

**МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РФ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЛУЖБА
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ**

**Кафедра вычислительных машин, комплексов,
систем и сетей.**

Б.Л. Резников, В.Н. Попов

Электроника

***Лабораторные работы
Автоматизированная среда Multisim***

*для студентов II курса
специальности 230101
дневного обучения*

Москва - 2008

Содержание

Содержание	3
1. Введение	4
2. Порядок проведения лабораторных занятий	5
3. Лабораторная работа №1	6
3.1 Теоретические сведения	6
3.1.1 Классификация диодов	9
3.2 Порядок проведения работы	14
3.3 Упражнения и задачи	18
3.4 Контрольные вопросы	18
4. Лабораторная работа №2	19
4.1 Теоретические сведения	20
4.1.1 Биполярные транзисторы	20
4.1.2 Полевые транзисторы	28
4.2 Порядок проведения работы	36
4.3 Упражнения и задачи	40
4.4 Контрольные вопросы	40
5. Лабораторная работа №3	41
5.1 Теоретические сведения	41
5.1.1 Структурная схема операционного усилителя	41
5.1.2 Основные расчетные соотношения	42
5.1.3 Основные типы схем на базе операционного усилителя	44
5.1.4 Компараторы	47
5.1.5 Классификация операционных усилителей	48
5.2 Порядок проведения работы	49
5.3 Результаты выполнения	54
5.4 Упражнения и задачи	55
5.5 Контрольные вопросы	56
6. Лабораторная работа №4	57
6.1 Теоретические сведения	57
6.1.1 Базовый логический элемент ТТЛ логики	57
6.1.2 Базовый логический элемент ЭСЛ логики	60
6.2 Порядок проведения работы	62
6.3 Расчеты	65
6.4 Контрольные вопросы	66
6.5. Литература	66
7. Приложение А – Руководство по Multisim	67
7.1 Элементная база и измерительные приборы	67
7.2 Добавление элементов и работа с приборами	70

1. Введение

Данные пособие содержит описание лабораторных работ по электронике для студентов специальности 230101 “Вычислительные машины, комплексы, системы и сети”.

Работы проводятся на компьютере, в среде компьютерного моделирования **Multisim & ElectronicsWorkbench**. Студентам, желающим углубить свои знания в области компьютерного анализа электрических цепей, можно посоветовать приложения такие, как MicroCap 7, APLAC, DesignLab, HyperSignalBlockDesign, PCAD и другие.

Multisim – простой в использовании современный инструмент конструирования электронных приборов. Он состоит из набора взаимосвязанных модулей, предназначенных для составления, анализа и настройки аналоговых, цифровых, радиочастотных и гибридных схем, включая программируемые компоненты, проектирования топологии и разводки печатных плат, оптимизации расположения деталей и дизайна корпуса.

Multisim, являясь серьезнейшим решением такого рода, в обращении интуитивно прост и нагляден, что делает его незаменимым при использовании в учебном процессе. Студенты, начинающие свой путь в области электротехники и электроники, гораздо быстрее смогут направить, полученные теоретические знания в практическое русло.

Система виртуального схемотехнического моделирования Multisim является новой версией, уже зарекомендовавшего себя, семейства программ фирмы Electronics Workbench. Соответственно она включает в себя все достоинства предыдущих версий и расширенные возможности, которые сильно повышают функциональные технические возможности программы.

Недостатком данной среды является отсутствие локализованной версии и базы данных по отечественным элементам.

2. Порядок проведения лабораторных занятий

Каждое лабораторное занятие должно включать в себя следующие этапы:

1. Подготовка к работе (проводится студентом до начала лабораторного занятия).
 - 1.1 Изучение теоретических сведений и примеров решения задач по теме занятия.
 - 1.2 Подготовка необходимых материалов (заготовки отчета, таблиц, графиков и т.д.)
2. Допуск к лабораторной работе.

Проводится преподавателем после личной беседы с каждым студентом. Вопросы, знание которых необходимо для выполнения работ, приведены в конце каждой лабораторной работы.

Если в результате опроса выяснится неподготовленность студента по теме, он не допускается к работе и направляется на доработку материала. До окончания занятий студент должен находиться в лаборатории.

3. Выполнение лабораторной работы.

После допуска студенты приступают к выполнению лабораторной работы в соответствии с данными методическими указаниями. При выполнении работы необходимо обязательно соблюдать правила техники безопасности, с которыми должен ознакомиться каждый студент.

По окончании выполнения работы студент должен сообщить об этом преподавателю, после чего приступить к обработке результатов и составлению отчета.

4. Оформление отчета и защита.

Отчет оформляется индивидуально каждым студентом. Он должен содержать:

- 4.1. Цель работы.
- 4.2. Задание на выполнение.
- 4.3. Чертежи всех использованных и отработанных схем (каждая схема должна иметь название).
- 4.4. Расчетные формулы и результаты измерений.
- 4.5. Анализ результатов и полученных экспериментально зависимостей.

Работа считается выполненной при наличии в отчете всех результатов измерений и необходимых вычислений, а также всех необходимых схем и графиков зависимостей.

По завершении оформления отчета студент должен защитить данную работу.

На защите студент обязан представить преподавателю отчет о проделанной работе. По отчету проводится обсуждение проделанной работы, по результатам которого

преподаватель ставит отметку о зачете работы или отправляет студента на доработку данной темы.

3. Лабораторная работа №1.

«Исследование схем на полупроводниковых диодах».

Цель работы:

Целью работы является изучение конструкции, принципов действия, классификации полупроводниковых диодов, а также освоение методов моделирования основных типов схем, использующих полупроводниковые диоды, в среде **Multisim**.

Содержание работы:

1. Исследование характеристик и параметров диодов. Построение ВАХ.
2. Исследование параметров и характеристик стабилитронов.
3. Исследование схем выпрямителей.

Инструменты:

- Функциональный генератор (Эл. № 18, 27).
- Источник постоянного напряжения (Эл. № 1).
- Источник переменного напряжения (Эл. № 8).
- Диод (Эл. № 4, 22).
- Стабилитрон (Эл. № 6).
- Диодный мост (Эл. № 5).
- Резисторы (Эл. № 2).
- Трансформаторы (Эл. № 7).
- Мультиметр (Эл. № 19)
- Амперметр (Эл. № 16)
- Вольтметр (Эл. № 15)
- Осциллограф (Эл. № 17, 26).

3.1 Теоретические сведения

Диод – полупроводниковый прибор с одним р-п переходом и двумя выводами, обладающий вентильным свойством (ток в одном из направлений проводится значительно лучше, чем в другом).

р-п переход возникает в небольшой зоне соединения полупроводника р-типа и полупроводника п-типа, в которой происходит диффузия электронов из п-области в

р-область. Этот процесс продолжается до тех пор, пока на границе р-п перехода в обе стороны не возникает область, свободная от основных носителей (свободных дырок или электронов примеси), которая называется обеднённой. Кроме того, на подложке присутствуют ещё и не основные носители зарядов, возникающие в результате тепловых процессов. В обеднённой зоне возникает внутренняя ЭДС, которая называется потенциальным барьером, препятствующая дальнейшему движению электронов через р-п переход при достижении равновесия. Для того, чтобы преодолеть барьер, необходимо подключить внешний источник ЭДС.

Вольт-амперная характеристика диода (зависимость тока, протекающего через диод от приложенного к нему напряжения) описывается выражением:

$$I = I_s (e^{\frac{U_D}{\varphi_t}} - 1)$$

где:

I_s – значение тока насыщения, теплового или обратного тока.

U_D – напряжение на р-п переходе (на диоде).

$\varphi_t = k \cdot T / q$ – тепловой потенциал, равный контактной разности потенциалов на границе р-п перехода при отсутствии внешнего напряжения (при нормальной температуре $\varphi_t = 0.025 \text{ В}$).

k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, q – заряд электрона.

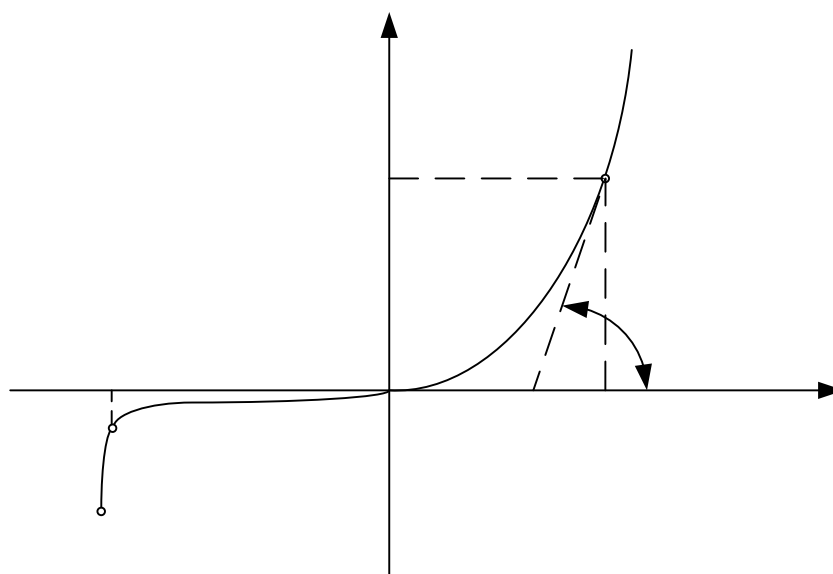


Рисунок 1 – ВАХ диода.

Полупроводниковый диод характеризуется статическим и дифференциальным (динамическим) сопротивлениями, легко определяемыми по ВАХ. Дифференциальное сопротивление (R_d) численно равно отношению бесконечно малого приращения напряжения к соответствующему приращению тока в заданном режиме работы диода и может быть определено графически как котангенс угла A на ВАХ.

Статическое сопротивление ($R_{ст}$) численно равно отношению напряжения на элементе U_e к прошедшему через него току I_e (Рисунок 1).

При прямом включении источника питания обеднённая зона в полупроводнике сужается, а при значительном напряжении почти совсем пропадает (прямое смещение) – прямая ветвь ВАХ диода. При этом на p-n переходе присутствует постоянное падение напряжения (0,1-0,2)В для германия и 0,6В – для кремния.

Ток через диод в данном случае можно определить по формуле:

$$I_{пр} = \frac{(E - U_{np})}{R}$$

При обратном включении источника питания обедненная область p-n перехода увеличивается, расширяя границу раздела и тем самым препятствуя прохождению тока (обратная ветвь ВАХ p-n перехода). Здесь происходит обратное смещение p-n перехода. Ток через диод определяется как:

$$I_{обр} = \frac{(E - U_{обп})}{R}$$

Диффузионная ёмкость возникает вблизи контактного слоя p-n перехода за счёт изменения заряда, вызванного изменением прямого напряжения.

Зависимость $C_{диф}$ от значения прямого тока $I_{пр}$ имеет вид:

$$C_{диф} = \frac{q}{kT} (I_{пр} + I_{обп}) \tau_p, \text{ где } \tau_p - \text{ время жизни дырок в базе диода (в переходе n-типа).}$$

Диффузионная ёмкость будет тем больше, чем больше прямой ток через переход и чем больше время жизни не основных носителей заряда в области базы диода (область с меньшей концентрацией носителей, n-область). Диффузионная ёмкость обращается в ноль при $I_{пр} = -I_{обп}$. На внешних зажимах $C_{диф}$ даёт емкостной фазовый сдвиг между током и напряжением.

Барьерная ёмкость возникает при обратном напряжении на переходе и обусловлена изменением в нём объёмного заряда.

$$C_{общ} = C_{диф} + C_{бар}. \quad C_{диф} > C_{бар} \text{ (по абсолютной величине).}$$

3.1.1 Классификация диодов

Все диоды можно разбить на две большие группы – выпрямительные и специальные.

Выпрямительный диод использует вентильные свойства р-п перехода и применяется в выпрямителях переменного тока. Он представляет собой электронный ключ, управляемый приложенным к нему напряжением. При прямом напряжении ключ замкнут, а при обратном – разомкнут. Однако в обоих этих случаях ключ не является идеальным. При подаче прямого напряжения за счёт падения напряжения $U_{пр}$ на открытом диоде выпрямленное напряжение, снимаемое с нагрузки, несколько ниже входного напряжения. Значение $U_{пр}$ для открытых германиевых диодов порядка 0.5В, а для кремниевых – 1.5В.

Основными параметрами выпрямительных диодов являются:

$I_{пр\ ср\ max}$ – максимальное (за период входного напряжения) значение среднего прямого тока диода;

$U_{обр\ доп}$ – наибольшее допустимое значение постоянного обратного напряжения диода;

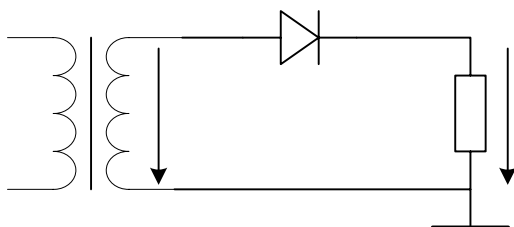
f_{max} – максимальная допустимая частота входного напряжения;

$U_{пр}$ – прямое падение напряжения на диоде при заданном прямом токе;

U_{max} – максимальное обратное напряжение на диоде.

Выпрямители напряжения, построенные с использованием полупроводниковых диодов, можно разделить на однополупериодные, двухполупериодные со средней точкой и двухполупериодные мостовые.

Однополупериодный:



Основные расчётные формулы:

$$U_{ср} = U_{вх} * \sqrt{2/\pi}; \quad U_{вх} = 2,22 * U_{ср};$$

$$I_{ср} = U_{ср} / R_H; \quad \epsilon = \pi/2 = 1,57;$$

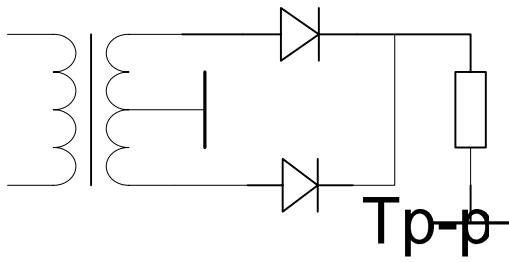
$$U_{обр\ max} = \sqrt{2} * U_{вх} = \pi * U_{ср}; \quad I_{д\ ср} = I_{ср};$$

$$I_{д\ max} = \sqrt{2} * U_{вх} / R_H = \pi * I_{ср};$$

$$f_{вых} = f_{вх}.$$

Рисунок 2 – СхЭ (схема электрическая принципиальная) однополупериодного выпрямителя.

Двухполупериодный со средней точкой:



Основные расчётные формулы:

$$U_{cp} = U_2 * \sqrt{2/\pi} = 0,9 * U_2,$$

где U_2 – действующее значение каждой половины вторичной обмотки трансформатора.

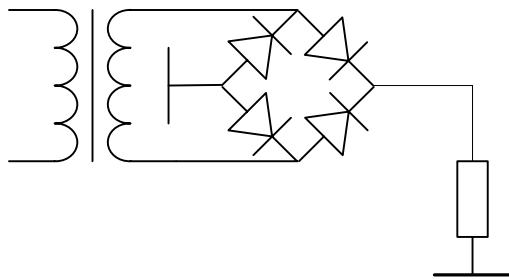
$$U_2 = 1,11 * U_{cp}; I_{cp} = U_{cp} / R_n; \varepsilon = 0,67;$$

$$U_{обр\ max} = \sqrt{2} * U_2 = \pi * U_{cp}; I_{д\ ср} = 1/2 * I_{cp};$$

$$I_{д\ max} = \sqrt{2} * U_2 / R_n = I_{cp} * \pi / 2; f_{вых} = 2 * f_{вх}.$$

Рисунок 3 – СхЭ двухполупериодного выпрямителя со средней точкой.

Самой применяемой схемой является схема мостового двухполупериодного выпрямителя:



Основные расчётные формулы:

$$U_{cp} = U_{вх} * 2 * \sqrt{2/\pi} = 0,9 * U_{вх};$$

$$U_{вх} = 1,11 * U_{cp}; I_{cp} = U_{cp} / R_n; \varepsilon = 0,67;$$

$$U_{обр\ max} = \sqrt{2} * U_{вх} = \pi * U_{cp} / 2; I_{д\ ср} = 1/2 * I_{cp};$$

$$I_{д\ max} = \sqrt{2} * U_{вх} / R_n = I_{cp} * \pi / 2; f_{вых} = 2 * f_{вх}.$$

Рисунок 4 – СхЭ мостового двухполупериодного выпрямителя.

где:

U_{cp} и I_{cp} – среднее значение напряжения и тока выпрямителя;

$U_{обр}$ – максимальное значение обратного напряжения на диоде(при воздействии отрицательной полуволны);

ε – коэффициент пульсации выходного напряжения;

$I_{д\ ср}$ – среднее значение тока диода;

$I_{д\ max}$ – максимальное значение тока диода;

$f_{вх}$ – входная частота;

$f_{вых}$ – выходная частота.

На мостовом двухполупериодном выпрямителе частота выходного сигнала в два раза больше частоты входного сигнала. Кроме того, максимальное обратное напряжение в два раза меньше, чем у однополупериодного и двухполупериодного со средней точкой. Это позволяет диодам работать в более “щадящем” режиме. Поэтому мостовая схема выпрямителя самая распространённая.

По мощности выпрямительные диоды классифицируют на:

- Маломощные ($I_{пр\ ср\ max} \leq 0,3A$);
- Средней мощности ($0,3A < I_{пр\ ср\ max} \leq 10A$);
- Большой мощности ($I_{пр\ ср\ max} > 10A$).

По частоте выпрямительные диоды классифицируют на:

- Низкочастотные ($f_{max} < 1000Гц$);
- Высокочастотные ($f_{max} > 1000Гц$).

Диод Шотки.

Выполнен на выпрямляющем переходе некоторых видов металла с полупроводником. Его отличает меньшее, чем у диодов с p-n переходом, напряжение $U_{пр}$ и более высокие частотные характеристики. Применяется для увеличения быстродействия импульсных(ключевых) схем.

Стабилитрон.

Полупроводниковый прибор, сконструированный для работы в режиме электрического пробоя, так называемом лавинном пробое(для кремниевого стабилитрона пробой наступает при $U_{обр}=5B$). В указанном режиме при значительном изменении тока стабилитрона напряжение изменяется незначительно(стабилизируется).

К основным параметрам стабилитрона относятся:

$U_{ст}$ – номинальное напряжение стабилизации при заданном токе;

R_d – дифференциальное сопротивление при заданном токе;

$I_{ст}$ – ток стабилизации;

$P_{ст}$ – рассеиваемая мощность;

$I_{ст} = (E - U_{ст})/R$;

$P_{ст} = I_{ст} * U_{ст}$;

Варикап.

Полупроводниковый диод, который работает как переменная ёмкость. При подаче на него обратного напряжения, возникает барьерная ёмкость, которая уменьшается с увеличением этого напряжения по модулю.

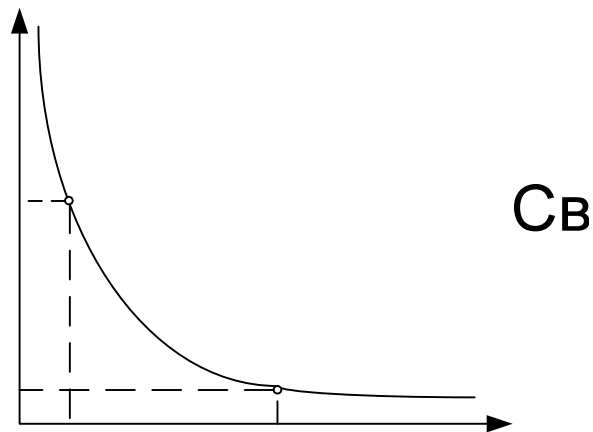


Рисунок 5 – зависимость ёмкости варикапа от обратного напряжения.

Туннельный диод.

Занимает особое место среди полупроводниковых диодов из-за свойственной ему положительной обратной связи по напряжению и хорошим динамическим свойствам. Его ВАХ имеет участок отрицательного дифференциального сопротивления (участок CD).

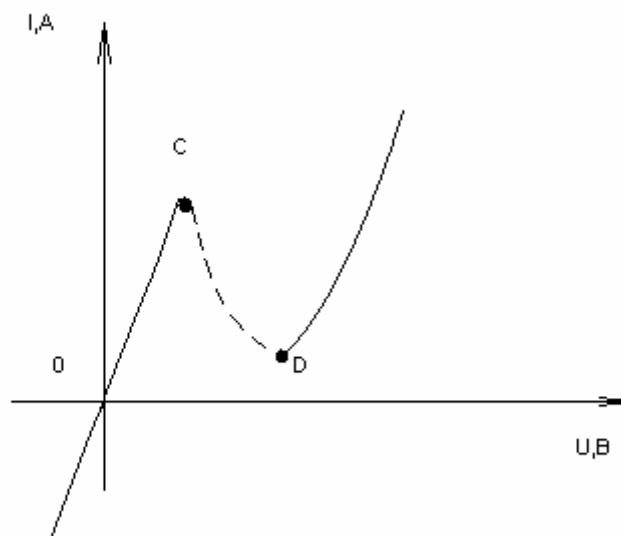


Рисунок 6 – ВАХ туннельного диода.

Излучающий диод(светодиод).

Полупроводниковый диод, излучающий из области p-n перехода кванты энергии.

По характеристике излучения светодиоды делятся на две группы:

- диоды с излучением в видимой области спектра - светодиоды;

- диоды с излучением в инфракрасной области спектра, получившие название ИК - диоды.

Принцип действия обеих групп диодов одинаков и базируется на самопроизвольной рекомбинации носителей заряда при прямом токе через выпрямляющий электрический переход. Известно, что рекомбинация носителей заряда сопровождается освобождением кванта энергии. Спектр частот последнего определяется типом исходного материала.

Светодиоды применяются в световых индикаторах, а ИК-диоды – в оптоэлектронных устройствах.

Фотодиод.

Полупроводниковый прибор, принцип действия которого основан на использовании внутреннего фотоэффекта – генерации в полупроводнике под действием света(фотонов) свободных носителей заряда.

Фотодиод используют для преобразования светового излучения в электрический ток.

Условно-графические обозначения диодов приведены на Рисунке 7.

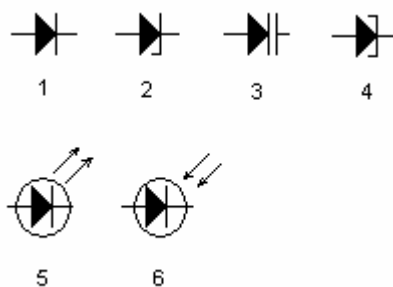


Рисунок 7 – УГО диодов.

1. Выпрямительный или импульсный диод.
2. Стабилитрон.
3. Варикап.
4. Туннельный диод.
5. Излучающий диод.
6. Фотодиод.

3.2 Порядок проведения работы

В процессе выполнения работы необходимо выполнить следующие эксперименты:

1. Полупроводниковые диоды.

1.1 Измерение напряжения и вычисление тока, протекающего через диод.

Соберите схему, показанную на Рисунке 8. После включения схемы мультиметр должен показать напряжение при прямом смещении $U_{пр}$. Подайте на диод обратное напряжение (переверните источник напряжения). Мультиметр покажет напряжение при обратном смещении $U_{об}$. Запишите показания мультиметра. Рассчитайте ток при прямом и обратном смещении ($I_{пр}, I_{об}$).

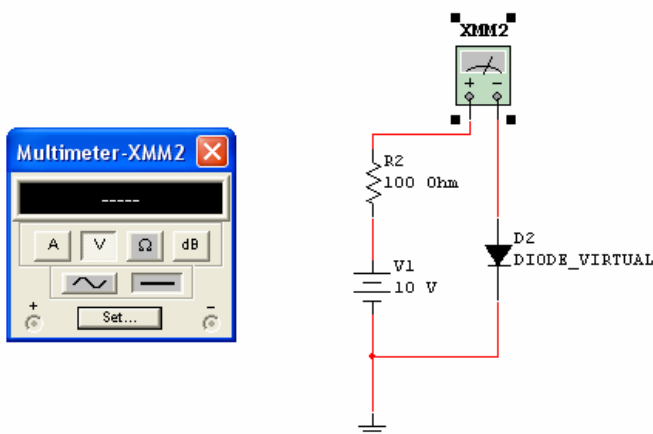


Рисунок 8 – Эксперимент 1.1.

1.2 Снятие вольтамперной характеристики (ВАХ).

Прямая ветвь ВАХ.

1.2.1 Соберите схему (Рисунок 9) и включите её. Запишите значения напряжения $U_{пр}$ и тока $I_{пр}$ диода, устанавливая при этом значение источника от 5В до 0В.

Обратная ветвь ВАХ.

1.2.2 Переверните диод и последовательно устанавливая значение ЭДС источника равным 0В, 5В, 10В, 20В, 25В, 30В, запишите значения $I_{об}$, $U_{об}$. Результаты запишите в таблицы. По таблице постройте графики зависимости $I_{пр}(U_{пр})$ и $I_{об}(U_{об})$.

Таблица 1 – Результаты эксперимента 1.2.2

Ипр(Юб)	Упр (Юб)

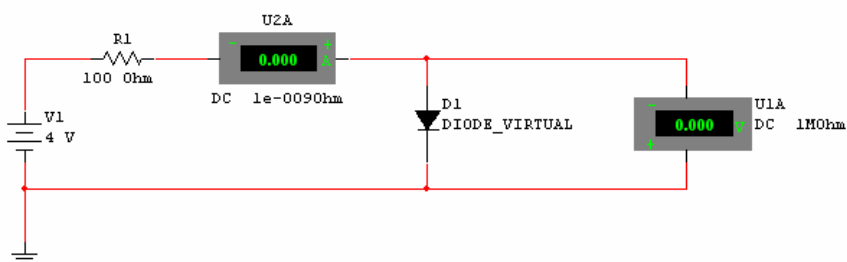


Рисунок 9 – Эксперимент 1.2.1 и 1.2.2.

2.Стабилитроны.

Измерение нагрузочной характеристики параметрического стабилизатора.

Соберите схему(Рисунок 10). Значение сопротивления резистора R_L , включённого параллельно стабилитрону, устанавливайте равным 50 Ом, 100 Ом, 200 Ом, 500 и 700Ом. Значение ЭДС установите равным 30В. Рассчитайте ток I_L , протекающий через резистор R_L , а также напряжение $U_{ст}$ на стабилитроне и ток $I_{ст}$ для каждого значения R_L . Этот эксперимент проведите при условии короткого замыкания. Результаты запишите в Таблицу 2.

Таблица 2.

R_L , Ом	$U_{ст}$, В	I_L , мА	$I_{ст}$, мА
50			
100			
200			
500			
700			
К.З.			

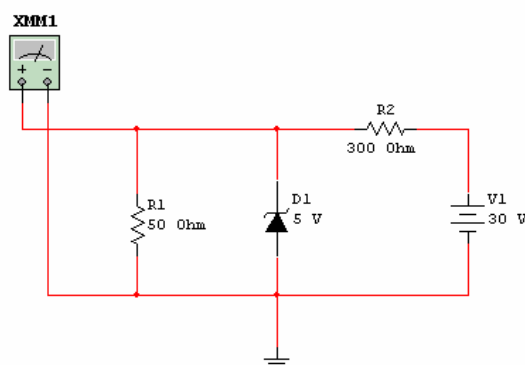


Рисунок 10 – Эксперимент 2.

3. Выпрямители.

3.1 Однополупериодный выпрямитель

Соберите схему (Рисунок 11) и запустите её. Осциллограф установите в режим В/А. Зарисуйте ВАХ с осциллографа.

Схему можно собрать двумя способами, используя обычные компоненты и реальные (рисунок 11.1 и рисунок 11.2).

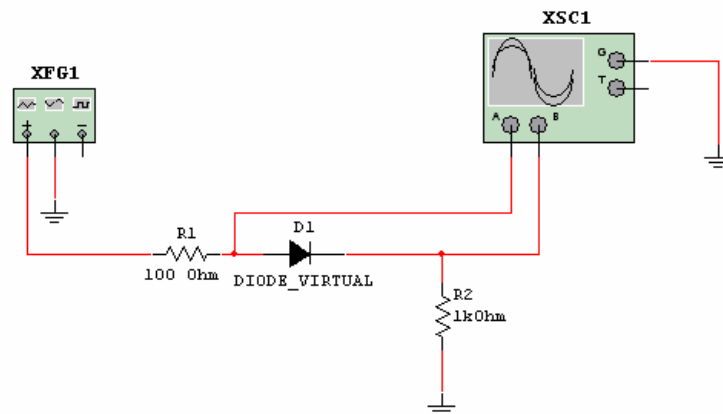


Рисунок 11.1 – Однополупериодный выпрямитель, построенный на стандартных компонентах.

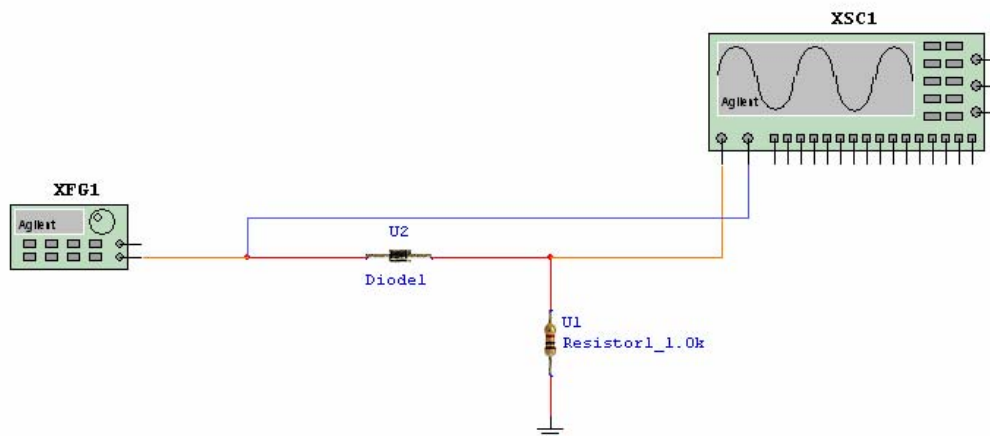


Рисунок 11.2 – Однополупериодный выпрямитель, построенный на «реальных» компонентах.

Данные функционального генератора для схемы на Рисунке 11:

- частота 10кГц
- напряжение 1В.

3.2. Исследование $U_{вх}$ и $U_{вых}$ двухполупериодного выпрямителя со средней точкой.

Соберите схему (Рисунок 12). Зарисуйте осциллограммы входного и выходного сигналов с осциллографа. По осциллограмме выходного напряжения определите период. Вычислите значение максимального обратного напряжения $U_{мах}$ на диоде и среднее значение выходного сигнала $\langle U_d \rangle$. (О настройке трансформатора смотри в **Приложении А**)

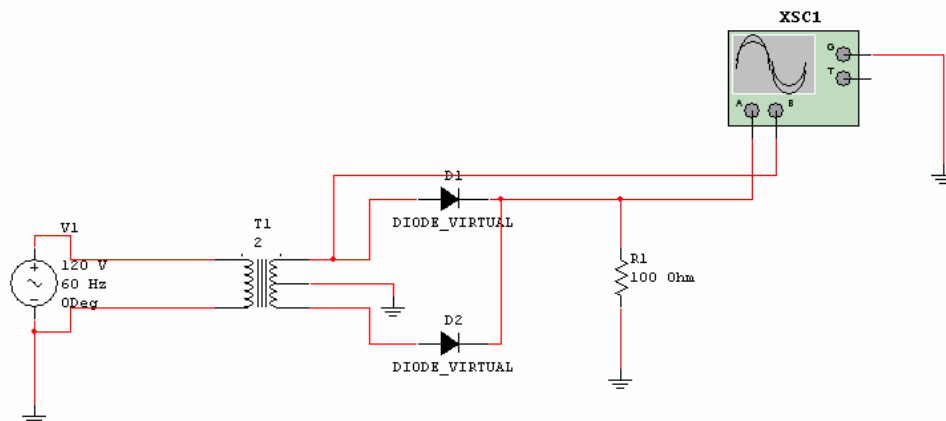


Рисунок 12 – Эксперимент 3.2.

3.3. Исследование мостового выпрямителя.

Соберите схему (Рисунок 13). Выполните пункт 3.2, только для мостового выпрямителя. Дополнительно вычислите коэффициент трансформации (отношение амплитуд напряжений на первичной и вторичной обмотке трансформатора в режиме, близком к холостому ходу).

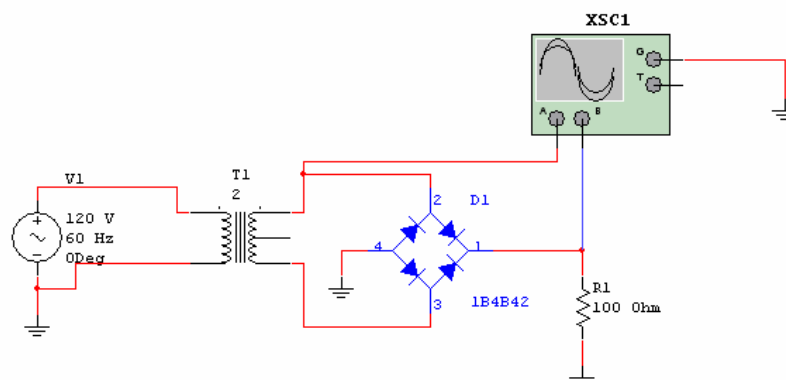


Рисунок 13 – Эксперимент 3.3.

3.3 Упражнения и задачи

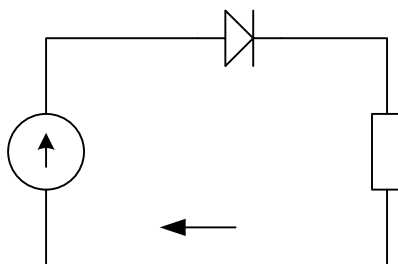


Рисунок 14.

Задача 1.

К цепи, состоящей из последовательного соединения диода и резистора $R=150\text{ Ом}$ приложено напряжение $U_{п}=5\text{ В}$ (Рисунок 14). Определить ток в цепи и падение напряжений на её элементах.

Задача 2.

Рассчитать однофазный двухполупериодный выпрямитель со средней точкой, если $U_{н}=30\text{ В}$, $I_{н}=0.2\text{ А}$, $\epsilon_2=0.05$.

Задача 3.

Определить, как изменится рабочий режим цепи на Рисунке 14 при условии увеличения напряжения с 5 В до 7 В .

Задача 4.

Рассчитать двухполупериодный мостовой выпрямитель, если $U_{н}=50\text{ В}$, $I_{н}=0.5\text{ А}$, $\epsilon_2=0.01$.

3.4 Контрольные вопросы

1. Что представляют собой полупроводниковые приборы?
2. Какие полупроводниковые материалы используются в диодах?
3. Где используются полупроводниковые диоды?
4. Объясните принцип работы p-n перехода?
5. Что такое вольт-амперная характеристика (ВАХ)?
6. Какие схемы выпрямителей вам известны?
7. В чём различие выходных характеристик различных схем выпрямителей?
8. По каким соотношениям необходимо рассчитывать эти схемы?
9. Зачем нужен стабилитрон?
10. Перечислите основные параметры выпрямительных диодов?

4. Лабораторная работа №2

«Исследование схем на биполярных и полевых транзисторах.»

Цель работы:

Целью работы является изучение конструкции, принципов действия и классификации широко используемых в электронике биполярных и полевых транзисторов, а также освоение методов моделирования основных типов схем, использующих полупроводниковые транзисторы, в среде **Electronics Workbench**.

Содержание работы:

1. Исследование параметров и характеристик транзистора, включённого по схеме с общим эмиттером (с ОЭ).
2. Снятие входных и выходных ВАХ транзистора, включённого по схеме с общим эмиттером (с ОЭ).
3. Снятие входных и выходных сигналов транзисторного каскада, включённого по схеме с общей базой (с ОБ).
4. Расчет усилительного каскада на полевом транзисторе, включенного по схеме с общим истоком (с ОИ).
5. Снятие входных и выходных ВАХ транзистора, включённого по схеме с общим истоком (с ОИ).

Инструменты:

- Функциональный генератор (Эл. № 18, 27).
- Источник постоянного напряжения (Эл. № 1).
- Источник переменного напряжения (Эл. № 8).
- Резисторы (Эл. № 2, 20).
- Конденсаторы (Эл. № 3, 21)
- Транзисторы (Эл. № 10, 11, 12, 25)
- Амперметр (Эл. № 16)
- Вольтметр (Эл. № 15)
- Осциллограф (Эл. № 17, 26).

4.1 Теоретические сведения

Транзистор - это активный преобразователь с несколькими (обычно двумя) электронно-дырочными переходами, имеющий три (от эмиттера, базы в коллектора) или более выводов.

4.1.1 Биполярные транзисторы

Транзистор представляет собой монокристалл, имеющий три области с различным типом проводимости. Транзистор с чередованием р-п-р называют транзистором прямой проводимости, а транзистор п-п-п типа - транзистором обратной проводимости.

Германиевый сплавной транзистор р-п-р типа изготавливается путём наплавления индия на пластину германия п- типа, образуя область с проводимостью р- типа. На границе р-п областей образуются р-п переходы. р-область с переходом, имеющую меньшую площадь, называют эмиттером, а имеющую большую площадь - коллектором. Средняя п- область называется основанием или базой.

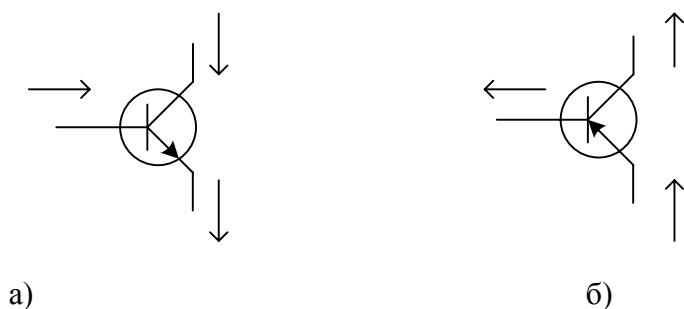


Рисунок 15. Условное обозначение транзисторов обратной (а) и прямой (б) проводимости.

На Рисунке 15 а, б приведено условное обозначение транзисторов и стрелками указаны направления токов, принятые за положительные.

Рассмотрим принцип действия транзистора р-п-р (физические процессы в транзисторе п-р-п аналогичны). Концентрация основных носителей в базе много ниже концентрации основных носителей в эмиттере и коллекторе, т. е. база является высокоомным слоем. Такое соотношение концентраций достигается технологией при изготовлении. В состоянии равновесия на границе р- и п- областей (эмиттер - база и база - коллектор) имеют место потенциальные барьеры с потенциалом “ ϕ ”.

Если к эмиттерному переходу присоединить источник постоянного напряжения с полярностью, соответствующей проводящему направлению, а к коллекторному переходу -

с обратной полярностью в соответствии со знаками, указанными на рис. 15 а, то потенциальный барьер эмиттерного перехода снижается на величину $U_{\text{э}}$, а коллекторного перехода увеличивается на величину $U_{\text{к}}$.

Снижение потенциального барьера эмиттерного перехода приводит к увеличению числа дырок, преодолевающих этот барьер и концентрация дырок на границе база - эмиттер увеличивается в р-п-р транзисторе.

Аналогично происходит увеличение концентрации электронов на границе эмиттер - база в п-р-п транзисторе.

Концентрация дырок на границе база - коллектор в р-п-р транзисторе уменьшается, так как потенциальный барьер коллекторного перехода увеличивается и число дырок, преодолевающих этот барьер, уменьшается.

Обычно концентрацию неосновных носителей в базе на границе коллекторного перехода (для р-п-р транзистора неосновные носители в базе – дырки) принимают равной нулю, т. к. подходящие к этой границе дырки втягиваются полем перехода в коллекторную область, вследствие того, что коллекторное поле для дырок является ускоряющим. В то же время подходящие к этой границе электроны втягиваются в область базы.

Наличие градиента концентрации вызывает диффузионный ток, направленный в сторону уменьшения концентрации.

Подходящие под действием диффузии к коллекторному переходу дырки затягиваются полем коллекторного перехода в коллекторную область транзистора. Не все дырки, вошедшие в базу, доходят до коллектора, т. к. некоторая их часть (1-10%) рекомбинирует с электронами в базовой области.

Рекомбинация дырок с электронами обуславливает рекомбинационную составляющую базового тока. Кроме рекомбинационной составляющей через базу проходят электронные составляющие эмиттерного и коллекторного токов.

Наибольшим током в транзисторе является ток эмиттера, т. к. определяется дырками, перешедшими из эмиттера в базовую область. Некоторая часть этих дырок, как уже отмечалось, рекомбинирует, обуславливая ток базы, оставшаяся часть дырок затягивается в коллекторную область, обуславливая ток коллектора (дырочную составляющую). Поэтому токи в транзисторе связаны соотношением:

$$I_{\text{э}} = I_{\text{б}} + I_{\text{к}},$$

где $I_{\text{э}}$ — ток эмиттера, $I_{\text{б}}$ - ток базы, $I_{\text{к}}$ - ток коллектора.

Это соотношение записано без учёта очень малого по величине теплового тока коллектора $I_{кб0}$, обусловленного электронами, протекающими из коллекторного слоя в базовый через переход база - коллектор. Отношение

$$\alpha = \frac{I_{\varepsilon}(p)}{I_{\varepsilon}(p) + I_{\varepsilon}(n)},$$

показывающее, какая часть тока эмиттера является дырочной и инжектируется в базу, называется эффективностью эмиттера. Для получения возможно большей эффективности базу транзистора делают высокоомной, с малой концентрацией примесей, а эмиттер и коллектор - с концентрацией примесей на три-четыре порядка больше, чем в базе.

Основной величиной, характеризующей качество биполярного транзистора, является коэффициент передачи эмиттерного тока, приближённо:

$$\alpha = \frac{I_k}{I_{\varepsilon}} \approx 0.94 - 0.995, \text{ т.е. меньше единицы.}$$

Связь между токами в транзисторе и приложенными между его электродами напряжениями выражаются входными и выходными ВАХ транзистора. Вид характеристик зависит от его схемы включения. Возможны три схемы включения в зависимости от того, какой из электродов является общей точкой по переменному току для входной и выходной цепей:

- с общей базой (ОБ)
- с общим эмиттером (ОЭ)
- с общим коллектором (ОК)

Рассмотрим статические характеристики транзистора, включенного по схеме с ОБ. Входными характеристиками называют зависимость тока эмиттера от напряжения между эмиттером и базой, снятых при нескольких неизменённых значениях напряжения между коллектором и базой:

$$I_{\varepsilon} = \varphi(U_{\varepsilon б}) \text{ при } U_{кб} = \text{const.}$$

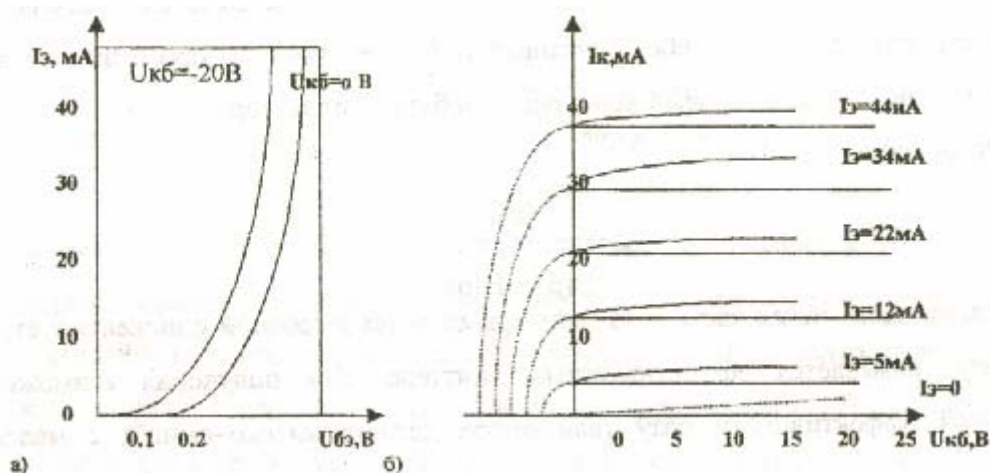


Рисунок 16. Типовые входные (а) и выходные (б) характеристики германиевого транзистора в схеме с ОБ.

Типовая входная характеристика приведена на Рисунке 16а. Входная характеристика при напряжении коллектора, равном нулю, аналогична прямой ветви ВАХ р-п перехода. При включении отрицательного напряжения между коллектором и базой характеристика смещается к оси ординат, как это показано на Рисунке 16а. Это смещение соответствует увеличению тока эмиттера при заданном напряжении между эмиттером и базой. Увеличение тока эмиттера можно объяснить тем, что градиент концентрации дырок в базе увеличивается с увеличением напряжения на коллекторе, а следовательно, увеличивается ток эмиттера, пропорциональный этому градиенту.

Выходные характеристики транзистора с ОБ приведены на Рисунке 16б. При токе эмиттера, равном нулю, характеристика подобна обратной ветви ВАХ диода. Ток I_k при $I_э=0$ называется тепловым током транзистора и обозначается $I_{кбо}$. Выходными характеристиками транзистора в схеме ОБ называют зависимость тока коллектора от напряжения между коллектором и базой, снятую при нескольких неизменных значениях тока эмиттера:

$$I_k = \varphi(U_{кб}) \text{ при } I_э = \text{const.}$$

Характеристики имеют значительный наклон в прямолинейной части, наличие которого объясняется эффектом Эрли. Сущность эффекта состоит в том, что при изменении напряжения $U_{кб}$ меняется ширина коллекторного р-п перехода, который, смещаясь в сторону высокоомной базы, уменьшает ширину базы, а это приводит к увеличению коэффициента переноса носителей заряда через базу за счёт уменьшения рекомбинации носителей заряда в базе. Выходные характеристики в схеме с ОБ отличаются хорошей линейностью и эквидистантностью.

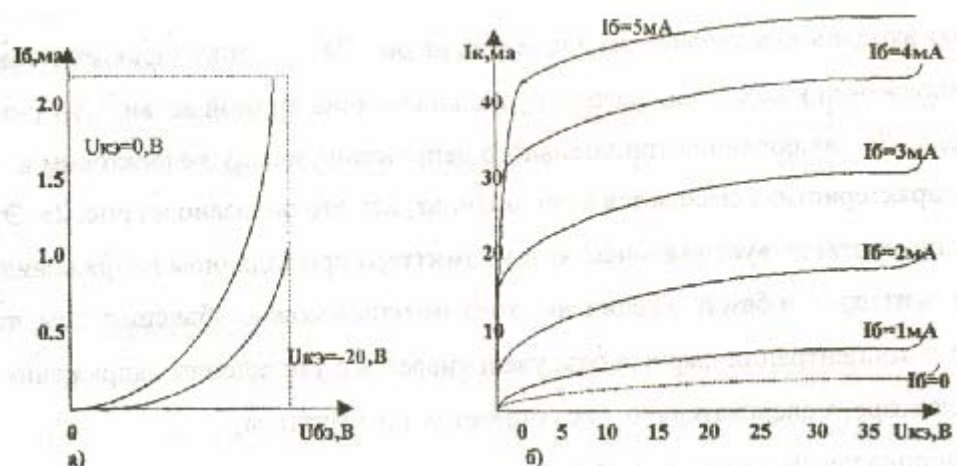


Рисунок 17. Типовые входные (а) и выходные (б) характеристики транзисторов в схеме с ОЭ.

Входные и выходные характеристики транзистора, включённого по схеме с общим эмиттером, приведены на Рисунке 17.

Входными характеристиками для схемы ОЭ называют зависимость тока базы от напряжения между базой и эмиттером, снятую при нескольких неизменных значениях напряжения между коллектором и эмиттером: $I_B = \varphi(U_{BE})$ при $U_{CE} = \text{const}$.

В отличие от схемы ОБ входные характеристики в схеме ОЭ смещаются под действием коллекторного напряжения к оси абсцисс. Это объясняется изменением знака напряжения обратной связи, возникающей из-за наличия модуляции величины базы (эффект Эрли).

Входная характеристика схемы ОЭ при $U_{CE} = 0$ также подобна прямой ветви ВАХ диода. Входными характеристиками транзистора для схемы ОЭ называют зависимость тока коллектора от напряжения между коллектором и эмиттером, снятую при нескольких неизменных значениях тока базы:

$$I_C = \varphi(U_{CE}) \text{ при } I_B = \text{const}.$$

Выходные характеристики для схемы ОЭ не выходят за пределы первого квадранта, потому что источник внешней ЭДС U_{BE} включён навстречу напряжению внешнего источника U_{CE} и между базой и коллектором транзистора действует напряжение:

$$U_{CB} = U_{CE} - U_{BE}.$$

При $|U_{CE}| = |U_{BE}|$ напряжение U_{CB} уменьшается до нуля, т. е. коллекторный переход будет заперт. При напряжении $U_{CE} = 0$ дырки, инжектируемые в базу, будут подхвачены внешним электрическим полем источника U_{BE} и пойдут в базовый электрод.

Выходные характеристики транзистора в схеме ОЭ характеризуются большим наклоном и меньшей эквидистантностью, чем в схеме ОБ, так как управляющим в схеме

ОБ является ток базы I_b , по величине значительно меньший, чем управляющий ток в схеме ОЭ I_z (ток эмиттера).

Для схемы ОЭ важным является отношение тока коллектора к току базы, называемое коэффициентом передачи тока от базы к коллектору в транзисторе:

$$\beta = \frac{I_k}{I_b} = \frac{I_k}{I_z - I_k} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}.$$

Если α изменяется в пределах от 0.9 до 0.99, то β изменяется в пределах от 10 до 100, и выше.

При $I_b = 0$ тепловой ток коллектора $I'_{ko} = I_{kbo} (1 + \beta)$, так как он усиливается транзистором в β - раз.

Основные отличия выходных характеристик в схеме с общим эмиттером больше, чем в схеме с ОБ. Наклон характеристик в схеме с ОЭ больше, чем в схеме с ОБ. Увеличение наклона характеристик показывает, что в схеме с ОЭ при увеличении $U_{кз}$ ток I_k увеличивается сильнее, чем в схеме с ОБ, при увеличении $U_{кб}$.

Тепловой ток коллектора I'_{ko} в схеме с ОЭ при $I_b = 0$ больше, чем тепловой ток коллектора

I_{kbo} в схеме с ОБ при $I_z = 0$.

Предельно допустимое напряжение между коллектором и эмиттером в схеме с ОЭ меньше, чем между коллектором и базой в схеме с ОБ.

Транзистор характеризуется зарядами (барьерными) и диффузионными ёмкостями эмиттерного и коллекторного переходов. Диффузионная ёмкость эмиттерного перехода обусловлена изменением заряда в базе при изменении напряжения на эмиттере. Величина этой ёмкости зависит от тока через эмиттерный переход и может достигать значения в десятки тысяч пикофарад.

Обратно смещённый коллекторный переход характеризуется главным образом барьерной ёмкостью. Ее величина зависит от величины перехода и, таким образом, является функцией коллекторного напряжения. Изменяется она в пределах десятков пикофарад. Величина ёмкости зависит от схемы включения транзистора. Ёмкость коллекторного перехода для схемы с ОЭ увеличивается, по сравнению со схемой с ОБ, в $1/(1+\alpha)$ или $(\beta + 1)$ раз.

Влияние температуры на характеристики транзисторов.

При увеличении температуры окружающей среды термическая равновесная концентрация дырок в базе растёт, и тепловой ток I_{ko} увеличивается. С увеличением

температуры также увеличивается и коэффициент передачи по току α . Поэтому выходные характеристики транзистора с увеличением температуры смещаются вверх.

Влияние температуры сказывается сильнее на характеристиках транзистора, включённого по схеме с ОЭ, чем на характеристиках транзистора, включённого по схеме с ОБ, так как в первом случае коллекторный ток будет равен:

$$I_{k''OЭ} = \beta(I_b + I_{kбo}) + I_{kбo} = \beta I_b + I'_{ko},$$

а во втором:

$$I_{k''OБ} = \alpha I_b + I_{kбo},$$

где $I'_{ko} > I_{kбo}$.

Кроме того, падение напряжения на эмиттерном переходе с ростом температуры уменьшается.

Усилительный каскад по схеме с ОЭ.

При использовании транзистора в качестве *усилителя*, на него нужно подать правильное напряжение смещения (задать режим работы по постоянному току). Для этого используется делитель напряжения R1-R2 и источник питания постоянного тока U_p . Чтобы снять выходное напряжение с коллектора, в цепь коллектора включается R_n - нагрузочный резистор, а R_k - является коллекторным резистором. С помощью эмиттерного резистора R_e вводится отрицательная обратная связь, обеспечивающая стабилизацию статического режима усилителя. C_{p1} - входной, а C_{p2} - выходной разделительный конденсатор. Для устранения отрицательной обратной связи по переменному току и одновременного сохранения стабильности по постоянному току применяется эмиттерный развязывающий конденсатор C_e . Усилитель с ОЭ дает высокое усиление по току и напряжению, а значит и по мощности. Фаза входного сигнала инвертируется при его усилении.

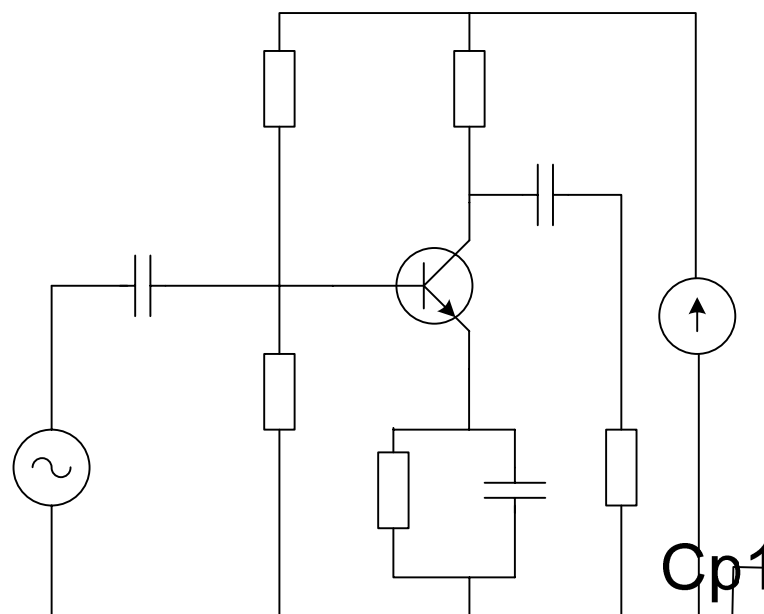


Рисунок 18 - Усилительный каскад по схеме с ОЭ.

Усилительный каскад по схеме с ОБ.

Усилитель с ОБ имеет низкое входное сопротивление (50 -100 Ом) и низкий коэффициент усиления по сравнению с усилителем по схеме с ОЭ. Преимущество этого усилителя - хорошие частотные характеристики (широкая полоса пропускания). Поэтому усилители с ОБ используются при очень высоких частотах. Разделительный конденсатор C1 обеспечивает передачу переменного входного сигнала на эмиттер транзистора (входное напряжение прикладывается между эмиттером и базой) - эмиттерный резистор. Делителем напряжения R1-R2 задается режим работы усилителя. Выходной сигнал снимается с нагрузочного резистора R4.

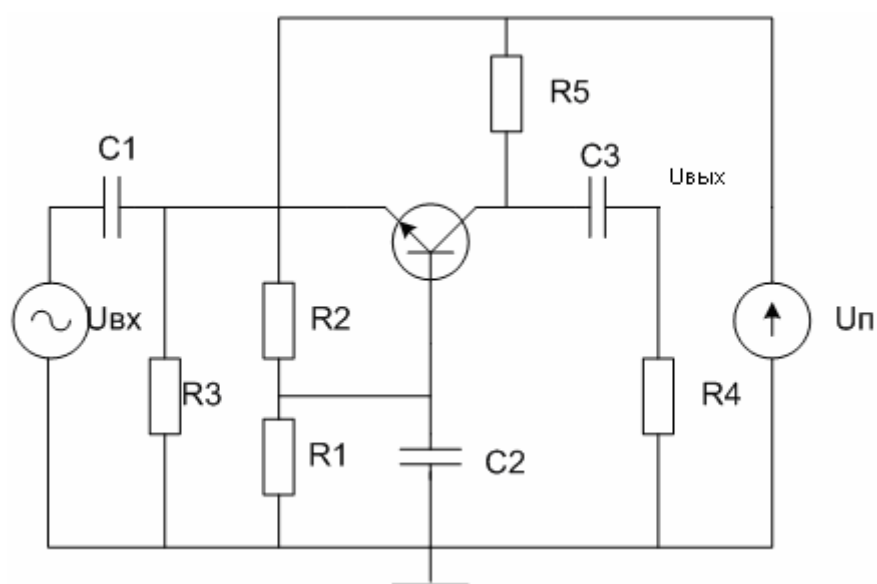


Рисунок 19 - Усилительный каскад по схеме с ОБ.

4.1.2 Полевые транзисторы

В настоящее время полевые транзисторы находят все более широкое применение.

Почему же к полевым транзисторам возник, практически сразу с момента их возникновения, такой огромный интерес? Это объясняется рядом их свойств, отсутствующих у биполярных транзисторов: высокое входное сопротивление (практически бесконечность) по постоянному току и на высокой частоте, низкий коэффициент шума, почти полное разделение выходного сигнала от входного, обусловленность рабочего тока только основными носителями. Совокупность этих свойств позволяет упростить схемы, уменьшить размер и массу устройства, а также улучшить некоторые технические характеристики по сравнению с устройствами на биполярных транзисторах. Благодаря этому преимуществу полевые транзисторы широко применяются в цифровых схемах, особенно в больших интегральных схемах запоминающих устройств, содержащих тысячи транзисторов. Но все-таки, несмотря на все преимущества, они имеют существенный недостаток - коэффициент усиления полевого транзистора значительно ниже.

Транзистор называется полевым, так как входное напряжение создает электрическое поле, которое в свою очередь влияет на выходной ток.

Итак, значит полевой транзистор - это полупроводниковый прибор, в котором выходной ток управляется входным напряжением. Полевой транзистор еще называют униполярным, поскольку его работа основана на использовании только основных носителей заряда – либо электронов, либо дырок.

Существуют два типа полевых транзисторов:

- 1) с управляющим р-п переходом ;
- 2) с изолированным затвором (МОП -, МДП-транзисторы).

Транзисторы с управляющим р-п переходом.

На Рисунке 20 показано условное изображение полевого транзистора с управляющим р-п переходом, где:

- 1-затвор (управляющий электрод);
- 2-исток;
- 3-сток.



Рисунок 20 - Полевые n-канальные (а) и p-канальные (б) транзисторы с управляющим р-п переходом.

Для объяснения принципа работы этого транзистора рассмотрим, как создается этот полупроводниковый прибор.

На Рисунке 6 представлена структура такого транзистора.

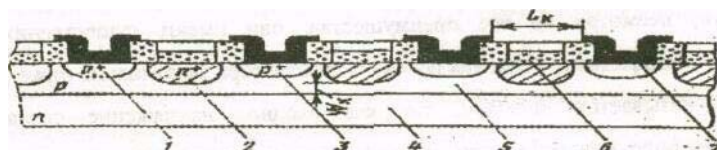


Рисунок 21 - Разрез структуры полевого транзистора с управляющим р-п переходом с каналом р- типа проводимости:

1-область стока; 2-верхний низкоомный затвор; 3- область истока; 4 - полупроводниковая подложка - нижний высокоомный затвор; 5- диффузионный карман (эпитаксиальный слой); 6 - окисел; 7-металлические контакты. L_k -расстояние между диффузионными областями стока и истока.

В исходном материале - подложке создается методом диффузии примесей (или эпитаксиальным выращиванием) легированная область – диффузионный карман (или эпитаксиальный слой). К пластине слабо легированного полупроводника, имеющего электропроводность определенного типа, прикрепляют с двух сторон электроды. Внешние напряжения прикладывают так, что через полупроводник потечет ток. Этот полупроводник называют каналом n- или р-типа (тип проводимости канала определяется типом проводимости диффузионного кармана). Ток, протекающий через канал, называют током стока I_c . Электрод, от которого начинают движение основные носители заряда в канале, называют истоком, а электрод, к которому движутся основные носители заряда, называют стоком.

Рассмотрим принцип действия полевого транзистора с управляющим р-п переходом (ПТУП) на примере транзистора с каналом n-типа.

Исток обычно заземлен и относительно него измеряют напряжения на стоке и затворе. Если напряжения на затворе и на стоке равны нулю ($U_{зи}=U_{си}=0$), то ток через канал не потечет ($I_c=0$). При отрицательном напряжении на затворе через р-п переход протекает обратный ток, которым практически можно пренебречь.

На Рисунке 22 приведены выходные ВАХ характеристики ПТУП с каналом n-типа. Характеристики других типов транзисторов имеют аналогичный вид, но отличаются напряжением на затворе и полярностью приложенных напряжений. При приложении положительного напряжения к стоку ($U_{си} > 0$) и при напряжении на затворе, равном нулю ($U_{зи} = 0$), по каналу потечет ток, который будет создаваться основными носителями заряда (в данном случае электронами). Ток стока растет пропорционально напряжению. На выходных ВАХ характеристиках (зависимость тока стока от напряжения на стоке при различных напряжениях на затворе), представленных на Рисунке 22, этому режиму соответствует линейная область.

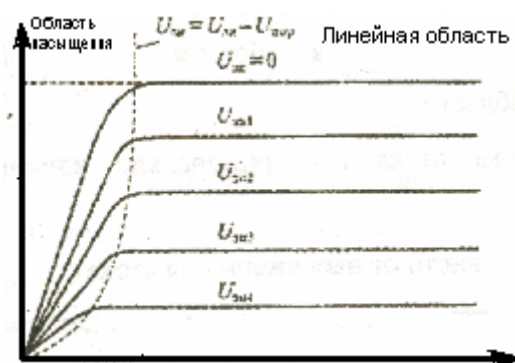


Рисунок 22- Выходные характеристики полевого транзистора с управляющим p-n переходом с каналом n- типа .

Линейность стоковых характеристик на этих участках объясняется тем, что ток стока создает падение напряжения на участке сток - исток: от нуля на истоке до U_c на стоке. Это падение напряжения увеличивает обратное смещение на p-n переходе и, в результате этого, происходит сужение канала, причем в области стока больше, чем в области истока. Увеличение напряжения на стоке приводит к увеличению разности потенциалов между каналом и затвором, что в свою очередь увеличивает толщину обедненных слоев p-p-n переходов. При некотором напряжении на стоке обедненные слои смыкаются вблизи стока, и наступает момент, называемый перекрытием канала. Соответствующее напряжение на стоке называется напряжением насыщения ($U_{си} = U_{синас}$). Дальнейшее увеличение напряжения не приводит к росту тока стока, а лишь увеличивает напряженность поля в обедненном слое. При этом точка смыкания обедненных слоев смещается в сторону истока. Начиная с момента перекрытия канала, выходные характеристики принимают, так называемый, “пентодный” вид. На рис.6 этому моменту соответствует область насыщения. Запирающее напряжение, приложенное к затвору, увеличивает начальную толщину обедненных слоев, уменьшая исходное проводящее сечение канала. Поэтому при совместном действии напряжений

- линейную область (изменение тока стока пропорционально изменению напряжения на стоке);
- область насыщения (ток стока слабо зависит от напряжения на стоке);
- область пробоя (ток стока резко возрастает при малых изменениях напряжения на стоке).

Для полевых транзисторов входная характеристика (зависимость I_z от U_{zi} при фиксированном значении $U_{си}$) не имеет практического применения, и при расчетах используются только передаточные и выходные ВАХ. Таким образом, полевые транзисторы с управляющим р-п переходом работают в режиме обеднения канала носителями заряда (независимо от типа его проводимости) при изменении напряжения затвор - исток до напряжения отсечки.

Транзисторы с изолированным затвором.

На рисунке 24 приведена структура такого полевого транзистора с изолированным затвором.

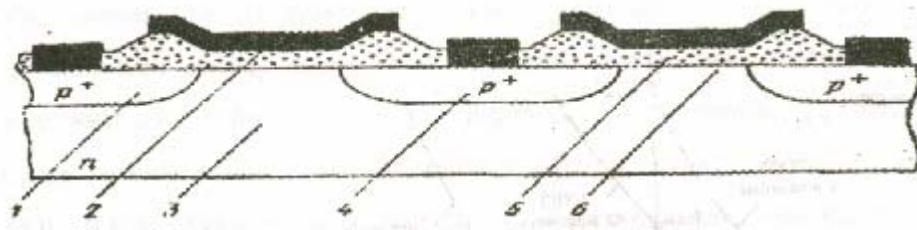


Рисунок 24 - Разрез структуры МДП-транзистора с индуцированным каналом.

1-область стока; 2- металлизация затвора; 3 - подложка; 4-область истока; 5- диэлектрик; 6-область канала.

В чистом или слабо легированном кремнии (подложке) диффузией созданы сильно легированные области противоположного по сравнению с подложкой типа проводимости. Это области стока и истока. Металлический электрод затвора изолирован от подложки слоем диэлектрика толщиной 0,15-0,3 мкм. В основном используются два типа диэлектрика: диэлектрик на основе окислов кремния, или МОП - транзисторы (металл - окисел-полупроводник) и двухслойный диэлектрик на основе окисла кремния и нитрида кремния, или МДП - транзисторы (металл - диэлектрик-полупроводник). МОП - транзисторы иногда используются в схемах усилителей, но большее применение они находят в цифровых схемах. Если приложить напряжение к структуре металл-диэлектрик - полупроводник, то из-за большой разницы удельных сопротивлений диэлектрика и полупроводника электрическое поле будет существовать только в диэлектрике. Поэтому в полупроводнике вблизи границы раздела образуется поверхностный заряд. На управление величиной этого заряда поперечным электрическим полем основан принцип действия транзисторов с изолированным затвором.

Транзисторы с изолированным затвором делятся на две группы:

- 1) со встроенным каналом (канал создается при изготовлении);
- 2) с индуцированным каналом (канал возникает под действием напряжения, приложенного к управляющим электродам).

На Рисунке 25 показано условное изображение полевого транзистора с изолированным затвором.

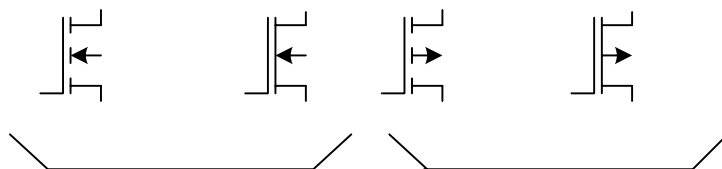


Рисунок 25 - Схематическое изображение полевых транзисторов с изолированным затвором.

Существенным преимуществом транзисторов с изолированным затвором является высокое входное сопротивление, достигающее значений от 10 ГОм до 100 ТОм (у транзисторов с управляющим p-n переходом $R_{вх}=1\text{ГОм}$). Рассмотрим принцип работы этих приборов.

канал n-типа

Транзистор с изолированным затвором со встроенным каналом.

В отличие от транзистора с управляющим p-n переходом в транзисторе со встроенным каналом ток стока будет создаваться как при положительной, так и при отрицательной полярности на его затворе. При подаче на затвор отрицательного напряжения, это напряжение будет компенсировать положительный заряд, сосредоточенный на границе раздела диэлектрик - полупроводник, и оттеснять основных носителей заряда (электроны) из приповерхностной зоны. В прилегающей к диэлектрику поверхности канала, в результате ухода свободных зарядов, образуется обедненный слой. При этом проводимость канала уменьшается. А это, в свою очередь, приводит к уменьшению тока стока. Такой режим работы транзистора называют режимом обеднения.

Если подать на затвор положительное напряжение, то на металлической поверхности затвора будут создаваться заряды положительного знака, а у прилегающей к диэлектрику поверхности канала будет накапливаться отрицательный заряд, увеличивая первоначальную проводимость канала. Это ведет к увеличению тока стока. Такой режим транзистора называется режимом обогащения.

Таким образом, меняя напряжение на затворе, можно изменять ток стока.

Полевые транзисторы с изолированным затвором со встроенным каналом работают как в режиме обеднения, так и в режиме обогащения.

Транзистор с изолированным затвором с индуцированным каналом.

В этом транзисторе токопроводящий канал создается при подаче на затвор определенной полярности и значения напряжения. Без подачи напряжения сопротивление сток-исток очень велико и соответствует сопротивлению двух включенных диодов при нулевом смещении. Если же подать положительное напряжение на затвор, которое будет превышать пороговую величину, то в приповерхностном слое основания (зона между стоком и истоком) начнется движение электронов из области истока к области стока. Слой, через который будет происходить движение зарядов, называется индуцированным каналом. Так как индуцированный канал создается только при подаче на затвор положительного напряжения, то транзистор с индуцированным каналом может работать только в режиме обогащения, в отличие от транзистора со встроенным каналом. Напряжение на затворе, при котором индуцируется канал, называют пороговым напряжением **Узипор**. Обычно пороговое напряжение полевых транзисторов с индуцированным каналом лежит в пределах

$$U_{зипор} = 1 - 6 \text{ В.}$$

Основные параметры полевых транзисторов.

Основными параметрами, характеризующими полевой транзистор как нелинейный элемент, являются:

-коэффициент усиления по напряжению

$$K_u = dU_{си} / dU_{зи} \text{ при } I_c = \text{const};$$

-крутизна (определяется по передаточной характеристике)

$$s = dI_c / dU_{зи} \text{ при } U_{си} = \text{const};$$

-дифференциальное выходное (внутреннее R_i) сопротивление

$$R_{вых} = R_i = dU_{си} / dI_c \text{ при } U_{зи} = \text{const};$$

-дифференциальное сопротивление участка затвор-сток

$$R_{зс} = dU_{зс} / dI_c.$$

Это сопротивление учитывает обратную связь между выходом и входом полевого транзистора.

Входное сопротивление $R_{вх}$ полевого транзистора очень велико, так как значение тока затвора I_z очень мало.

Значение параметра R_i можно определить при работе транзистора в режиме насыщения как котангенс угла наклона выходной характеристики,

Крутизна s передаточной характеристики отражает степень влияния входного напряжения на выходной ток. Этот параметр транзистора лежит в пределах 1 - 5 мА/В.

Усилительный каскад по схеме с ОИ.

Полевые транзисторы могут работать в схеме включения с общим истоком, с общим стоком или с общим затвором. Наиболее распространенной является схема с общим истоком.

Усилительные каскады на полевых транзисторах управляются напряжением, приложенному или к запертому р-п переходу (в транзисторах с управляющим р-п переходом) или между электрически изолированным затвором и подложкой (в транзисторах с изолированным затвором).

Ток затвора в усилительных каскадах на полевых транзисторах достаточно мал. Для транзисторов с управляющим р-п переходом этот ток не превышает 10 нА. Для транзисторов с изолированным затвором этот ток на несколько порядков меньше.

Для транзисторов с управляющим р-п переходом входное сопротивление на низких частотах составляет десятки МОм, а для транзисторов с изолированным затвором достигает 10^{12} - 10^{15} Ом. С повышением частоты входное сопротивление существенно уменьшается из-за наличия емкостей затвор - исток и затвор - сток.

При построении аналоговых усилителей на полевых транзисторах наибольшее распространение, как было сказано выше, получила схема каскада с общим истоком. При этом в ней, как правило, применяются или полевые транзисторы с управляющим р-п переходом, или МДП - транзисторы со встроенным каналом.

На Рисунке 14 приведена усилительная схема на полевом транзисторе с управляющим р-п переходом, которая и будет исследоваться.

При анализе усилительных каскадов на полевых транзисторах оперируют с крутизной характеристики и током $I_{нч}$, которые соответствуют нулевому напряжению на затворе относительно истока, то есть $U_{зи}=0$.

При расчете используют следующие приближенные соотношения, описывающие характеристики полевых транзисторов:

$$I_c = I_{снач} (1 - U_{зи}/U_{зиотс});$$

$$S = dI_c/dU_{зи} = s_{нач} (1 - U_{зи}/U_{зиотс});$$

$$|s_{нач}| = 2I_{снач}/U_{зиотс}.$$

В этих формулах:

I_c - текущее значение тока стока,

Иснач -начальный ток стока при напряжении отсечки $U_{зиотс}$,
снач- крутизна характеристики при напряжении отсечки $U_{зиотс}$,
 $U_{зи}$ -текущее значение напряжения затвор-исток,
s- текущая крутизна.

Через резистор утечки R2 отводится на шасси очень малый ток утечки затвора. Резистор R3 обеспечивает необходимое обратное смещение, поднимая потенциал истока выше потенциала затвора. Кроме того, этот резистор обеспечивает также стабильность режима усилителя по постоянному току. R3 - нагрузочный резистор, который может иметь очень большое сопротивление (более 1,5МОм). Развязывающий конденсатор C2 в цепи истока устраняет отрицательную обратную связь по переменному току через резистор R1. При подаче сигнала на вход усилителя изменяется ток стока, вызывая в свою очередь, изменение выходного напряжения на стоке транзистора. Во время положительного полупериода входного сигнала напряжение на затворе увеличивается в положительном направлении, обратное напряжение смещения перехода затвор - исток уменьшается и, следовательно, увеличивается ток Истока полевого транзистора. Увеличение Истока приводит к уменьшению выходного (стокового) напряжения, и на выходе воспроизводится отрицательный полупериод усиленного сигнала. И наоборот, отрицательному полупериоду входного сигнала соответствует положительный полупериод выходного сигнала.

4.2 Порядок проведения работы

В процессе выполнения работы необходимо выполнить следующие эксперименты:

1.1. Расчёт характеристик биполярного транзистора .

В схеме(Рисунок 26) провести измерения тока коллектора I_k для каждого значения E_k и E_b и заполнить Таблицу 3. По данным таблицы построить график зависимости I_k от E_k . Построить нагрузочную прямую по постоянному току на выходной характеристике транзистора. По графику определить рабочую точку и записать её значение.

Таблица 3.

		Ек, В				
Еб, В	Іб, мкА	0.1	0.5	1	5	10
1.5						
2.5						
3.5						
4.5						
5.7						

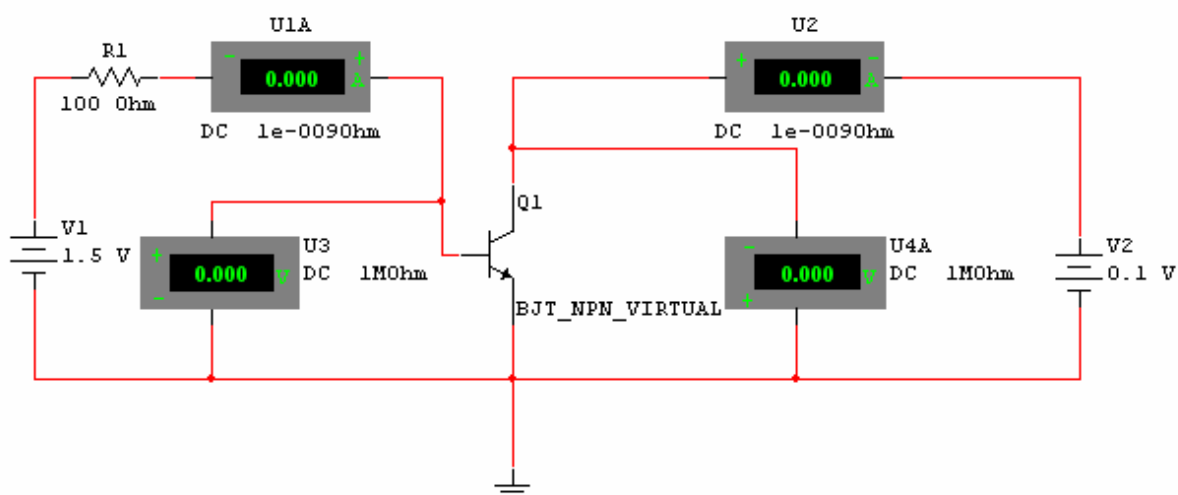


Рисунок 26 – Эксперимент 1.1.

1.2. Определение коэффициента усиления транзистора, включённого по схеме с ОЭ.

Соберите схему (Рисунок 27.1 или Рисунок 27.2). Зарисуйте полученную осциллограмму и по ней определите коэффициент усиления каскада по напряжению.

Данные функционального генератора для схемы на Рисунке 27:

- частота 25кГц
- напряжение 10мВ.

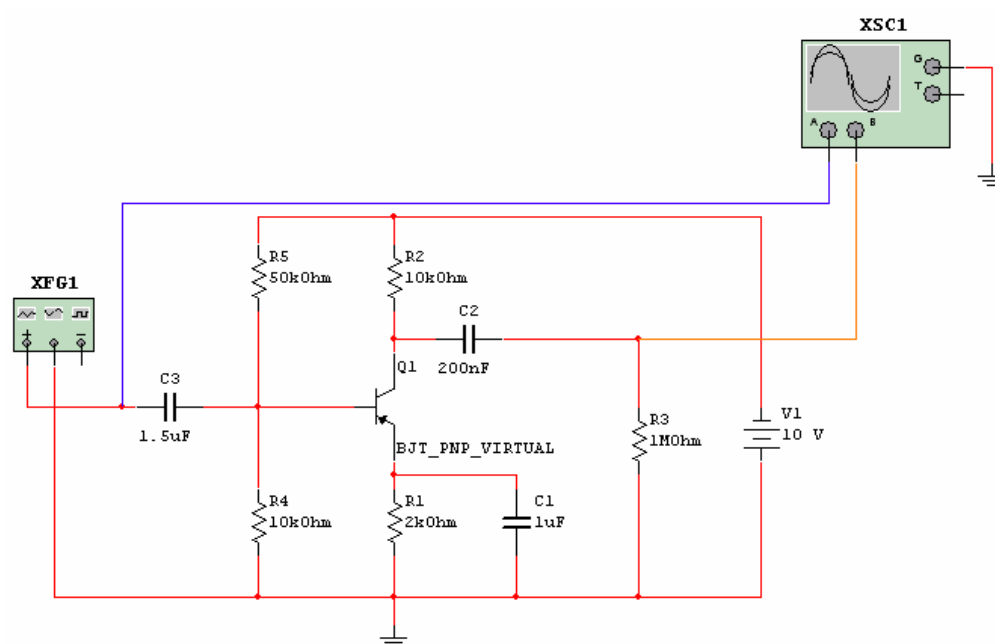


Рисунок 27.1 – Эксперимент 1.2.

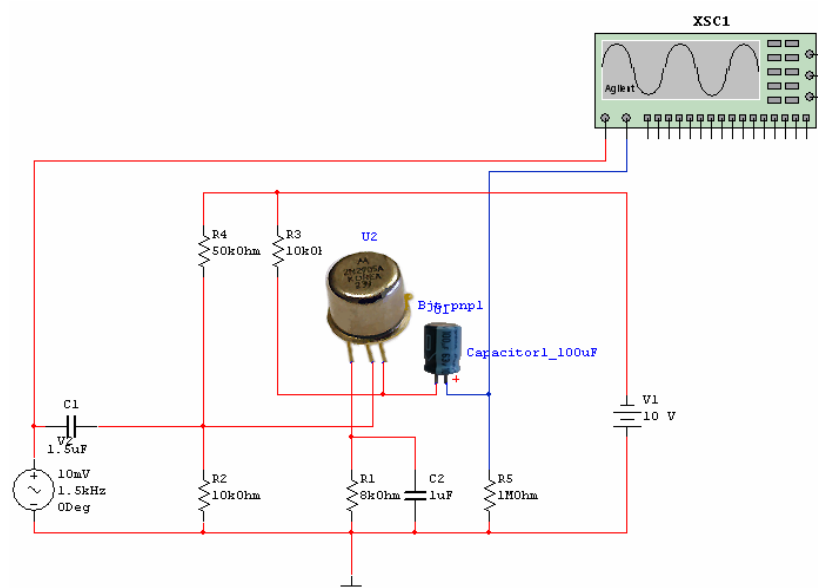


Рисунок 27.2 – Эксперимент 1.2. на реальных компонентах

1.3. Определение коэффициента усиления транзистора, включенного по схеме с ОБ.

Соберите схему (Рисунок 28). Зарисуйте осциллограмму и определите по ней коэффициент усиления каскада.

Данные функционального генератора для схемы на Рисунке 28:

- частота 10кГц
- напряжение 10мВ.

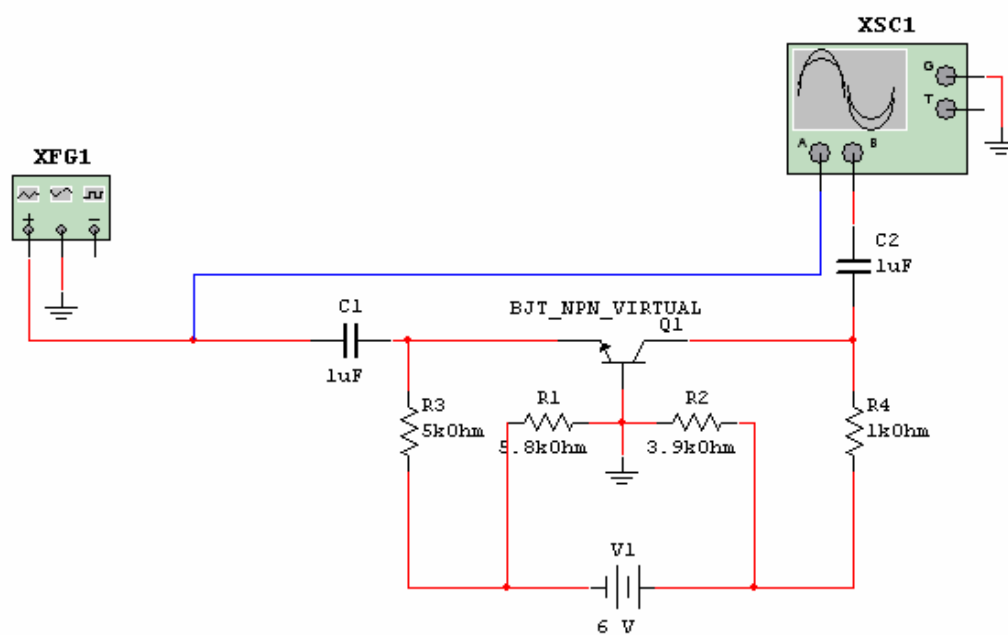


Рисунок 28 – Эксперимент 1.3.

2.1. Определение коэффициента усиления транзистора, включенного по схеме с ОИ.

Соберите схему (Рисунок 29). Зарисуйте осциллограмму и определите по ней коэффициент усиления каскада.

Данные функционального генератора для схемы на Рисунке 29:

- частота 1кГц
- напряжение 20мВ.

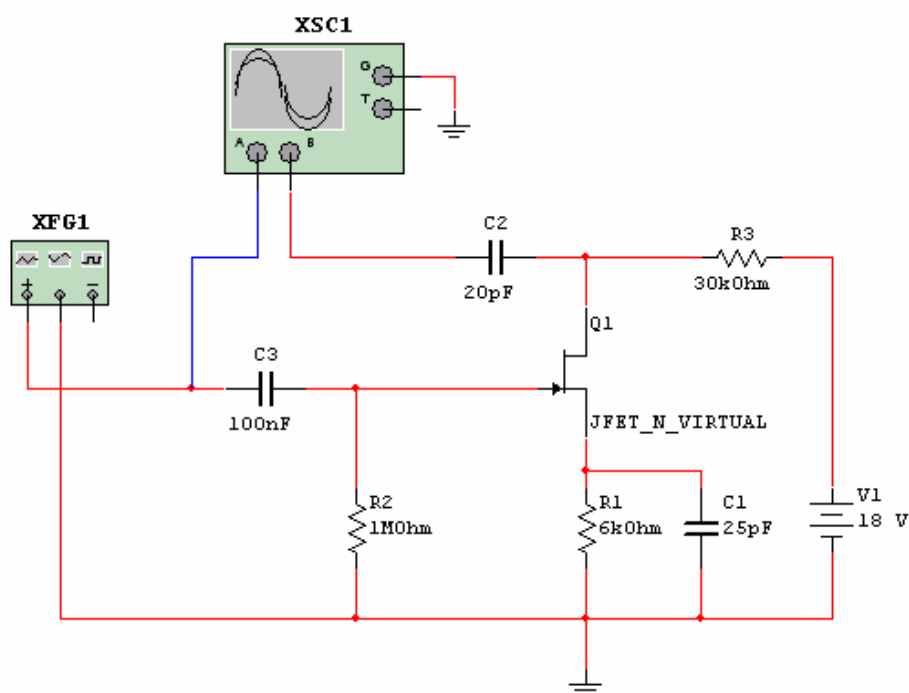


Рисунок 29 – Эксперимент 2.1.

4.3 Упражнения и задачи

Задача 1.

Дано:

$R_{вх}=250\text{ Ом}$, $R_1=9\text{ кОм}$, $R_2=3\text{ кОм}$,

$R_k=200\text{ Ом}$, $R_H=50\text{ Ом}$. Транзистор BC182.

Найти β .

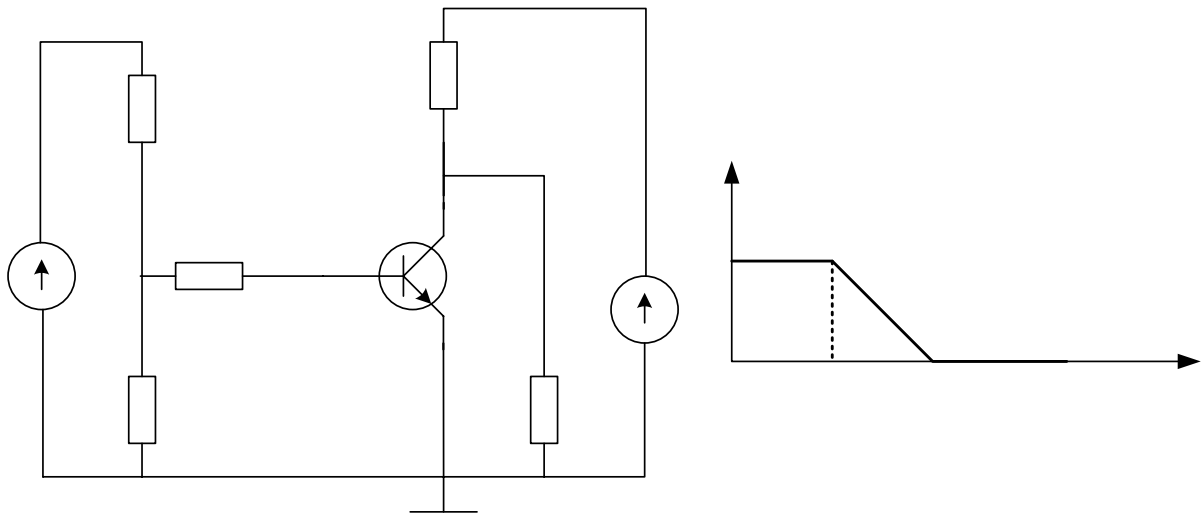


Рисунок 30 – к Задаче 1.

4.4 Контрольные вопросы

1. Какие типы транзисторов Вы знаете? В чём заключаются их принципиальные отличия?
2. От чего зависит ток коллектора биполярного транзистора?
3. Объясните суть передаточных характеристик полевых транзисторов.
4. Поясните принцип усиления в транзисторной каскаде.
5. Какое условие необходимо выполнить, чтобы перевести транзистор в режим отсечки?
6. Какую роль играют параллельно соединённые резистор и конденсатор в цепи эмиттера?
7. Какова разность фаз между входными и выходными синусоидальными сигналами в усилителе с ОЭ, ОБ, ОИ?
8. На чём основан принцип термостабилизации рабочей точки транзисторного каскада?
9. В чём заключаются достоинства схемы усилителя с ОЭ? с ОБ? с ОИ? По чему даёт усиление схема с ОЭ? с ОБ? с ОИ?

R_k

R_1

$R_{вх}$

R_2

5. Лабораторная работа №3

«Исследование параметров операционных усилителей».

Цель работы.

Целью данной лабораторной работы является освоение студентами методов моделирования основных типов схем, использующих операционные усилители, в среде **Electronics Workbench**, а также расчетов этих схем.

Содержание работы.

1. Знакомство с общей схемой ОУ. Расчет основных параметров.
2. Инвертирующий и неинвертирующий усилители
3. Компараторы на операционных усилителях.

Инструменты.

- Функциональный генератор (Эл. № 18, 27).
- Источник постоянного напряжения (Эл. № 1).
- Источник переменного напряжения (Эл. № 8).
- Резисторы (Эл. № 2, 20).
- Переменный резистор (Эл. № 24)
- Конденсаторы (Эл. № 3, 21)
- Операционные усилители (Эл. № 13, 23)
- Амперметр (Эл. № 16)
- Вольтметр (Эл. № 15)
- Осциллограф (Эл. № 17, 26).

5.1 Теоретические сведения

5.1.1 Структурная схема операционного усилителя

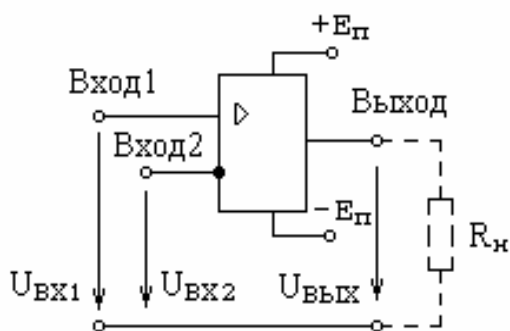
Операционный усилитель (ОУ) – унифицированный многокаскадный усилитель постоянного тока, выполненный на интегральной схеме и удовлетворяющий следующим требованиям к электрическим параметрам:

- коэффициент усиления по напряжению стремится к бесконечности ($K_U \rightarrow \infty$);
- входное сопротивление стремится к бесконечности ($R_{ВХ} \rightarrow \infty$);
- выходное сопротивление стремится к нулю ($R_{ВЫХ} \rightarrow 0$);

- если входное напряжение стремится к нулю, то выходное напряжение также равно нулю ($U_{ВХ} = 0 \rightarrow U_{ВЫХ} = 0$);
- бесконечная полоса усиливаемых частот ($f_B \rightarrow \infty$).

Являясь, по существу, идеальным усилительным элементом, ОУ составляет основу всей аналоговой электроники, что стало возможным в результате достижений современной микроэлектроники, позволившей реализовать достаточно сложную структуру ОУ в интегральном исполнении на одном кристалле и наладить массовый выпуск подобных устройств. Все это позволяет рассматривать ОУ в качестве простейшего элемента электронных схем подобно диоду, транзистору и т.п. Следует отметить, что на практике ни одно из перечисленных выше требований ОУ не может быть удовлетворено полностью.

Операционный усилитель – это аналоговая интегральная схема, снабженная, как



минимум, пятью выводами. Ее условное графическое изображение приведено на рис.31.

Два вывода ОУ используются в качестве входных, один вывод является выходным, два оставшихся вывода используются для подключения источника

питания ОУ. С учетом фазовых соотношений входного и выходного сигналов один из

Рис 31. Условное графическое обозначение ОУ

входных выводов (вход 1) называется неинвертирующим, а другой (вход 2) –

инвертирующим. Выходное напряжение $U_{ВЫХ}$ связано с входными напряжениями $U_{ВХ1}$ и $U_{ВХ2}$ соотношением

$$U_{ВЫХ} = K_{У0} (U_{ВХ1} - U_{ВХ2}),$$

где $K_{У0}$ – собственный коэффициент усиления ОУ по напряжению.

Питание операционного усилителя осуществляется от двух разнополюсных источников. В реальных ОУ напряжение питания лежит в диапазоне $\pm 3 \text{ В} \dots \pm 18 \text{ В}$

5.1.2 Основные расчетные соотношения

При отсутствии входного сигнала через входные контакты ОУ протекают так называемые тепловые токи, обусловленные наличием разности напряжений в N-P переходах расположенных в ОУ транзисторов и диодов. Значения этих токов можно приблизительно оценить по значению среднего входного тока:

$$I_{cp} = \frac{I_1 + I_2}{2}; I_1 \text{ и } I_2 - \text{токи на входах ОУ при отсутствии внешнего сигнала.}$$

В отдельных случаях необходимо знать модуль разности входных токов:

$$\Delta I_{вх} = I_1 - I_2$$

Качество операционных усилителей характеризуется коэффициентом усиления напряжения на постоянном токе. Для идеального ОУ этот параметр стремится к бесконечности, для реальных ОУ составляет величину порядка десятков тысяч единиц.

Для компенсации влияния тепловых токов на выходной сигнал, на вход необходимо подать напряжение смещения

$$U_{см} = \frac{\Delta U_{вых}}{K_y}$$

Для операционного усилителя есть две составляющие входного сопротивления: входное сопротивление по синфазному импульсу и входное дифференциальное сопротивление.

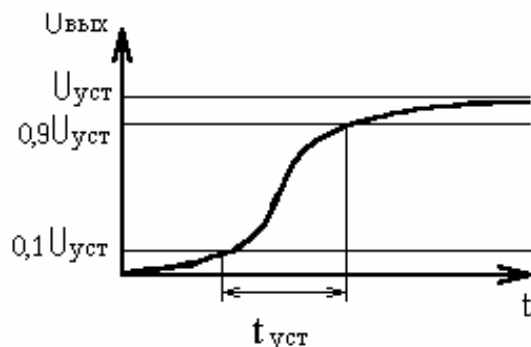
Входное сопротивление по синфазному импульсу определяется как отношение приращения входного синфазного напряжения к приращению среднего входного тока:

$$R_{вх.сф.} = \frac{\Delta U_{вх.сф.}}{\Delta I_{вх.ср.}}$$

Дифференциальное сопротивление определяется как отношение дифференциального напряжения (изменения напряжения между входами ОУ) к изменению входного тока:

$$R_{вх.диф.} = \frac{\Delta U_{вх}}{\Delta I_{вх}}$$

Выходное сопротивление $R_{вых}$ в ОУ уменьшает амплитуду выходного сигнала и составляет 20...2000 Ом.



Отношение изменения выходного напряжения ОУ ко времени его нарастания называется скоростью нарастания выходного напряжения. Время нарастания — время, за которое выходное напряжение изменяется от 10% до 90% от своего

Рисунок 32 — Определение времени нарастания импульса по графику

установившегося значения. $V_{U_{\text{ВЫХ}}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{t_{\text{уст}}}$; На рисунке 32 показана зависимость

выходного напряжения от времени.

5.1.3 Основные типы схем на базе операционного усилителя

Далее приведены основные схемы, использующие ОУ. Более подробное описание работы этих схем приведено в литературе из приведенного в конце данного пособия списка (Например, [1])

Инвертирующий усилитель

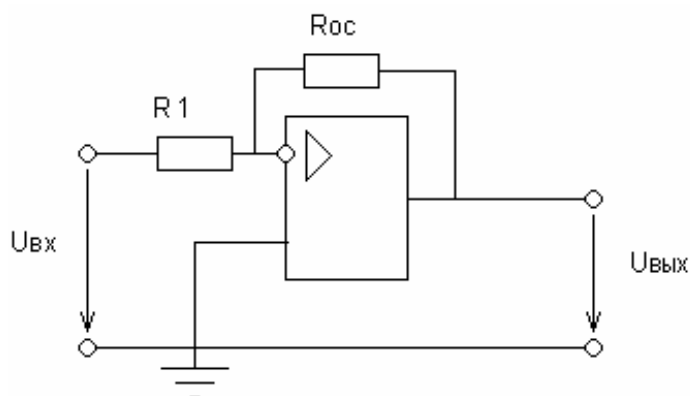


Рисунок 33 — Инвертирующий усилитель

Подаваемое на R1 входное напряжение находится в противофазе с выходным напряжением.

R_{oc} – сопротивление обратной связи.

$$K_y = - \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = - \frac{R_{oc}}{R_1}$$

С увеличением частоты входного сигнала коэффициент усиления значительно снижается. Поэтому инвертирующий усилитель применяется для усиления сигналов с частотой, меньшей некоторой граничной.

Граничная частота — это частота, при которой коэффициент усиления ухудшается не более чем на 30% от своего максимального значения (при постоянном входном сигнале).

Неинвертирующий усилитель

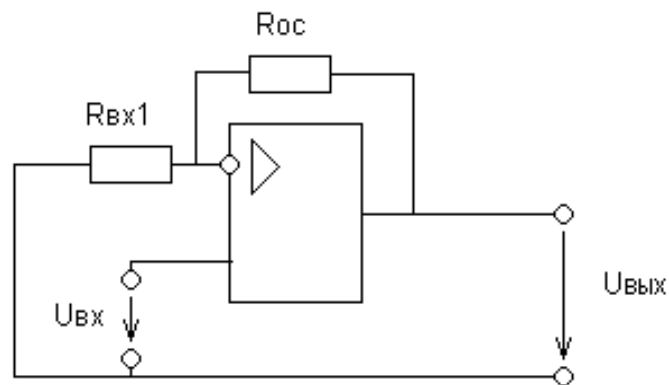


Рисунок 34 — Неинвертирующий усилитель

Основное отличие от инвертирующего усилителя заключается в том, что входной и выходной сигналы совпадают по фазе.

$$\text{Коэффициент усиления: } K_y = 1 + \frac{R_{oc}}{R_{вх1}} = \frac{1}{\gamma}; \quad \gamma = \frac{U_{oc}}{U_{вых}}$$

Постоянная составляющая выходного напряжения $U_{0вых} = U_{см} \cdot K_y$

При изменении значения сопротивления обратной связи, изменяется передаточная характеристика ОУ (зависимость выходного напряжения от входного напряжения).

Суммирующий усилитель

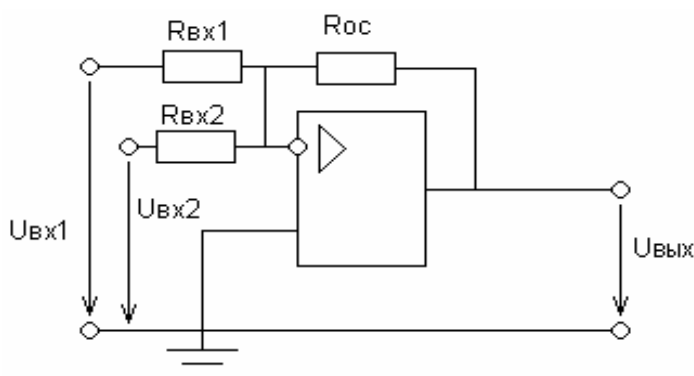


Рисунок 35 — Суммирующий усилитель

$$\text{Количество входных напряжений не ограничено; } U_{вых} = -R_{oc} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{u_{вхi}}{R_i}$$

Интегрирующий усилитель

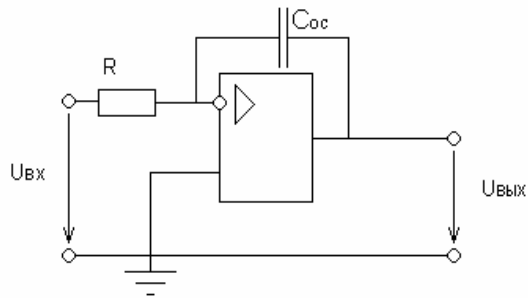


Рисунок 36 — Интегрирующий усилитель

$$V = - \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{RC_{\text{ос}}} \text{ (В/с)} \text{ — скорость изменения}$$

выходного напряжения

$$U_{\text{ВЫХ}} = - \frac{1}{RC_{\text{ос}}} \cdot \int_0^t U_{\text{ВХ}} dt$$

$$K_y = \frac{X_c}{R_{\text{ВХ}}} = \frac{1}{2\pi f RC} \text{ (для синусоидального}$$

сигнала)

Дифференцирующий усилитель

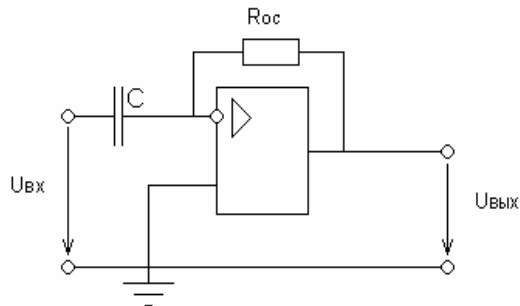


Рисунок 37 — Дифференцирующий Усилитель

$$U_{\text{ВЫХ}} = - R_{\text{ос}} C \cdot \frac{dU_{\text{ВХ}}}{dt}$$

При подаче на вход синусоидального сигнала напряжение на выходе также будет изменяться по синусоидальному закону с той же частотой, что и входной сигнал.

Дифференциальный усилитель

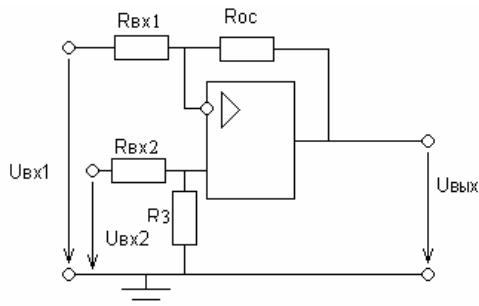


Рисунок 38 — Дифференциальный усилитель

При $R_1 = R_2$

$$U_{\text{ВЫХ}} = - \frac{R_{\text{ос}}}{R_1} (U_1 - U_2)$$

Усиливает разность двух входных напряжений.

5.1.4 Компараторы

Компараторы – особый класс электронных схем, основная функция которых — сравнение входного сигнала с эталонным. В них состояние выходного сигнала изменяется при превышении входным сигналом порогового значения (рисунок 39а). Компараторы могут выполняться на базе различных элементов, в том числе и на операционных усилителях. При этом усиление входного сигнала значительно лишь вблизи порога, в основном работа ОУ происходит в области ограничения выходного напряжения (отрицательной или положительной).

Основной характеристикой компаратора является зависимость “Вход-Выход” (зависимость выходного напряжения от входного напряжения), представленная на рисунке 39б.

Схема простейшего компаратора — детектора нулевого уровня (пороговое напряжение достаточно близко к нулю) представлена на рисунке 40

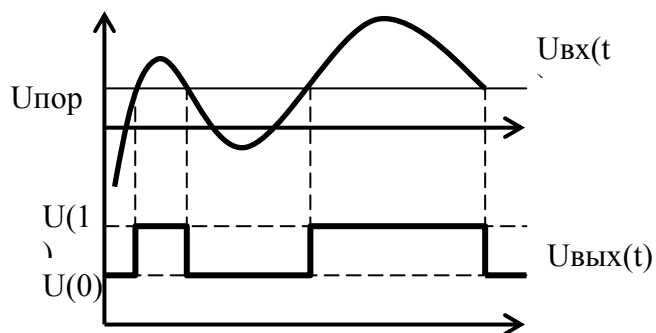


Рисунок 39а — Принцип работы компаратора.

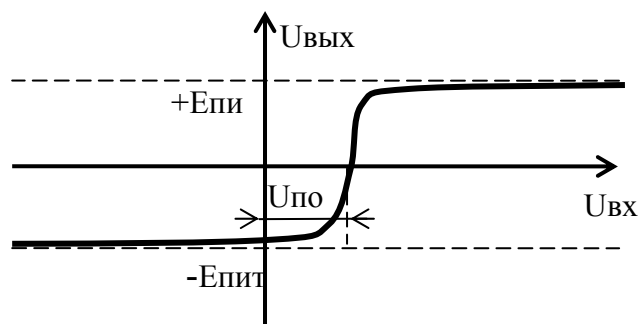


Рисунок 39б — Общий вид зависимости “Вход-Выход”

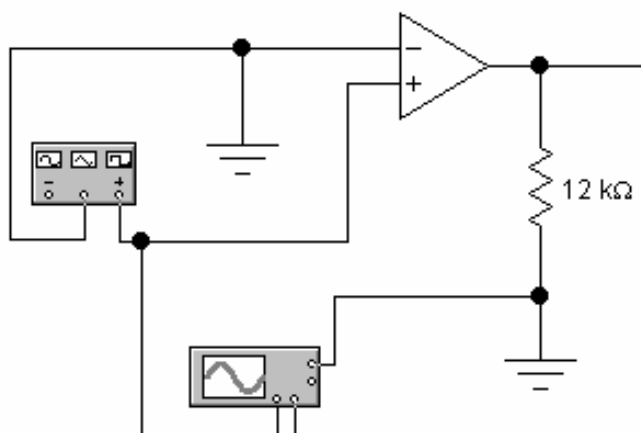


Рисунок 40 — Детектор нулевого уровня.

5.1.5 Классификация операционных усилителей

Быстродействующие широкополосные операционные усилители (К154УД2) используются для преобразования быстроизменяющихся сигналов. Они характеризуются высокой скоростью нарастания выходного сигнала, малым временем установления, высокой частотой единичного усиления, а по остальным параметрам уступают операционным усилителям общего применения. К сожалению, для них не нормируется время восстановления после перегрузки,

Их основные параметры: скорость нарастания $V_{U_{\text{вых max}}} \gg 30 \text{ В/мкс}$; время установления $t_{\text{уст}} \leq 1 \text{ мкс}$; частота единичного усиления $f_1 \geq 10 \text{ МГц}$.

Прецизионные (высокоточные) операционные усилители (К140УД24) используются для усиления малых электрических сигналов, сопровождаемых высоким уровнем помех, и характеризуются малым значением напряжения смещения и его температурным дрейфом, большими коэффициентами усиления и подавления синфазного сигнала, большим входным сопротивлением и низким уровнем шумов. Как правило, имеют невысокое быстродействие.

Их основные параметры: напряжение смещения $U_{\text{см}} \leq 250 \text{ мкВ}$; температурный дрейф $\Delta U_{\text{см}} / \Delta T \leq 5 \text{ мкВ/}^\circ\text{C}$; коэффициент усиления $K_{U0} \geq 150 \text{ тыс.}$

Операционные усилители общего применения (К140УД7) используются для построения узлов аппаратуры, имеющих суммарную приведенную погрешность на уровне 1%. Характеризуются относительно малой стоимостью и средним уровнем параметров (напряжение смещения $U_{\text{см}}$ — единицы милливольт, температурный дрейф $\Delta U_{\text{см}} / \Delta T$ — десятки микровольт/ $^\circ\text{C}$, коэффициент усиления K_{U0} — десятки тысяч, скорость нарастания $V_{U_{\text{вых max}}}$ — от десятых долей до единиц вольт/микросекунд).

Операционные усилители с малым входным током — усилители с входным каскадом, построенным на полевых транзисторах. Входной ток $I_{\text{вх}} \leq 100 \text{ пА}$.

Многоканальные операционные усилители имеют параметры, аналогичные усилителям общего применения или микромощным усилителям с добавлением такого параметра, как коэффициент разделения каналов. Они служат для улучшения массогабаритных показателей и снижения энергопотребления аппаратуры. Западные фирмы выпускают сдвоенные прецизионные и быстродействующие усилители.

Мощные и высоковольтные операционные усилители — усилители с выходными каскадами, построенными на мощных высоковольтных элементах. Выходной ток $I_{\text{вых}} \geq 100 \text{ мА}$; выходное напряжение $U_{\text{вых}} \geq 15 \text{ В}$.

Микрометрические операционные усилители (К1423УД1) необходимы в случаях, когда потребляемая мощность жестко лимитирована (переносные приборы с автономным питанием, приборы, работающие в ждущем режиме). Ток потребления $I_{\text{пот max}} \leq 1 \text{ мА}$.

5.2 Порядок проведения работы

В процессе выполнения работы необходимо выполнить следующие эксперименты:

1. Характеристики ОУ

1.1 Измерение напряжения смещения

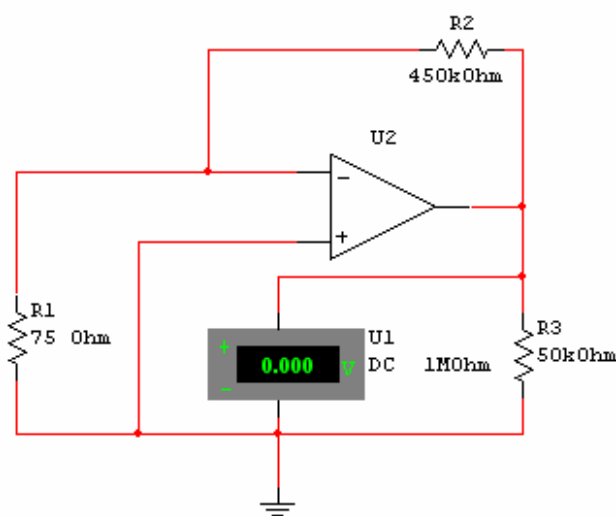


Рисунок 41 Эксперимент 1.1

Соберите схему, показанную на рис. 41. Выставьте соответствующие значения, вычислите коэффициент усиления по напряжению. Включите схему. Запишите показания вольтметра.

Рассчитайте напряжение смещения для данного операционного усилителя.

Занесите измеренные и рассчитанные величины в отчет.

1.2 Измерение входных тепловых токов

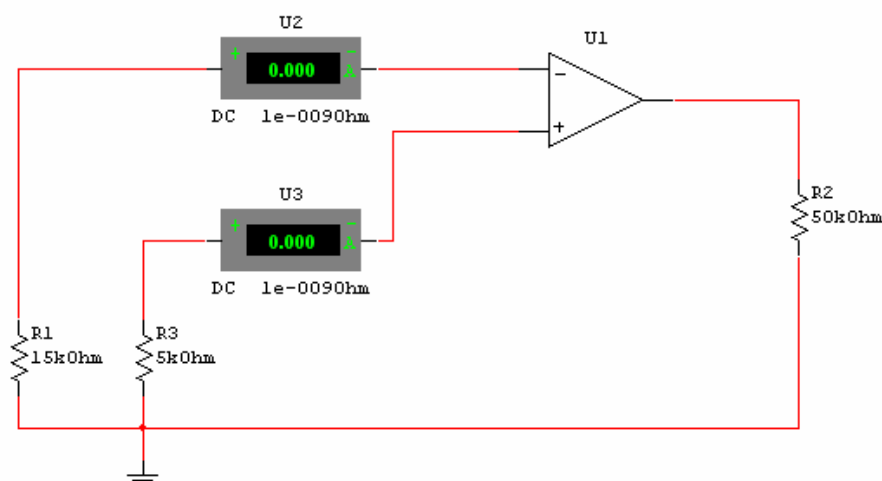


Рисунок 42 — Эксперимент 1.2

Соберите схему (рис 42) и включите ее. Запишите значения токов на каждом входе.

Рассчитайте значения разности входных токов и среднего входного тока.

Результаты запишите в отчет

1.3 Измерение входного дифференциального сопротивления

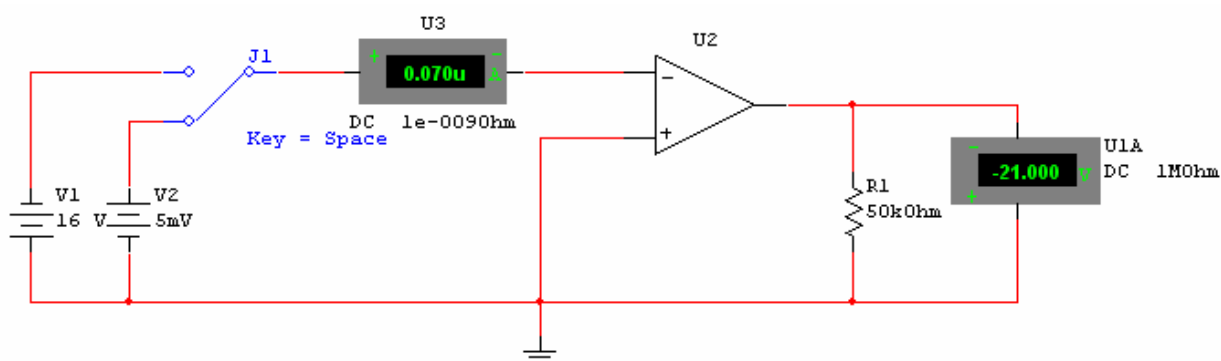


Рисунок 43 — Эксперимент 1B

Соберите схему, показанную на рисунке 43. Включите схему, измерьте входной ток и выходное напряжение. Переведите ключ клавишей «SPACE» в нижнее положение и повторите измерения. Рассчитайте значение входного дифференциального сопротивления. Запишите результаты в отчет.

2. Неинвертирующий и инвертирующий усилители

2.1 Усиление синусоидального сигнала на неинвертирующем усилителе

Рассчитайте значение коэффициента усиления по напряжению в схеме (рисунок 44). Запустите схему и рассчитайте действующие значения напряжений входного и выходного сигналов. Рассчитайте экспериментальное значение K_u и сравните с теоретическим значением. Вычислите постоянную составляющую выходного напряжения (напряжение смещения рассчитано в эксперименте 1.1, значение коэффициента усиления — полученное практически в данном эксперименте). Занесите результаты измерений и вычислений в отчет.

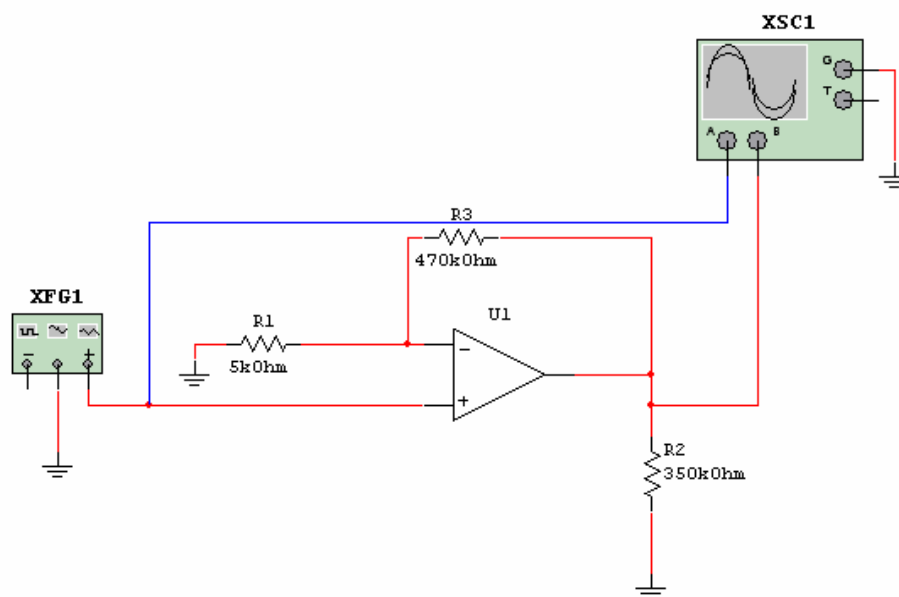


Рисунок 44 — Эксперимент 2.1

Данные функционального генератора для схемы на Рисунке 44:

- частота 10кГц
- напряжение 15мВ.

2.2 Усиление синусоидального сигнала на инвертирующем усилителе

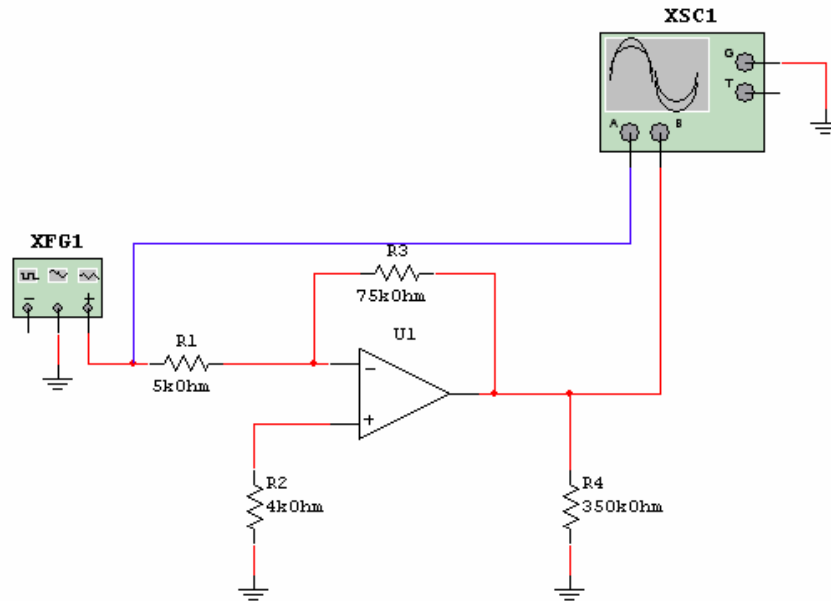


Рисунок 45.1 — Эксперимент 2.2

Данную схему можно собрать, используя реальные компоненты:

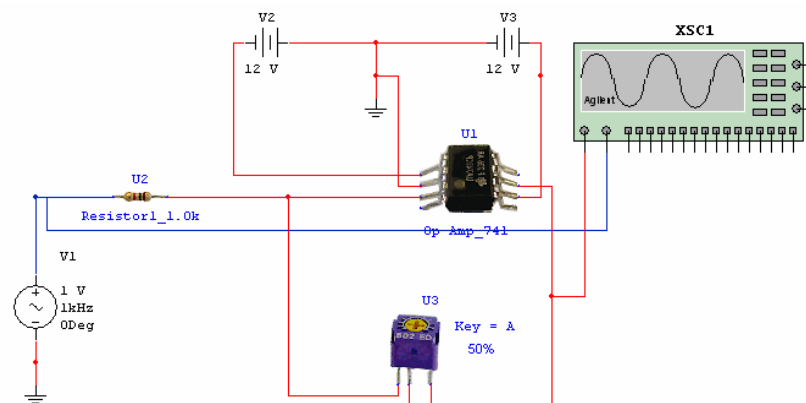


Рисунок 45.2 — Эксперимент 2.2 на реальных компонентах

Данные функционального генератора для схемы на Рисунке 45:

- частота 25кГц
- напряжение 100мВ.

Соберите схему на рисунке 45.1 или 45.2 (на выбор) и рассчитайте коэффициент усиления по напряжению в данной схеме. Включите схему и запишите амплитудные значения напряжений по показаниям осциллографа. По виду изображения оцените разность фаз между входным и выходным сигналами. Рассчитайте коэффициент усиления по полученным экспериментально значениям входного и выходного

напряжений. Сравните полученное значение коэффициента с полученным теоретическим значением.

Результаты расчетов и измерений занесите в отчет.

3. Компараторы

3.1 Характеристики компаратора с положительным опорным напряжением

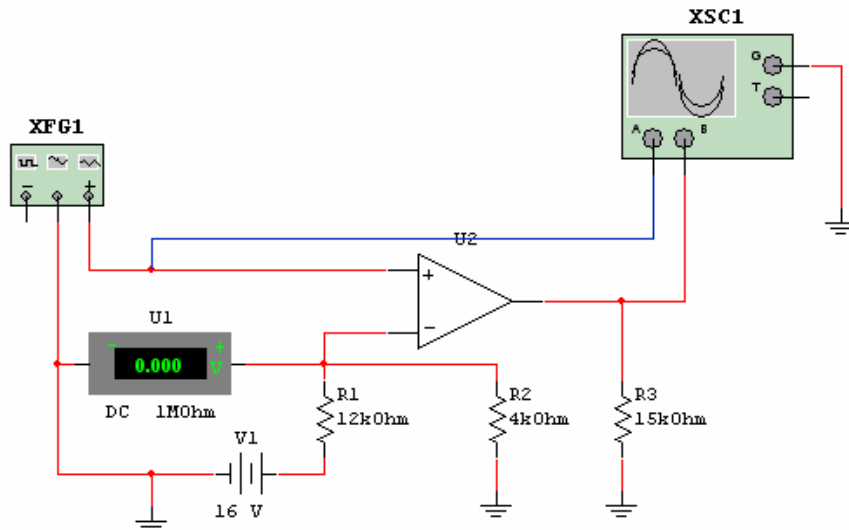


Рисунок 46 — Эксперимент 3.1

Соберите и включите схему (рисунок 46). Переведите осциллограф в режим В/А. Зарисуйте график в отчет. Определите по графику значение порогового напряжения.

Установите режим осциллографа Y/Т. Зарисуйте графики в отчет. Определите пороговое значение входного напряжения, запишите его в отчет и сравните с ранее полученным значением.

Данные функционального генератора для схемы на Рисунке 46:

- частота 25кГц
- напряжение 100мВ.

3.2 Характеристики компаратора с отрицательным опорным напряжением

Данные функционального генератора для схемы на Рисунке 47:

- частота 25кГц
- напряжение 100мВ.

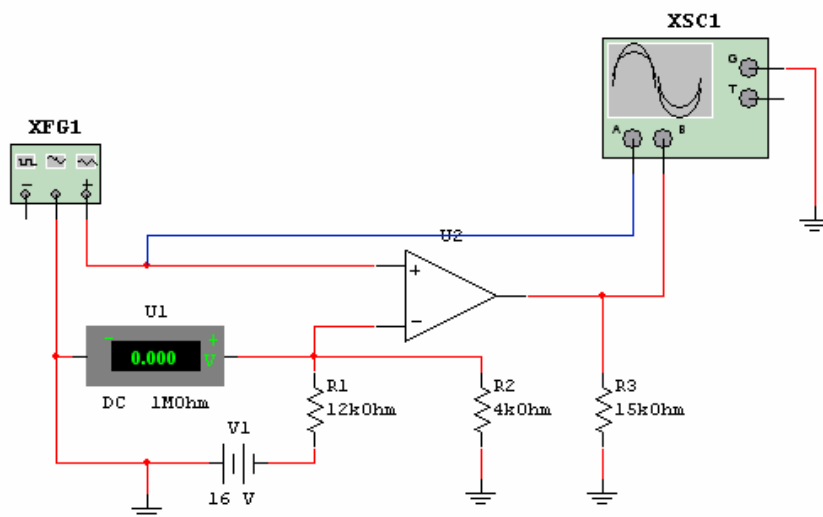


Рисунок 47 — Эксперимент 3.2

Соберите и включите схему (рисунок 47). Переведите осциллограф в режим В/А. Зарисуйте график в отчет. Определите по графику значение порогового напряжения

Установите режим осциллографа Y/T. Зарисуйте графики в отчет. Определите пороговое значение входного напряжения, запишите его в отчет и сравните с ранее полученным значением.

5.3 Результаты выполнения

К результатам лабораторной работы относятся все полученные теоретические и экспериментальные значения величин, а также графики полученных экспериментально зависимостей. Все эти данные необходимо зафиксировать в отчете в соответствующем разделе.

1. Характеристики ОУ:

1.1 Измерение напряжения смещения

Коэффициент усиления по напряжению (теоретический расчет).

Выходное напряжение

Напряжение смещения

1.2 Измерение входных тепловых токов

Значения токов на инвертирующем и неинвертирующем входах

Значение среднего входного тока и разности входных токов

1.3 Измерение входного дифференциального сопротивления:

Значения входного тока и выходного напряжения при первом положении ключа

Значения входного тока и выходного напряжения при втором положении ключа

Изменение входного тока

Изменение входного напряжения

Входное дифференциальное сопротивление

2. Неинвертирующий и инвертирующий усилители

2.1 Усиление синусоидального сигнала на неинвертирующем усилителе

Теоретическое значение коэффициента усиления

Действующие значения выходного и входного напряжений

Экспериментальное значение коэффициента усиления

Значение постоянной составляющей выходного напряжения

2.2 Усиление синусоидального сигнала на инвертирующем усилителе

Теоретическое значение коэффициента усиления

Амплитудные значения выходного и входного напряжений

Разность фаз

Экспериментальное значение коэффициента усиления

3. Компараторы:

Для каждого эксперимента привести графики зависимости ВХОД-ВЫХОД, напряжений от времени и значения порогового напряжения.

5.4 Упражнения и задачи

Задача 1:

Значения входного сопротивления и сопротивления обратной связи для инвертирующего усилителя равны соответственно 5кОм и 12кОм. Рассчитать значения выходного напряжения и коэффициента усиления по напряжению, если на вход подано напряжение 75мВ.

Задача 2:

На входы суммирующего усилителя подали $U_1=35\text{мВ}$ и $U_2=-15\text{мВ}$. Рассчитать $U_{\text{вых}}$, если $R_1=2\text{кОм}$; $R_2=7\text{кОм}$; $R_{\text{ос}}=12\text{кОм}$.

Задача 3:

Рассчитать параметры неинвертирующего усилителя. $R_1=7\text{кОм}$; $R_{\text{ос}}=35\text{кОм}$; $U_{\text{вх}}=50\text{мВ}$.

Задача 4:

Емкость интегрирующего усилителя $C=5\text{мкФ}$; $R_1=3\text{кОм}$; $U_{вх}=50\text{мВ}$. Вычислить скорость изменения выходного сигнала.

Задача 5:

При тех же параметрах, что и в задаче 4, на вход усилителя подали синусоидальный сигнал с частотой $f=15\text{кГц}$. Рассчитать коэффициент усиления по напряжению.

Задача 6:

На входах дифференциального усилителя напряжения $U_1=75\text{мВ}$ и $U_2=30\text{мВ}$. Входное сопротивление 3кОм . Сопротивление обратной связи 25кОм . Найти выходное напряжение

5.5 Контрольные вопросы

1. Что представляет собой операционный усилитель?
2. Какие внешние условия влияют на работу ОУ?
3. Приведите порядок величины коэффициента усиления ОУ?
4. Где используются ОУ?
5. Приведите основные характеристики ОУ.?
6. Какие типы усилителей, использующих ОУ вам известны?
7. По каким соотношениям необходимо рассчитывать эти схемы?
8. Какие основные ОУ вы можете назвать?
9. Что такое амплитудно-частотная характеристика ОУ?
10. Какая функция характеризует зависимость напряжения выходного сигнала от напряжения входного сигнала?
11. Что такое компаратор?
12. Какие особенности применения ОУ в схемах компараторов вы знаете?
13. Как избежать появления нелинейных искажений выходного сигнала?
14. Как в среде ElectronicsWorkbench просмотреть графики зависимостей напряжений от времени?
15. Как задаются свойства элементов в ElectronicsWorkbench?
16. Где располагается полевой транзистор со встроенным каналом?
17. Как приостановить выполнение процесса в EWB?

6. Лабораторная работа №4

«Исследование базовых логических схем ТТЛ и ЭСЛ логики.»

Цель работы:

Целью работы является освоение студентами методов моделирования основных типов базовых логических схем ТТЛ и ЭСЛ логики, в среде Electronics Workbench, а также расчетов этих схем.

Содержание работы:

1. Расчет и исследование основных параметров базовых логических элементов ТТЛ и ЭСЛ логики.
2. Исследование схемы ТТЛ логики.
3. Исследование схемы ЭСЛ логики.

Инструменты:

- Функциональный генератор (Эл. № 18, 27).
- Источник постоянного напряжения (Эл. № 1).
- Источник переменного напряжения (Эл. № 8).
- Резисторы (Эл. № 2, 20).
- Переменный резистор (Эл. № 24)
- Конденсаторы (Эл. № 3, 21)
- Транзисторы (Эл. № 10, 11, 12, 25)
- Диод (Эл. № 4, 22).
- Амперметр (Эл. № 16)
- Вольтметр (Эл. № 15)
- Осциллограф (Эл. № 17, 26).

6.1 Теоретические сведения

6.1.1 Базовый логический элемент ТТЛ логики

Характерной особенностью ТТЛ является использование многоэмиттерных транзисторов. Эти транзисторы сконструированы таким образом, что отдельные эмиттеры не оказывают влияния друг на друга. Каждому эмиттеру соответствует свой р-п переход.

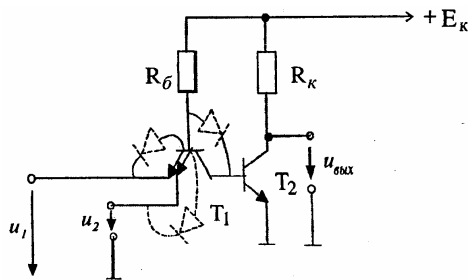


Рис.48.

При мысленной замене многоэмиттерного транзистора диодами (рис. 48.) получаем элемент диодно-транзисторной логики «И-НЕ». Из анализа схемы можно сделать вывод, если на один из входов или на оба входа подать низкий уровень напряжения (что соответствует нулю), то ток базы T_2 будет равен нулю, и на коллекторе транзистора T_2 будет высокий

уровень напряжения (что соответствует единице). Если на оба входа подать высокий уровень напряжения, то через базу T_2 транзистора будет протекать большой базовый ток и на коллекторе T_2 будет низкий уровень напряжения.

Расчет базового логического элемента ТТЛ логики использует следующие соотношения, для чего введем следующие обозначения:

- $I_{вх}^0$ – входной ток при подаче на вход сигнала низкого уровня;
- $I_{вх}^1$ – входной ток при подаче на вход сигнала высокого уровня;
- $I_{б}^{T1}$ – ток базы первого транзистора;
- $I_{б}^{T2}$ – ток базы второго транзистора;
- $I_{б}^{T4}$ – ток базы четвертого транзистора;
- $I_{к}^{T1}$ – ток коллектора первого транзистора;
- $I_{к}^{T2}$ – ток коллектора второго транзистора;
- $I_{э}^{T2}$ – ток эмиттера второго транзистора;
- I_{R1} – ток протекающий по первому резистору;
- I_{R2} – ток протекающий по второму резистору;
- I_{R3} – ток протекающий по третьему резистору;
- $I_{вых}^0$ – выходной ток при подаче сигнала низкого уровня;
- $U_{п}$ – напряжение питания;
- $U_{вх}^0$ – напряжение на входе при подаче сигнала низкого уровня;
- $U_{бэ}^{T1}$ – напряжение на базоемиттере транзистора T_1 ;
- $U_{бэ}^{T2}$ – напряжение на базоемиттере транзистора T_2 ;
- $U_{бэ}^{T4}$ – напряжение на базоемиттере транзистора T_4 ;
- $U_{бк}^{T1}$ – напряжение на базокolleкторе транзистора T_1 ;
- P^1 – мощность при подаче сигнала высокого уровня;
- P^0 – мощность при подаче сигнала низкого уровня;
- P – средняя мощность логического элемента;

Расчет базового логического элемента ТТЛ логики:

Для токов:

1) входных:

- при подаче на вход нуля

$$I_{вх}^0 = (U_{п} - U_{вх}^0 - U_{бэ}^{T1}) / (R1 * n^0), \text{ где } n^0 = 1 \quad (1,1)$$

- при подаче на вход единицы

$$I_{вх}^1 = (U_{п} - V_6) / R1 * n = (U_{п} - (U_{вх}^1 + U_{бэ}^{T5} + (U_{бэ}^{T1} - U_{кэ}^{T1}))) ; \quad (1,2)$$

где n – кол-во входов многоэмиттерного транзистора

2) баз транзисторов:

- первого транзистора

$$I_6^{T1} = (U_{п} - U_{бэ}^{T4} - U_{бэ}^{T2} - U_{бк}^{T1}) / R1$$

- второго транзистора

$$I_6^{T2} = I_{к}^{T1} = I_6^{T1} + n * I_{вх}^1$$

- четвертого транзистора

$$I_6^{T4} = I_9^{T2} - I_{R3}$$

3) коллектора второго транзистора:

$$I_{к}^{T2} = (U_{п} - U_{бэ}^{T4} - U_9) / R2$$

4) эмиттера второго транзистора:

$$I_9^{T2} = I_6^{T2} - I_{к}^{T2}$$

5) протекающих по:

- первому резистору

$$I_{R1} = (U_{п} - U_{бэ}^{T4} - U_{бэ}^{T2} - U_{бк}^{T1}) / R1$$

- третьему резистору

$$I_{R3} = U_{бэ}^{T4} / R3$$

6) выходного при подаче нуля

$$I_{вых}^0 = \beta n * I_6^{T4} = \beta n * (I_9^{T2} - I_{R3}) = \beta n [(I_6^{T2} + I_{к}^{T2}) - U_{бэ}^{T4} / R3], \text{ где } \beta n = 30$$

Для мощностей:

- при подаче единицы

$$P^1 = (I_{R1} + I_{R2}) * U_{п} \quad (1,3)$$

- при подаче нуля

$$P^0 = I_{вх}^0 * U_{п} \quad (1,4)$$

- средняя

$$P = (P^0 + P^1) / 2 \quad (1,5)$$

6.1.2 Базовый логический элемент ЭСЛ логики

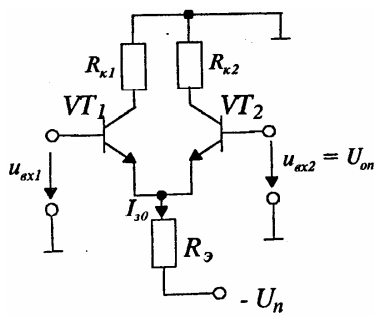


Рис. 49.

Основой базового логического элемента ЭСЛ является токовый ключ. Схема токового ключа подобна схеме дифференциального усилителя (рис. 49.).

Необходимо обратить внимание на то, что микросхемы ЭСЛ питаются отрицательным напряжением. На базу T_2 подано отрицательное опорное напряжение $U_{оп}$. Изменение входного напряжения $U_{вх1}$ приводит к перераспределению постоянного тока I_{30} , заданного сопротивлением R_3 , между

транзисторами, что имеет следствием изменение напряжений на их коллекторах. Транзисторы не входят в режим насыщения, и это является одной из причин высокого быстродействия элементов ЭСЛ.

Расчет базового логического элемента ЭСЛ логики использует следующие соотношения, для чего введем следующие обозначения:

$U_{вх}^0$ – входное напряжение при подаче на вход сигнала низкого уровня;

$U_{вх}^1$ – входное напряжение при подаче на вход сигнала высокого уровня;

$U_{бэ}$ – напряжение на базо-эмиттере;

$U_{оп}$ – опорное напряжение;

$U_{п}$ – напряжение питания;

U^0 – напряжение при подаче на вход сигнала низкого уровня;

U^1 – напряжение при подаче на вход сигнала высокого уровня;

U_{R1} – напряжение протекающее по первому резистору;

U_{R2} – напряжение протекающее по второму резистору;

U_{R3} – напряжение протекающее по третьему резистору;

U_{R4} – напряжение протекающее по четвертому резистору;

U_{R5} – напряжение протекающее по пятому резистору;

I_{R1}^0 – ток протекающий по первому резистору при подаче на вход сигнала низкого уровня;

I_{R2}^0 – ток протекающий по второму резистору при подаче на вход сигнала низкого уровня;

I_{R4}^0 – ток протекающий по четвертому резистору при подаче на вход сигнала низкого уровня;

I_{R5}^0 – ток протекающий по второму резистору при подаче на вход сигнала низкого уровня;

I_k – ток коллектора;

I_3 – ток эмиттера;

$I_{п}^0$ – ток питания при подаче на вход сигнала низкого уровня;

I_{R1}^1 – ток протекающий по первому резистору при подаче на вход сигнала высокого уровня;

I_{R2}^1 – ток протекающий по второму резистору при подаче на вход сигнала высокого уровня;

I_{R4}^1 – ток протекающий по четвертому резистору при подаче на вход сигнала высокого уровня;

I_{R5}^1 – ток протекающий по второму резистору при подаче на вход сигнала высокого уровня;

I_{π}^1 – ток питания при подаче на вход сигнала высокого уровня;

P^1 – мощность при подаче сигнала высокого уровня;

P^0 – мощность при подаче сигнала низкого уровня;

P_{cp} – средняя мощность логического элемента;

Расчет базового логического элемента ЭСЛ логики:

На входе $U_{вх}^0$; T1 – закрыт, T2 – открыт;

$$U_{R2} + U_{\bar{03}} - U_{оп} + U_{\pi} = 0$$

$$U_{R2} = I_{R2}^0 R_2 \Rightarrow I_{R2}^0 = U_{R2} / R_2$$

$$U_{оп} = 0,5 * (U^1 + U^0)$$

$$I_{R2}^0 = (U_{оп} - U_{\pi} - U_{\bar{03}}) / R_2$$

$$I_{R4}^0 = U_{R4} / R_4; I_{R5}^0 = U_{R5} / R_5$$

По Кирхгофу:

$$U_{R4} + U_{\bar{03}} - U_{R1} + U_{\pi} = 0; U_{R1} = 0, \text{ т.к. T1 – закрыт}$$

$$U_{R5} + U_{\bar{03}} - U_{R1} + U_{\pi} = 0$$

$$I_{R4}^0 = (-U_{\pi} - U_{\bar{03}}) / R_4$$

$$I_k = \alpha_n * I_{\bar{03}}; \alpha_n = 0,98; I_k = I_{R1}^0; I_{\bar{03}} = I_{R2}^0 \Rightarrow$$

$$U_{R3} = I_{R2}^0 * \alpha_n * R_3$$

$$I_{R5}^0 = (-U_{\pi} + U_{R3} - U_{\bar{03}}) / R_5$$

$$I_{\pi}^0 = I_{R2}^0 + I_{R4}^0 + I_{R5}^0 \text{ (по Кирхгофу);}$$

$$P^0 = I_{\pi}^0 * U_{\pi}; \quad (2,1)$$

На входе $U_{вх}^1$: T1 – открыт, T2 – закрыт:

$$U_{R2} + U_{\bar{03}} - U_{вх}^1 + U_{\pi} = 0; U_{R2} = I_{R2}^1 * R_2$$

$$I_{R2}^1 = (U_{вх}^1 - U_{\pi} - U_{\bar{03}}) / R_2$$

$$I_{R4}^1 = (-U_{\pi} + U_{R1} - U_{\bar{03}}) / R_4$$

$$U_{R1} = I_{R1}^1 * R_1 = \alpha_n * I_{R2}^1 * R_1, \text{ где } \alpha_n = 0.98 \quad (2,2)$$

$$I_{R5}^1 = (-U_{\pi} - U_{\bar{03}}) / R_5 = I_{R4}^0$$

$$I_{\Pi}^1 = I_{R2}^1 + I_{R4}^1 + I_{R5}^1$$

$$P^1 = I_{\Pi}^1 * U_{\Pi} \quad (2,3)$$

$$P_{cp} = (P_0 + P_1) / 2 \quad (2,4)$$

Разница выходных напряжений при подаче нуля и единицы

$$\Delta U_{\text{л}} = U_{\text{вых}}^1 - U_{\text{вых}}^0$$

$$U_{\text{вых}}^1 = U_{R1} - U_{\text{бэТ3}} = -U_{\text{бэТ3}} \quad (\text{T1} - \text{закрыт} \Rightarrow U_{R1} = 0)$$

$$U_{\text{вых}}^0 = U_{R1} - U_{\text{бэТ4}} = U_{R1} + U_{\text{вых}}^1$$

$$U_{\text{вых}}^0 - U_{\text{вых}}^1 = U_{R3}$$

$$\Delta U_{\text{л}} = U_{R3} = I_{R3} * R3 = \alpha n * I_{R2}^0 * R3, \text{ где } \alpha n = 0.98 \quad (2,5)$$

6.2 Порядок проведения работы

В процессе выполнения работы необходимо выполнить следующие эксперименты:

1. Базовый элемент ТТЛ логики.

Соберите схему рис.50.

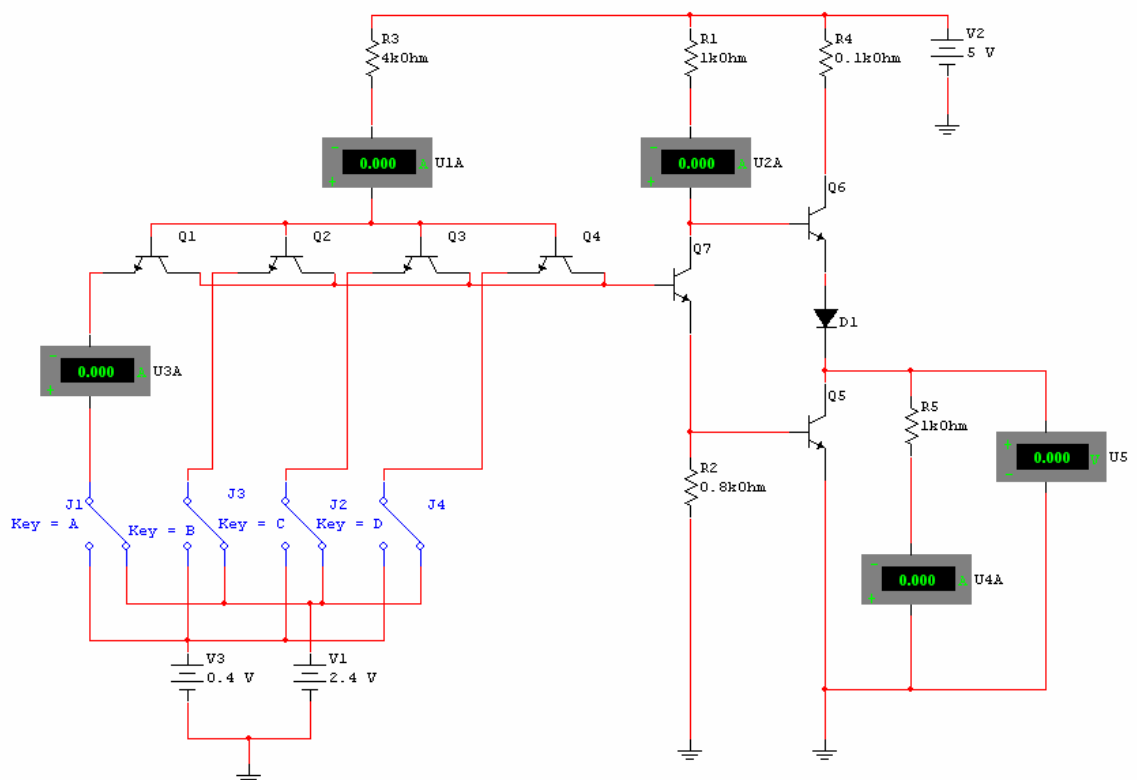


Рисунок 50 – Базовый элемент ТТЛ логики

1. Включите схему, измерьте входной и выходной токи при подаче на вход сигнала низкого уровня, запишите полученные значения.
2. Рассчитайте с помощью формулы (1,1) входной ток при подаче на вход сигнала низкого уровня, запишите полученные значения.

3. Измерьте входной и выходной токи при подаче на вход сигнала высокого уровня, запишите полученные значения.
4. Рассчитайте с помощью формулы (1,2) входной ток при подаче на вход сигнала низкого уровня, запишите полученные значения.
5. Измерьте токи, протекающие по первому и второму резисторам, при подаче на вход высокого уровня сигнала, запишите полученные значения.
6. Рассчитайте с помощью формулы (1,3) значение мощности при подаче на вход высокого уровня сигнала, запишите полученные значения.
7. Рассчитайте с помощью формулы (1,4) значение мощности при подаче на вход низкого уровня сигнала, запишите полученные значения.
8. Рассчитайте с помощью формулы (1,5) значение средней мощности, запишите полученные значения.

Результаты выполнения:

Измерения:

Входной ток при подаче сигнала низкого уровня - $I_{вх}^0$.

Входной ток при подаче сигнала высокого уровня – $I_{вх}^1$.

Выходной ток при подаче сигнала низкого уровня - $I_{вых}^0$.

Выходной ток при подаче сигнала высокого уровня – $I_{вых}^1$.

Ток, протекающий по первому резистору – I_{R1} .

Ток, протекающий по второму резистору - I_{R2} .

Расчеты:

Входной ток при подаче сигнала низкого уровня (1.1).

Входной ток при подаче сигнала высокого уровня (1.2).

Мощность логического элемента при подаче на вход сигнала высокого уровня (1.3).

Мощность логического элемента при подаче на вход сигнала низкого уровня (1.4).

Среднюю мощность логического элемента (1.5).

2. Базовый элемент ЭСЛ логики.

Соберите схему рис.51.

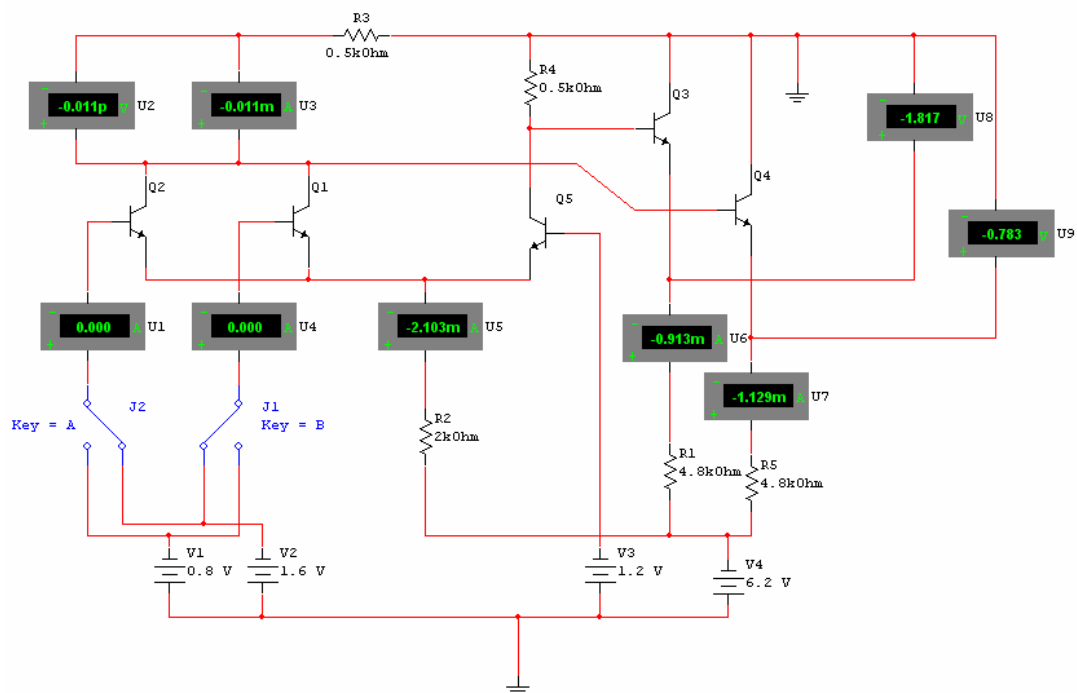


Рисунок 51 – Базовый элемент ЭСЛ логики

1. Включите схему, измерьте входной ток при подаче на вход сигнала низкого уровня, запишите полученные значения.
2. Измерьте входной ток при подаче на вход сигнала высокого уровня, запишите полученные значения.
3. Измерьте выходное напряжение при подаче сигнала низкого уровня, запишите полученные значения.
4. Измерьте выходное напряжение при подаче сигнала высокого уровня, запишите полученные значения.
5. Измерьте токи, протекающие по первому, второму, четвертому и пятому резисторам, при подаче сигнала высокого уровня, запишите полученные значения.
6. Измерьте токи, протекающие по первому, второму, четвертому и пятому резисторам, при подаче сигнала низкого уровня, запишите полученные значения.
7. Измерьте падение напряжения на первом резисторе при высоком уровне сигнала, запишите полученные значения в раздел «Результат».
8. Измерьте падение напряжения на первом резисторе при низком уровне сигнала, запишите полученные значения в раздел «Результат».
10. Рассчитайте падение напряжения на первом резисторе по формуле (2,2), запишите полученные значения.
11. Рассчитайте разницу выходного напряжения по формуле (2,5), запишите полученные значения.

12. Рассчитайте с помощью формулы (2,3) значение мощности при подаче на вход высокого уровня сигнала, запишите полученные значения.

13. Рассчитайте с помощью формулы (2,1) значение мощности при подаче на вход низкого уровня сигнала, запишите полученные значения.

14. Рассчитайте с помощью формулы (2,4) значение средней мощности, запишите полученные значения.

Результаты выполнения:

Измерения:

Входной ток при подаче сигнала низкого уровня .

Входной ток при подаче сигнала высокого уровня.

Выходное напряжение при подаче сигнала низкого уровня.

Выходное напряжение при подаче сигнала высокого уровня.

Ток, протекающий по первому резистору (R1), при подаче высокого уровня сигнала.

Ток, протекающий по второму резистору (R2), при подаче высокого уровня сигнала.

Ток, протекающий по четвертому резистору (R4), при подаче высокого уровня сигнала.

Ток, протекающий по пятому резистору (R5), при подаче высокого уровня сигнала.

Ток, протекающий по первому резистору (R1), при подаче низкого уровня сигнала.

Ток, протекающий по второму резистору (R2), при подаче низкого уровня сигнала.

Ток, протекающий по четвертому резистору (R4), при подаче низкого уровня сигнала.

Ток, протекающий по пятому резистору (R5), при подаче низкого уровня сигнала.

Падение напряжения на первом резисторе (R1), при подаче высокого уровня сигнала.

Падение напряжения на первом резисторе (R1), при подаче низкого уровня сигнала.

6.3 Расчеты

Падение напряжения на первом резисторе (R1), при подаче сигнала низкого уровня (2.2).

Разница выходного напряжения (2.5).

Мощность логического элемента при подаче на вход сигнала высокого уровня (2.3).

Мощность логического элемента при подаче на вход сигнала низкого уровня (2.1).

Средняя мощность логического элемента (2.4).

6.4 Контрольные вопросы

1. Какова величина напряжения питания элемента ТТЛ логики?
2. Какова величина напряжения питания элемента ЭСЛ логики?
3. Какая характерная особенность ТТЛ логики?
4. Что является основой базового логического элемента ЭСЛ?
5. Чему равно напряжение логической единицы?
6. Чему равно напряжение логического нуля?

6.5 Литература

1. Лачин В.И., Савелов Н.С. Электроника. Ростов-на Дону, Феникс, 2000.
2. Прянишников В.А. Электроника. Курс лекций., С.-Перербург, “Корона принт” 1998.
3. Перельман Б.Л. Справочник по полупроводниковым приборам, М. Микротех. 1996
4. Шихин А.Я. Электротехника, М., Высшая школа, 2001
5. Завадский В.А., Компьютерная электроника, ТОО ВЕК, Киев 1996.
6. Опадчий Ю.Ф. и др. Аналоговая и цифровая электроника, Горячая линия- Телеком, М. 1999.
7. Карлащук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC (Electronic Workbench) М., Солон Р, 2000
8. Резников Б.Л., Виртуальное исследование полупроводниковых приборов и аналоговых схем на IBM PC, МГТУ ГА, М. 2001.
9. Резников Б.Л., Зотов А.Б., Компьютерное моделирование устройств электроники, М., МГТУ ГА, 2001.
10. Резников Б.Л., Журавлев А.А., Пособие к выполнению лабораторной работы №4. М., МГТУ ГА, 2002г.

7. Приложение А – Руководство по Multisim

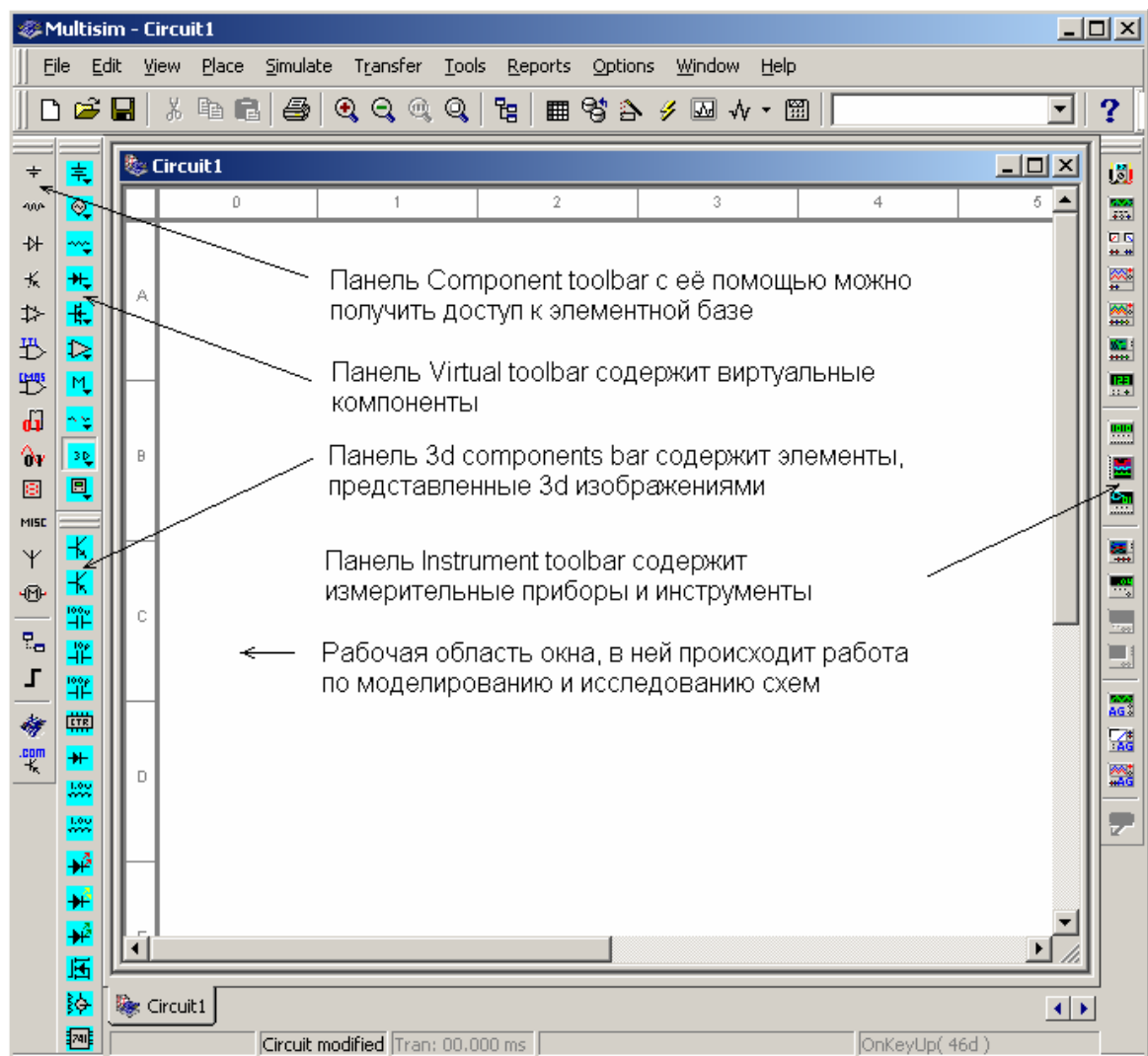
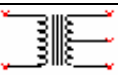


Рисунок 52 – панели инструментов Multisim

7.1 Элементная база и измерительные приборы

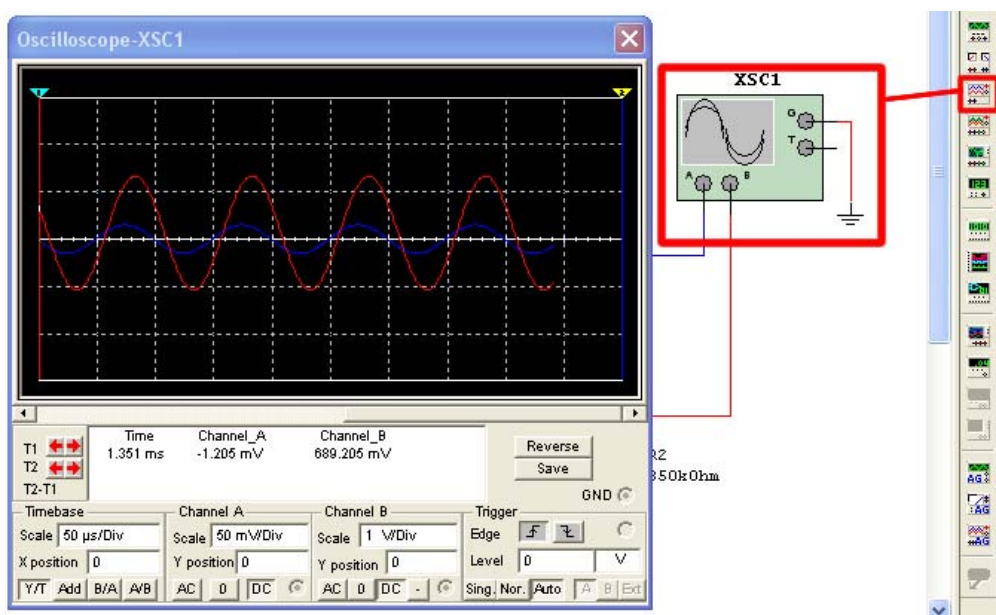
Для выполнения лабораторных работ понадобятся следующие элементы и инструменты:

№	Наименование	Название в Multisim	Изображение
Элементы			
1	Источник питания	DC_POWER	
2	Сопротивление	RESISTOR_VIRTUAL	
3	Конденсатор	CAPACITOR_VIRTUAL	
4	Диод	DIODE_VIRTUAL	
5	Диодный мост	1B4B42	

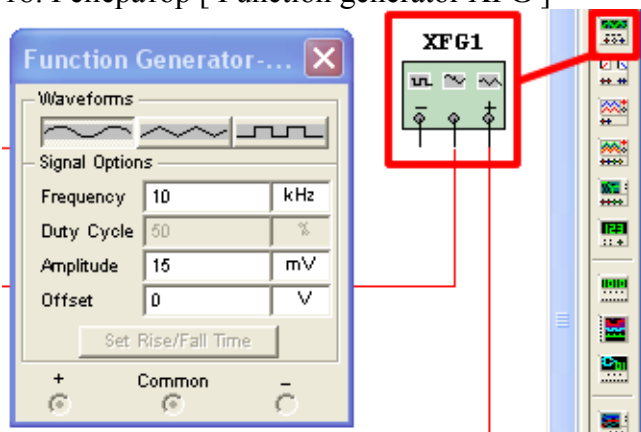
6	Стабилитрон	ZENER_VIRTUAL	
7	Трансформатор	TS_VIRTUAL	
8	Источник переменного питания	AC_VOLTAGE	
9	Земля	GROUND	
10	Транзистор n-p-n	BJT_NPN_VIRTUAL	
11	Транзистор p-n-p	BJT_PNP_VIRTUAL	
12	Полевой транзистор	JFET_N_VIRTUAL	
13	Операционный усилитель	OPAMP_3T_VIRTUAL	
14	Ключ	SPDT	
Измерительные приборы			
15	Вольтметр	VOLTMETER_H	
16	Амперметр	AMMETER_H	

Также для работы потребуются:

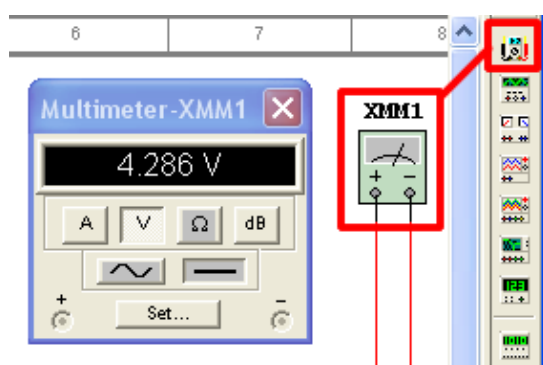
17. Осциллограф [Oscilloscope – XSC]



18. Генератор [Function generator XFG]



19. Мультиметр [Multimeter XMM]

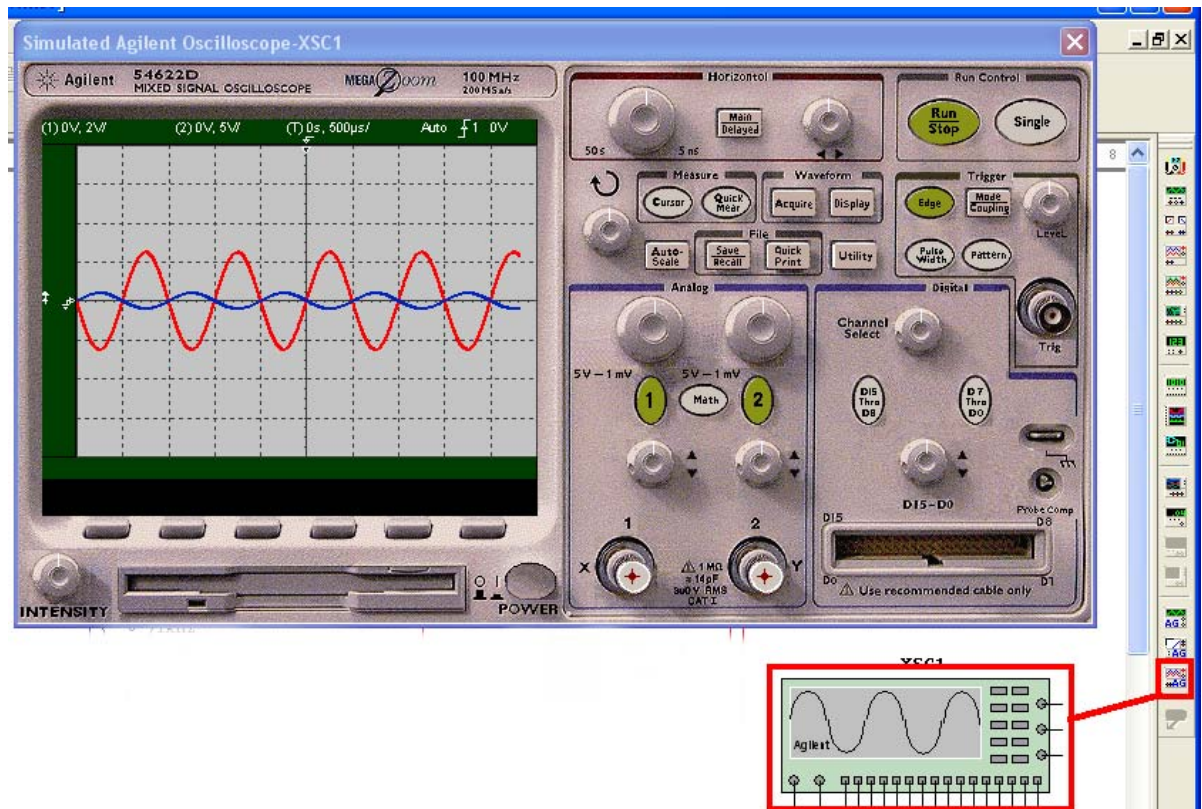


Для выполнения схем на реальных компонентах потребуются следующие элементы и измерительные приборы:

Элементы			
20	Резистор	Resistor1_1.0k	
21	Конденсатор	Capacitor1_100uF	
22	Диод	Diode1	
23	Операционный усилитель	Op-Amp_741	
24	Переменный резистор	Potentiometer1_5K	
25	Транзистор p-n-p	Bjt-pnp1	

Измерительные приборы

26. Осциллограф [Simulated Agilent Oscilloscope XSC]



27. Генератор [Simulated Agilent Function generator XFG]



7.2.Добавление элементов и работа с приборами

Для добавления элементов необходимо открыть окно Select a Component, нажав на пиктограмму или клавиши Ctrl+W.

После чего появиться следующее окно:

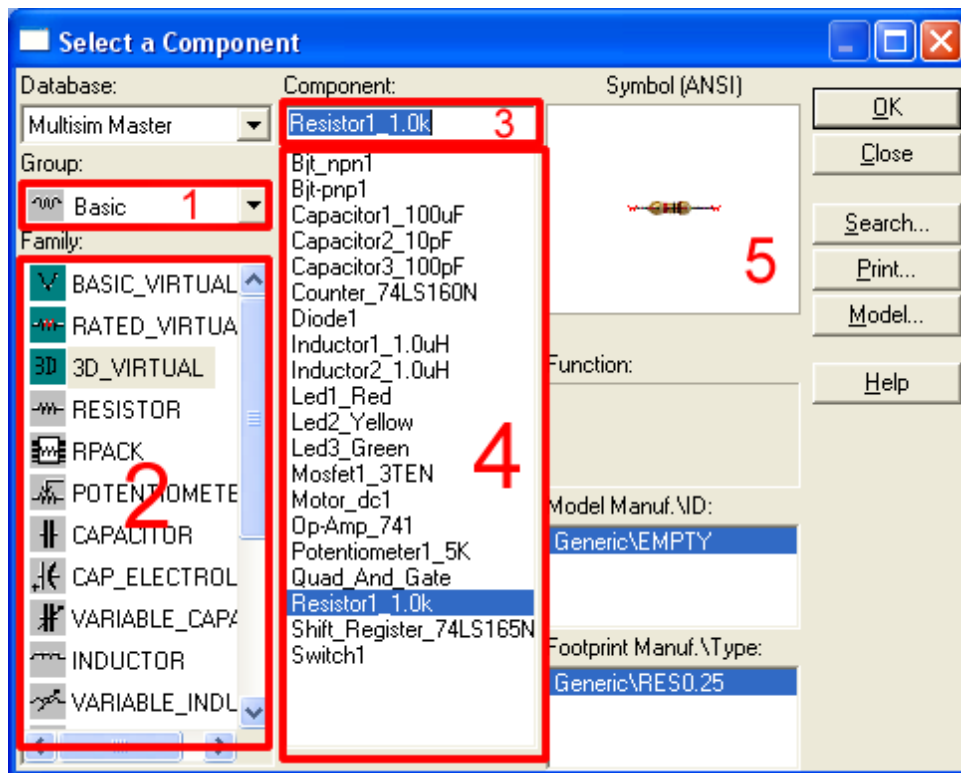


Рисунок 53 – Выбор нужного элемента

В данном окне 5 основных элемента:

1. Group (Группа)
2. Family (Подгруппа)
3. Component (Название компонента)
4. Список элементов в подгруппе
5. Графическое изображение

Для того, чтобы быстро выбрать требуемый элемент, необходимо ввести его имя в поле «Название компонента» (3).

На следующих рисунках представлены элементы управления осциллографом и генератором.

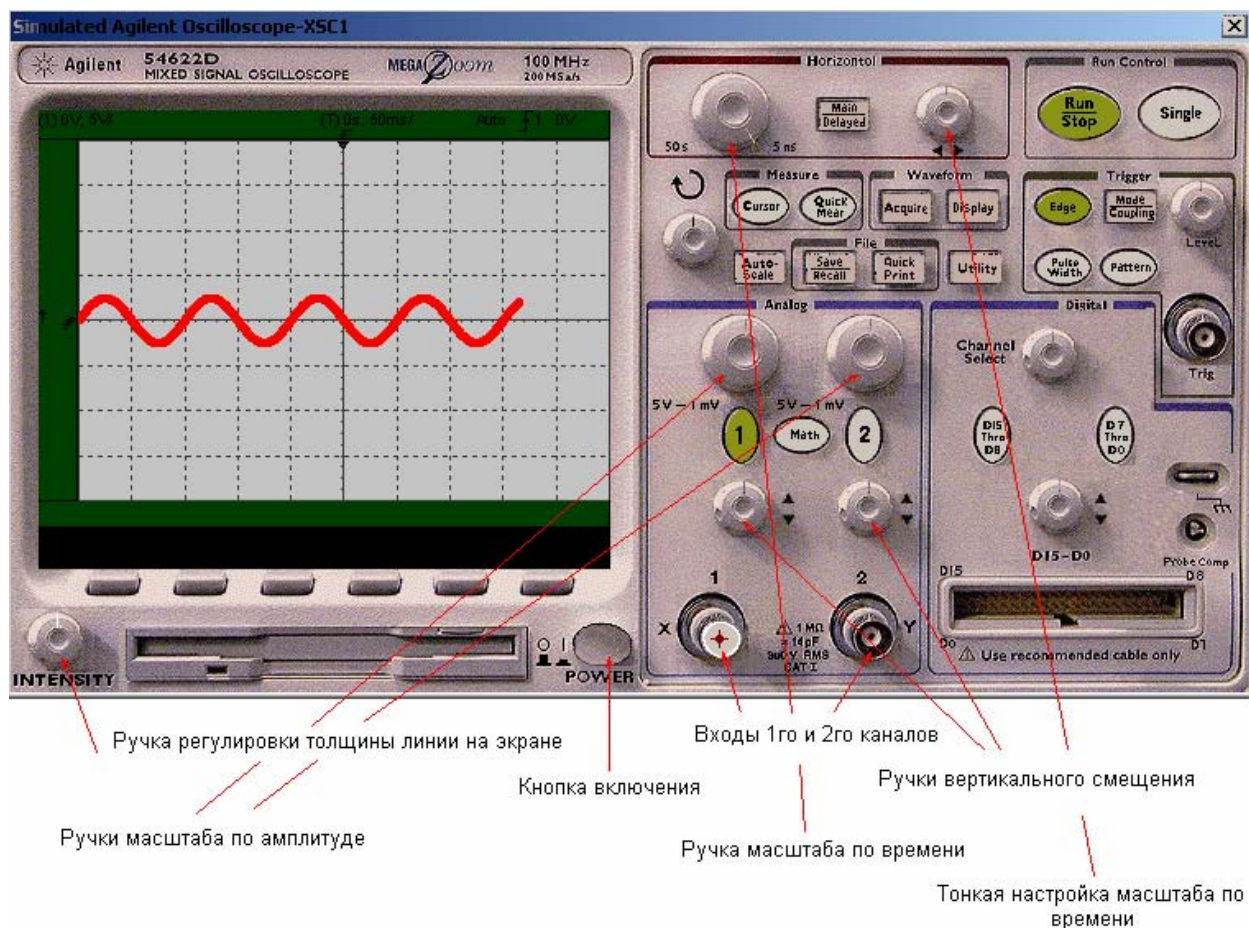


Рисунок 54 – Управление осциллографом

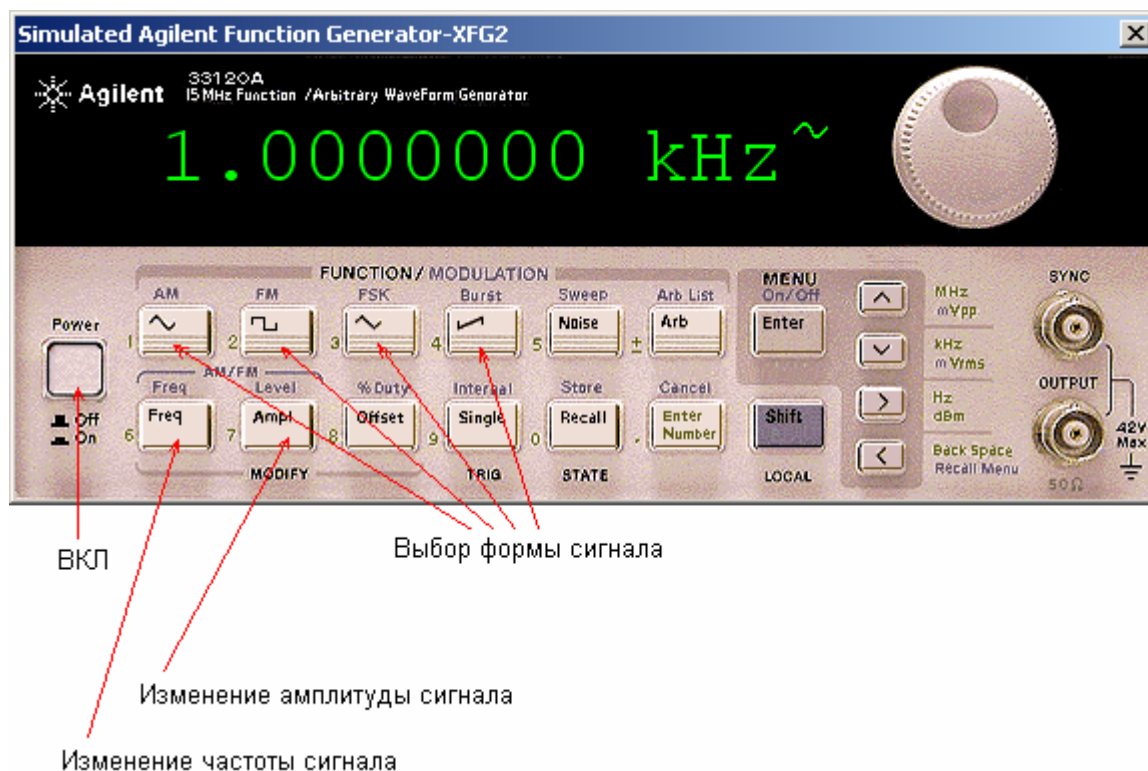


Рисунок 55 – Управление генератором