ имеет величину достаточную для создания электрического поля, вытягивающего заряды из базовой области в коллектор.

По входной характеристике можно рассчитать дифференциальное сопротивление база-эмиттерного перехода $r_{\text{Б}} = \Delta U_{\text{Б}} / \Delta I_{\text{Б}}$, величина которого существенно зависит от $I_{\text{Б}}$.

Выходной характеристикой биполярного транзистора для схемы с общим эмиттером называют зависимость тока коллектора $I_{\text{К}}$ от тока базы $I_{\text{Б}}$ при неизменном значении тока базы [2, с. 99] (рис. 2.8).

Зависимость тока коллектора от напряжения между базой и эмиттером снимается при фиксированных токах базы.



Рис. 2.8. Выходная характеристика биполярного транзистора

В режиме насыщения $U_{\text{КЭ}}$ имеет величину недостаточную для вытягивания зарядов из базовой области в коллектор. Ток коллектора при этом

мало зависит от тока базы, и все ветви выходной характеристики сливаются в одну.

В активном режиме ток коллектора практически не зависит от напряжения на коллекторе, так как практически все заряды, выходящие из эмиттера, попадают в коллектор – ток коллектора в основном зависит от тока базы.

Незначительный наклон выходных характеристик связан с уменьшением толщины базы при росте $U_{кэ}$, что в свою очередь уменьшает количество рекомбинаций зарядов в базе и соответственно ток через база-эмиттерный переход.

Область отсечки лежит ниже кривой $I_b = 0$, при этом ток коллектора очень мал.

На рис. 2.9 показана характеристика прямой передачи транзистора по току, для схемы с общим эмиттером, которая представляет собой связь между входным и выходным токами при $U_{кэ} = \text{const}$.

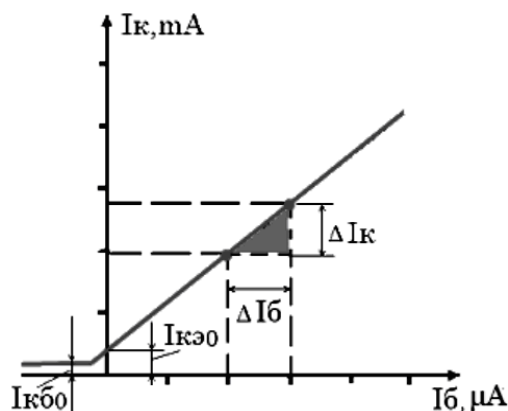


Рис. 2.9. Характеристика прямой передачи транзистора по току

По характеристике прямой передачи транзистора по току можно определить коэффициент передачи по току $\beta = \Delta I_k / \Delta I_b$ в схеме с ОЭ.

Сопротивление обратносмещенного коллекторного перехода очень велико поэтому в цепь коллектора можно включать весьма большие сопротивления нагрузки, не изменяя величину коллекторного тока.

Соответственно в цепи нагрузки может выделяться значительная мощность. Сопротивление прямосмещенного эмиттерного перехода, напротив, весьма мало (например, при токе 1 мА оно составляет всего 25 Ом). Поэтому при почти одинаковых токах мощность, потребляемая в цепи эмиттера, оказывается несравненно меньше, чем мощность, выделяемая в цепи нагрузки. Следовательно, транзистор способен усиливать мощность, т.е. является усилительным прибором

Для использования биполярного транзистора в качестве усилителя в цепь коллектора подключается сопротивление R_k (рис. 2.10), величина напряжения на котором зависит от тока коллектора $U_{Rk} = I_k R_k$.

Выходное напряжение усилителя

$$U_{вых} = U_{кэ} = E_k - I_k R_k. \quad (2.5)$$

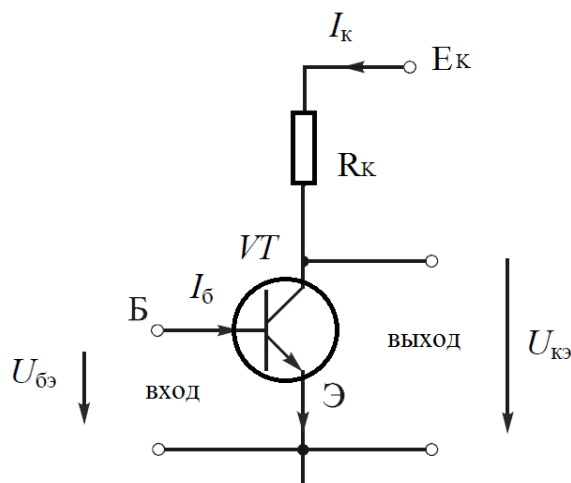


Рис. 2.10. Усилитель на биполярном транзисторе

Для обеспечения работы усилителя в линейном режиме необходимо выбрать начальную рабочую точку на выходной характеристике, при помощи построения нагрузочной прямой.

Нагрузочная прямая проводится через точки E_k/R_k на оси коллекторных токов и E_k на оси коллекторных напряжений.

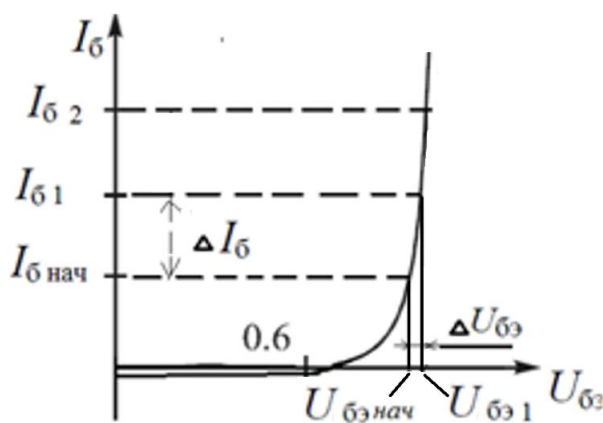
Точки пересечений нагрузочной прямой с выходными характеристиками показывают выходные напряжения $U_{вых} = U_{кэ}$ при различных токах базы (рис. 2.11).



Рис. 2.11. Выбор начальной рабочей точки

Обычно начальная рабочая точка выбирается посередине отрезка нагрузочной прямой между областью насыщения и областью отсечки, что позволяет получить максимальную амплитуду изменений $U_{вых}$.

После выбора начальной рабочей точки по выходной характеристике можно определить начальный ток базы $I_{бнач}$, по которому при помощи входной характеристики найти начальную величину $U_{бэ}$ (рис. 2.12).

Рис. 2.12. Выбор начального напряжения $U_{бэ}$

Для установки начальной рабочей точки обычно используют источник питания E_k и делитель напряжения. Следует учитывать, что входные характеристики существенно зависят от температуры р-п перехода, при ее изменении начальная рабочая точка может сдвигаться. Необходимо принимать меры по температурной стабилизации рабочей точки.

Используя выходные и входные характеристики (рис 2.11 и 2.12) схемы с ОЭ можно построить график зависимости выходного напряжения усилителя на биполярном транзисторе от входного (рис 2.13).

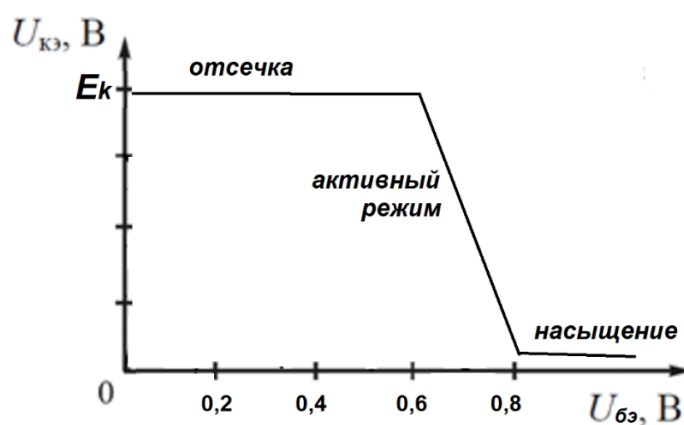


Рис. 2.13. Зависимость выходного напряжения от входного в схеме с ОЭ

Коэффициент усиления по напряжению в схеме, показанной на рис. 2.10 можно определить по формуле $K_U = \Delta U_{кэ} / \Delta U_{бэ}$, коэффициент усиления по току по формуле $K_I = \Delta I_K / \Delta I_б$.

2.3. Технические средства для выполнения работы

Модуль **ТРАНЗИСТОРЫ**, модуль **МУЛЬТИМЕТРЫ** и модуль **МИЛЛИАМПЕРМЕТРЫ** на стендах **ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ – 2**.

2.4. Порядок выполнения экспериментальных исследований

2.4.1. Снятие входной характеристики транзистора

Снятие входной характеристики транзистора производится по схеме, показанной на рис. 2.14.

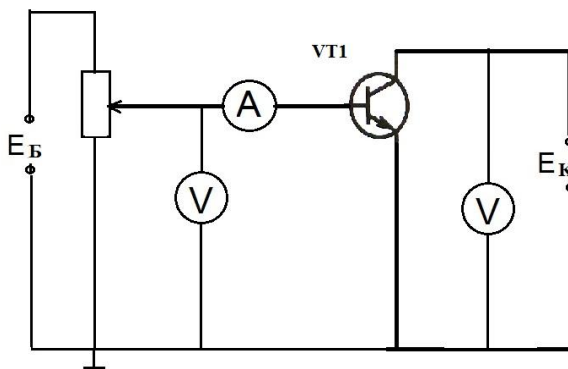


Рис. 2.14. Схема снятия входной характеристики биполярного транзистора

Для выполнения работы необходимо осуществить следующие действия:

1. Модуль питания стенда (220 В) **QF1** установить в положение **ВЫКЛЮЧЕНО**. В модуле **ТРАНЗИСТОРЫ** выключить питание.
2. В модуле **ТРАНЗИСТОРЫ** извлечь из гнезд все перемычки (рис. 2.15).

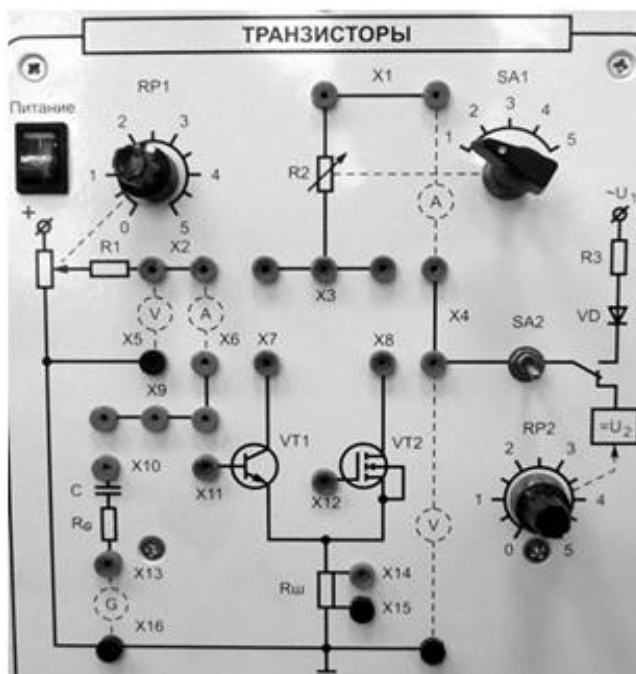


Рис. 2.15. Вид модуля **ТРАНЗИСТОРЫ** перед началом работы

3. Установить рычаг переключателя **SA2** в нижнее положение ($=U_2$).
4. Ручку потенциометра **RP1** повернуть против часовой стрелки в крайнее положение.

5. Ручку потенциометра **RP2** повернуть против часовой стрелки в крайнее положение.

6. На модуле **МУЛЬТИМЕТРЫ** установить переключатели режима измерения для левого и правого мультиметров в положение **постоянное напряжение 20 В** (рис. 2.16).



Рис. 2.16. Вид модуля **МУЛЬТИМЕТРЫ** перед началом работы

7. На модуле **МИЛЛИАМПЕРМЕТРЫ** установить переключатели масштаба измерения для левого прибора **x1** для правого прибора **x100** (предел измерений токов 100 мкА и 10 мА соответственно – рис. 2.17).

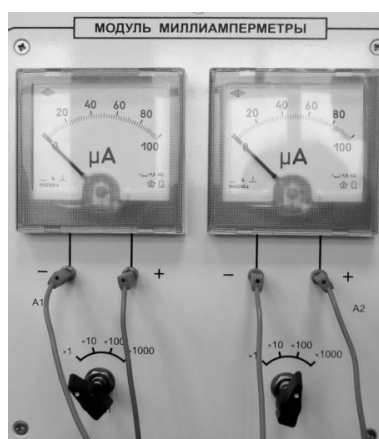


Рис. 2.17. Вид модуля **МИЛЛИАМПЕРМЕТРЫ** перед началом работы

8. Черный щуп левого мультиметра вставить в гнездо разъема **X5**.

9. Красный щуп левого мультиметра вставить гнездо разъема **X9**.

10. Красный щуп правого мультиметра вставить гнездо разъема **X4**.

11. Черный щуп правого мультиметра вставить в гнездо разъема **X15**.

12. Соединить перемычкой гнезда разъемов **X4** и **X7**.

13. Соединить перемычкой гнездо **+** левого миллиамперметра с гнездом **X2**.

14. Соединить перемычкой гнездо – левого миллиамперметра с гнездом **X6**.

15. Соединить перемычкой гнезда разъемов **X6** и **X11**.

16. Соединить перемычкой с конденсатором гнезда разъемов **X7** и **X16**.

17. Модуль питания стенда (220 В) **QF1** установить в положение **ВКЛЮЧЕНО**.

18. Включить питание модуля **ТРАНЗИСТОРЫ**.

19. Поворачивая ручку потенциометра **RP2** по часовой стрелке установить напряжение на коллекторе транзистора $E_K=3V$ (показания правого мультиметра).

20. Поворачивая ручку потенциометра **RP1** по часовой стрелке изменять напряжение на базе транзистора. Наблюдая показания левого мультиметра и левого миллиамперметра занести в таблицу 2.1 величины токов базы при различных напряжениях на ней.

Таблица 2.1– Сила тока через базу при различных напряжениях на ней

U _б , В	0	0,2	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
I _б , мкА	0								

2.4.2. Снятие выходных характеристик транзистора

Снятие выходных характеристик транзистора производится по схеме показанной на рис. 2.18.

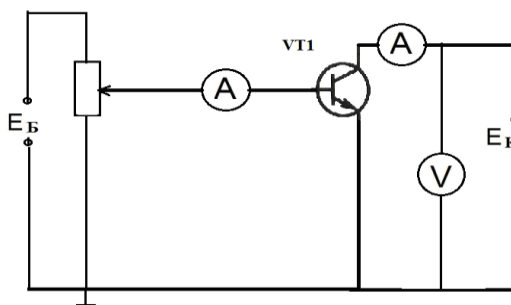


Рис. 2.18. Схема снятия выходных характеристик транзистора

Для выполнения работы необходимо осуществить следующие действия:

1. Модуль питания стенда (220 В) **QF1** установить в положение **ВЫКЛЮЧЕНО**. В модуле **ТРАНЗИСТОРЫ** выключить питание.

2. В модуле **ТРАНЗИСТОРЫ** извлечь из гнезд все перемычки (рис. 2.15).

3. Установить рычаг переключатель **SA2** в нижнее положение ($=U_2$).

4. Ручку потенциометра **RP1** повернуть против часовой стрелки в крайнее положение.

5. Ручку потенциометра **RP2** повернуть против часовой стрелки в крайнее положение.

6. На модуле **МУЛЬТИМЕТРЫ** установить переключатели режима измерения для левого и правого мультиметров в положение **постоянное напряжение 20 В** (рис. 2.16).

7. На модуле **МИЛЛИАМПЕРМЕТРЫ** установить переключатели масштаба измерения для левого прибора **x1** для правого прибора **x100**(предел измерений токов 100 мкА и 10 мА соответственно – рис. 2.17).

8. Красный щуп правого мультиметра вставить гнездо разъема **X4**.

9. Черный щуп правого мультиметра вставить в гнездо разъема **X15**.

10. Соединить перемычкой гнездо + левого миллиамперметра с гнездом **X2**.

11. Соединить перемычкой гнездо – левого миллиамперметра с гнездом **X11**.

12. Соединить перемычкой гнездо + правого миллиамперметра с гнездом **X4**.

13. Соединить перемычкой гнездо- правого миллиамперметра с гнездом **X7**.

14. Соединить перемычкой с конденсатором гнезда разъемов **X7** и **X16**.

15. Модуль питания стенда (220 В) **QF1** установить в положение **ВКЛЮЧЕНО**.

16. Включить питание модуля **ТРАНЗИСТОРЫ**.

17. Поворачивая ручку потенциометра **RP1** по часовой стрелке, изменяем напряжение на базе транзистора.

Наблюдая показания левого миллиамперметра установить ток базы I_b равным 10 мкА.

18. Поворачивая ручку потенциометра **RP2** по часовой стрелке, изменять напряжение на коллекторе транзистора E_K (правый мультиметр) и заносить величину тока коллектора I_k (правый миллиамперметр) в таблицу 2.2.

19. Поворачивая ручку потенциометра **RP1** по часовой стрелке, изменяем напряжение на базе транзистора. Наблюдая показания левого миллиамперметра установить ток базы равным 15 мкА.

20. Поворачивая ручку потенциометра **RP2** по часовой стрелке, изменять напряжение на коллекторе транзистора E_K (правый мультиметр) и заносить величину тока коллектора I_k (правый миллиамперметр) в таблицу 2.2.

21. Поворачивая ручку потенциометра **RP1** по часовой стрелке, изменяем напряжение на базе транзистора. Наблюдая показания левого миллиамперметра установить ток базы равным 20 мкА.

22. Поворачивая ручку потенциометра **RP2** по часовой стрелке, изменять напряжение на коллекторе транзистора E_K (правый мультиметр) и заносить величину тока коллектора I_k (правый миллиамперметр) в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Сила тока коллектора при различных напряжениях на нём

	Ек, В	0	2	4	6	8	10	11
$I_b=10\text{мкА}$	I_k, мА	0						
$I_b=15\text{мкА}$		0						
$I_b=20\text{мкА}$		0						
$I_b=25\text{мкА}$		0						

23. Поворачивая ручку потенциометра $RP2$, установить напряжение на коллекторе транзистора $E_K = 3$ В (правый мультиметр).

24. Поворачивая ручку потенциометра $RP1$, изменять ток базы транзистора I_B с шагом 5 мкА (левый миллиамперметр) и заносить в таблицу 2.3 величины токов коллектора I_K (правый миллиамперметр).

При изменении тока базы транзистора I_B напряжение на коллекторе транзистора E_K может изменяться, поэтому его необходимо поддерживать при помощи потенциометра $RP2$.

25. Поворачивая ручку потенциометра $RP2$, установить напряжение на коллекторе транзистора $E_K = 6$ В (правый мультиметр).

26. Поворачивая ручку потенциометра $RP1$, изменять ток базы транзистора с шагом 5 мкА (левый миллиамперметр) и заносить в таблицу 2.3 величины токов коллектора I_K (правый миллиамперметр).

Таблица 2.3 – Сила тока коллектора при различных токах базы

	$I_B, \text{мкА}$	0	5	10	15	20	25
$E_K = 3\text{В}$	$I_K, \text{мА}$	0					
$E_K = 6\text{В}$		0					

2.4.3. Снятие зависимости выходного напряжения от входного в схеме с ОЭ

Снятие зависимости выходного напряжения от входного в схеме с ОЭ производится по схеме показанной на рис. 2.19.

Для выполнения работы необходимо осуществить следующие действия:

1. Модуль питания стенда (220 В) **QF1** установить в положение **ВЫКЛЮЧЕНО**. В модуле **ТРАНЗИСТОРЫ** выключить питание.

2. В модуле **ТРАНЗИСТОРЫ** извлечь из гнезд все перемычки (рис. 2.15).

3. Установить рычаг переключатель $SA2$ в нижнее положение ($=U_2$).

4. Ручку потенциометра **RP1** повернуть против часовой стрелки в крайнее положение.

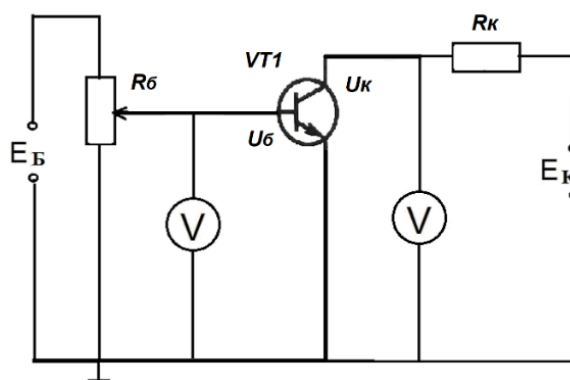


Рис. 2.19. Схема снятия характеристики зависимости выходного напряжения от входного в схеме с ОЭ

5. Ручку потенциометра **RP2** повернуть против часовой стрелки в крайнее положение.

6. Красный щуп правого мультиметра вставить гнездо разъема **X3**.
 7. Черный щуп правого мультиметра вставить в гнездо разъема **X15**.
 8. Красный щуп левого мультиметра вставить гнездо разъема **X2**.
 9. Черный щуп левого мультиметра вставить в гнездо разъема **X16**.
 10. Соединить перемычкой с конденсатором гнезда разъемов **X7** и **X16**.
 11. Соединить перемычкой гнезда разъемов **X11** и **X2**.
 12. Соединить перемычкой гнезда разъемов **X7** и **X3**.
 13. Соединить перемычкой гнезда разъемов **X1** и **X4**.
 14. Установить переключатель SA1 в положение **1 (R_к= 1 кОм)**.
 15. Модуль питания стенда (220 В) **QF1** установить в положение **ВКЛЮЧЕНО**.
 16. Включить питание модуля **ТРАНЗИСТОРЫ**.
 17. Поворачивая ручку потенциометра RP2 по часовой стрелке, наблюдая показания правого мультиметра необходимо установить напряжение на коллекторе транзистора **+5 В**.
 18. Поворачивая ручку потенциометра RP1 по часовой стрелке, наблюдая показания левого мультиметра необходимо устанавливать напряжение на базе транзистора в соответствии с таблицей 2.4.
- Показания правого мультиметра (U_k) необходимо записать в таблицу 2.4.

Таблица 2.4 – Напряжение на коллекторе транзистора при различных U_b .

U_b , В	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
U_k , В										

2.5. Обработка экспериментальных данных

1. Используя данные таблицы 2.1, построить входную характеристику биполярного транзистора.
2. Сделать выводы.
3. Рассчитать величину дифференциального сопротивления база-эмиттерного перехода для своего варианта I_b (таблица 2.5).
4. Используя данные таблицы 2.2, построить семейство выходных характеристик биполярного транзистора.
5. Объяснить вид характеристик. Сделать выводы.
6. Построить на графике выходных характеристик нагрузочную прямую для своего варианта E_k и R_k (таблица 2.5).
7. Выбрать рабочую точку посередине нагрузочной прямой и определить начальный ток базы.
8. Рассчитать рассеиваемую мощность на коллекторном переходе транзистора и на R_k в рабочей точке.
9. Используя входную характеристику, определить начальное напряжение базы $U_{бэ}$.
10. Рассчитать коэффициенты усиления по напряжению и по току для своего варианта E_k и R_k .

11. Используя данные таблицы 2.3, построить характеристику прямой передачи по току.

12. Объяснить вид характеристики. Сделать выводы.

13. Рассчитать коэффициент передачи транзистора по току для своего варианта I_B (таблица 2.5).

14. Используя данные таблицы 2.4, построить график зависимости напряжения на коллекторе от напряжения на базе.

15. По графику зависимости напряжения на коллекторе от напряжения на базе рассчитать коэффициент усиления по напряжению в схеме с ОЭ в активном режиме.

16. Сделать выводы по результатам работы.

Таблица 2.5 – Исходные данные для проведения расчетов

№ варианта	I_B , мкА	E_K , В	R_K , кОм	U_3 , В
1	10	4	1	2,2
2	15	5	1,5	2,3
3	20	6	2	2,4
4	25	7	2,5	2,5
5	10	8	3	2,6
6	15	9	1	2,2
7	20	10	1,5	2,3
8	25	4	2	2,4
9	10	5	2,5	2,5
10	15	6	3	2,6
11	20	7	1	2,2
12	25	8	1,5	2,3
13	10	9	2	2,4
14	15	10	2,5	2,5
15	20	4	3	2,6
16	25	5	1	2,2
17	10	6	1,5	2,3
18	15	7	2	2,4
19	20	8	2,5	2,5
20	25	9	3	2,6
21	10	10	1	2,2
22	15	4	1,5	2,3
23	20	5	2	2,4
24	25	6	2,5	2,5
25	10	7	3	2,6

2.6. Содержание отчета

Отчёт должен содержать:

- титульный лист;
- цель лабораторной работы;
- схемы экспериментов;
- таблицы и графики результатов;

- расчеты для своего варианта исходных данных;
- выводы.

Отчёт по лабораторной работе должен быть выполнен в соответствии требованиями ГОСТ.

2.7. Порядок защиты работы

Защита производится при наличии отчета и состоит в объяснениях полученных результатов и ответах на контрольные вопросы.

2.8. Контрольные вопросы

1. Каков принцип действия биполярного транзистора?
2. Какова полярность постоянных напряжений, прикладываемых к транзистору типа n-p-n?
3. Как выглядят выходные и входные статические характеристики в схеме с общим эмиттером?
4. Что такое статическая характеристика прямой передачи по току? Как ее построить?
5. Как определить статический коэффициент передачи транзистора по току?
6. Как построить линию нагрузки?
7. Как выбрать рабочую точку покоя?
8. Нарисуйте схему усилительного каскада с общим эмиттером.
9. Каково назначение элементов усилителя?
10. Как определить коэффициент усиления каскада по току и напряжению (графически и экспериментально)?
11. Что такое область активного усиления, насыщения, отсечки?

Лабораторная работа № 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

3.1. Цель работы

Исследование характеристик полевых транзисторов.

3.2. Краткие теоретические сведения

3.2.1. Принцип работы полевого транзистора с p-n переходом

Полевой транзистор с p-n переходом (рис. 3.1) представляет собой кристалл полупроводника, очень слабо легированного примесью (на рисунке – акцепторной), что обуславливает его малую проводимость (в данном случае р-типа). В кристалле создана область с противоположной проводимостью, образующая с основной частью кристалла p-n переход. От противоположных концов области сделаны выводы: исток (**И**) и сток (**С**). От n-области третий вывод – затвор (**З**).

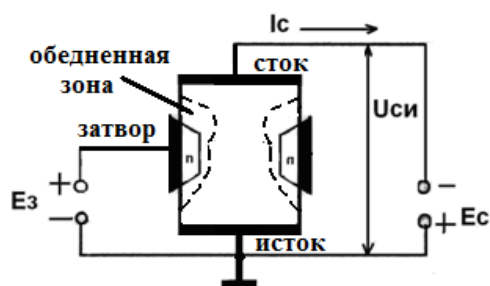


Рис. 3.1. Полевой транзистор с p-n переходом

Если напряжение на затворе относительно истока $U_{зи} = 0$, вблизи p-n перехода образуется обедненная зона (её граница в p-области показана штриховой линией). При подаче на сток напряжения относительно истока через область пойдет ток. В обедненной зоне основные носители отсутствуют, поэтому проводящим будет канал в p-области сечением, лежащий за пределами обедненной зоны.

Из теории p-n перехода известно, что приложение к нему обратного (запирающего) напряжения приводит к расширению обедненной зоны и, следовательно, к уменьшению проводящего сечения канала. Его сопротивление возрастает, ток уменьшается [1, с. 37]. При увеличении до некоторого $U_{зи}$ называемого напряжением отсечки, проводящее сечение станет равным нулю, ток практически прекратится. Таким образом, изменяя $U_{зи}$ можно управлять I_c .

Подача прямого напряжения на p-n переход полевого транзистора не применяется, так как при прямых $U_{зи} > 0,1$ В, возникает значительный ток затвора и транзистор выходит из строя.

Полевой транзистор с р-п переходом работает при обратном напряжении, поэтому ток затвора чрезвычайно мал (порядка 10 нА), а входное сопротивление, в отличие от биполярных транзисторов, очень велико.

Полевые транзисторы могут быть как с р-каналом, так и с n-каналом. Для последних, полярность питающих напряжений – противоположная. Условные обозначения на принципиальных схемах показаны на рис. 3.2.

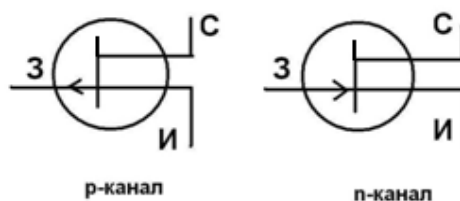


Рис. 3.2. Условные обозначения полевых транзисторов с р-п переходом

3.2.2. Полевые транзисторы с изолированным затвором

Полевой транзистор с изолированным затвором – это транзистор, затвор которого электрически изолирован от канала полупроводника слоем диэлектрика. Благодаря этому, у транзистора очень высокое входное сопротивление (у некоторых моделей оно достигает 10^{17} Ом).

В соответствии со своей физической структурой, полевой транзистор с изолированным затвором носит название МОП-транзистор (Металл-Оксид-Полупроводник), или МДП-транзистор (Металл-Диэлектрик-Полупроводник). Международное название прибора – MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor-Field-Effect-Transistor).

МДП-транзисторы делятся на два типа – со встроенным каналом и с индуцированным каналом[1, с. 38]. В каждом из типов есть транзисторы с n-каналом и р-каналом. На рис. 3.3 показано устройство МДП-транзистора с индуцированным каналом.

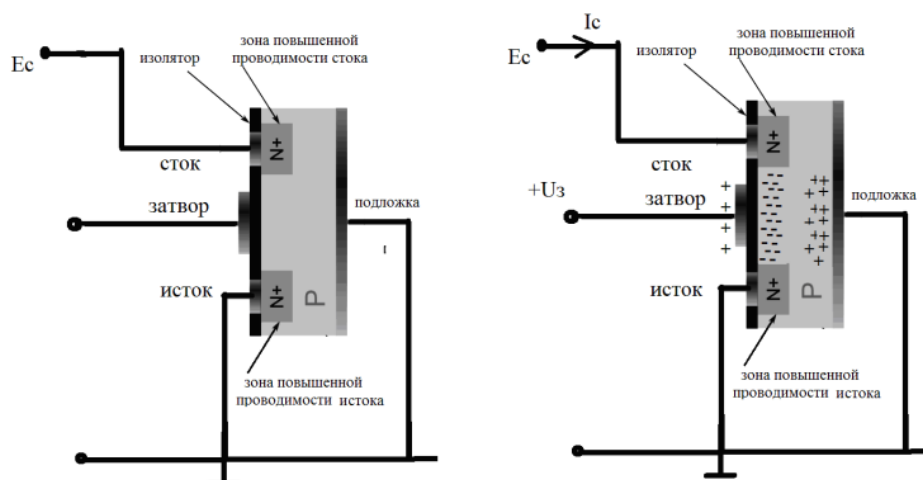


Рис. 3.3. МДП-транзистор с индуцированным каналом

При подключении напряжения между стоком и истоком ток через канал не проходит, поскольку между зонами n^+ находится область p , не пропускающая электроны. Если подать на затвор положительное напряжение относительно истока $U_{зи}$, возникнет электрическое поле, выталкивающее положительные ионы (дырки) из зоны p в сторону подложки. В результате под затвором концентрация дырок начнет уменьшаться, и их место займут электроны, притягиваемые положительным напряжением на затворе.

Когда $U_{зи}$ достигнет своего порогового значения, концентрация электронов в области затвора превысит концентрацию дырок и между стоком и истоком сформируется канал с электропроводностью n -типа, по которому пойдет ток $I_{си}$. Чем выше напряжение на затворе транзистора $U_{зи}$, тем шире канал и, следовательно, больше сила тока. Такой режим работы полевого транзистора называется режимом обогащения.

3.2.3. ВАХ полевого транзистора

Выходные характеристики полевого транзистора с изолированным затвором показаны на рис. 3.4.

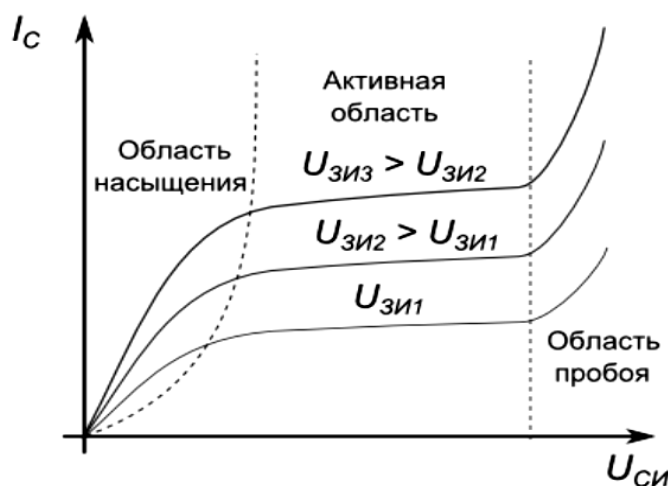


Рис. 3.4 .Выходные характеристики МДП-транзистора

С увеличением напряжения $U_{си}$ ток стока I_c растет прямо пропорционально росту напряжения $U_{си}$. Этот участок называют **область насыщения** (канал транзистора насыщается носителями заряда). По достижении некоторого напряжения на стоке электрическое поле стока начинает противодействовать полю затвора, и ширина канала уменьшается. При этом с ростом $U_{си}$ ток стока практически не возрастает. Этот участок называют **активная область**.

При достижении $U_{си}$ порогового значения (**область пробоя** р-n перехода), структура полупроводника разрушается, и транзистор превращается в обычный проводник. Данный процесс необратим, и транзистор приходит в негодность.

Входная сток-затворная характеристика МДП-транзистора с индуцированным затвором приведена на рис. 3.5.

Если $U_z < U_{\text{порог}}$. Транзистор закрыт и ток стока очень мал. По достижении $U_{\text{порог}}$. Транзистор переходит в открытое состояние.

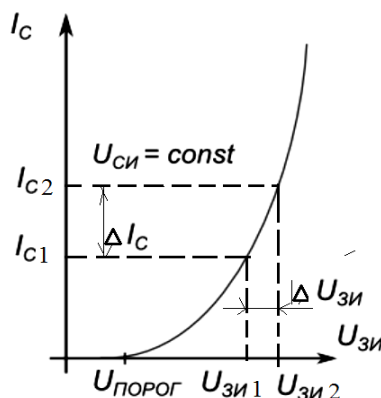


Рис. 3.5. Сток-затворная характеристика МДП-транзистора

Усилительные свойства полевого транзистора можно характеризовать крутизной проходной характеристики, которая вычисляется по формуле $S = \Delta I_{\text{ст}} / \Delta U_{\text{зи}}$ при $U_{\text{си}} = \text{const}$.

При использовании полевого транзистора в усилителе напряжения необходимо выбрать начальную рабочую точку и определить начальное напряжение затвора.

На рис. 3.6 показана схема усилителя на МДП-транзисторе с общим истоком (ОИ).

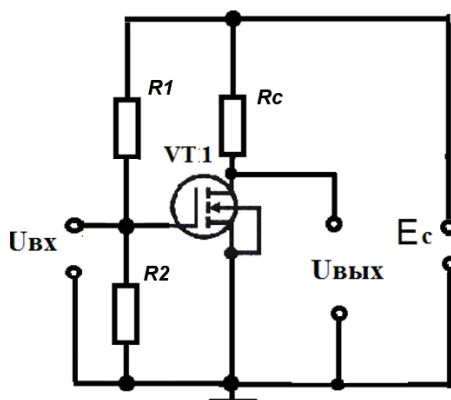


Рис. 3.6. Усилитель на МДП-транзисторе с ОИ

Выбор начальной рабочей точки показан на рис. 3.7. Нагрузочная прямая проводится через точки E_c/R_c на оси коллекторных токов и E_c на оси коллекторных напряжений. Начальная точка выбирается на середине прямой для получения максимальной амплитуды выходного напряжения усилителя.

Точки пересечений нагрузочной прямой с выходными характеристиками показывают выходные напряжения $U_{\text{вых}} = U_{\text{си}}$ при различных напряжениях на затворе. Коэффициент усиления по напряжению $K_U = \Delta U_{\text{си}} / \Delta U_{\text{зи}}$.

Для установки начальной рабочей точки можно использовать источник питания E_c и делитель напряжения $R1, R2$.

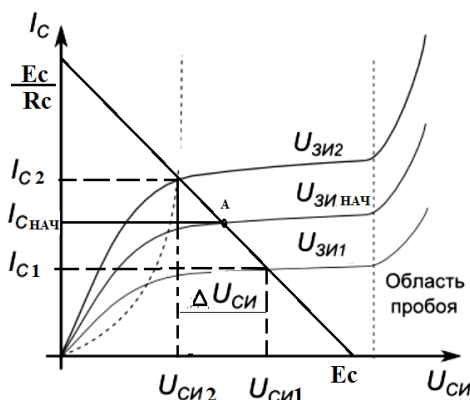


Рис. 3.7. Выбор начальной рабочей точки

Используя выходные и входные характеристики (рис 3.6 и 3.7) схемы с ОИ можно построить график зависимости выходного напряжения усилителя на МДП-транзисторе от входного (рис 3.8).

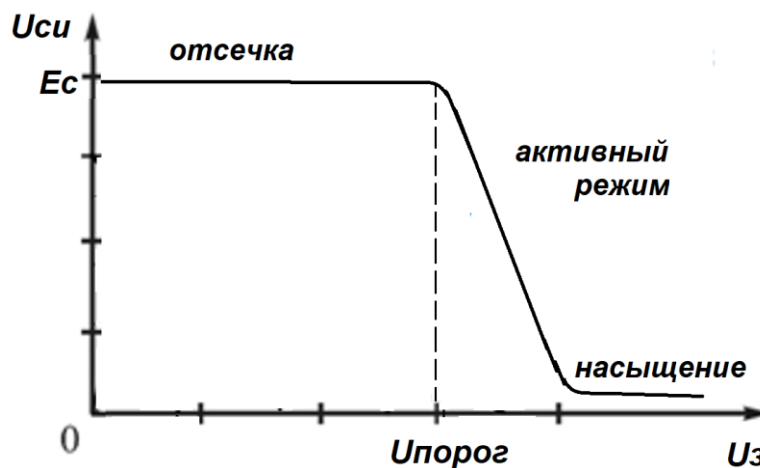


Рис. 3.8. Зависимость выходного напряжения от входного в схеме с ОИ

3.3. Технические средства для выполнения работы

Модуль **ТРАНЗИСТОРЫ**, модуль **МУЛЬТИМЕТРЫ** и модуль **МИЛЛИАМПЕРМЕТРЫ** на стендах **ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ – 2**.

3.4. Порядок выполнения экспериментальных исследований

3.4.1. Снятие выходной характеристики транзистора

Снятие входной характеристики транзистора производится по схеме, показанной на рис. 3.9.

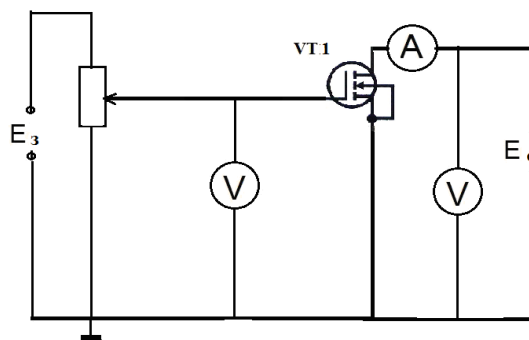


Рис. 3.9. Схема снятия выходных характеристик МДП-транзистора

Для выполнения работы необходимо осуществить следующие действия:

1. Модуль питания стенда (220 В) **QF1** установить в положение **ВЫКЛЮЧЕНО**. В модуле **ТРАНЗИСТОРЫ** выключить питание.
2. В модуле **ТРАНЗИСТОРЫ** извлечь из гнезд все перемычки.
3. Установить рычаг переключателя SA2 в нижнее положение ($=U_2$).
4. Ручку потенциометра **RP1** повернуть против часовой в крайнее положение.
5. Ручку потенциометра **RP2** повернуть против часовой в крайнее положение.
6. На модуле **МУЛЬТИМЕТРЫ** установить переключатели режима измерения для левого и правого мультиметров в положение **постоянное напряжение 20 В**.
7. На модуле **МИЛЛИАМПЕРМЕТРЫ** установить переключатель масштаба измерения для правого прибора **x100** (предел измерения тока 10 мА).
8. Красный щуп правого мультиметра вставить гнездо разъема **X4**.
9. Черный щуп правого мультиметра вставить в гнездо разъема **X15**.
10. Красный щуп левого мультиметра вставить в гнездо разъема **X2**.
11. Черный щуп левого мультиметра вставить в гнездо разъема **X5**.
12. Соединить перемычкой гнездо + правого миллиамперметра с гнездом **X4**.
13. Соединить перемычкой гнездо- правого миллиамперметра с гнездом **X8**.
14. Соединить перемычкой гнездо **X12** с гнездом **X2**.
15. Соединить перемычкой с конденсатором гнезда разъемов **X8** и **X16**.
16. Модуль питания стенда (220 В) **QF1** установить в положение **ВКЛЮЧЕНО**. Включить питание модуля **ТРАНЗИСТОРЫ**.
17. Поворачивая ручку потенциометра **RP1** по часовой стрелке, устанавливаем напряжение на затворе транзистора $U_з=2,0$ В (левый мультиметр).
18. Поворачивая ручку потенциометра **RP2** по часовой стрелке, изменять напряжение на стоке транзистора E_c (правый мультиметр) и заносить величину тока стока I_c (правый миллиамперметр) в таблицу 3.1.

3.4.2. Снятие зависимости выходного напряжения от входного в схеме с ОИ

Снятие зависимости выходного напряжения от входного в схеме с ОЭ производится по схеме, показанной на рис. 3.10.

Для выполнения работы необходимо осуществить следующие действия:

1. Модуль питания стенда (220 В) **QF1** установить в положение **ВЫКЛЮЧЕНО**. В модуле **ТРАНЗИСТОРЫ** выключить питание.
2. В модуле **ТРАНЗИСТОРЫ** извлечь из гнезд все перемычки (рис. 2.15).
3. Установить рычаг переключателя **SA2** в нижнее положение ($=U_2$).
4. Ручку потенциометра **RP1** повернуть против часовой стрелки в крайнее положение.

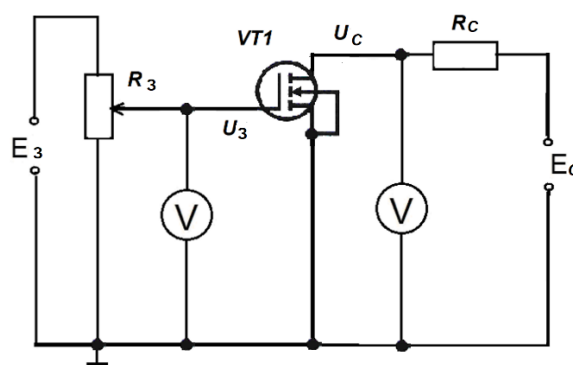


Рис. 3.10. Схема снятия характеристики зависимости выходного напряжения от входного в схеме с ОИ

5. Ручку потенциометра **RP2** повернуть против часовой стрелки в крайнее положение.
6. Красный щуп правого мультиметра вставить гнездо разъема **X3**.
7. Черный щуп правого мультиметра вставить в гнездо разъема **X15**.
8. Красный щуп левого мультиметра вставить гнездо разъема **X2**.
9. Черный щуп левого мультиметра вставить в гнездо разъема **X16**.
10. Соединить перемычкой с конденсатором гнезда разъемов **X8** и **X16**.
11. Соединить перемычкой гнезда разъемов **X12** и **X2**.
12. Соединить перемычкой гнезда разъемов **X8** и **X3**.
13. Соединить перемычкой гнезда разъемов **X1** и **X4**.
14. Установить переключатель **SA1** в положение **1** ($R_k = 1 \text{ кОм}$).
15. Модуль питания стенда (220 В) **QF1** установить в положение **ВКЛЮЧЕНО**.
16. Включить питание модуля **ТРАНЗИСТОРЫ**.
17. Поворачивая ручку потенциометра **RP2** по часовой стрелке, наблюдая показания правого мультиметра необходимо установить напряжение на стоке транзистора **+5 В**.
18. Поворачивая ручку потенциометра **RP1** по часовой стрелке, наблюдая показания левого мультиметра необходимо устанавливать напряжение на затворе транзистора в соответствии с таблицей 3.3.
19. Показания правого мультиметра (U_k) необходимо записать в таблицу 3.3.

Таблица 3.3 – Напряжение на стоке транзистора при различных U_3

$U_3, \text{В}$	0	0,8	1,2	1,6	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0
$U_c, \text{В}$										

3.5. Обработка экспериментальных данных

1. Используя данные таблицы 3.1, построить семейство выходных характеристик полевого транзистора.

2. Построить на графике выходных характеристик нагрузочную прямую для своего варианта E_C и R_C (таблица 3.4).

3. Выбрать рабочую точку посередине нагрузочной прямой и определить начальное напряжения затвора U_3 .

4. Рассчитать рассеиваемую мощность на канале транзистора и на R_C в рабочей точке.

5. Рассчитать коэффициент усиления по напряжению для своего варианта E_C и R_C .

6. Используя данные таблицы 3.2, построить график зависимости тока стока I_c от напряжения на затворе.

7. Рассчитать крутизну характеристики транзистора для своего варианта U_3 (таблица 3.4).

8. Используя данные таблицы 3.3, построить график зависимости напряжения на стоке от напряжения на затворе МДП- транзистора.

9. По графику зависимости напряжения на стоке от напряжения на затворе МДП- транзистора рассчитать коэффициент усиления по напряжению в схеме с ОИ в активном режиме.

10. Сделать выводы по результатам работы.

3.6. Содержание отчета

Отчёт должен содержать:

- титульный лист;
- цель лабораторной работы;
- схемы экспериментов;
- таблицы и графики результатов;
- расчеты сделанные для своего варианта задания;
- выводы.

Отчёт по лабораторной работе должен быть выполнен в соответствии требованиями ГОСТ.

Таблица 3.4 – Исходные данные для проведения расчетов

№ варианта	$E_c, В$	$R_c, кОм$	$U_{3, В}$
1	4	1	2,2
2	5	1,5	2,3
3	6	2	2,4
4	7	2,5	2,5
5	8	3	2,6
6	9	1	2,2
7	10	1,5	2,3
8	4	2	2,4
9	5	2,5	2,5
10	6	3	2,6
11	7	1	2,2
12	8	1,5	2,3
13	9	2	2,4
14	10	2,5	2,5
15	4	3	2,6
16	5	1	2,2
17	6	1,5	2,3
18	7	2	2,4
19	8	2,5	2,5
20	9	3	2,6
21	10	1	2,2
22	4	1,5	2,3
23	5	2	2,4
24	6	2,5	2,5
25	7	3	2,6

3.7. Порядок защиты работы

Защита производится при наличии отчета и состоит в объяснениях полученных результатов и ответах на контрольные вопросы.

3.8. Контрольные вопросы

1. Каков принцип действия полевого транзистора с изолированным затвором?
2. Какова полярность постоянных напряжений, прикладываемых к полемому транзистору с изолированным затвором и каналом n-типа, в усилительном каскаде с общим истоком?
3. Как выглядят выходные и сток-затворные статические характеристики в схеме с общим истоком?
4. Что такое статическая сток-затворная характеристика? Как ее построить?
5. Как определить крутизну сток-затворной характеристики?

6. Нарисуйте схему усилительного каскада с общим истоком. Каково назначение элементов усилителя?

7. Как определить коэффициент усиления каскада по напряжению (графически и экспериментально)?

8. Что такое область активного усиления, насыщения, отсечки?

Лабораторная работа № 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

4.1. Цель работы

Исследование характеристик логических элементов.

4.2. Краткие теоретические сведения

4.2.1. Логические уровни

Логические функции в электронных устройствах реализуются при помощи логических схем. В логических схемах информация, представленная двоичными сигналами «0» и «1» [1, с. 128].

Условились в качестве логических состояний цифровых микросхем воспринимать напряжение на их входе и выходе. При этом высокое напряжение договорились считать единицей, а низкое напряжение - считать нулем. В идеальном случае напряжение на выходе микросхем должно быть равным напряжению питания или общего провода схемы. В реальных схемах так не бывает. Даже на полностью открытом транзисторе есть падение напряжения. В результате на выходе цифровой микросхемы напряжение всегда будет меньше напряжения питания и больше потенциала общего провода. Поэтому договорились напряжение, меньшее заданного уровня (уровень логического нуля) считать нулём, а напряжение, большее заданного уровня (уровень логической единицы), считать единицей. Если же напряжение на выходе микросхемы будет больше уровня логического нуля, но меньше уровня логической единицы, то такое состояние микросхемы будем называть неопределённым.

В настоящее время наибольшее распространение получили две технологии схемотехнического построения логических элементов:

- транзисторно-транзисторная логика (ТТЛ, TTL);
- логика на основе комплиментарных МОП транзисторов (КМОП, CMOS).

На рис. 4.1 приведены допустимые уровни выходных логических сигналов для ТТЛ микросхем.

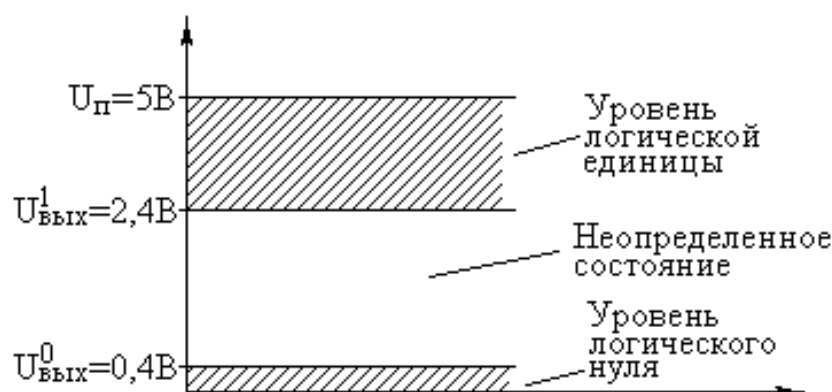


Рис. 4.1. Уровни логических сигналов на выходе цифровых ТТЛ микросхем

Напряжение с выхода одной микросхемы передаётся на вход другой микросхемы по проводнику. В процессе передачи на этот проводник может наводиться напряжение от каких-либо генераторов помех (осветительная сеть, радиопередатчики, импульсные генераторы). Помехоустойчивость цифровых микросхем определяется максимальным напряжением помех, которое не приводит к превращению логического нуля в логическую единицу и зависит от разности логических уровней цифровой микросхемы.

$$U^{-\text{пом}} = U_{\text{ВЫХ}}^{1\text{мин}} - U_{\text{ВХ}}^{1\text{мин}}$$

То же самое относится и к помехам, превращающим логический ноль в логическую единицу.

$$U^{+\text{пом}} = U_{\text{ВЫХ}}^{0\text{макс}} - U_{\text{ВХ}}^{0\text{макс}}$$

Граница уровня логического нуля и единицы для ТТЛ микросхем приведена на рис. 4.2.

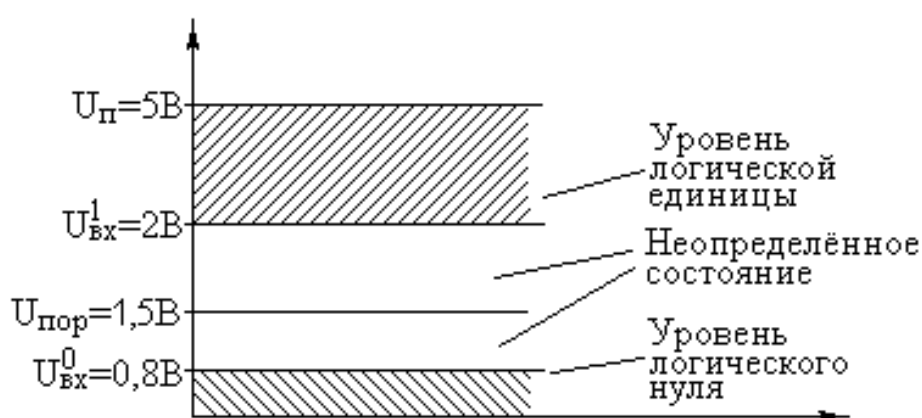


Рис. 4.2. Уровни логических сигналов на входе цифровых ТТЛ микросхем

Так как на выходе цифровой ТТЛ микросхемы уровень логической единицы не быть меньше 2,4 В, а уровень логического нуля не быть больше 0,4В, то при наведении на вход ТТЛ микросхемы помехи, напряжением менее 0,9 вольт, искажение цифровой информации не произойдёт. На рис. 4.3 показана амплитудная характеристика инвертирующего ЛЭ.

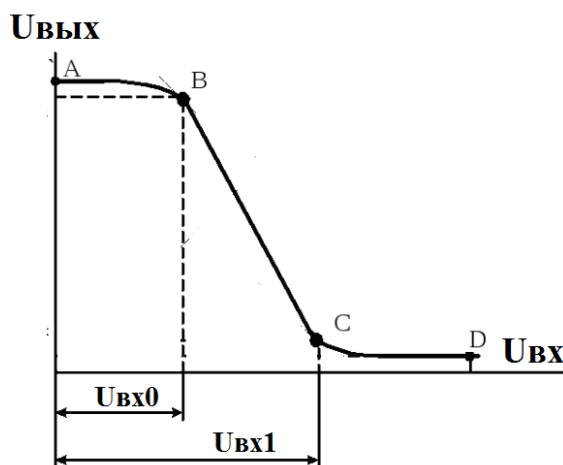


Рис. 4.3. Амплитудная характеристика инвертирующего ЛЭ

Точке А соответствует максимальное выходное напряжение, точке D - минимальное. Пороговое напряжение находится между точками В и С.

На рис. 4.4 приведен пример временных диаграмм ЛЭ И для периодических входных сигналов X1 и X2 и выходного сигнала Y общей длительностью $t = 12$ мс. Длительность высокого уровня X1 $t_1=0,4$ мс, низкого уровня X1 $t_1 = 0,6$ мс. Длительность высокого уровня X2 $t_3=4$ мс, низкого уровня X1 $t_4 = 4$ мс.

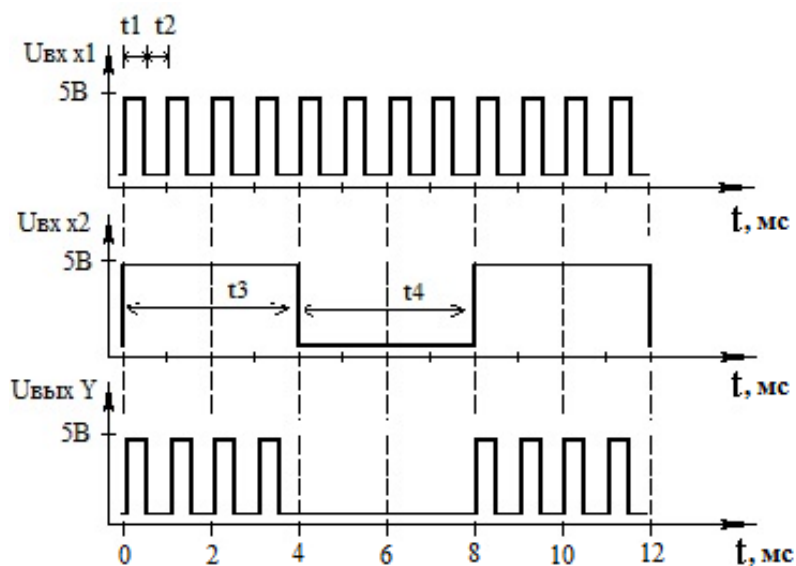


Рис. 4.4. Временные диаграммы ЛЭ И

Сложность логических схем и множество сочетаний входных сигналов и нагрузок не позволяет рассчитывать на индивидуальное согласование и регулировку ЛЭ в процессе изготовления, наладки и эксплуатации цифрового прибора. В связи с этим для обеспечения работоспособности цифрового прибора необходимо, чтобы ЛЭ обладал рядом функциональных качеств.

4.2.2. Реализация ЛЭ

Логические функции легко реализуются при помощи диодов [2, с. 140]. На рис. 4.5 представлена схема логического элемента «ИЛИ». На каждый из входов может подаваться сигнал в виде какого-то напряжения (единица) или его отсутствия (ноль). На резисторе R появится напряжение даже при его появлении на каком – либо из диодов.

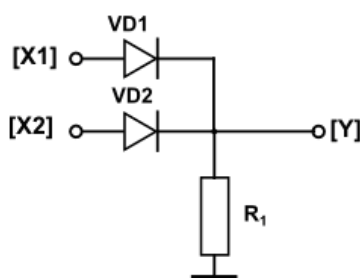


Рис. 4.5. Логический элемент ИЛИ

Схема элемента логического «И» приведена на рис. 4.6. Если хотя – бы к одному из входов будет сигнал равный нулю, то через диод будет протекать ток. Падение напряжения на диоде не превышает 0,6 В, соответственно на выходе тоже будет низкий уровень. На выходе сможет появиться высокий уровень только при условии, что все диоды будут закрыты, то есть на всех входах будет высокий уровень.

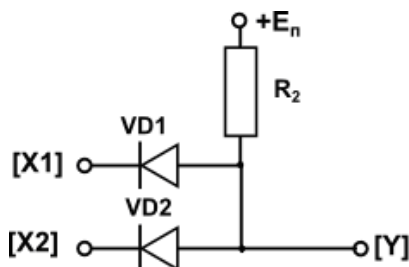


Рис. 4.6. Логический элемент И

Недостатком реализации логических элементов на диодах является невозможность их каскадирования, так как на каждом диоде падает напряжение и мощность сигнала при распространении по схеме уменьшается. Для улучшения характеристик логических элементов на диодах используется усилитель на транзисторах, а технология реализации ЛЭ получила название диодно-транзисторной логики (ДТЛ).

Схема логического элемента НЕ на биполярном транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером приведена на рис. 4.7.

При наличии положительного напряжения на входе $x=1$ транзистор открывается и напряжение его коллектора близко к нулю [1, с. 133]. Если $x=0$ то положительного сигнала на базе нет, транзистор закрыт, ток не проходит через коллектор, и на резисторе R нет падения напряжения, соответственно напряжение коллектора близко к E_n .

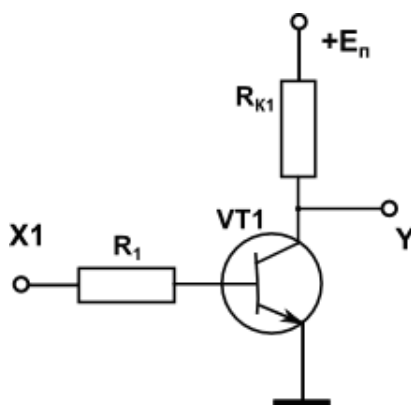


Рис. 4.7. Логический элемент НЕ на биполярном транзисторе

Схема логического элемента НЕ на полевом МОП-транзисторе, включенном по схеме с общим истоком приведена на рис. 4.8.

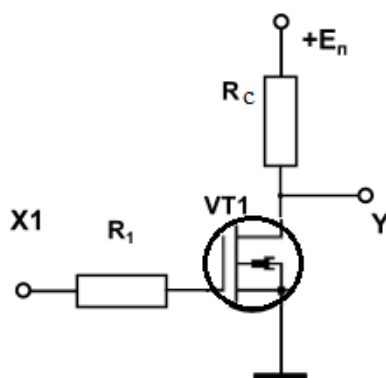


Рис. 4.8. Логический элемент НЕ на полевом транзисторе

Пример реализации логического элемента «И-НЕ» посредством ДТЛ технологии показан на рис. 4.9.

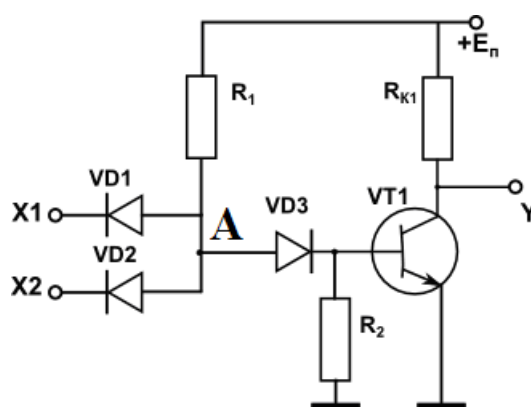


Рис. 4.9. Логический элемент И-НЕ

Если $x_1 = 0$ или $x_2 = 0$, то через диод VD_1 или VD_2 будет протекать ток, а в точке А будет напряжение равное падению напряжения на диодах VD_1 , VD_2 . Для предотвращения открывания транзистора VT_1 его база подключена к точке А через диод VD_3 , включенный в прямом направлении. Падение напряжения на VD_3 при этом примерно равно падению напряжения на диодах VD_1 , VD_2 и напряжение на базе транзистора VT_1 равно нулю. Поэтому VT_1 будет закрыт, а на выходе будет единица, что и требуется при наличии нуля на каком-либо из входов.

Если $x_1=1$ и $x_2=1$, то через диоды VD_1 , VD_2 ток протекать не будет. При этом транзистор VT_1 будет переведен в открытое состояние током, протекающим от $+E_n$, через R_1 , VD_3 и база-эмиттерный переход VT_1 . Так как VT_1 будет открыт, то на выходе будет ноль, что требуется при наличии единиц на всех входах.

Недостатком технологии ДТЛ является низкая скорость переключения выхода ЛЭ из состояния низкого уровня в высокий, из-за медленного процесса утечки заряда с базы VT_1 , находящегося в режиме насыщения, через резистор R_2 .

В более современной и эффективной технологии, которая получила название ТТЛ данная проблема решена путём замены диодов на мультиэмиттерный транзистор, что также позволило уменьшить площадь кристалла и повысить плотность элементов [1, с. 135].

Пример реализации логического элемента «И-НЕ» посредством ТТЛ технологии показан на рис. 4.10.

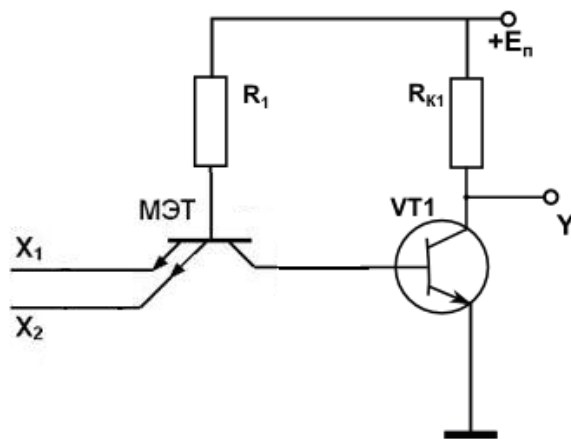


Рис. 4.10. Логический элемент И-НЕ ТТЛ

Логический элемент ТТЛ за счёт использования многоэмиттерного транзистора (МЭТ), объединяющего свойства диода и транзисторного усилителя, позволяет увеличить быстродействие, снизить потребляемую мощность и усовершенствовать технологию изготовления микросхем.

Рассмотрим работу логического элемента И-НЕ ТТЛ.

Если хотя бы на одном из входов x_1 или x_2 будет ноль, то на эмиттере МЭТ будет нулевой потенциал, и он работает в нормальном режиме насыщения, так как в базу втекает ток резистора R_1 , поэтому потенциал коллектора МЭТ и базы VT1 близок к нулю. В этом случае VT1 находится в режиме отсечки, поэтому на коллекторе VT1 потенциал близок к потенциалу источника питания E_p , — на выходе элемента логическая 1.

Если $x_1=1$ и $x_2=1$, то от $+E_p$ через R_1 , через прямосмещённый коллекторный переход МЭТ в базу VT1 будет втекать ток.

При этом VT1 переходит в состояние насыщения, его коллекторный потенциал становится близок к нулю (на выходе логический 0).

Таким образом, на выходе будет логический 0 только если все входы имеют состояние логической 1, это соответствует логической функции И-НЕ.

Достоинством ЛЭ ТТЛ является повышенное, по сравнению с ЛЭ ДТЛ быстродействие. Это обусловлено тем, что при переходе выхода из состояния логического нуля в логическую 1 транзистор VT1 выходит из насыщения. При этом неосновные носители, накопленные в его базе, относительно быстро стекают через коллектор насыщенного МЭТ, потенциал которого близок к нулю.

К недостаткам ЛЭ ТТЛ можно отнести большое энергопотребление от источника питания, которое вызвано значительными токами необходимыми для

перевода биполярных транзисторов ЛЭ в режим насыщения, большую рассеиваемую мощность и импульсные помехи при переключении.

Снизить в несколько раз энергопотребление ЛЭ позволяет использование диодов Шотки, которые подключаются параллельно переходам биполярных транзисторов и предотвращают глубокое их насыщение. Такие ЛЭ получили название транзисторно-транзисторная логика на диодах Шотки (ТТЛШ). Структура, объединяющая биполярный транзистор и диод Шотки получила название - транзистор Шотки [1, с. 133], имеющий собственное обозначение на схемах (рис. 4.11)

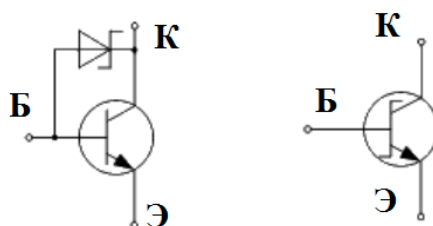


Рис. 4.11. Транзистор Шотки

Схема базового элемента ТТЛШ показана на рис. 4.12.

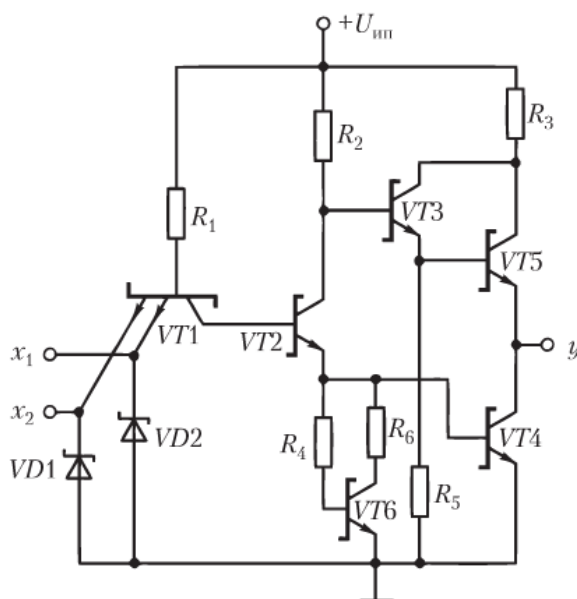


Рис. 4.12. Базовый элемент ТТЛШ

Существенно снизить энергопотребление ЛЭ позволило использование полевых транзисторов металл-оксид-полупроводник (МОП) [1, с. 134].

На рис. рис. 4.13 показана схема инвертора на двух МОП транзисторах с N- и P-каналами. Высокий входной потенциал открывает транзистор с N-каналом и закрывает транзистор с P-каналом. Выход при этом имеет низкий уровень, так как через открытый канал соединен с общим проводом. При подаче на вход низкого уровня будет открыт верхний транзистор, а нижний закрыт. В результате ток от источника питания через микросхему не протекает при любом состоянии выхода.

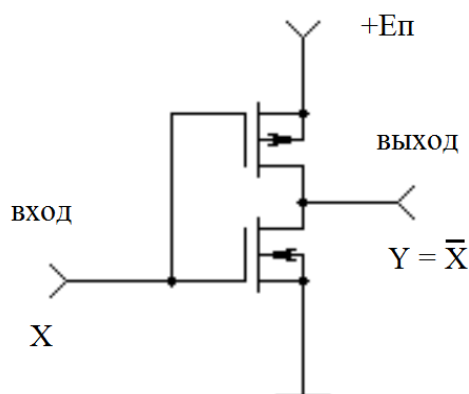


Рис. 4.13. Инвертор на двух МОП транзисторах

Пара транзисторов, сходных по абсолютным значениям параметров, но имеющих разные типы проводимостей называют комплементарной парой транзисторов. ЛЭ на комплементарных парах получили название комплементарная структура металл-оксид-полупроводник (КМОП, CMOS).

Так как в схеме нет нагрузочных сопротивлений, то в статическом состоянии через КМОП-схему протекают только токи утечки через закрытые транзисторы, и энергопотребление в статическом режиме очень низкое. Электрическая энергия от источника питания тратится в основном при переключении на заряд емкостей затворов и проводников. Таким образом потребляемая мощность пропорциональна частоте этих переключений. Необходимо также учитывать, что переключение транзисторов имеет конечное время, поэтому на короткое время оба типа транзисторов могут быть открыты и через их каналы возникает ток короткого замыкания. На высоких частотах (100-1000 мГц) переключений потребляемая мощность ЛЭ КМОП становится сравнимой с мощностью потребляемой ЛЭ ТТЛШ.

На рис. 4.14 представлена схема КМОП ЛЭ 2И-НЕ. Для перевода выхода в низкое состояние необходимо, чтобы каналы транзисторов VT1 и VT2 были открыты, что достигается подачей высокого уровня одновременно на X1 и X2. Транзисторы VT3 и VT4 при этом будут закрыты. При любых других состояниях X1 и X2 выход будет подключен через открытые VT3, VT4 к источнику питания и на нем будет высокий уровень.

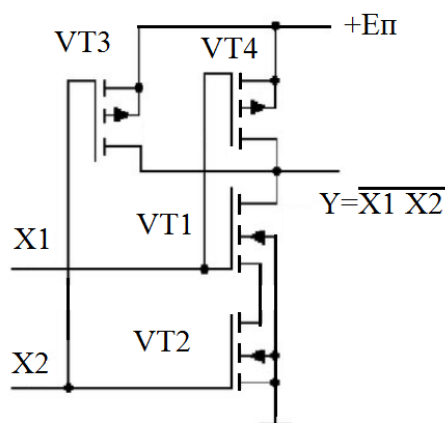


Рис. 4.14. ЛЭ 2И-НЕ КМОП

4.3. Технические средства для выполнения лабораторной работы

1. Модуль **ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ТРИГГЕРЫ**, модуль **МУЛЬТИМЕТРЫ**, модуль **ЦАП и АЦП**, на стендах **ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ – 2**.

2. Двухканальный цифровой осциллограф.

4.4. Порядок выполнения экспериментальных исследований

4.4.1. Исследование характеристики Х ЛЭ И

Построение амплитудной характеристики ЛЭ 2-И производится по схеме, показанной на рис. 4.15.

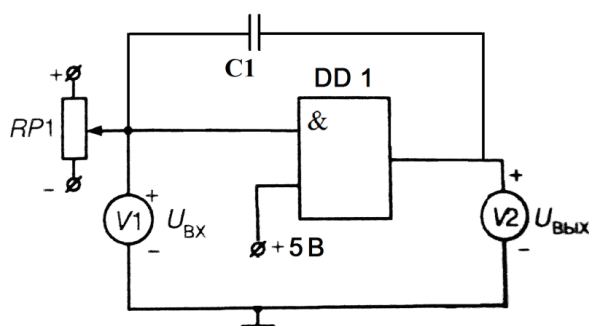


Рис. 4.15. Схема для построения амплитудной характеристики ЛЭ

Для выполнения работы необходимо осуществить следующие действия:

1. Модуль питания стенда (220 В) **QF1** установить в положение **ВЫКЛЮЧЕНО**.

2. В модуле **ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ТРИГГЕРЫ** извлечь из гнезд все перемычки (рис. 4.16).

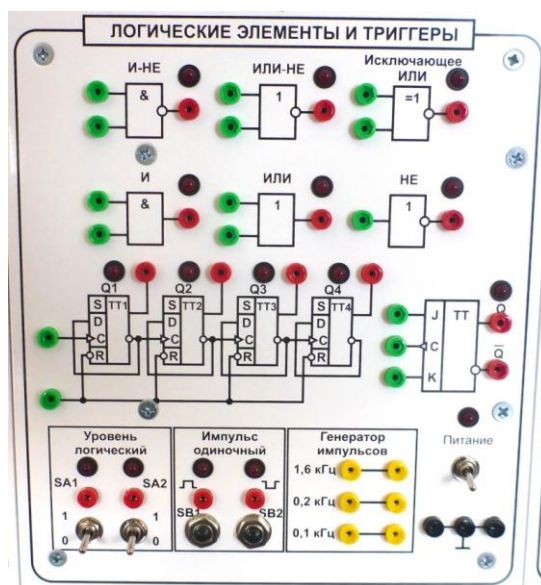


Рис. 4.16. Вид модуля **ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ТРИГГЕРЫ**

3. Установить переключатель **ПИТАНИЕ** модуля в положение **Выкл.**
4. На модуле **МУЛЬТИМЕТРЫ** установить переключатели режима измерения мультиметров в положение измерения напряжения в диапазоне 20 В (рис. 4.17).



Рис. 4.17. Вид модуля **МУЛЬТИМЕТРЫ** перед началом работы

5. В модуле **ЦАП и АЦП** извлечь из гнезд все перемычки (рис. 4.18).
6. Установить переключатель **ПИТАНИЕ** модуля в положение **Выкл.**

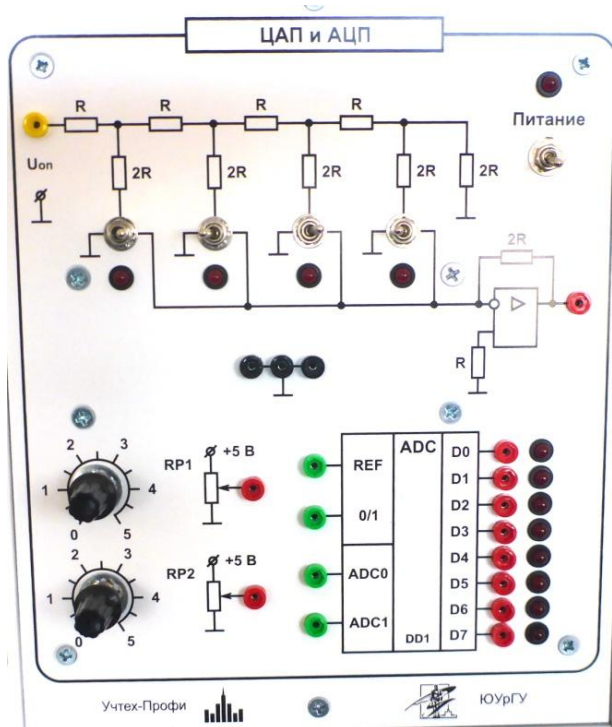


Рис. 4.18. Вид модуля **ЦАП и АЦП**

7. В модуле **ЦАП и АЦП** соединить перемычкой средний вывод потенциометра RP1 (красное гнездо разъема) с одним из входов элемента **И** в модуле **ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ТРИГГЕРЫ** (зеленое гнездо).

8. Соединить **перемычкой с конденсатором** вход элемента **И**, к которому был подключен средний вывод потенциометра RP1, и выход логического элемента **И** (красное гнездо).

9. Другой вход элемента **И** в модуле **ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ТРИГГЕРЫ** (зеленое гнездо) соединить перемычкой с гнездом SA1 секции **Уровень логический**

10. Черный щуп левого мультиметра вставить в гнездо разъема $\perp$ в модуле **ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ТРИГГЕРЫ**.

11. Красный щуп левого мультиметра соединить со средним выводом потенциометра RP1 (красное гнездо разъема модуля **ЦАП и АЦП**).

12. Черный щуп правого мультиметра вставить в гнездо разъема $\perp$ в модуле **ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ТРИГГЕРЫ**.

13. Красный щуп правого мультиметра вставить в гнездо разъема выхода логического элемента **И** (красное гнездо).

14. Выключатель SA1 секции **Уровень логический** установить в положение 1 (верх).

15. Модуль питания стенда (220 В) **QF1** установить в положение **ВКЛЮЧЕНО**.

16. Включить питание модуля **ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ТРИГГЕРЫ**.

17. Включить питание модуля **ЦАП и АЦП**.

18. Поворачивая ручку потенциометра RP1 в модуле **ЦАП и АЦП**, и наблюдая показания левого мультиметра, устанавливать величины входного напряжения в соответствии с таблицей 4.1. Занести в таблицу 4.1 величины напряжений $U_{\text{вых}}$ согласно показаниям правого мультиметра.

Таблица 4.1 – Напряжение на выходе логического элемента **И**

$U_{\text{вх}}, \text{В}$	0	1	2	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3	4	5
$U_{\text{вых}}, \text{В}$															

4.4.2. Исследование амплитудной характеристики ЛЭ И-НЕ

Построение амплитудной характеристики ЛЭ **2И-НЕ** производится по схеме, показанной на рис. 4.19.

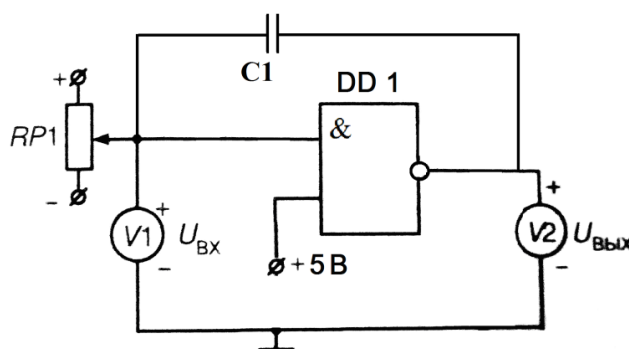


Рис. 4.19. Схема для построения амплитудной характеристики ЛЭ И-НЕ

4.4.3. Построение таблицы истинности ЛЭ

Построение таблицы истинности ЛЭ 2И-НЕ производится по схеме показанной на рис. 4.20.

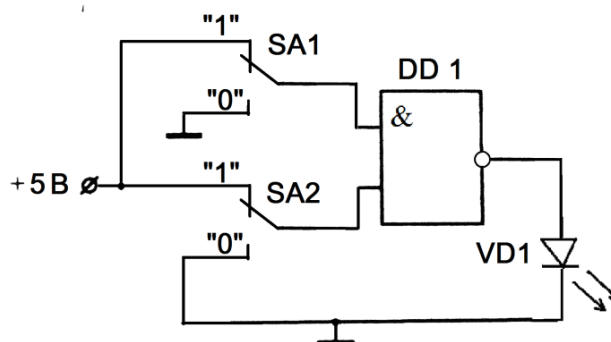


Рис. 4.20. Схема для построения таблицы истинности ЛЭ И-НЕ

Для построения таблицы истинности ЛЭ 2И-НЕ необходимо осуществить следующие действия:

1. Модуль питания стенда (220 В) **QF1** установить в положение **ВЫКЛЮЧЕНО**.
2. В модуле **ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ТРИГГЕРЫ** извлечь из гнезд все перемычки (рис. 4.16).
3. Установить переключатель **ПИТАНИЕ** модуля в положение **Выкл.**
4. Один вход элемента **И-НЕ** в модуле **ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ТРИГГЕРЫ** (зеленое гнездо) соединить перемычкой с гнездом SA1 секции **Уровень логический**, другой вход элемента **И-НЕ** в модуле **ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ТРИГГЕРЫ** (зеленое гнездо) соединить перемычкой с гнездом SA2 секции **Уровень логический**.
5. Переключатели SA1 и SA2 секции **Уровень логический** установить в положение **0(вниз)**.
6. Модуль питания стенда (220 В) **QF1** установить в положение **ВКЛЮЧЕНО**.
7. Включить питание модуля **ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ТРИГГЕРЫ**.
8. Заполнить таблицу истинности 4.3, изменяя при помощи переключателей SA1, SA2 логические уровни на входах ЛЭ И-НЕ и наблюдая состояние светодиода подключенного к выходу ЛЭ И-НЕ (свечение диода соответствует уровню 1).

Таблица 4.3 – Таблица истинности ЛЭ И-НЕ

X1 (SA1)	X2 (SA2)	Y 0/1
0	0	
0	1	
1	0	
1	1	

Построение таблицы истинности ЛЭ И производится по схеме, показанной на рис. 4.21.

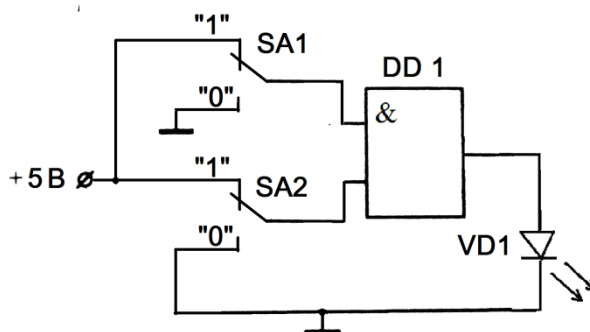


Рис. 4.21. Схема для построения таблицы истинности ЛЭ И

Для построения таблицы истинности ЛЭ И необходимо осуществить следующие действия:

1. Отсоединить перемычки от входов ЛЭ И-НЕ.
2. Один вход элемента **И** в модуле **ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ТРИГГЕРЫ** (зеленое гнездо) соединить перемычкой с гнездом SA1 секции **Уровень логический**, другой вход элемента **И** в модуле **ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ТРИГГЕРЫ** (зеленое гнездо) соединить перемычкой с гнездом SA2 секции **Уровень логический**.
3. Переключатели SA1 и SA2 секции **Уровень логический** установить в **0** (в нижнее положение).
4. Заполнить таблицу истинности 4.4, изменяя при помощи переключателей SA1, SA2 логические уровни на входах ЛЭ И и наблюдая состояние светодиода подключенного к выходу ЛЭ И (свечение диода соответствует уровню 1).

Таблица 4.4 – Таблица истинности ЛЭ И

X1 (SA1)	X2 (SA2)	Y 0/1
0	0	
0	1	
1	0	
1	1	

Построение таблицы истинности ЛЭ ИЛИ-НЕ производится по схеме, показанной на рис. 4.22.

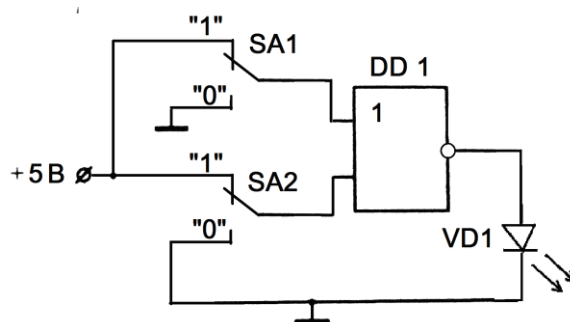


Рис. 4.22. Схема для построения таблицы истинности ЛЭ ИЛИ-НЕ

Для построения таблицы истинности ЛЭ ИЛИ-НЕ необходимо осуществить следующие действия:

1. Отсоединить переключки от входов ЛЭ И.
2. Один вход элемента **ИЛИ-НЕ** в модуле **ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ТРИГГЕРЫ** (зеленое гнездо) соединить переключкой с гнездом SA1 секции **Уровень логический**, другой вход элемента **ИЛИ-НЕ** в модуле **ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ТРИГГЕРЫ** (зеленое гнездо) соединить переключкой с гнездом SA2 секции **Уровень логический**.

3. Переключатели SA1 и SA2 секции **Уровень логический** установить в 0 (в нижнее положение).

4. Заполнить таблицу истинности 4.5, изменяя при помощи переключателей SA1, SA2 логические уровни на входах ЛЭ **ИЛИ-НЕ** и наблюдая состояние светодиода подключенного к выходу ЛЭ **ИЛИ-НЕ** (свечение диода соответствует уровню 1).

Таблица 4.5 – Таблица истинности ЛЭ ИЛИ-НЕ

X1(SA1)	X2 (SA2)	Y 0/1
0	0	
0	1	
1	0	
1	1	

Построение таблицы истинности ЛЭ **ИЛИ** производится по схеме, показанной на рис. 4.23.

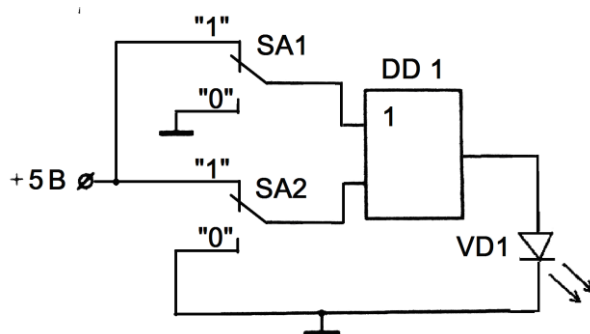


Рис. 4.23. Схема для построения таблицы истинности ЛЭ ИЛИ

Для построения таблицы истинности ЛЭ ИЛИ необходимо осуществить следующие действия:

1. Отсоединить переключки от входов ЛЭ **ИЛИ-НЕ**.
2. Один вход элемента **ИЛИ** в модуле **ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ТРИГГЕРЫ** (зеленое гнездо) соединить переключкой с гнездом SA1 секции **Уровень логический**, другой вход элемента **ИЛИ** в модуле **ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ТРИГГЕРЫ** (зеленое гнездо) соединить переключкой с гнездом SA2 секции **Уровень логический**.

3. Переключатели SA1 и SA2 секции **Уровень логический** установить в 0 (в нижнее положение).

4. Заполнить таблицу истинности 4.6, изменяя при помощи переключателей SA1, SA2 логические уровни на входах ЛЭ **ИЛИ** и наблюдая состояние светодиода подключенного к выходу ЛЭ **ИЛИ** (свечение диода соответствует уровню 1).

Таблица 4.6 – Таблица истинности ЛЭ 2ИЛИ

X1 (SA1)	X2 (SA2)	Y 0/1
0	0	
0	1	
1	0	
1	1	

Построение таблицы истинности ЛЭ, **исключающее ИЛИ-НЕ** производится по схеме, показанной на рис. 4.24.

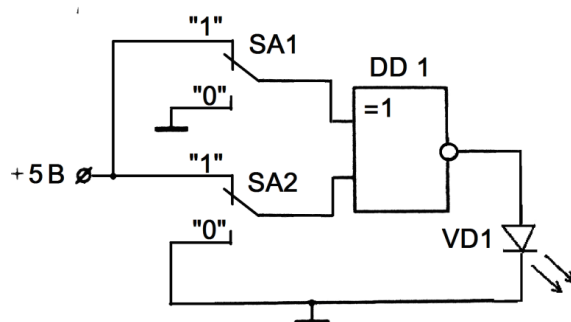


Рис. 4.24. Схема построения таблицы истинности ЛЭ **исключающее ИЛИ-НЕ**

Для построения таблицы истинности ЛЭ **исключающее ИЛИ-НЕ** (на стенде имеет обозначение - **исключающее ИЛИ**) необходимо осуществить следующие действия:

1. Отсоединить перемычки от входов ЛЭ **ИЛИ**.
2. Один вход элемента **исключающее ИЛИ-НЕ** в модуле **ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ТРИГГЕРЫ** (зеленое гнездо) соединить перемычкой с гнездом SA1 секции **Уровень логический**, другой вход элемента **исключающее ИЛИ-НЕ** в модуле **ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ТРИГГЕРЫ** (зеленое гнездо) соединить перемычкой с гнездом SA2 секции **Уровень логический**.
3. Переключатели SA1 и SA2 секции **Уровень логический** установить в 0 (в нижнее положение).
4. Заполнить таблицу истинности 4.7, изменяя при помощи переключателей SA1, SA2 логические уровни на входах ЛЭ **исключающее ИЛИ-НЕ** и наблюдая состояние светодиода подключенного к выходу ЛЭ **исключающее ИЛИ-НЕ** (свечение диода соответствует уровню 1).

Таблица 4.7 – Таблица истинности ЛЭ **исключающее ИЛИ-НЕ**

X1(SA1)	X2(SA1)	Y0/1
0	0	
0	1	
1	0	
1	1	

Построение таблицы истинности ЛЭ НЕ производится по схеме, показанной на рис. 4.25.

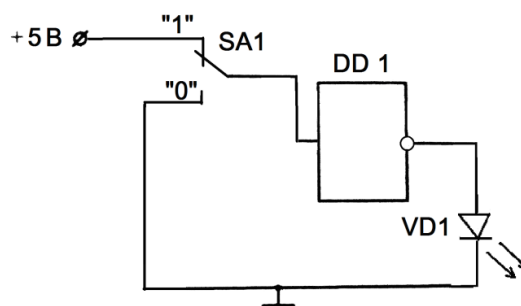


Рис. 4.25. Схема для построения таблицы истинности ЛЭ НЕ

Для построения таблицы истинности ЛЭ НЕ необходимо осуществить следующие действия:

1. Отсоединить перемычки от входов ЛЭ **исключающее ИЛИ-НЕ**.
2. Вход элемента **НЕ** в модуле **ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ТРИГГЕРЫ** (зеленое гнездо) соединить перемычкой с гнездом SA1 секции **Уровень логический**.
3. Переключатель SA1 секции **Уровень логический** установить в 0.
4. Заполнить таблицу истинности 4.8, изменяя при помощи переключателя SA1 логические уровни на входах ЛЭ НЕ и наблюдая состояние светодиода подключенного к выходу ЛЭ НЕ (свечение диода соответствует уровню 1).

Таблица 4.8 – Таблица истинности ЛЭ НЕ

X1(SA1)	Y0/1
0	
1	

4.4.4. Исследование временных диаграмм ЛЭ

Исследование временных диаграмм ЛЭ И производится по схеме, показанной на рис. 4.26.

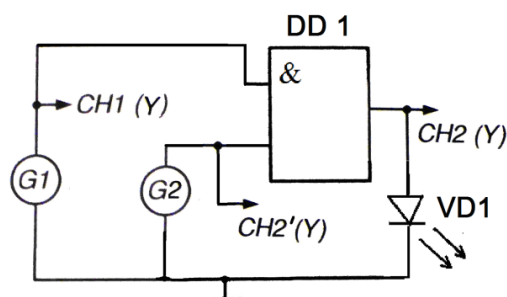


Рис. 4.26. Схема исследования временных диаграмм ЛЭ И

Для исследования временных диаграмм ЛЭ И необходимо осуществить следующие действия:

1. Установить переключатель **ПИТАНИЕ** модуля в положение **Выкл.**

2. Один вход элемента **И** в модуле **ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ТРИГГЕРЫ** (зеленое гнездо) соединить перемычкой с гнездом 0,1 кГц секции **Генератор импульсов**, другой вход элемента **И** в модуле **ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ТРИГГЕРЫ** (зеленое гнездо) соединить перемычкой с гнездом 1,6 кГц секции **Генератор импульсов**.

3. Красный щуп 1 канала осциллографа подключить к гнезду разъема 0,1 кГц секции **Генератор импульсов**.

4. Черный щуп 1 канала осциллографа подключить к гнезду разъема $\perp$ в модуле **ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ТРИГГЕРЫ** (черное гнездо).

5. Красный щуп 2 канала осциллографа подключить к гнезду разъема 1,6 кГц секции **Генератор импульсов**.

6. Черный щуп 2 канала осциллографа подключить к гнезду разъема к $\perp$ в модуле **ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ТРИГГЕРЫ** (черное гнездо).

7. Выключатель модуля питания стенда (220 В) **QF1** установить в положение **ВКЛЮЧЕНО**.

8. Выключатель модуля **ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ТРИГГЕРЫ (Питание)** установить в положение **ВКЛЮЧЕНО**.

9. Включить осциллограф и ожидать его готовности.

10. Нажать кнопку **АВТО** (на правой стороне передней панели осциллографа, синего цвета), отпустить и подождать 5 секунд.

11. Сфотографировать осциллограммы выходных сигналов генераторов импульсов G1 и G2.

12. Красный щуп 2 канала осциллографа подключить к гнезду разъема выхода логического элемента И (красное гнездо).

13. Нажать кнопку **АВТО** осциллографа, отпустить и подождать 5 секунд.

14. Сфотографировать осциллограммы выходного сигнала генератора импульсов G1 и сигнала с выхода логического элемента И.

4.5. Обработка экспериментальных данных

1. Используя данные таблицы 4.1 построить амплитудную характеристику ЛЭ И.

2. Используя данные таблицы 4.2 построить амплитудную характеристику ЛЭ И-НЕ.

3. Используя данные таблиц 4.3 – 4.8 построить таблицы истинности ЛЭ и описать словами их свойства.

4. По данным исследования временных диаграмм при помощи осциллографа построить временные диаграммы работы ЛЭ И.

5. Построить временные диаграммы работы ЛЭ с периодическими импульсными сигналами для своего варианта, используя данные таблицы 4.9 и пример на рис. 4.4.

6. Сделать выводы.

Таблица 4.9 – Исходные данные для проведения расчетов

№ варианта		ЛЭ	t, мс	t1, мс	t2, мс	t3, мс	t4, мс
1		2И	12	1	2	5	6
2		2И-НЕ	13	2	1	6	5
3		2ИЛИ	14	2	3	6	7
4		2ИЛИ-НЕ	15	3	1	7	6
5		XOR	16	1	3	8	8
6		2И	17	4	2	8	7
7		2И-НЕ	18	2	4	7	9
8		2ИЛИ	19	3	4	9	8
9		2ИЛИ-НЕ	20	4	3	9	9
10		XOR	12	2	2	3	3
11		2И	13	3	3	5	5
12		2И-НЕ	14	4	1	7	6
13		2ИЛИ	15	3	2	8	5
14		2ИЛИ-НЕ	16	2	3	5	9
15		XOR	17	4	2	7	9
16		2И	18	3	1	9	4
17		2И-НЕ	19	2	4	9	8
18		2ИЛИ	20	5	2	8	5
19		2ИЛИ-НЕ	12	1	2	4	5
20		XOR	13	2	1	5	6
21		2И	14	3	2	7	6
22		2И-НЕ	15	2	2	5	5
23		2ИЛИ	16	3	4	7	5
24		2ИЛИ-НЕ	17	2	4	8	6
25		XOR	18	4	1	7	9

4.6. Содержание отчета о лабораторной работе

Отчёт должен содержать:

- титульный лист;
- цель лабораторной работы;
- схемы экспериментов;
- таблицы и графики результатов;
- расчеты;
- выводы.

Отчёт по лабораторной работе должен быть выполнен в соответствии требованиями ГОСТ.

4.7. Порядок защиты работы

Защита производится при наличии отчета и состоит в объяснениях полученных результатов и ответах на контрольные вопросы.

4.8. Контрольные вопросы

1. Что такое двухзначная логика?
2. Что такое таблица соответствия логических функций?
3. Что такое логический уровень?
4. Что такое коэффициент разветвления на выходе ЛЭ?
5. Какой недостаток имеет реализация логических элементов на диодах?
6. Чем отличаются ЛЭ ТТЛ и ЛЭ ТТЛШ?
7. Какие недостатки имеют ЛЭ ТТЛ?
8. Что такое штрих КМОП?
9. Чем отличаются ЛЭ ТТЛ и КМОП?
10. От чего зависит энергопотребление ЛЭ КМОП?
11. Как реализовать элемент НЕ на биполярном транзисторе?
12. Объясните принцип работы КМОП ЛЭ 2И-НЕ.

Лабораторная работа № 5. **ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ**

5.1. Цель работы

Исследование характеристик оптоэлектронных приборов.

5.2. Краткие теоретические сведения

5.2.1. Оптоэлектронные приборы

Оптоэлектронными приборами (оптронами) называют такие приборы, в которых имеются источник и приемник излучения (светоизлучатель и фотоприемник) с оптической связью между ними, конструктивно связанные друг с другом [3, с. 491].

Принцип действия оптронов любого вида на том, что в излучателе энергия электрического сигнала преобразуется в световую, в фотоприемнике, наоборот, световой сигнал вызывает изменение его электрических параметров.

Наибольшее распространение получили оптроны, у которых имеется прямая оптическая связь от излучателя к фотоприемнику и, как правило, исключены все виды электрической связи между этими элементами.

Оптоэлектронная интегральная микросхема представляет собой микросхему, состоящую из нескольких оптронов и электрически соединенных с ними согласующих или усилительных устройств.

В электронных цепях оптрон выполняет функцию элемента связи, в котором осуществлена электрическая (гальваническая) развязка входа и выхода.

5.2.2. Достоинства и недостатки оптронов

Оптоэлектронные приборы имеют определенные достоинства и недостатки, которые обуславливают их применение в электронных устройствах.

Основные достоинства:

- возможность обеспечения идеальной электрической (гальванической) развязки между входом и выходом;
- возможность реализации бесконтактного оптического управления электронными устройствами;
- отсутствие обратной реакции приемника на излучатель – однонаправленность оптического канала;
- широкая частотная полоса пропускания оптрона, возможность передачи по оптронной цепи, как переменной, так и постоянной составляющей;
- защищенность от помех, невосприимчивость оптических каналов связи к воздействию электромагнитных полей;

- физическая и технологическая совместимость с другими полупроводниковыми и микроэлектронными приборами.

Основные недостатки оптоэлектронных устройств:

- невысокий КПД, обусловленный необходимостью двойного преобразования энергии (электричество – свет – электричество);
- повышенная зависимость параметров и характеристик от температуры и ионизирующих излучений;
- временная деградация (ухудшение) параметров;
- повышенный уровень собственных шумов;
- конструктивно-технологическое несовершенство, связанное с использованием гибридной технологии (необходимость объединения в одном приборе нескольких, отдельных кристаллов из различных полупроводников).

Несмотря на имеющиеся недостатки, достоинства оптронов обуславливают их массовое применение в электронных устройствах.

5.2.3. Резисторный оптрон

В современных оптоэлектронных приборах в качестве излучателя используется светодиод. В зависимости от применяемого фотоприемника оптроны подразделяются на несколько типов [3, с. 493].

В резисторном оптроне приемником излучения является фоторезистор. Условное обозначение резисторного оптрона приведено на рис 5.1. Основное достоинство резисторного оптрона - возможность работы, как на постоянном, так и на переменном токе. Резисторные оптроны могут применяться для автоматического регулирования усиления, для управления бесконтактными делителями напряжения и т. д.

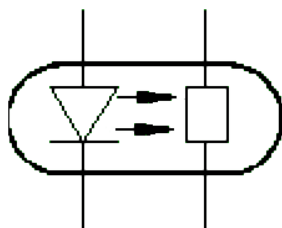


Рис. 5.1. Условное обозначение резисторного оптрона

Основные параметры резисторных оптронов:

- максимальный входной ток;
- максимальный выходной ток;
- $R_{\text{вых}}$ при нормальной работе;
- $R_{\text{т. вых.}}$ – темновое выходное сопротивление;
- R изоляции;
- время включения и выключения, характеризующее динамические характеристики оптрона.

Основные характеристики резисторного оптрона:

- входные ВАХ;
- передаточная характеристика (зависимость $R_{\text{вых}} = f(I_{\text{вх}})$).

5.2.4. Диодный оптрон

В диодном оптроне приемником излучения является фотодиод. Условное обозначение диодного оптрона приведено на рис 5.2.

Диодные оптроны могут работать в двух режимах: фотогенераторном и фотодиодном. Выходная характеристика оптрона в фотодиодном режиме аналогична обратной ветви ВАХ диода. Обратный ток не зависит от напряжения, но существенно зависит от температуры окружающей среды. Достоинством диодного оптрона является практически линейная передаточная характеристика, что позволяет использовать его для гальванической развязки аналоговых датчиков.

В фотогенераторном режиме выходная ВАХ существенно зависит от выходного тока. Фото-ЭДС не превышает контактной разности потенциалов на р-п-переходе фотодиода и может находиться в диапазоне 0,4...0,8 В.

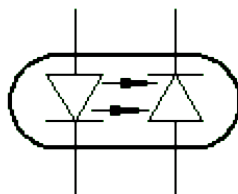


Рис. 5.2. Условное обозначение диодного оптрона

Основные параметры резисторных оптронов:

- максимальный входной ток;
- максимальный выходной ток;
- максимальное обратное напряжение;
- выходной обратный (тепловой) ток $I_{\text{вых. обр.}}$ – ток, протекающий в выходной цепи диодного оптрона при отсутствии входного тока и заданном напряжении на выходе;
- время нарастания и спада выходного импульса – интервал времени, в течение которого выходной сигнал изменяется соответственно от 0,1 до 0,5 и от 0,9 до 0,5 максимального значения;
- статический коэффициент передачи по току - отношение разницы выходного тока и выходного теплового тока к входному току, выраженное в процентах.

Основным недостатком диодных оптронов является малый коэффициент передачи по току, что требует применения дополнительного усилителя.

5.2.5. Транзисторный оптрон

Транзисторные оптроны имеют в качестве приемника излучения – биполярный кремниевый фототранзистор (рис. 5.3).

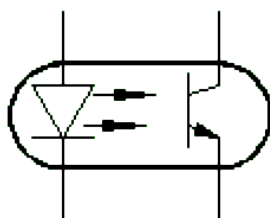


Рис. 5.3. Условное обозначение транзисторного оптрона

В качестве приемника также могут использоваться однопереходный и полевой транзисторы.

Основные параметры аналогичны параметрам диодных оптронов. Дополнительно указываются максимальный ток коллектора, максимальное напряжение эмиттер-коллектор, максимальная мощность рассеивания на коллекторе.

Достоинством транзисторных оптронов является высокий коэффициент передачи по току, однако они имеют существенно-нелинейную зависимость входного и выходного токов. Основная сфера применения транзисторных оптронов - устройства связи различных датчиков с измерительными устройствами, работающими в ключевом режиме, а также в качестве реле. На рис. 5.4 приведена схема включения транзисторного оптрона.

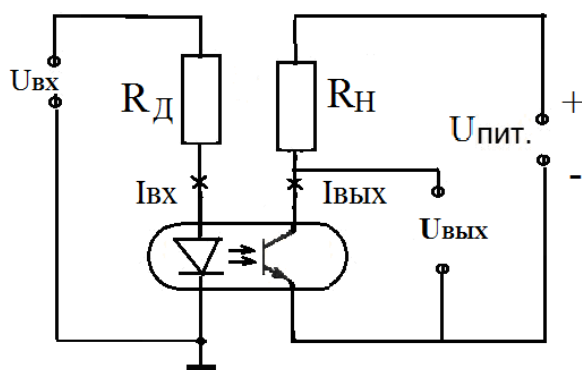


Рис. 5.4. Схема включения транзисторного оптрона

Величина дополнительного сопротивления R_d определяется исходя из необходимой величины входного тока $I_{вх}$ и входного напряжения $U_{вх}$, с учетом падения напряжения на светодиоде оптрона. Нагрузка может включаться непосредственно в коллекторную цепь оптрона. Также выходной сигнал может сниматься между эмиттером и коллектором, как показано на рис. 5.4. В этом случае напряжение $U_{вых}$ будет уменьшаться при увеличении $I_{вх}$. Такое включение часто используют для гальванической развязки линий передачи данных от входных портов микроконтроллеров.

5.2.6. Тиристорный и симисторный оптроны

Тиристорные оптроны имеют в качестве фотоприемника кремниевый фототиристор и применяются в ключевых режимах [3, с. 493]. Условное обозначение тиристорной оптопары приведено на рис. 5.5.

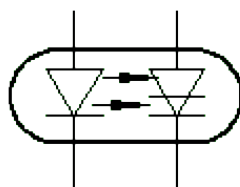


Рис. 5.5. Условное обозначение тиристорного оптрона

Тиристорные оптроны применяются для формирования мощных импульсов, для управления и коммутации различных устройств с мощными нагрузками [3, с. 483].

Основные входные параметры аналогичны входным параметрам диодных оптронов. Дополнительно указываются минимальный входной ток светодиода, при котором происходит включение тиристора.

К основным выходным параметрам относятся максимальное напряжение тиристора и максимальный выходной ток.

При необходимости управления нагрузками в цепях переменного напряжения используется оптопара с симистором. Условное обозначение симисторного оптрона приведено на рис. 5.6.

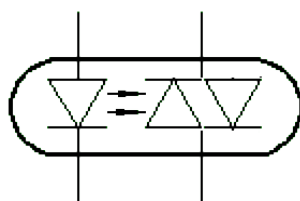


Рис. 5.6. Условное обозначение симисторного оптрона

Основные параметры симисторных оптронов аналогичны параметрам тиристорных оптронов. На рис. 5.7 приведена схема включения симисторного оптрона.

Величина дополнительного сопротивления R_d определяется исходя из необходимой величины входного тока $I_{вх}$ и входного напряжения $U_{вх}$, с учетом падения напряжения на светодиоде симисторного оптрона. Нагрузка может включаться непосредственно в цепь симистора оптрона.

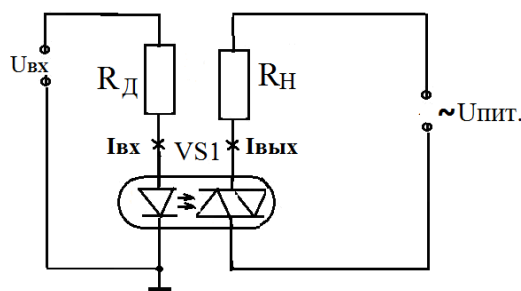


Рис. 5.7. Схема включения симисторного оптрона

Если максимально допустимый ток симисторного оптрона недостаточен для управления нагрузкой, то можно добавить мощный симистор с необходимым рабочим током, как показано на рис. 5.8.

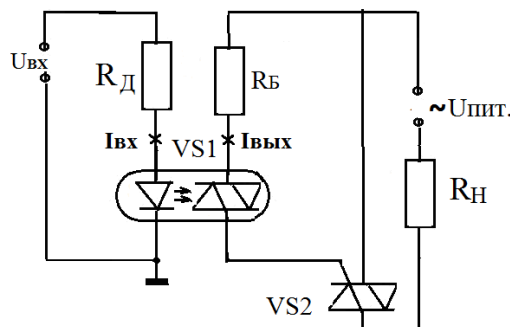


Рис. 5.8. Схема включения симисторного оптрона с мощным симистором

Величина резистора R_B определяется током необходимым для надежного открывания симистора VS2 и может находиться в пределах 100 – 300 Ом при мощности нагрузки до 2 кВт и напряжения питания 220 В.

Достоинством тиристорных и симисторных оптронов является возможность подключения входных цепей к выходным портам микроконтроллеров и управления нагрузками мощностью в несколько киловатт. Основной недостаток симисторных оптронов – невысокое быстродействие, которое определяется частотой питающего напряжения.

5.3. Технические средства для выполнения работы

Модуль **МИЛЛИАМПЕРМЕТРЫ**, модуль **МУЛЬТИМЕТРЫ**, модуль **ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ** на стендах **ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ – 2**.

5.4. Порядок выполнения экспериментальных исследований

5.4.1. Исследование диодного оптрона

Исследование диодного оптрона производится по схеме, показанной на рис. 5.9.

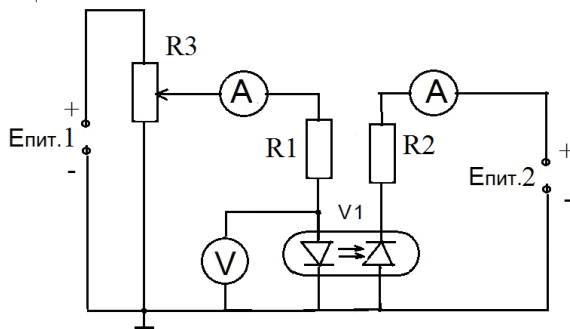


Рис. 5.9. Схема исследования характеристик диодного оптрона

Для выполнения работы необходимо осуществить следующие действия:

1. Модуль питания стенда (220 В) **QF1** установить в положение **ВЫКЛЮЧЕНО**. В модуле **ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ** выключить питание.

2. В модуле **ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ** извлечь из гнезд все перемычки (рис. 5.10).

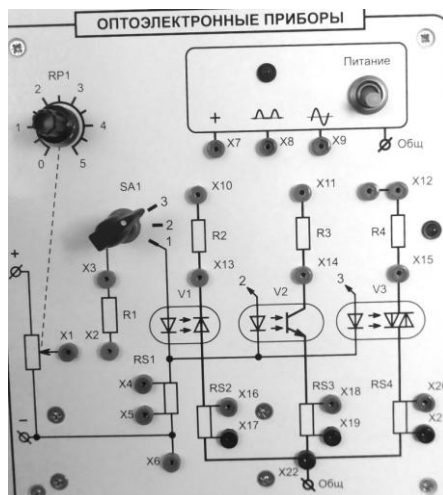


Рис. 5.10. Вид модуля **ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ**

3. Переключатель SA1 установить в положение 1.

4. Ручку потенциометра **RP1** повернуть против часовой стрелки до упора.

5. На модуле **МУЛЬТИМЕТРЫ** установить переключатели режима измерения для левого и правого мультиметров в положение **постоянное напряжение 20 В** (рис. 5.11).



Рис. 5.11. Вид модуля **МУЛЬТИМЕТРЫ** перед началом работы

13. Соединить X1 с “+” левого миллиамперметра, X2 соединить с “—” левого миллиамперметра (рис. 5.12)



Рис. 5.12. Вид модуля **МИЛЛИАМПЕРМЕТРЫ** перед началом работы

7. Соединить X7 с “+” правого миллиамперметра, X10 соединить с “–” правого миллиамперметра (рис. 5.12).

8. Установить переключатель диапазона измерений левого миллиамперметра в положение **x100**.

9. Установить переключатель диапазона измерений правого миллиамперметра в положение **x10**.

10. Красный щуп левого мультиметра вставить гнездо разъема **X3**.

11. Черный щуп левого мультиметра вставить в гнездо разъема **X6**.

12. Модуль питания стенда (220 В) **QF1** установить в положение **ВКЛЮЧЕНО**. В модуле **ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ** включить питание.

13. Поворачивая по часовой стрелке ручку потенциометра **RP1** устанавливать ток через светодиод оптрона (левый миллиамперметр) в соответствии с таблицей 5.1 и заносить в таблицу 5.1 значения напряжения на светодиоде (левый мультиметр) и тока через фотодиод (правый миллиамперметр).

Таблица 5.1 – Сила тока фотодиода и напряжение на светодиоде оптрона

Исд, мА	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Усд, В	0										
Ифд, мА	0										

5.4.2. Исследование транзисторного оптрона

Исследование транзисторного оптрона производится по схеме, показанной на рис. 5.13.

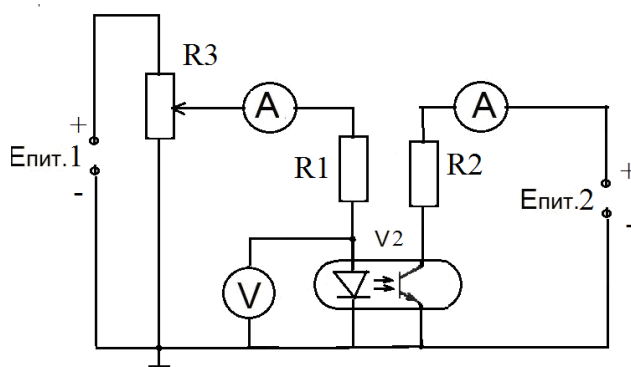


Рис. 5.13. Схема исследования характеристик транзисторного оптрона

Для выполнения работы необходимо осуществить следующие действия:

1. Модуль питания стенда (220 В) **QF1** установить в положение **ВЫКЛЮЧЕНО**. В модуле **ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ** выключить питание.
2. Извлечь перемычку из гнезда X10 и вставить ее в гнездо X11.
3. Переключатель SA1 в модуле **ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ** установить в положение 2.
4. Установить переключатель диапазона измерений правого миллиамперметра в положение **x100**.
5. Ручку потенциометра **RP1** в модуле **ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ** повернуть против часовой стрелки до упора.
6. Модуль питания стенда (220 В) **QF1** установить в положение **ВКЛЮЧЕНО**. В модуле **ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ** включить питание.
7. Поворачивая по часовой стрелке ручку потенциометра **RP1** устанавливать ток через светодиод оптрона (левый миллиамперметр) в соответствии с таблицей 5.2 и заносить в таблицу 5.2 значения напряжения на светодиоде (левый мультиметр) и тока через фототранзистор (правый миллиамперметр).

Таблица 5.2 – Сила тока фототранзистора и напряжение на светодиоде оптрона

Исд, мА	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Uсд, В	0										
Iфд, мА	0										

5.4.3. Исследование тиристорного оптрона

Исследование тиристорного оптрона производится по схеме, показанной на рис. 5.14.

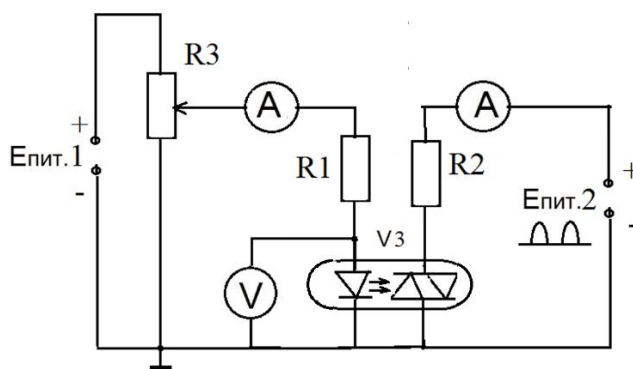


Рис. 5.14. Схема исследования характеристик тиристорного оптрона

Для выполнения работы необходимо осуществить следующие действия:

1. Модуль питания стенда (220 В) **QF1** установить в положение **ВЫКЛЮЧЕНО**. В модуле **ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ** выключить питание.
2. Извлечь перемычку из гнезда X11 и вставить ее в гнездо X12.
3. Извлечь перемычку из гнезда X7 и вставить ее в гнездо X8.
4. Переключатель SA1 в модуле **ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ** установить в положение 3.
5. Установить переключатель диапазона измерений правого миллиамперметра в положение **x1000**.
6. Ручку потенциометра **RP1** в модуле **ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ** повернуть против часовой стрелки до упора.
7. Модуль питания стенда (220 В) **QF1** установить в положение **ВКЛЮЧЕНО**. В модуле **ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ** включить питание.
8. Поворачивая по часовой стрелке ручку потенциометра **RP1** устанавливать ток через светодиод оптрона (левый миллиамперметр) в соответствии с таблицей 2 и заносить в таблицу 5.3 значения напряжения на светодиоде (левый мультиметр) и тока через фототиристор (правый миллиамперметр).

Таблица 5.3 – Сила тока фототиристора и напряжение на светодиоде оптрона

Исд, мА	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
Uсд, В	0											
Iфд, мА	0											

5.5. Обработка экспериментальных данных

1. Используя данные таблицы 5.1 построить график зависимости тока светодиода от напряжения на нем для диодного оптрона.
2. Используя данные таблицы 5.1 построить график зависимости тока фотодиода от тока светодиода для диодного оптрона.
3. Используя данные таблицы 5.2 построить график зависимости тока светодиода от напряжения на нем для транзисторного оптрона.

4. Используя данные таблицы 5.2 построить график зависимости тока фототранзистора от тока светодиода для транзисторного оптрона.

5. Используя данные таблицы 5.3 построить график зависимости тока светодиода от напряжения на нем для тиристорного оптрона.

6. Используя данные таблицы 5.3 построить график зависимости тока фототиристора от тока светодиода для тиристорного оптрона.

7. Сделать выводы.

8. Используя данные таблицы 5.2 выбрать величину входного напряжения $U_{вх}$ (рис. 5.4), которая необходима для обеспечения выходного тока в соответствии со своим вариантом $I_{вых}$ и R_d (таблица 5.4).

9. Используя данные таблицы 5.3 выбрать величину входного напряжения $U_{вх}$ (рис. 5.7), которая необходима для обеспечения открытого состояния тиристорного оптрона R_d (таблица 5.4).

10. Используя данные таблицы 5.3 выбрать величину R_d (рис. 5.7), которая необходима для обеспечения открытого состояния тиристорного оптрона при $U_{вх} = 5 \text{ В}$.

Таблица 5.4 – Исходные данные для проведения расчетов

№ варианта		$I_{вых}, \text{мА}$	$R_d, \text{кОм}$
1		1	1
2		2	1,5
3		3	2
4		4	2,5
5		5	3
6		6	1
7		7	1,5
8		8	2
9		9	2,5
10		10	1
11		1	1,5
12		2	2
13		3	2,5
14		4	3
15		5	1
16		6	1,5
17		7	2
18		8	2,5
19		9	1
20		10	1,5
21		1	2
22		2	2,5
23		3	3
24		4	1
25		5	1,5

5.6. Содержание отчета по лабораторной работе

Отчёт должен содержать:

- титульный лист;
- цель лабораторной работы;
- схемы экспериментов;
- таблицы и графики результатов;
- расчеты;
- выводы.

Отчёт по лабораторной работе должен быть выполнен в соответствии требованиями ГОСТ.

5.7. Порядок защиты работы

Защита производится при наличии отчета и состоит в объяснениях полученных результатов и ответах на контрольные вопросы.

5.8. Контрольные вопросы

1. Каков принцип действия оптоэлектронных приборов?
2. Что такое оптопара?
3. Что такое оптоэлектронная микросхема?
4. Какие достоинства имеют оптоэлектронные приборы?
5. Какие недостатки имеют оптоэлектронные приборы?
6. Как устроен резисторный оптрон?
7. Какие основные параметры имеет резисторный оптрон?
8. Для каких целей используют резисторные оптроны?
9. Как устроен диодный оптрон?
10. Какие основные параметры имеет диодный оптрон?
11. Для каких целей используют диодные оптроны?
12. Как устроен тиристорный оптрон?
13. Как устроен симисторный оптрон?
14. Какие основные параметры имеет тиристорный оптрон?
15. Для каких целей используют симисторные оптроны?
16. Какие достоинства имеют симисторные оптроны?
17. Какие недостатки имеют симисторные оптроны?

Лабораторная работа № 6. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

6.1. Цель работы

Исследование характеристик операционных усилителей с отрицательной обратной связью.

6.2. Краткие теоретические сведения

6.2.1. Операционный усилитель

Операционный усилитель (ОУ; англ. operational amplifier, OpAmp) — усилитель постоянного тока с дифференциальным входом, имеющий высокий коэффициент усиления [2, с. 118]. В настоящее время ОУ широко применяются в виде отдельных чипов и функциональных блоков в составе более сложных интегральных схем. На основе ОУ можно построить различные электронные узлы, характеристики которых определяются в основном цепями обратной связи. Такая особенность ОУ существенно упрощает проектирование электронных схем. Обозначение ОУ на схемах показано на рис. 6.1.

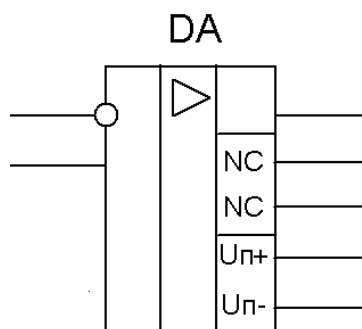


Рис. 6.1. Обозначение ОУ на схемах

На рис.1 с левой стороны инвертирующий (сверху) и неинвертирующий входы. С правой стороны – выход (сверху), выводы коррекции(NC), выводы питания (Uп+, Uп-). Часто на схемах можно встретить другие обозначения, показанные на рис. 6.2.

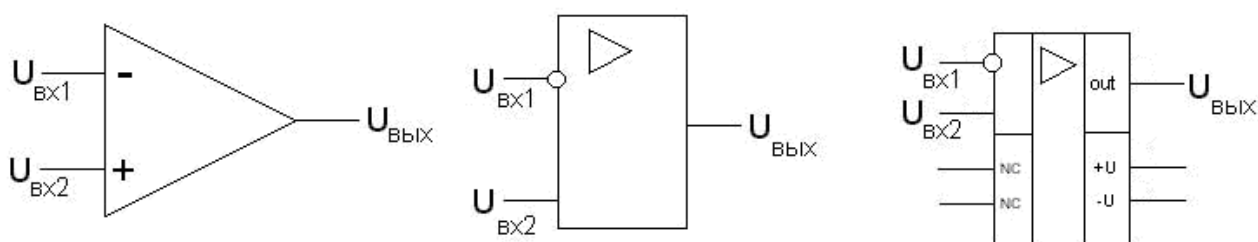


Рис. 6.2. Различные способы обозначения ОУ на схемах

Операционный усилитель изначально был спроектирован для выполнения математических операций (отсюда его название), путём использования напряжения как аналоговой величины. Такой подход лежит в основе аналоговых компьютеров, в которых ОУ использовались для моделирования базовых математических операций (сложение, вычитание, интегрирование, дифференцирование и т. д.).

Первый интегральный ОУ был спроектирован инженером фирмы «Fairchild Semiconductor» Робертом Видларом в 1963 году, для военных применений. В 1968 году фирма «Fairchild Semiconductor» выпустила недорогой ОУ $\mu A741$ со встроенной частотной коррекцией. Многие производители до сих пор выпускают версии этого чипа. Позднее были разработаны ОУ на полевых транзисторах с P-N переходом и с изолированным затвором, что улучшило их характеристики.

Операционный усилитель считается наиболее часто встречающимся элементом в аналоговой схемотехнике. Добавление нескольких внешних компонентов к ОУ позволяет использовать его в различных электрических схемах [2, с. 119].

6.2.2. Основные параметры операционного усилителя

Эквивалентная схема ОУ, в которой смоделированы некоторые параметры представлена на рис. 6.3.

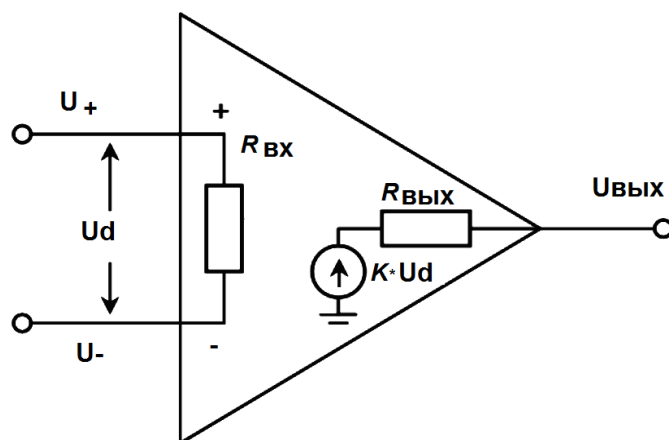


Рис. 6.3. Эквивалентная схема ОУ

Идеальный операционный усилитель имеет следующие свойства:

- коэффициент усиления $K = \infty$;
- входное сопротивление $R_{вх} = \infty$ (ток от $U+$ к $U-$ не течёт);
- выходное сопротивление $R_{вых} = 0$ (выходное напряжение $U_{вых}$ не изменяется при изменении выходного тока);
- диапазон выходных напряжений $U_{вых}$ равен бесконечности;
- нулевой входной ток (нет токов утечки и токов смещения);

- нулевое напряжение смещения (когда $U_+ = U_-$, то на выходе $U_{ВЫХ} = 0$);
- $U_{ВЫХ}$ зависит только от $U_d = U_+ - U_-$ (подавление синфазного сигнала);
- параметры ОУ не зависят от изменения напряжений источников питания;
- бесконечно широкая полоса пропускания (амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) и фазочастотная (ФЧХ) характеристики является идеально плоскими с нулевым фазовым сдвигом);
- скорость изменения выходного напряжения не ограничена (напряжение и ток не ограничены на всех частотах).

6.2.3. Обратные связи в усилителях

Обратной связью называют процесс передачи сигнала из выходной цепи во входную. Цепь, обеспечивающую эту передачу, называют цепью обратной связи. Петля, или контур обратной связи, состоит из прямого пути, образуемого активным элементом, и обратного пути, образуемого цепью обратной связи [2, с. 119]. На рис. 6.4 представлена схема ОУ с цепью обратной связи в виде делителя напряжения.

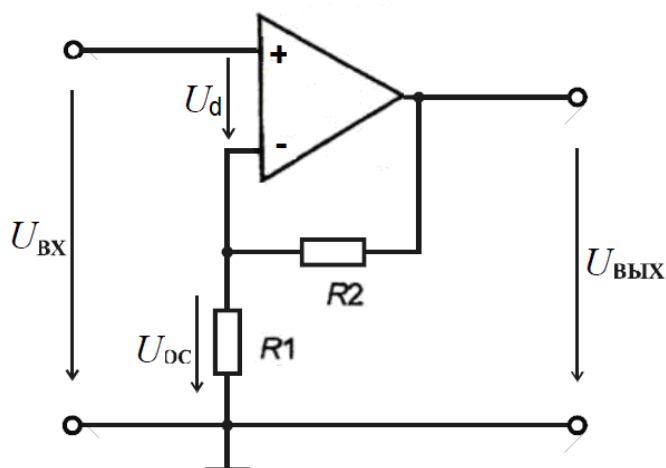


Рис. 6.4. Схема усилителя с цепью обратной связи

Если принять, что выходное сопротивление $R_{OUT} = 0$, входное сопротивление $R_{IN} = \infty$, $U_{ВЫХ} = KU_d$, то напряжение обратной связи

$$U_{ОС} = U_{ВЫХ} \frac{R1}{R1 + R2} = \beta U_{ВЫХ},$$

где β - коэффициент передачи цепи обратной связи.

$$\beta = \frac{R1}{R1 + R2}. \quad (6.1)$$

Напряжение на входе усилителя

$$U_d = U_{BX} - U_{OC} . \quad (6.2)$$

Так как напряжение обратной связи вычитается из входного, то такая связь является отрицательной.

Принимая $U_{ВЫХ} = KU_d$, где K - коэффициент усиления ОУ из (6.2) получаем

$$U_d = U_{BX} - U_{ВЫХ} \beta = U_{BX} - U_d K \beta ,$$

$$U_d = U_{BX} \frac{1}{1 + K \beta} , \quad (6.3)$$

$$U_{ВЫХ} = U_{BX} \frac{K}{1 + K \beta} . \quad (6.4)$$

Из формулы (6.4) следует, что коэффициент усиления ОУ с отрицательной обратной связью (рис. 6.3) равен

$$K_{OC} = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{BX}} = \frac{K}{1 + K \beta} . \quad (6.5)$$

Знаменатель в формуле (6.5) показывает глубину обратной связи, а произведение $K\beta$ называют коэффициентом петлевого усиления. Если $K\beta \gg 1$, то такая обратная связь называется глубокой. В этом случае $U_d \approx 0$, а

$$K_{OC} \approx \frac{1}{\beta} = 1 + \frac{R2}{R1} . \quad (6.6)$$

Из (6.6) следует, что в случае глубокой отрицательной обратной связи коэффициент усиления определяется цепью обратной связи и практически не зависит от параметров самого усилителя [1, с. 71].

На рис. 6.5 представлена схема усилителя с отрицательной обратной связью, в которой входной сигнал подается на инвертирующий вход ОУ, а неинвертирующий вход присоединен к общему проводу. Для случая глубокой отрицательной обратной связи $U_d \approx 0$, следовательно напряжение в точке А будет $U_A \approx 0$.

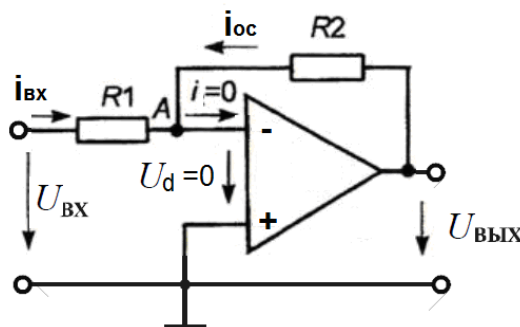


Рис. 6.5. Инвертирующий ОУ с отрицательной обратной связью

Принимая входной ток ОУ равным нулю, по закону Кирхгофа $i_{\text{вх}} = -i_{\text{ос}}$ следовательно

$$U_{\text{вх}} / R_1 = -U_{\text{вых}} / R_2$$

и

$$U_{\text{вых}} = -\frac{R_2}{R_1} U_{\text{вх}}. \quad (6.7)$$

Знак минус в формуле (6.7) показывает, что схема на рис. 6.5 является инвертирующим усилителем напряжения с коэффициентом

$$K_{\text{ос}} = -\frac{R_2}{R_1}. \quad (6.8)$$

6.2.4. Параметры реальных ОУ

Современные ОУ, выпускаемые ведущими производителями, могут иметь параметры, которые в некоторых случаях могут считаться близкими к идеальным. Например, коэффициент усиления без обратной связи, у некоторых типов ОУ достигает 10^5 для медленноменяющихся входных сигналов, что позволяет создавать усилители с глубокой ОС [1, с. 70].

Входное сопротивление ОУ с входными КМОП транзисторами очень велико (более 10^{12} Ом), что практически исключает прохождение входного тока [1, с. 68].

Другие параметры ОУ достаточно далеки от идеальных:

- выходное сопротивление $R_{\text{вых}}$ может находиться в пределах 10 – 1000 Ом;
- диапазон выходных напряжений $U_{\text{вых}}$ определяется величиной напряжения источников питания (обычно $U_{\text{вых}} < U_{\text{пит}}$ на 2-3 В);
- входное напряжение смещения может быть в пределах $10^{-3} \div 10^{-6}$ В (при котором $U_{\text{вых}} = 0$);
- $U_{\text{вых}}$ зависит не только от $U_d = U_+ - U_-$, но и от величин U_+ и U_- (подавление синфазного сигнала может достигать 80 – 90 дБ);
- параметры ОУ зависят от изменения напряжений источников питания;
- полоса пропускания у большинства ОУ без ООС достаточно узкая $f_{\text{ср}} < 100$ Гц (АЧХ имеет спадающий характер в области высокой частоты, начиная от частоты среза $f_{\text{ср}}$);
- с ростом частоты входного сигнала увеличивается фазовый сдвиг выходного сигнала;
- скорость изменения выходного напряжения для различных типов ОУ может находиться в пределах 10 – 1000 В/мкс.

6.2.5. Амплитудная характеристика ОУ

Ограниченность $U_{ВЫХ}$ приводит к тому, амплитудные (передаточные) характеристики ОУ нелинейные. Их представляют в виде двух кривых, относящихся соответственно к инвертирующему и неинвертирующему входам.

Характеристики снимают при подаче сигнала на один из входов, при нулевом сигнале на другом.

Каждая из кривых состоит из наклонного (линейного) участка с пропорциональной зависимостью выходного напряжения от входного и горизонтального участка, которому соответствуют режим полностью открытого (насыщенного) либо закрытого состояния транзисторов выходного каскада [1, с 69].

Пример амплитудной характеристики ОУ приведен на рис. 6.6.

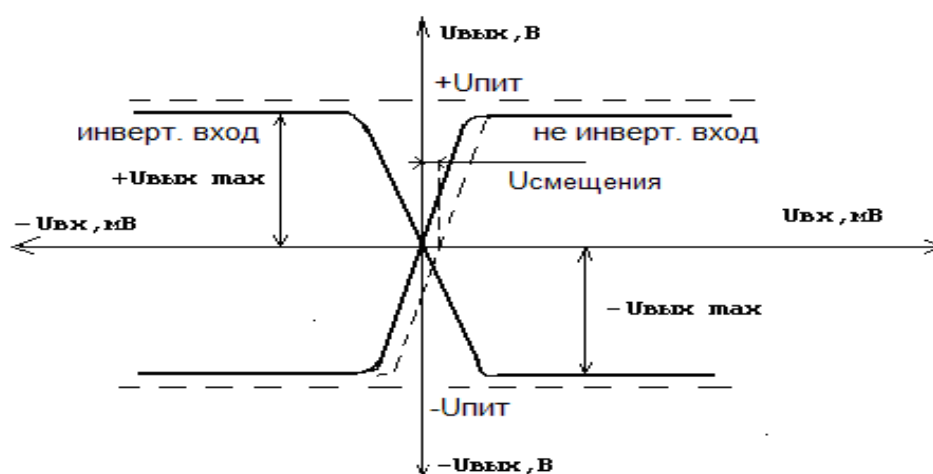


Рис. 6.6. Амплитудная характеристика ОУ

Угол наклона участка линейного участка определяется коэффициентом усиления $K = \frac{\Delta U_{ВЫХ}}{\Delta U_{ВХ}}$, величина напряжения горизонтального участка определяется соответствующими величинами напряжений источников питания $+U_{пит}$ и $-U_{пит}$.

Амплитудные характеристики могут не проходить через 0 (пунктирная линия на рис. 6.6), что объясняется разбалансом реальных ОУ на величину $U_{смещ.}$. На рис. 6.7 показана передаточная характеристика ОУ для синфазного сигнала.

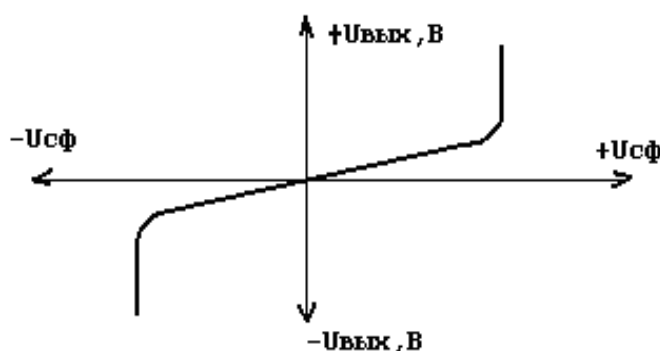


Рис. 6.7. Передаточная характеристика ОУ для синфазного сигнала

В реальных ОУ при подаче одинакового напряжения на инвертирующий и неинвертирующий входы, выходное напряжение не равно нулю и зависит от величины входного. Существует диапазон синфазных входных напряжений, в котором выходное напряжение слабо зависит от их величин (область ослабления синфазного сигнала). ОУ характеризуется коэффициентом ослабления синфазного сигнала.

При величинах синфазных напряжений сравнимых с напряжениями источников питания ОУ, коэффициент передачи синфазного сигнала резко возрастает.

6.2.6. Частотные характеристики ОУ

На рис. 6.8 представлена АЧХ ОУ, которая имеет спадающий характер в области высоких частот. Причиной этого является частотная зависимость параметров транзисторов и паразитных емкостей схемы ОУ. Граничной частоте $f_{гр}$, соответствует снижение коэффициента усиления ОУ в корень квадратный из 2 раз.

Частота f_1 , при которой коэффициент усиления ОУ равен единице, называется частотой единичного усиления.

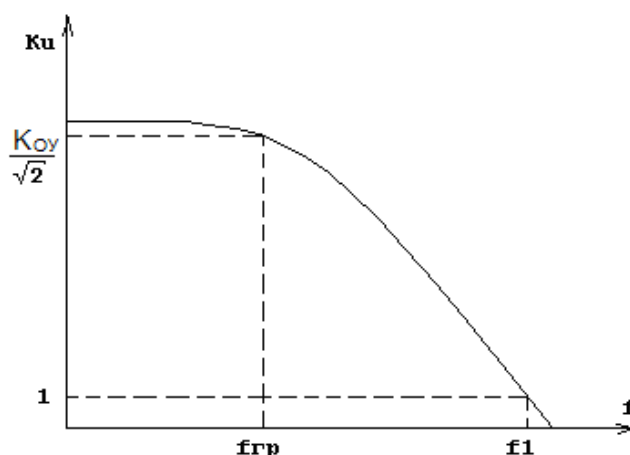


Рис. 6.8. АЧХ ОУ

На рис. 6.9 представлена ФЧХ ОУ, из которой видно, что с ростом частоты входного сигнала увеличивается фазовый сдвиг выходного сигнала, достигая на высоких частотах 180 град. И более.

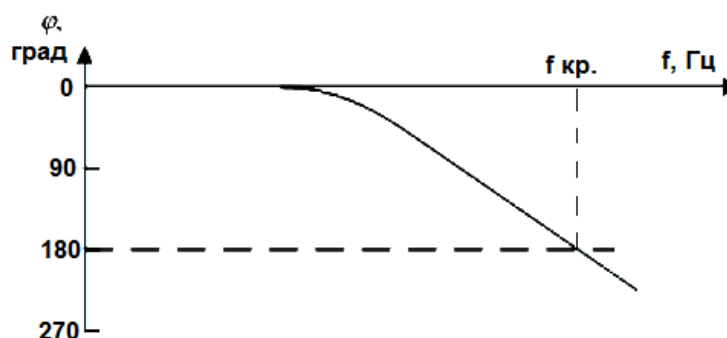


Рис. 6.9. ФЧХ ОУ

При использовании ОУ с ООС сигнал с выхода подается на его инвертирующий вход, что соответствует сдвигу фаз на 180 град. Таким образом на некоторой критической частоте общий фазовый сдвиг достигает 360 град. И ООС превращается в положительную обратную связь. При этом устойчивость ОУ определяется условием

$$K_{f_{кр}}\beta < 1. \quad (6.9)$$

Из условия (9) следует, что на глубину обратной связи β накладываются ограничения. Универсальные ОУ изготавливаются с встроенными цепями частотной коррекции, которые снижают усиление на высоких частотах, обеспечивая устойчивость работы при любой глубине ООС.

Для удобства анализа АЧХ их выполняют обычно в логарифмическом масштабе, как показано на рис. 6.10.

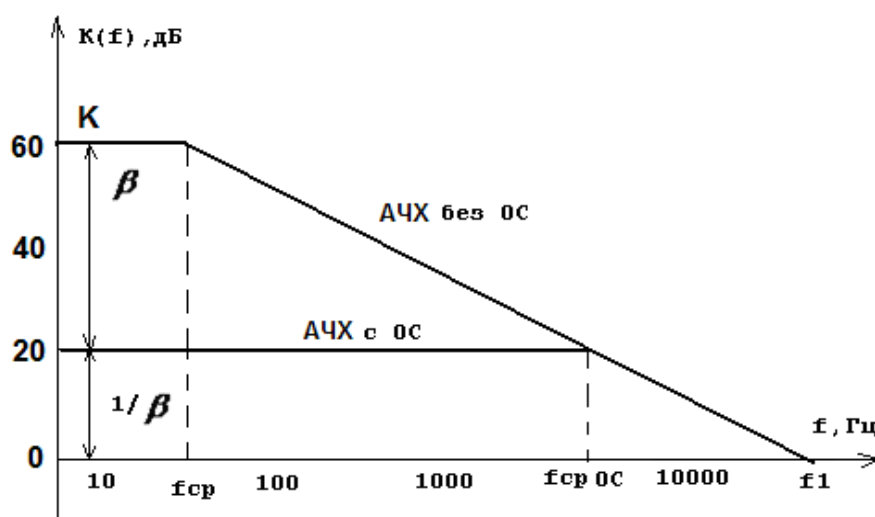


Рис. 6.10. Логарифмические АЧХ ОУ

Коэффициент усиления по напряжению на логарифмических характеристиках выражают в децибелах: $K_{дБ} = 20 \lg K$, где K – числовое значение коэффициента усиления по напряжению. Это удобно, так как значения коэффициентов усиления каскадов, выраженные в децибелах, можно складывать графически, вместо того чтобы их перемножать.

Встроенная коррекция универсальных ОУ вызывает спад коэффициента усиления на 20 дБ при увеличении частоты в 10 раз, после $f_{гр}$.

Рис. 6.10 иллюстрирует влияние ООС на АЧХ ОУ. Отрицательная ОС ограничивает коэффициент усиления ОУ и значительно расширяет полосу пропускания. Граничная частота $f_{гр}$ увеличивается за счет уменьшения коэффициента усиления.

Глубина ООС, как видно из рис. 6.10, есть разность между коэффициентами усиления ОУ без ОС и с ОС, выраженными в децибелах.

Максимальный коэффициент усиления ОУ на заданной частоте приближенно равен отношению f_1 к этой частоте.

6.2.7. Динамические параметры ОУ

Динамическими параметрами ОУ являются скорость нарастания выходного напряжения (скорость отклика) и время установления выходного напряжения.

На рис. 6.11 показана реакция ОУ на воздействие скачка входного напряжения.

Скорость нарастания выходного напряжения находят по отношению приращения выходного напряжения к времени на участке изменения выходного напряжения от $0,1U_{\text{вых}}$ до $0,9U_{\text{вых}}$. Время установления выходного напряжения $t_{\text{уст}}$ оценивают интервалом времени, в течение которого выходное напряжение меняется от уровня $0,1$ до уровня $0,9$ установившегося значения. Для универсальных ОУ с встроенными цепями частотной коррекции скорость нарастания выходного напряжения обычно невелика – $0,1 - 5$ В/мкс.

В быстродействующих ОУ с внешними цепями частотной коррекции скорость выходного сигнала может превышать 1000 В/мкс.

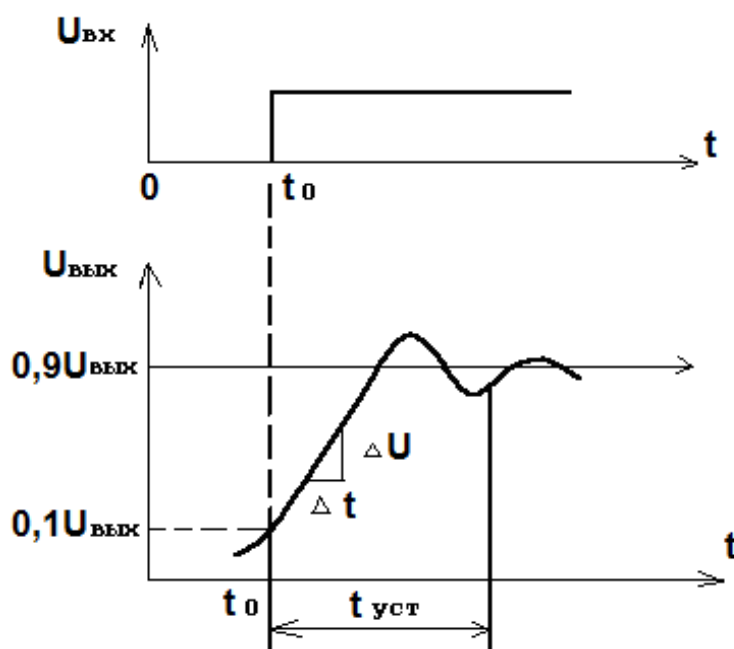


Рис. 6.11. Реакция ОУ на воздействие скачка

6.3. Технические средства для выполнения работы

1. Модуль **ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ**, модуль **МУЛЬТИМЕТРЫ**, модуль **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** на стендах **ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ – 2**.

2. Двухканальный цифровой осциллограф.

6.4. Порядок выполнения экспериментальных исследований

6.4.1. Исследование амплитудной характеристики инвертирующего усилителя с обратной связью

Снятие амплитудной характеристики инвертирующего усилителя с обратной связью производится по схеме, показанной на рис. 6.11.

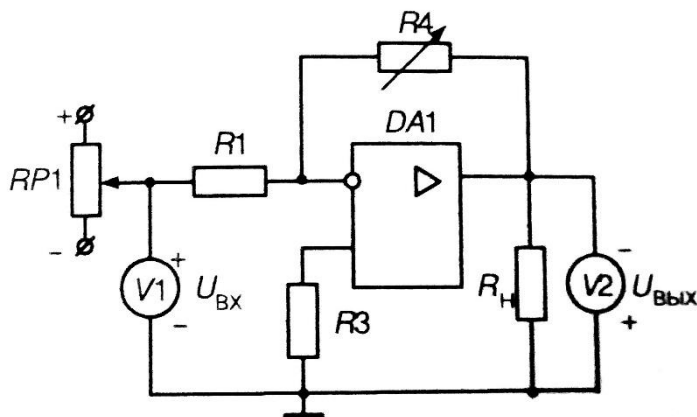


Рис. 6.11. Схема инвертирующего усилителя

Для выполнения работы необходимо осуществить следующие действия:

1. Модуль питания стенда (220 В) **QF1** установить в положение **ВЫКЛЮЧЕНО**.
2. В модуле **ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ** извлечь из гнезд все перемычки (рис. 6.12).

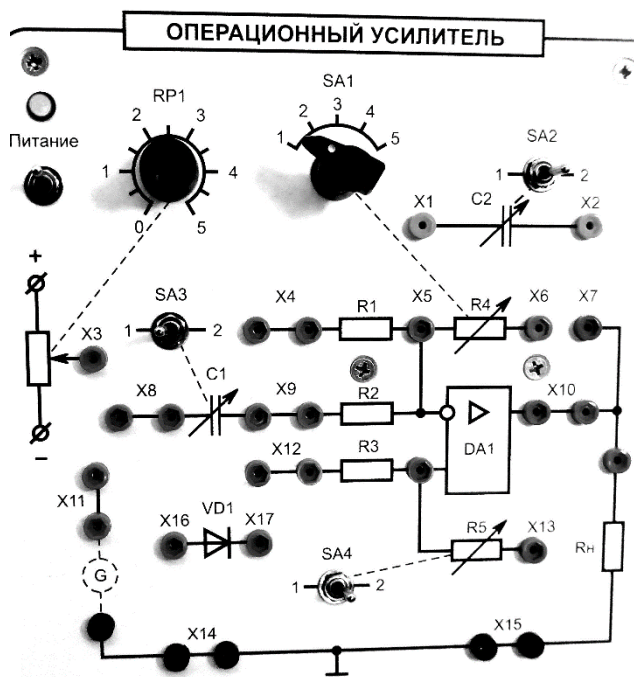


Рис. 6.12. Вид модуля **ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ**

3. Установить переключатель **ПИТАНИЕ** в положение **Выкл.**

4. На модуле **МУЛЬТИМЕТРЫ** установить переключатели режима измерения мультиметров в положение измерения напряжения в диапазоне 20 В (рис. 6.13).



Рис. 6.13. Вид модуля **МУЛЬТИМЕТРЫ** перед началом работы

5. Черный щуп левого мультиметра вставить в гнездо разъема **X14**.

6. Красный щуп левого мультиметра вставить в гнездо разъема **X4**.

7. Красный щуп правого мультиметра вставить в гнездо разъема **X10**.

8. Черный щуп правого мультиметра вставить в гнездо разъема **X15**.

9. Соединить перемычкой гнезда разъемов **X10** и **X6**.

10. Соединить перемычкой гнезда разъемов **X12** и **X14**.

11. Соединить перемычкой гнезда разъемов **X3** и **X4**.

12. Установить переключатель SA1 в положение 1 ($R4=20\text{кОм}$).

13. Модуль питания стенда (220 В) **QF1** установить в положение **ВКЛЮЧЕНО**. Включить питание модуля **ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ**.

14. Поворачивая ручку потенциометра RP1, и наблюдая показания левого мультиметра, установить величину входного напряжения равной -8 В. Занести в таблицу 1 величину напряжение $U_{\text{вых}}$ согласно показаниям правого мультиметра.

15. Заполнить таблицу 6.1, изменяя величину напряжения на входе инвертирующего усилителя.

Таблица 6.1 – Напряжение на выходе инвертирующего ОУ ($R4=20\text{кОм}$)

$U_{\text{вх}}, \text{В}$	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$U_{\text{вых}}, \text{В}$																	

16. Установить переключатель SA1 в положение 2 ($R4=50\text{кОм}$).

17. Поворачивая ручку потенциометра RP1, и наблюдая показания левого мультиметра, установить величину входного напряжения равной -8 В. Занести в таблицу 1 величину напряжение $U_{\text{вых}}$ согласно показаниям правого мультиметра.

18. Заполнить таблицу 6.2, изменяя величину напряжения на входе инвертирующего усилителя.

Таблица 6.2 – Напряжение на выходе инвертирующего ОУ ($R_4=50\text{кОм}$)

[illegible]

19. Установить переключатель SA1 в положение 3 ($R4=100\text{кОм}$).

20. Поворачивая ручку потенциометра RP1, и наблюдая показания левого мультиметра, установить величину входного напряжения равной -3 В. Занести в таблицу 6.3 величину напряжения $U_{вых}$ согласно показаниям правого мультиметра.

21. Заполнить таблицу 6.3, изменяя величину напряжения на входе инвертирующего усилителя.

Таблица 6.3 – Напряжение на выходе инвертирующего ОУ ($R4=100\text{кОм}$)

[illegible]

22. Установить переключатель SA1 в положение 4 ($R4=150\text{кОм}$).

23. Поворачивая ручку потенциометра RP1, и наблюдая показания левого мультиметра, установить величину входного напряжения равной -2,5 В. Занести в таблицу 6.4 величину напряжения $U_{вх}$ согласно показаниям правого мультиметра.

24. Заполнить таблицу 6.4, изменяя величину напряжения на входе инвертирующего усилителя.

Таблица 6.4 – Напряжение на выходе инвертирующего ОУ ($R_4=150\text{кОм}$)

[illegible]

25. Установить переключатель SA1 в положение 5 ($R4=200\text{кОм}$).

26. Поворачивая ручку потенциометра RP1, и наблюдая показания левого мультиметра, установить величину входного напряжения равной -1,25 В. Занести в таблицу 6.5 величину напряжения $U_{вх}$ согласно показаниям правого мультиметра.

27. Заполнить таблицу 6.5, изменяя величину напряжения на входе инвертирующего усилителя.

Таблица 6.5 – Напряжение на выходе инвертирующего ОУ ($R_4=200\text{кОм}$)

[illegible]

6.4.2. Исследование неинвертирующего усилителя с обратной связью

Снятие амплитудной характеристики неинвертирующего усилителя с обратной связью производится по схеме, показанной на рис. 6.14.

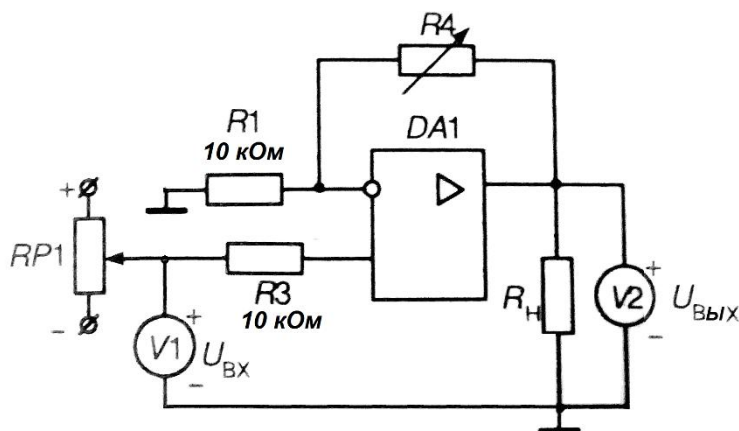


Рис. 6.14. Схема неинвертирующего усилителя

Для выполнения работы необходимо осуществить следующие действия:

1. Модуль питания стенда (220 В) **QF1** установить в положение **ВЫКЛЮЧЕНО**.

2. В модуле **ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ** извлечь из гнезд все перемычки (рис. 6.12).

3. Установить переключатель **ПИТАНИЕ** в положение **Выкл.**

4. На модуле **МУЛЬТИМЕТРЫ** установить переключатели режима измерения мультиметров в положение измерения напряжения в диапазоне 20 В (рис. 6.13).

5. Черный щуп левого мультиметра вставить в гнездо разъема **X14**.

6. Красный щуп левого мультиметра вставить в гнездо разъема **X12**.

7. Красный щуп правого мультиметра вставить в гнездо разъема **X10**.

8. Черный щуп правого мультиметра вставить в гнездо разъема **X15**.

9. Соединить перемычкой гнезда разъемов **X10** и **X6**.

10. Соединить перемычкой гнезда разъемов **X4** и **X14**.

11. Соединить перемычкой гнезда разъемов **X3** и **X12**.

12. Установить переключатель **SA1** в положение 1 ($R4=20\text{ кОм}$).

13. Модуль питания стенда (220 В) **QF1** установить в положение **ВКЛЮЧЕНО**. Включить питание модуля **ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ**.

14. Поворачивая ручку потенциометра **RP1**, и наблюдая показания левого мультиметра, установить величину входного напряжения равной -7 В. Занести в таблицу 6.6 величину напряжения $U_{\text{вых}}$ согласно показаниям правого мультиметра.

15. Заполнить таблицу 6.6, изменяя величину напряжения на входе инвертирующего усилителя.

Таблица 6.6 – Напряжение на выходе неинвертирующего ОУ ($R_4=20\text{кОм}$)

U _{ВХ} , В	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
U _{ВЫХ} , В															

16. Установить переключатель SA1 в положение 2 ($R_4=50\text{кОм}$).

17. Поворачивая ручку потенциометра RP1, и наблюдая показания левого мультиметра, установить величину входного напряжения равной -7 В. Занести в таблицу 1 величину напряжения U_{ВЫХ} согласно показаниям правого мультиметра.

18. Заполнить таблицу 6.7, изменяя величину напряжения на входе инвертирующего усилителя.

Таблица 6.7 – Напряжение на выходе неинвертирующего ОУ ($R_4=50\text{кОм}$)

U _{ВХ} , В	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
U _{ВЫХ} , В															

19. Установить переключатель SA1 в положение 3 ($R_4=100\text{кОм}$).

20. Поворачивая ручку потенциометра RP1, и наблюдая показания левого мультиметра, установить величину входного напряжения равной -7 В. Занести в таблицу 3 величину напряжения U_{ВЫХ} согласно показаниям правого мультиметра.

21. Заполнить таблицу 6.8, изменяя величину напряжения на входе инвертирующего усилителя.

Таблица 6.8 – Напряжение на выходе неинвертирующего ОУ ($R_4=100\text{кОм}$)

U _{ВХ} , В	-3	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
U _{ВЫХ} , В													

22. Установить переключатель SA1 в положение 4 ($R_4=150\text{кОм}$).

23. Поворачивая ручку потенциометра RP1, и наблюдая показания левого мультиметра, установить величину входного напряжения равной -7 В. Занести в таблицу 6.9 величину напряжения U_{ВЫХ} согласно показаниям правого мультиметра.

24. Заполнить таблицу 6.9, изменяя величину напряжения на входе инвертирующего усилителя.

Таблица 6.9 – Напряжение на выходе неинвертирующего ОУ ($R_4=150\text{кОм}$)

U _{ВХ} , В	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1	1,5	1	2	2,5
U _{ВЫХ} , В												

25. Установить переключатель SA1 в положение 5 ($R_4=200\text{кОм}$).

26. Поворачивая ручку потенциометра RP1, и наблюдая показания левого мультиметра, установить величину входного напряжения равной -7 В. Занести в таблицу 5 величину напряжения U_{ВЫХ} согласно показаниям правого мультиметра.

27. Заполнить таблицу 6.10, изменяя величину напряжения на входе инвертирующего усилителя.

Таблица 6.10 – Напряжение на выходе инвертирующего ОУ ($R_4=200\text{кОм}$)

$U_{\text{ВХ}}, \text{В}$	-1,25	-1	-0,75	-0,5	-0,25	0	0,25	0,5	0,75	1	1,25
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{В}$											

6.4.3. Исследование АЧХ ОУ с обратной связью

Снятие АЧХ неинвертирующего ОУ с обратной связью производится по схеме, показанной на рис. 6.15.

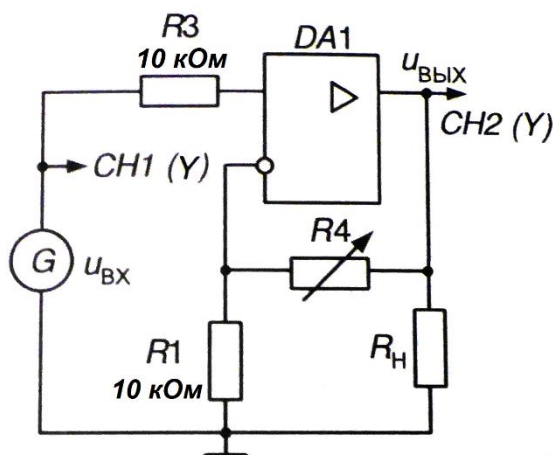


Рис. 6.15. Схема исследования АЧХ ОУ

Для выполнения работы необходимо осуществить следующие действия:

1. Выключатель модуля питания стенда (220 В) **QF1** установить в положение **ВЫКЛЮЧЕНО**.
2. В модуле **ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ** извлечь из гнезд все перемычки (рис. 6.12).
3. Установить переключатель **ПИТАНИЕ** в положение **Выкл.**
4. Соединить перемычкой гнезда разъемов **X10** и **X6**.
5. Соединить перемычкой гнезда разъемов **X4** и **X14**.
6. Соединить перемычкой гнездо разъема **X12** и гнездо разъема **Выход** в модуле **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** (рис. 6.16).
7. Соединить перемычкой гнездо разъема **X14** и гнездо разъема **⊥** в модуле **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**.
8. Установить переключатель **SA1** в положение 1 ($R_4=20\text{кОм}$).
9. В модуле **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** в секции **Частота** установить переключатель **множитель x1**, регулятор **f, Гц** в положение **100** (рис. 6.16).
10. В модуле **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** в секции **Форма** установить переключатель в положение **~ 10 В** (рис. 6.16).



Рис. 6.16. Вид модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**

10. Красный щуп 1 канала осциллографа подключить к гнезду разъема **X12**.

11. Черный щуп 1 канала осциллографа подключить к гнезду разъема **X15**.

12. Красный щуп 2 канала осциллографа подключить к гнезду разъема **X10**.

13. Черный щуп 2 канала осциллографа подключить к гнезду разъема **X15**.

14. Выключатель модуля питания стенда (220 В) **QF1** установить в положение **ВКЛЮЧЕНО**.

15. Выключатель модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР (Сеть)** установить в положение **ВКЛЮЧЕНО**.

16. Включить осциллограф.

17. На передней панели осциллографа нажать кнопку **ИЗМЕР** (рис. 6.17).

Должны быть подсвечены кнопки на передней панели **КАН1**, **КАН2**, **ИЗМЕР** (если нет нажать соответствующую кнопку).

18. На передней панели осциллографа нажать кнопку **МЕНЮ ВКЛ/ВЫКЛ** (рис. 6.17). Должны быть подсвечены кнопки на передней панели **КАН1**, **КАН2**, **ИЗМЕР** (если нет нажать соответствующую кнопку).



Рис. 6.17. Вид передней панели осциллографа

19. На передней панели осциллографа нажать кнопку **МЕНЮ ВКЛ/ВЫКЛ** (рис. 6.17). Вид экранного меню показан на рис. 6.18.

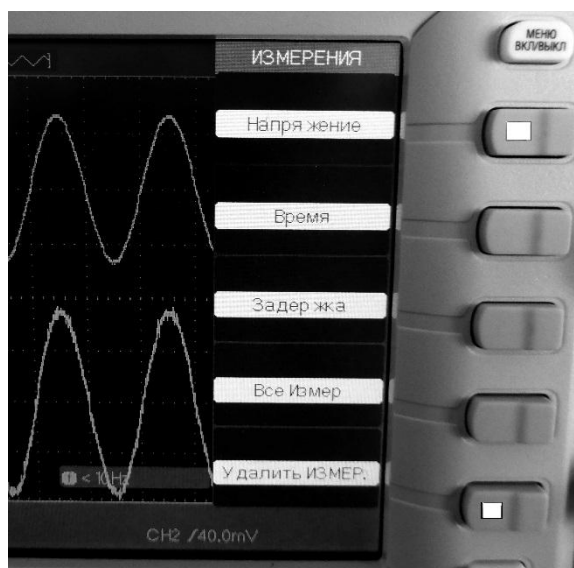


Рис. 6.18. Вид экранного меню осциллографа

20. Нажать кнопку экранного меню **Удалить ИЗМЕР.**

21. Нажать кнопку экранного меню **Напряжение**. Вид экранного меню **Напряжение** показан на рис. 6.19.



Рис. 6.19. Вид экранного меню **Напряжение**

22. Нажимая кнопку экранного меню **Источник**, выбрать **КАН1**

23. Нажимая кнопку экранного меню **Тип**, выбрать **Vмакс**.

24. Нажать кнопку экранного меню **Добавить**.

25. Нажимая кнопку экранного меню **Источник**, выбрать **КАН2**

26. Нажимая кнопку экранного меню **Тип**, выбрать **Vмакс**.

27. Нажать кнопку экранного меню **Добавить**.

Результаты измерения напряжений **V_{макс}** должны отображаться в левом нижнем углу экрана (рис. 6.20). Значение напряжения **V_{макс}** для 1 канала отображается желтым цветом, для 2 канала - синим.

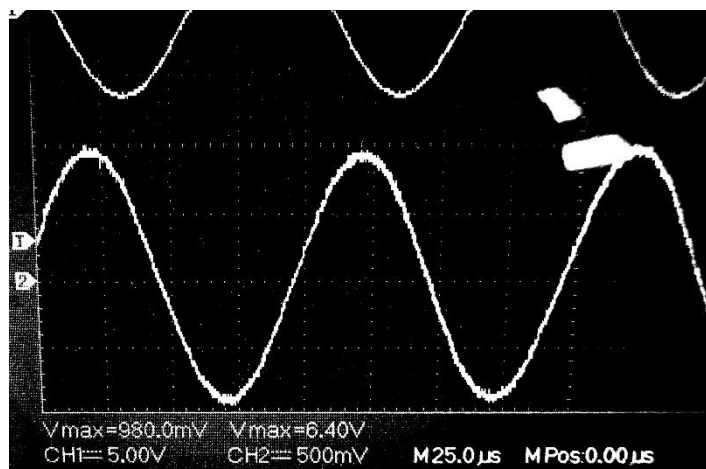


Рис. 6.20. Результаты измерения напряжений **V_{макс}**

28. Поворачивая ручку **Амплитуда**, модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**, и наблюдая показания **V_{макс}** для 1 канала, установить величину входного напряжения в пределах 400 - 600 мВ.

29. Нажать кнопку **АВТО** (на правой стороне передней панели осциллографа, синего цвета) и подождать 5 секунд.

30. Поворачивая ручку **Амплитуда**, модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**, и наблюдая показания **V_{макс}** для 1 канала, установить величину входного напряжения в пределах 480-520 мВ.

Занести в таблицу 1 величину напряжение **U_{вых}** в соответствии с показаниями на экране **V_{макс}** для 2 канала входа осциллографа, при частоте входного напряжения 100 Гц.

31. Заполнить таблицу 6.11, изменяя частоту напряжения на входе инвертирующего усилителя при помощи переключателя **множитель** модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**.

Таблица 6.11 – Напряжение на выходе неинвертирующего ОУ ($R_4=20\text{кОм}$)

f, Гц	100	1000	10000	100000
U _{вых} , В				

32. Установить переключатель SA1 в положение 2 ($R_4=50\text{кОм}$).

33. Нажать кнопку **АВТО** и подождать 5 секунд.

34. Заполнить таблицу 6.12, изменяя частоту напряжения на входе инвертирующего усилителя при помощи переключателя **множитель** модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**.

Таблица 6.12 – Напряжение на выходе неинвертирующего ОУ ($R_4=50\text{кОм}$)

f, Гц	100	1000	10000	100000
U _{вых} , В				

35. Установить переключатель SA1 в положение 3 ($R4=100\text{кОм}$).

36. Нажать кнопку **АВТО** и подождать 5 секунд.

37. Заполнить таблицу 6.13, изменяя частоту напряжения на входе инвертирующего усилителя при помощи переключателя **множитель** модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**.

Таблица 6.13 – Напряжение на выходе неинвертирующего ОУ ($R4=100\text{кОм}$)

f, Гц	100	1000	10000	100000
U _{вых} , В				

38. Установить переключатель SA1 в положение 4 ($R4=150\text{кОм}$).

39. Нажать кнопку **АВТО** и подождать 5 секунд.

40. Заполнить таблицу 6.14, изменяя частоту напряжения на входе инвертирующего усилителя при помощи переключателя **множитель** модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**.

Таблица 6.14 – Напряжение на выходе неинвертирующего ОУ ($R4=150\text{кОм}$)

f, Гц	100	1000	10000	100000
U _{вых} , В				

41. Установить переключатель SA1 в положение 5 ($R4=200\text{кОм}$).

42. Заполнить таблицу 6.15, изменяя частоту напряжения на входе инвертирующего усилителя при помощи переключателя **множитель** модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**.

Таблица 6.15 – Напряжение на выходе неинвертирующего ОУ ($R4=200\text{кОм}$)

f, Гц	100	1000	10000	100000
U _{вых} , В				

6.5. Обработка экспериментальных данных

1. Используя данные таблиц 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5 построить амплитудные характеристики инвертирующего усилителя.

2. Используя амплитудные характеристики, рассчитать коэффициенты усиления по напряжению для различных величин $R4$.

3. Сравнить полученные коэффициенты усиления по напряжению для различных величин $R4$ с теоретическими.

4. Сделать выводы.

5. Используя данные таблиц 6.6, 6.7, 6.8, 6.9, 6.10 построить амплитудные характеристики неинвертирующего усилителя.

6. Используя амплитудные характеристики, рассчитать коэффициенты усиления по напряжению для различных величин $R4$.

7. Сравнить полученные коэффициенты усиления по напряжению для различных величин $R4$ с теоретическими.

8. Сделать выводы.

9. Используя данные таблиц 6.11, 6.12, 6.13, 6.14, 6.15, рассчитать коэффициенты усиления по напряжению неинвертирующего усилителя для различных частот входного сигнала.

10. Используя данные таблиц 6.11, 6.12, 6.13, 6.14, 6.15 построить логарифмические АЧХ характеристики неинвертирующего усилителя.

11. Сделать выводы.

12. Используя логарифмические АЧХ характеристики ОУ рассчитать частоту единичного усиления.

13. Используя логарифмические АЧХ характеристики ОУ рассчитать коэффициент усиления ОУ без ООС для своего варианта $f_{вх}$ (Таблица 6.16).

14. Рассчитать коэффициент усиления неинвертирующего ОУ для своего варианта R1, R4 (таблица 6.16).

15. Рассчитать коэффициент усиления инвертирующего ОУ для своего варианта R1, R4 (таблица 6.16).

16. Построить логарифмическую АЧХ неинвертирующего ОУ для своего варианта R1, R4 (таблица 6.16).

17. Рассчитать величину R4 для своего варианта K_{oc} (таблица 6.16, R1=10 кОм). Нарисовать схему усилителя.

18. Рассчитать величину $U_{вых}$ инвертирующего ОУ для своего варианта $U_{вх}$, R1, R4 (таблица 6.16).

19. Рассчитать величину $U_{вых}$ неинвертирующего ОУ для своего варианта $U_{вх}$, R1, R4 (таблица 6.16).

20. Рассчитать K_{oc} неинвертирующего ОУ для двух случаев K_{oy} ($K_{oy}=10000$, $K_{oy}=20000$). Взять R1 и R4 для своего варианта (таблица 6.16).

6.6. Содержание отчета о выполнении лабораторной работы

Отчёт должен содержать:

- титульный лист;
- цель лабораторной работы;
- схемы экспериментов;
- таблицы и графики результатов;
- расчеты;
- выводы.

Отчёт по лабораторной работе должен быть выполнен в соответствии требованиями ГОСТ.

Таблица 6.16

№ варианта	R1, кОм	R4, кОм	U _{вх.} , В	f _{вх.} , кГц	K _{ос}
1	1	12	0,07	10	5
2	2	15	-0,15	15	-6
3	3	20	0,2	20	7
4	4	25	-0,25	25	-8
5	5	30	0,3	30	9
6	6	35	-0,07	35	-10
7	7	40	0,15	10	11
8	8	12	-0,2	15	-12
9	9	15	0,25	20	13
10	10	20	-0,3	25	-14
11	1	25	0,07	30	15
12	2	30	-0,15	35	-16
13	3	35	0,2	10	17
14	4	40	-0,25	15	-18
15	5	12	0,3	20	19
16	6	15	-0,07	25	-20
17	7	20	0,15	30	21
18	8	25	-0,2	35	-22
19	9	30	0,25	10	23
20	10	35	-0,3	15	-24
21	1	40	0,07	20	25
22	2	12	-0,15	25	-5
23	3	15	0,2	30	6
24	4	20	-0,25	35	-7
25	5	25	0,3	10	8

6.7. Порядок защиты работы

Защита производится при наличии отчета и состоит в объяснениях полученных результатов и ответах на контрольные вопросы.

6.8. Контрольные вопросы

1. Что такое ОУ?
2. Какие характеристики должен иметь идеальный ОУ?
3. Какие характеристики имеют реальные ОУ?
4. Что такое ООС?
5. Чем определяется глубина ООС?
6. Чем определяется $K_{ос}$?
7. Как рассчитать цепи ООС для обеспечения заданной величины $K_{ос}$?
8. Что показывает АЧХ ОУ?
9. Что такое частота единичного усиления?
10. Как построить логарифмическую АЧХ?
11. Как построить логарифмическую АЧХ с ООС?
12. От чего зависит максимальная величина U_{вых.} ОУ?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Миловзоров, О. В. Электроника : учебник для вузов / О. В. Миловзоров, И. Г. Панков. – 6-е изд., перераб. и доп. – Москва : Издательство Юрайт, 2022. – 344 с. – (Высшее образование). – ISBN 978-5-534-00077-1. – Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. – URL: <https://urait.ru/bcode/488848> (дата обращения: 24.03.2022).

2. Основы электротехники, микроэлектроники и управления в 2 т. Том 2 : учебное пособие для академического бакалавриата / Ю. А. Комиссаров, Л. С. Гордеев, Г. И. Бабокин, Д. П. Вент. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : Издательство Юрайт, 2018. – 313 с. – (Бакалавр. Академический курс). – ISBN 978-5-534-05432-3. – Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. – URL: <https://urait.ru/bcode/421609> (дата обращения: 24.03.2022).

3. Шишкин, Г. Г. Электроника : учебник для бакалавров / Г. Г. Шишкин, А. Г. Шишкин. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : Издательство Юрайт, 2017. – 703 с. – (Бакалавр. Академический курс). – ISBN 978-5-9916-3422-9. – Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. – URL: <https://urait.ru/bcode/396718> (дата обращения: 24.03.2022).

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ (ЭЛЕКТРОНИКА). ПРАКТИКУМ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

*Методические указания
к выполнению лабораторных работ*

Составитель : Осадченко Александр Евгеньевич

В авторской редакции

Изд. № 107/2022. Объем 6,25 п.л. Усл. печ. л. 5,81. Уч.-изд. л. 6,13.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»