

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Шебзухов Тимур Александрович

Должность: Директор Пятигорского института (филиал) Северо-Кавказского
федерального университета

Дата подписания: 06.09.2023 12:23:31

Уникальный программный ключ:

d74ce93cd40e39275c3ba2f58486412a1c8ef96f

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Пятигорский институт (филиал) СКФУ

Колледж Пятигорского института (филиал) СКФУ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ
ПО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ
ПРИКЛАДНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА
Специальность СПО

09.02.01 Компьютерные системы и комплексы

Пятигорск 2022

Методические указания для практических занятий по дисциплине «Прикладная электроника» составлены в соответствии с ФГОС СПО. Предназначены для студентов, обучающихся по специальности 09.02.01 «Компьютерные системы и комплексы»

Рассмотрены на заседании ПЦК ИСТиД (филиал) СКФУ в г. Пятигорске

Протокол №__от _____2022 г.

Составитель
Директор

Т.В.Икаева
З.А. Михалина

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Данные методические указания предназначены для закрепления теоретических знаний и приобретения необходимых практических навыков и умений по программе дисциплины "Прикладная электроника " для специальности СПО 09.02.01 Компьютерные системы и комплексы

Практические занятия составлены в соответствии с требованиями ФГОС по специальности.

Целями проведения практических занятий являются:

- обобщение, систематизацию, углубление, закрепление полученных теоретических знаний
- формирование умений применять полученные знания на практике, реализацию единства интеллектуальной и практической деятельности;

В результате освоения учебной дисциплины обучающийся должен **уметь**:

- различать полупроводниковые диоды, биполярные и полевые транзисторы, тиристоры на схемах и в изделиях;
- определять назначение и свойства основных функциональных узлов аналоговой электроники:
- усилителей, генераторов в схемах;
- использовать операционные усилители для построения различных схем;
- применять логические элементы, для построения логических схем, грамотно выбирать их параметры и схемы включения;

В результате освоения учебной дисциплины обучающийся должен **знать**:

- принципы функционирования интегрирующих и дифференцирующих RC-цепей;
- технологию изготовления и принципы функционирования полупроводниковых диодов и транзисторов, тиристора, аналоговых электронных устройств;
- свойства идеального операционного усилителя;
- принципы действия генераторов прямоугольных импульсов, мультивибраторов;
- особенности построения диодно-резистивных, диодно-транзисторных и транзисторно-транзисторных схем реализации булевых функций;
- цифровые интегральные схемы:
- режимы работы, параметры и характеристики, особенности применения при разработке цифровых устройств;
- этапы эволюционного развития интегральных схем: большие интегральные схемы, сверхбольшие интегральные схемы, микропроцессоры в виде одной или нескольких сверхбольших интегральных схем, переход к нанотехнологиям производства интегральных схем, тенденции развития

Практическая работа №1.

Тема 1. 1.Материалы, используемые в электронной технике.

Семинар-обсуждение письменных рефератов

Цель работы: расширить и систематизировать знания о материалах, используемые в электронной технике.

Теоретическая часть:

При изготовлении электронных приборов и устройств используют самые разнообразные материалы, выполняющие функции проводников, диэлектриков, полупроводников. Металлы широко применяются в качестве соединительных проводников и элементов катушек индуктивности; органические и неорганические диэлектрики — в качестве изоляторов и составных частей конденсаторов, полупроводники — для изготовления диодов и транзисторов. Материалы могут быть органическими (на основе углеродных соединений) и неорганическими, чистыми химическими элементами или соединениями. Обычно материалы используются в твердом виде, но есть устройства, в которых применяются жидкости (жидкие кристаллы и электролиты) и газы (газоразрядные ячейки). Многие электронные приборы и устройства основаны на использовании физических особенностей границ раздела материалов с разными свойствами (проводники и полупроводники, проводники и диэлектрики), материалов с различными фазовыми состояниями (твердых и жидких, жидких и газообразных), материалов и вакуума (электронные лампы). Известно, что все вещества состоят из одного или более химических элементов. Мельчайшими составными частицами вещества являются атом и молекула. Как правило, атомы различных химически чистых элементов соединяются с образованием молекул вещества. Например, молекулы водорода, кислорода, азота и инертных газов состоят из двух атомов. Молекулы, из которых состоит вещество, определяют свойства данного вещества. Например, молекула воды состоит из двух атомов водорода и одного атома кислорода, что и определяет ее физические свойства (плотность, температуры кипения и замерзания). Молекулы органических веществ состоят из многих атомов, соединенных определенным образом. Различие структур соединений одних и тех же атомов определяет получение веществ с различными физическими свойствами. Атом состоит из электронов, вращающихся вокруг ядра, находящегося в центре атома и содержащего протоны и нейтроны. Отрицательно заряженные электроны притягиваются к ядру с положительно заряженными протонами и непрерывно вращаются по орбитам, или оболочкам, вокруг него. Атомы разных элементов отличаются друг от друга числом протонов и электронов, например, у атома водорода один протон и один электрон, а атом углерода имеет четыре протона и четыре электрона. Число электронов в атоме равно числу протонов, однако они не могут находиться на одном расстоянии от ядра, так как отталкиваются друг от друга. Электроны также не могут находиться на произвольных расстояниях от ядра и занимают только разрешенные энергетические уровни. На первом уровне могут находиться максимум два электрона, а на втором и далее — до восьми. Число протонов определяет атомный номер элемента в Периодической системе элементов Д.И.Менделеева, общее число протонов и нейтронов — его атомную массу, а число электронов, занимающих последний энергетический уровень, во многом определяет физические и химические свойства вещества. Если последний разрешенный энергетический уровень атома полностью заполнен, то этот атом инертен (инертными газами являются гелий, неон, аргон, криптон, ксенон). Если на последнем энергетическом уровне атома находятся от одного до трех электронов, то они слабо связаны с ядром и атом склонен отдавать эти электроны при соединении с другими элементами. При этом говорят, что он обладает металлическими свойствами. Если до полного заполнения последнего энергетического уровня атома не хватает одного, двух или трех электронов (т.е. имеется от одной до трех вакансий), то атом склонен притягивать электроны при соединении с другими элементами. При этом говорят, что он обладает неметаллическими свойствами. В металлических веществах электроны, слабо связанные с ядром (так

называемые свободные электроны), под действием электрического потенциала покидают свои орбиты и начинают упорядоченное движение, образуя поток электронов, или электрический ток. Такие вещества, имеющие хорошую электрическую проводимость, называются проводниками. Хороший проводник имеет большое число несвязанных (или слабо связанных) с ядром электронов, которые способствуют возникновению электрического тока. Проводник обладает на небольших отрезках (до 1 м) столь малым сопротивлением, что им можно пренебречь. Примерами хороших проводников являются серебро, медь, алюминий. Наличие свободных электронов и, соответственно, свойства металлических соединений определяют высокую теплопроводность проводников. Диэлектрик (изолятор) — это материал, имеющий только связанные электроны, т.е. не имеющий свободных электронов. Изоляторы препятствуют протеканию электрического тока и, следовательно, обладают очень большим сопротивлением (приближающимся к сопротивлению разомкнутой цепи). Примерами изоляторов могут служить диоксид кремния (кварц), стекло, сухое дерево, резина, поливинилхлорид, слюда, полистирол и др. Если диэлектрик поместить в электрическое поле, то электроны его молекул ориентируются в определенном порядке за счет поляризации. При этом говорят, что молекулы диэлектрика поляризуются. Атомы полупроводников относятся к четвертой группе Периодической системы элементов Д. И. Менделеева. К ним относятся углерод (C), кремний (Si) и германий (Ge). Как правило, чистые полупроводники являются аморфными веществами. Однако при определенных условиях при получении из расплавов они могут образовывать монокристаллы с правильной кристаллической решеткой. К полупроводникам относятся и некоторые соединения металла и неметалла, например, арсенид галлия (GaAs) и уникальные соединения — карбид кремния (SiC) и нитрид кремния (SiN). Полупроводники имеют слабую собственную проводимость, обусловленную наличием небольшого количества свободных электронов. Причем появление свободного электрона под действием температуры или света создает появление положительно заряженного атома с недостающим электроном, который называется дыркой. При этом дырка может захватывать электрон соседнего атома, который в этом случае станет дыркой. Таким образом, дырки могут перемещаться до тех пор, пока не найдут свободный электрон и соединятся с ним. Свободные электроны и дырки полупроводника — основные носители зарядов, они создают слабую собственную проводимость. Процесс образования электронов и дырок под действием теплоты или света представляет собой генерацию носителей зарядов. Количество свободных электронов и дырок в полупроводниках возрастает при повышении температуры, что приводит к увеличению их проводимости, в отличие от металлов, проводимость которых с ростом температуры падает. Проводимость полупроводника можно повысить посредством введения определенного количества легирующих присадок (примесей). Некоторые присадки (например, атомы мышьяка As, неметалла пятой группы) вносят в кристаллическую решетку атома германия дополнительные электроны, в результате чего получают полупроводник *п*- типа (negative). Такие атомы называются атомами-донорами. Добавление к кристаллическому германию атомов-акцепторов (например, атомов алюминия Al, металла третьей группы) создает недостаток электронов в его внешней оболочке, т.е. образование дырок, имеющих положительный заряд. Такие полупроводники называются полупроводниками *р*- типа (positive). Полученные при внедрении примесей электроны являются основными носителями для полупроводников *п*- типа, а дырки — для полупроводников *р*- типа. Явления проводимости в металлах, диэлектриках и полупроводниках хорошо описываются на основе зонной теории, которая вводит понятие энергетического состояния электрона, обладающего кинетической и потенциальной энергией. Согласно зонной теории энергия электрона в твердом теле может изменяться в некоторых пределах практически непрерывно, но при этом существуют интервалы значений энергии (запрещенные уровни), которые электрон может преодолевать только скачком. Электроны в твердом веществе могут находиться только в

валентной зоне (ВЗ) или в зоне проводимости (ЗП), между которыми имеется запрещенная зона (ЗЗ). Для перевода электрона из валентной зоны в зону проводимости требуется придать ему дополнительную энергию ΔE , называемую энергией активации и измеряемую в электрон-вольтах (эВ). У атомов полупроводникового кремния энергия активации $\Delta E_{Si} = 1,12$ эВ выше, чем у атомов германия $\Delta E_{Ge} = 0,72$ эВ, поэтому перевести кремний в проводящее состояние труднее. Введением легирующих примесей можно уменьшить зону проводимости или увеличить валентную зону и таким образом уменьшить ширину запрещенной зоны. Расположение электронов и ширина запрещенной зоны полностью определяют электрические свойства вещества. Дело в том, что валентные электроны сильно связаны с атомами и не могут переходить от атома к атому под действием электрического поля. И наоборот, электроны, находящиеся в зоне проводимости, менее связаны с атомами и легко перемещаются от одного атома к другому под воздействием электрического поля. Зонная теория объясняет это наличием многих свободных уровней в зоне проводимости. У диэлектриков валентная зона полностью заполнена электронами и отделена от зоны проводимости широким барьером запрещенной зоны. Вследствие этого у диэлектриков нет свободных электронов в зоне проводимости и, соответственно, они имеют плохую проводимость.

Вопросы, выносимые на семинар:

1. Классификация и требования к материалам.
2. Полупроводники.
3. Проводниковые материалы, резисторы.
4. Диэлектрические материалы и компоненты.
5. Магнитные материалы.
6. Сверхпроводники

Практическая работа №2.

Тема 1.2. Физические процессы в полупроводниках.

Семинар-обсуждение письменных рефератов.

Цель работы: расширить и систематизировать знания о физических процессах, протекающих в полупроводниках (интернет-ресурсы).

Теоретическая часть:

Электрон в электрическом и магнитном поле. Суть явлений в приложении к электронной технике. Электропроводность полупроводников. Полупроводники р и n типа.

Образование и свойства р-n перехода. Факторы, влияющие на ВАХ реального р-n перехода. Емкость р-n перехода. Контакт металл-полупроводник Физические явления при образовании р-n перехода. Легирование.

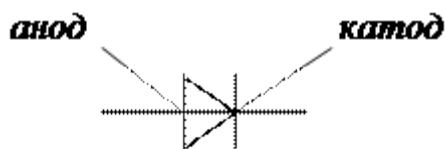
Полупроводники при низких температурах ведут себя как диэлектрики. С повышением температуры и под воздействием света часть электронов полупроводника приобретает энергию, создавая тем самым условия для появления электропроводности. В связи с переходом части электронов в ЗП в ВЗ полупроводника образуется соответствующее число свободных энергетических уровней — дырок. Это позволяет электронам перемещаться внутри ВЗ под действием электрического поля с одного уровня на другой, создавая дырочную проводимость. С повышением температуры все больше электронов проникает в ЗП, повышая тем самым электропроводность полупроводника, причем сильнее она повышается у полупроводников с более узкой ЗЗ. При приложении напряжения энергетические зоны в веществе становятся наклонными, причем угол их наклона возрастает с увеличением напряженности электрического поля. Если потенциальная энергия электрона в поле $E_p = q\phi$ (где q — заряд электрона; ϕ — разность потенциалов) выше энергии активации ΔE , то электроны могут проникать (туннелировать) из ВЗ в ЗП, создавая электронную проводимость. При этом одновременно образуются и дырки (атомы без одного электрона), создающие дырочную проводимость. Введение в полупроводник легирующих примесей приводит к появлению дополнительных энергетических уровней внутри ЗЗ. Если эти дополнительные уровни находятся вблизи ЗП

(при введении донорной примеси), то электроны примесных атомов легко переходят в нее, увеличивая проводимость полупроводника. Если же дополнительные уровни находятся вблизи ВЗ (при введении акцепторной примеси), то на них легко переходят электроны полупроводника из ВЗ, создавая дырки и увеличивая дырочную проводимость. К полупроводникам относятся вещества, у которых ширина ЗЗ не превышает 2,5 эВ. При температуре 300 К ширина ЗЗ у кремния (Si) составляет 1,12 эВ, у германия (Ge) — 0,75 эВ, у арсенида галлия (GaAs) — 1,43 эВ, у карбида кремния (SiC) — 2,4 ... 3,4 эВ. Энергия ионизации донорных и акцепторных примесей находится в пределах 0,01 ... 0,05 эВ. Средняя энергия теплового возбуждения при комнатной температуре составляет 0,025 эВ. Поэтому введение в полупроводник ничтожного количества примесей проводника многократному увеличению проводимости. Согласно зонной теории в полупроводниках под действием теплоты, света и колебаний кристаллической решетки постоянно происходит образование свободных электронов и дырок, т.е. генерация носителей зарядов. Одновременно происходит обратный процесс — возвращение электронов в валентную зону (рекомбинация носителей зарядов). Эти процессы приводят к формированию равновесной концентрации электронов и дырок в объеме полупроводника. Под воздействием электрического поля начинается генерация новых носителей зарядов и возникает избыточная (неравновесная) концентрация электронов и дырок. Избыточная концентрация носителей зарядов может образовываться в некоторых областях полупроводниковой структуры за счет инжекции (впрыскивания) и экстракции (втягивания) электронов электрическим полем, а так же в результате аккумуляции зарядов в ловушках. Прямая рекомбинация электронов и дырок маловероятна, так как в основном они находятся в разных местах полупроводниковой структуры. Обычно рекомбинация проходит с участием рекомбинационных ловушек, роль которых выполняют примесные атомы либо дефекты кристаллической решетки и поверхности. При этом электрон из зоны проводимости переходит в ловушку и находится там до тех пор, пока к нему не подойдет дырка; после чего происходит второй этап рекомбинации — электрон переходит на свободный уровень в валентной зоне дырки. Поскольку при рекомбинации электрон переходит на более низкий энергетический уровень, выделяется избыточная энергия. Если при этом излучается квант света — фотон, рекомбинация называется излучательной. При безизлучательной рекомбинации энергия электрона передается кристаллической решетке полупроводника с образованием кванта тепловой энергии колебаний — фонона.

Образование и свойства р—п-перехода.

Если полупроводник р-типа соединить с полупроводником п-типа и поместить в высокотемпературный вакуумный реактор, то под действием диффузии образуется монолитный пограничный слой с разными типами полупроводников по обеим сторонам границы раздела. Этот пограничный слой, называемый р—п-переходом, обладает особыми свойствами. Электроны в нем из области с проводимостью п-типа в нормальном состоянии под действием температурных колебаний и диффузии перетекают в область с проводимостью р-типа, чтобы заполнить в ней притягивающие их дырки. Дырки также диффундируют в п-область. Одновременно в р-области образуются некомпенсированные заряды акцепторной примеси, а в п-области — положительные заряды донорной примеси. Эти заряды создают электрическое поле и контактную разность потенциалов, препятствующую дальнейшему перемещению основных носителей зарядов и создающую для них потенциальный барьер. Перетекание электронов продолжается до тех пор, пока в р—п-переходе не образуется нейтральная зона, или так называемый обедненный слой, и потенциальный барьер достигнет максимальной величины. Вместе с тем электрическое поле контактной разности потенциалов обеспечивает возможность движения случайно возникающих неосновных носителей зарядов (дырок из п-области и электронов из р-области). Это приводит к появлению дрейфового тока, состоящего из электронной и дырочной составляющих. Если нет приложенного напряжения, то быстро наступает

равновесие, которое собственно и препятствует дальнейшему росту потенциально- го барьера. В обедненном приконтактном слое полупроводника атомы, как и в диэлектрике, нейтральны и дипольноориентированы, а потенциальный барьер препятствует дальнейшему движению основных носителей зарядов. Для того чтобы пересечь границу раздела, носители зарядов должны обладать энергией, достаточной для преодоления потенциального барьера. Источником этой энергии может служить внешняя электродвижущая сила (ЭДС), приложенная к полупроводникам по обе стороны р—п-перехода. При прямом включении источника ЭДС, когда плюс подключается к полупроводнику р-типа, а минус к полупроводнику п-типа, электрический ток будет протекать только тогда, когда напряжение $U_{п.б}$ превысит потенциальный барьер. Высота потенциального барьера зависит от типа применяемого полупроводника. Для германия она составляет 0,3 В, а для кремния — 0,6 В. Если внешнее напряжение превышает потенциальный барьер, области с электронной и дырочной проводимостями сближаются, обедненная область исчезает, электроны впрыскиваются (инжектируются) в р-область, объединяются с дырками (рекомбинируют) и, перемещаясь далее от атома к атому, создают электрический ток в цепи. Аналогично дырки инжектируются в п-область, где рекомбинируют, соединяясь с электронами. Инжектированные носители зарядов рекомбинируют не сразу, а в течение некоторого времени (времени жизни носителей зарядов), пробегая при этом в среднем некоторое расстояние (диффузионную длину пробега). При обратном включении источника напряжения электроны полупроводника с проводимостью п-типа (п-области) притягиваются положительным полюсом источника напряжения смещения, а дырки р-области притягиваются отрицательным полюсом. В результате обедненный слой расширяется и увеличивается потенциальный барьер, препятствующий проникновению электронов через границу раздела. Таким образом, через р—п-переход, при обратном включении напряжения ток практически не будет проходить. Следовательно, р—п - переход имеет одностороннюю проводимость, т.е. в одном направлении он пропускает ток, а в другом — не пропускает.



Структура полупроводникового диода с р—п-переходом и его условное графическое обозначение (УГО) показаны на рис. 1.1, а, б. Кремниевый диод состоит из двух слоев. Первый (вплавленный) слой состоит из кремния, легированного фосфором (п-область). Примесь фосфора создает избыток электронов в зоне проводимости (электронную проводимость). Второй слой состоит из кремния, легированного бором (р- область), в котором имеется избыток атомов с недостатком электронов (т. е. дырок). В этом слое преобладает дырочная проводимость. В контактной области образуется р—п - переход, создающий одностороннюю проводимость. В показанной на рис. 1.1 структуре р- область является более массивной и содержит большее количество примесей, чем п- область, поэтому ее называют базой. Зависимость силы тока в диоде от подаваемого к его обкладкам напряжения называется вольтамперной характеристикой (ВАХ). Схема для снятия ВАХ диодов при прямом включении внешнего источника напряжения, т. е. когда плюс подключается к полупроводнику р-типа, а минус — к полупроводнику п- типа, показана на рис. 1.1, в. Схема снятия ВАХ диодов при обратном включении внешнего источника ЭДС, т.е. когда плюс подключается к полупроводнику р-типа, а минус — к полупроводнику п- типа, показана на рис. 1.1, г. Типичные вольтамперные характеристики кремниевых и германиевых диодов показаны на рис. 1.2. Тангенс угла наклона кривой зависимости тока от напряжения определяет крутизну ВАХ, которая зависит от поперечного сечения р—п -перехода диода. Обратное напряжение, при котором происходит пробой диода ($U_{проб}$) зависит от толщины слоев р- и п - типов и

ширины запрещенной зоны полупроводника. У кремниевых диодов $U_{\text{проб}}$ больше, чем у германиевых, и может достигать 1 000 В. Пробой р—п - перехода может быть электрическим (обратимым) или тепловым (необратимым). Электрические пробой в свою очередь подразделяются на лавинные и туннельные. При лавинном пробое отдельные электроны р- области (неосновные носители зарядов) под действием высокого обратного напряжения р—п - перехода вырываются из нее и, соударяясь с атомами перехода, вызывают лавинное размножение электронов, а следовательно, и резкое возрастание тока. Напряжение на диоде падает. При этом попытки его повышения приводят к усилению тока, перегреву диода и его разрушению. Туннельный пробой наблюдается у некоторых диодов с высокими концентрациями легирующих присадок и узкой зоной р—п - перехода, когда под действием обратного напряжения верхний уровень валентной зоны их р- области начинает превышать нижний уровень зоны проводимости п- области. В этом случае электроны могут переходить из р- области в п- область без затрат энергии на преодоление запрещенной зоны (т.е. могут туннелировать). При дальнейшем повышении обратного напряжения начинается линейное нарастание тока за счет туннелирования. После снятия напряжения свойства р—п- перехода восстанавливаются. Тепловой пробой р—п-перехода наступает при нарушении теплового баланса, т.е. когда выделяемое количество теплоты превышает количество теплоты, рассеиваемое в р—п- переходе. При этом температура перехода повышается, наступает разрушение кристаллической решетки и диода. Рис. 1.2. Вольтамперные характеристики германиевого (Ge) и кремниевого (Si) диодов. Емкость р—п- перехода определяет быстродействие электронных приборов и называется барьерной (зарядной). Барьерная емкость зависит в основном от площади перехода и приложенного напряжения. При повышении прямого напряжения ширина перехода уменьшается, а число нескомпенсированных зарядов и емкость увеличиваются. При повышении обратного напряжения барьерная емкость снижается. Барьерную емкость сплавного несимметричного р—п- перехода, у которого концентрация акцепторов N_A в р- области больше, чем концентрация доноров N_D в п- области, можно рассчитать по формуле: $C_{spn} = 0,5 \sqrt{\epsilon \epsilon_0 N U_{ак}}$, где S — площадь перехода; ϵ_0 , ϵ — диэлектрические проницаемости соответственно полупроводника и р—п- перехода; U — обратное напряжение перехода. Барьерная емкость ухудшает свойства полупроводниковых приборов на основе р—п- перехода, используемых при выпрямлении токов высокой частоты, и снижает быстродействие этих приборов при выполнении с их помощью переключений в импульсных электронных ключах, поэтому ее стараются уменьшить путем уменьшения площади перехода. Изменение емкости р—п- перехода при изменении напряжения используют в схемах электронного изменения частоты генераторов с применением варикапов (диодов с изменяемой емкостью). При прямом токе в базе диода с р—п- переходом возникает диффузная емкость, связанная с появлением не успевших рекомбинировать неосновных носителей зарядов. При резком переключении полярности диода диффузная емкость вызывает появление скачка обратного тока, т.е. временное нарушение запирающего свойства перехода. Этот эффект, связанный с «рассасыванием» зарядов, также нежелателен и его устраняют специальными диодами Шоттки, созданными на основе контактного перехода металл—полупроводник. Следует отметить, что работа многих электронных приборов основана на физических явлениях, происходящих в зоне контакта веществ с разными электропроводящими свойствами, поэтому рассмотрим эти явления подробнее. Контактные явления — это общее название физических явлений, возникающих в области контакта двух материалов с разной электропроводностью. К числу важнейших контактных явлений относится возникновение контактной разности потенциалов металлов, имеющих различную работу выхода электронов $A_{\text{вых}}$. Работой выхода называется работа, которую затрачивает электрон для преодоления силы притяжения к атомам вещества, т.е. для выхода из вещества в вакуум. При тесном соприкосновении металлов с разной работой выхода или соединении их в вакуумной диффузной печи на свободных концах этих металлов возникает контактная

разность потенциалов, обусловленная перетеканием части электронов из одного металла в другой и появлением разной концентрации электронов в проводниках. В результате один из проводников оказывается заряженным положительно, а другой — отрицательно. Созданная при этом разность потенциалов, характерная для данной пары металлов, препятствует дальнейшему перетеканию электронов. В отличие от ЭДС источников тока при замыкании этой цепи контактная разность потенциалов не приводит к возникновению электрического тока, так как электроны находятся в равновесном состоянии по обеим сторонам соединения. Если зону контакта (спай) металлов нагревать, то равновесие электронов нарушится и возникнет термоэлектродвижущая сила. Разность напряжений при термо ЭДС мала, КПД преобразования теплоты в электричество незначителен вследствие высокой теплопроводности металлов, поэтому термо ЭДС используют только в датчиках температуры. На основе контактной разности потенциалов работают термопары из сплавов хромеля и алюмеля, имеющие линейную зависимость силы тока от температуры в диапазоне от 50 до 500 °С. Термопары В, из платины и родия, имеют линейную зависимость тока в температурном диапазоне от 50 до 1 200 °С. Контактная разность потенциалов возникает и при соприкосновении полупроводников с различными типами проводимости. Контакт между полупроводниками с р- и п- проводимостями создает область р—п- перехода с обедненным (запорным) слоем, обладающим односторонней проводимостью. Возникающая при соединении таких полупроводников контактная разность потенциалов обладает теми же свойствами, что и при соединении разнородных металлов. Возникновение при нагреве соединения разнородных полупроводников термо ЭДС используется при создании источников питания для радиоприемников и маломощных радиопередатчиков. Благодаря тому, что теплопроводность полупроводников меньше, чем металлов, КПД полупроводниковых термогенераторов выше, чем металлических, и они могут применяться там, где нет других источников тока. Для нагрева спаев термогенераторов применяются нагревательные устройства. Как уже отмечалось ранее, металлы имеют свободные электроны проводимости. Следовательно, при контакте металла с легированным полупроводником может образоваться контактный переход, похожий на р—п- переход в полупроводниках. Переходы металл—полупроводник впервые были исследованы немецким ученым Шоттки, поэтому и запирающий контакт называют барьером Шоттки. На основе таких контактов были созданы диоды Шоттки, обладающие высоким быстродействием вследствие того, что в них не происходит накопления диффузных зарядов. Эти диоды используются в СВЧ-схемах и ускоряющих цепях ключевых каскадов, которые будут рассмотрены далее. Особенности поведения электронов в полупроводниках и контактных зонах позволили создать новые уникальные электронные приборы, устройства и практически важные изделия современной электронной техники. Свойства р—п- переходов используются в разных электронных полупроводниковых приборах: диодах, транзисторах, тиристорах, динисторах, светодиодах, фотодиодах и других приборах, составляющих современную элементную базу электронной техники. На основе полупроводников с р—п- переходами формируются также сложные микросхемы, имеющие сотни и тысячи электронных элементов на одном кристалле и выполняющие сложные цифровые или специальные аналоговые функции.

1.4. Электронные вакуумные приборы

Электронные лампы

Первыми в радиоэлектронной технике начали использовать вакуумные электронные приборы — электронные лампы (рис. 1.3). Работа электронной лампы основана на создании потока электронов в вакууме и управлении им с помощью электрических полей, формируемых специальными электродами. Электронная лампа состоит из нескольких металлических электродов, заключенных в стеклянный, керамический или металлокерамический баллон, внутри которого создан высокий вакуум. Один из электродов (катод) нагревают спиралью до температуры 500 ... 700 °С. Под действием высокой температуры электроны покидают металлическую поверхность катода и образуют вокруг него электронное облако. В простейшей электронной лампе

диоде второй электрод (анод) имеет форму цилиндра, охватывающего катод. Если к диоду подвести постоянное напряжение, как в полупроводниковом диоде (см. рис. 1.1, в), т.е. плюс — на анод и минус — на катод (прямое включение), электроны под действием электрического поля устремятся от катода к аноду, создавая электрический ток в цепи. Если в цепь включить резистор R , то при появлении тока в лампе на нем появится перепад напряжений. При малом анодном напряжении только небольшая часть электронов притягивается анодом, а остальные электроны образуют пространственный заряд вокруг катода. По мере возрастания анодного напряжения увеличивается число электронов, достигающих катода, и ток в цепи растет, а плотность пространственного заряда уменьшается. Когда напряжение и ток возрастают настолько, что пространственный заряд полностью «рассасывается» и все электроны, испускаемые катодом, достигают анода, рост тока увеличением анодного напряжения замедляется и наступает режим насыщения. Измеряя зависимость тока от напряжения, получают ВАХ диода, как в полупроводниковом диоде (см. рис. 1.2). Если поменять полярность подключаемого к диоду напряжения, т.е. к аноду подвести минус, а к катоду — плюс (обратное включение), возникновения электрического тока в электронной лампе не произойдет, так как анод при этом остается «холодным» и не испускает электроны. Следовательно, электронная лампа диод обладает односторонней (вентильной) проводимостью. Это свойство используется при применении электронных ламп в качестве детектора в радиоэлектронных устройствах и в качестве выпрямителя при преобразовании переменного напряжения в постоянное. Электронная лампа триод имеет третий электрод, устанавливаемый между анодом и катодом. Он располагается ближе к катоду, поэтому напряжение, подаваемое на электрод, сильнее влияет на поток электронов между анодом и катодом. Поскольку третий электрод выполняется действительно в виде сетки или спирали, окружающей катод, то сам он забирает мало электронов, а большая их часть проскакивает к аноду. Из-за близкого расположения сетки к катоду небольшие изменения напряжения на ней сильнее сказываются на потоке электронов к аноду и значении анодного тока. Именно это свойство триода используется для усиления электрических сигналов. На основе триодов и других электронных ламп разработано множество электронных устройств, в частности электронных усилителей разнообразного назначения: резонансных, широкополосных, импульсных, силовых и т.п. Работа триодов во всех усилителях примерно одинаковая, а различие усилителей определяется внешними электрическими цепями. Ламповый генератор — устройство, в котором при помощи электронной лампы создаются незатухающие электрические колебания. Основными элементами простейшего лампового генератора являются электронная лампа (триод) с источниками питания и колебательный контур. Клистрон — это электронный прибор, представляющий собой сочетание многоэлектродной лампы с объемными резонаторами и предназначенный для усиления и генерирования колебаний сверхвысоких частот (в диапазоне сантиметровых и миллиметровых волн). Отражательный клистрон — электронный прибор для генерации ультравысоких частот (свыше 100 ГГц), относящихся к миллиметровому диапазону длин волн. Магнетрон — это многорезонаторный электронный прибор для генерации сверхвысоких частот большой мощности. Анод магнетрона представляет собой массивный цилиндр, в центральной полости которого расположен катод, а в стенках находятся цилиндрические резонаторные полости. Для создания нужной траектории электронов, идущих от катода к аноду, применяется поперечное магнитное поле. Под действием этого поля искривляется путь в соответствии с законом Лоренца вылетающих из катода электронов. Приближаясь к аноду, электроны движутся почти по касательной к его цилиндрической поверхности с прорезями, направленными к резонаторным полостям. Под действием случайных изменений потока электронов в резонаторах возникают колебания, которые модулируют эти потоки электронов, создавая, таким образом, устойчивую генерацию СВЧ-колебаний. Часть энергии колебаний отбирается в рабочую 24

линию из одного резонатора коаксиальным волноводом с помощью петли связи. Лампа

бегущей волны (ЛБВ) — специальная электронная лампа для усиления и генерации колебаний сверхвысоких частот (дециметровых и сантиметровых волн). Внутри этой лампы, выполненной в виде цилиндра диаметром 3 см и длиной 15 ... 20 см, вдоль провода, свитого в длинную спираль, распространяется электромагнитная волна со скоростью света ($c \approx 300\,000$ км/с). Вдоль оси спирали электрическое поле этой волны распространяется с меньшей скоростью (так как эта последняя скорость представляет собой проекцию скорости распространения волн вдоль спирали на направление оси спирали). Одновременно вдоль оси спирали движется пучок электронов приблизительно со скоростью перемещения поля. Взаимодействуя с электрическим полем волны, электроны отдают ему часть своей энергии и тем самым усиливают волну, распространяющуюся по спирали. При достаточно большом усилении в лампе наступает генерация колебаний. Основные достоинства лампы бегущей волны как усилителя: возможность прямого усиления СВЧ- сигналов в широкой полосе частот (до 10 % средней частоты) и сравнительно низкий шумовой фактор. Лампа обратной волны (ЛОВ) — электронная лампа, в которой в отличие от лампы бегущей волны электроны, сконцентрированные в узкий пучок, движутся не в одном направлении с движущимся вдоль замедляющего устройства полем бегущей волны, а встречно. При этом так же, как и в ЛБВ, взаимодействие движущихся электронов с полем бегущей волны приводит к усилению этого поля. Основная область применения лампы обратной волны — генерация колебаний в диапазоне дециметровых и сантиметровых волн. Электронно-лучевые трубки. Модификациями электронных ламп являются такие электровакуумные приборы, как кинескопы телевизоров, электронно-лучевые трубки осциллографов, рентгеновские трубки, электронно-оптические преобразователи и т.п. В основе действия электронно-лучевых трубок и кинескопов лежит принцип электронной пушки. Это нагреваемый спиралью катод и ряд электродов, формирующих направленный пучок электронов, интенсивность которых регулируется сеточным электродом. Специальные генераторы в осциллографах и телевизорах формируют линейно изменяющееся напряжение, которое подается на отклоняющие электроды и создает развертку изображения по вертикали и горизонтали. В результате на экране получают двумерную картину изображения.

Вопросы, выносимые на семинар:

1. Электрон в электрическом и магнитном поле.
2. Электропроводность полупроводников.
3. Полупроводники р и n типа.
4. Образование и свойства р-n перехода.
5. Физические явления при образовании р-n перехода Чем характеризуется подвижность носителей в полупроводнике?
6. Собственная проводимость и способы образования примесных проводимостей полупроводников.
7. Физические основы образования и вентильные свойства электронно-дырочного перехода. Вольт - амперная характеристика р-n перехода.
8. Прямое и обратное включение р-n перехода, вольт-амперная характеристика, пробой, его виды.

Практическая работа №3

Тема 1.3. Полупроводниковые выпрямительные диоды.

Исследование полупроводниковых выпрямительных диодов

Цель работы: Исследование принципа действия диодов. Получение практических навыков в анализе и оценке их работоспособности.

Перечень используемого оборудования

Измерительный стенд, модуль «Полупроводниковый диод», образцы диодов, ампервольтметр.

Теоретическая часть:

Выпрямительные диоды. *Выпрямительными* диодами называются электронные приборы, основным назначением которых является выпрямление переменного тока. Условное графическое обозначение выпрямительных диодов (УГО) приведено на рис. 1.

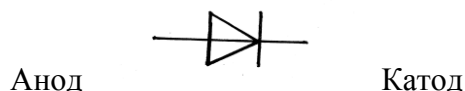


Рис.1 УГО выпрямительного диода

К выпрямительным диодам относят плоскостные двухэлектродные полупроводниковые приборы, выполненные на кремниевой или германиевой основе, а также селеновые и медно-закисные приборы.

Работа выпрямительных диодов основана на использовании выпрямительных (вентильных) свойств электронно-дырочного перехода. Свойства выпрямительных диодов характеризуются вольтамперными характеристиками (ВАХ) и параметрами. На рис. 2а представлены вольтамперные характеристики кремниевого и германиевого диодов.

В зависимости от площади р-п-перехода и эффективности отвода теплоты выпрямительные диоды подразделяются на диоды малой мощности, рассчитанные для получения выпрямленного тока не более 0,3А, средней с токами от 0,3 до 10А и большой, у которых выпрямленный ток превышает 10А.

Поскольку выпрямительные диоды обладают сравнительно большой емкостью - порядка нескольких десятков пикофарад, а также большим временем восстановления обратного сопротивления, их практическое применение ограничивается диапазоном частот (максимальная частота не превышает 100 кГц).

В качестве исходного материала при производстве германиевых и кремниевых выпрямительных диодов используют соответственно германий и кремний с электронной (п-типа) электропроводностью, поскольку подвижность электронов, как основных носителей заряда, в 2—2,5 раза больше подвижности дырок.

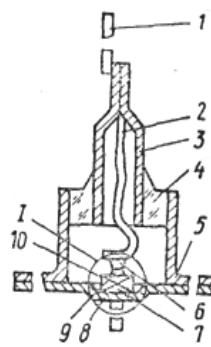
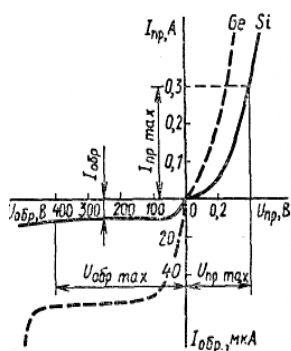
Исходный материал кристалла образует базовую область диода (катод), а акцепторная примесь (индий, алюминий, бор) - эмиттерную область (анод). От базовой и эмиттерной областей исходят внешние выводы.

Базовую область припаивают к кристаллодержателю. Для лучшего теплоотвода в диодах средней и большой мощности применяют радиаторы

Конструкция плоскостных диодов малой мощности представлена на рис.2б. Плоскостные диоды выполняют в виде пластинки 7 с электронной проводимостью, укрепленной на металлическом держателе 8, представляющем собой нижний контакт р-п-перехода.

В пластинке 7 из германия или кремния создается плоский по форме электронно-дырочный переход 9. В германиевых диодах для получения электронно-дырочного перехода 9 в пластинку из германия с электронной проводимостью добавляют каплю расплавленного индия, а затем нагревают. При нагревании плавящийся индий диффундирует в основной полупроводник, образуя в нем слой 10с дырочной проводимостью.

Верхний контакт представляет массивную деталь 6, способную пропускать значительные токи большого по площади перехода. Германиевая пластинка 7 с р-п-переходом помещается в металлический корпус 5, герметизированный сверху стеклянным изолятором 4 с трубкой 3, в которой помещены внутренний 2 и наружный 1 выводы.



а б
Рис.2 ВАХ диодов (а) и их конструкция (б)

Выпрямительные диоды характеризуют следующими параметрами.

Прямой ток $I_{Пр}$ - ток, протекающий через диод при прямом напряжении, обычно равном 1В. Прямой ток, как было сказано выше, определяется мощностью, на которую должен быть рассчитан диод.

Прямое падение напряжения $U_{пр}$ - падение напряжения на диоде при заданном прямом токе. Прямое напряжение у кремниевых диодов больше, чем у германиевых.

Максимальный обратный ток $I_{обр.мах.}$ - ток неосновных носителей, протекающий через диод при обратном напряжении, обычно близком к напряжению электрического пробоя. Обратный ток составляет сотые доли процента от прямого тока, у кремниевых диодов он меньше, чем у германиевых.

Максимальное обратное напряжение $U_{обр.мах}$ - падение напряжения на диоде при оговариваемой (достаточно большой) величине обратного тока, при которой не нарушается нормальная работа диода. Предельным обратным напряжением является напряжение, при котором происходит электрический пробой р-п-перехода. Кремниевые диоды обладают большим обратным напряжением, чем германиевые, поэтому они устойчиво работают в предпробойной области. Кремниевые диоды могут иметь максимальные обратные напряжения порядка 1000 - 1500 В, а германиевые 100 - 400 В.

Ход работы:

В работе исследуются два диода Д303 (германиевый) и Д202 (кремниевый), параметры которых представлены в таблице 1. Исследования заключаются в снятии ВАХ диодов и определении их основных параметров.

Таблица 1. Параметры диодов

Тип /параметры	$I_{пр.ср.макс.}$, мА	$U_{пр.}$, В (не более)	$U_{обр.макс.}$, В	$I_{обр.}$, мкА
Д303	3000	0,35	150	1000
Д202	400	1	100	500

1 Подготовить измерительный стенд. Для этого:

1.1 Переключатель «Сеть» - в положение О.

1.2 Ручки регулировки напряжения блоков питания 1 и 2 – в крайнее левое положение.

1.3 Переключатели приборов Р1, Р2, Р3, Р4 – в положение «20».

2 Подключить диодный модуль к измерительному стенду в соответствии с рисунком.3.

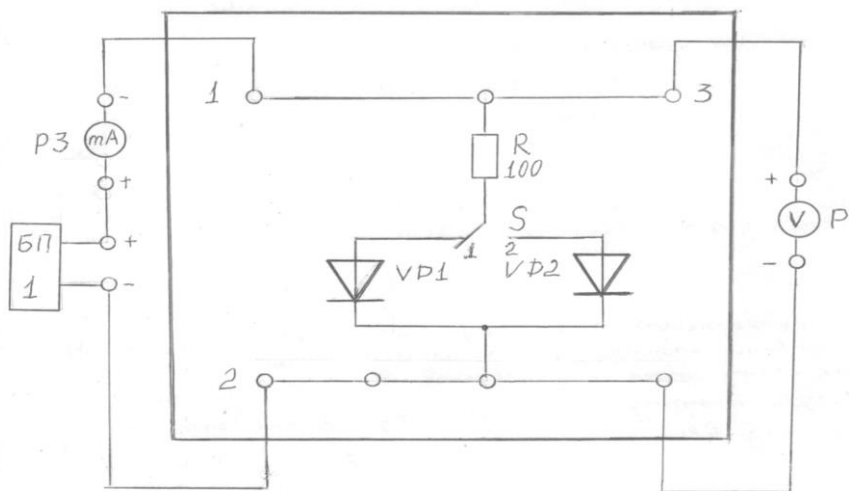


Рис.3 Схема исследования диодов

3 Переключатель S установить в положение 1 (Д303).

4 Включить питание стенда и убедиться, что показания подключенных приборов соответствуют 0.

5 Снятие ВАХ прямой ветви:

5.1 Ручкой «Точно» БП1 увеличивать напряжение на диоде, при этом снимать показания приборов P1 и P3 (не менее 5-6 измерений) и заносить их в таблицу 2.

Примечание: Измерения прекратить при достижении $I_a = 10$ мА.

Таблица 2 Диод Д303

Uак пр, В						
Iа,мА						

5.2 Ручку «Точно» вернуть в исходное положение.

5.3 Переключатель S поставить в положение 2 для исследования диода Д202 и повторить п.5.1. Показания приборов занести в аналогичную таблицу.

6 Выключить питание стенда.

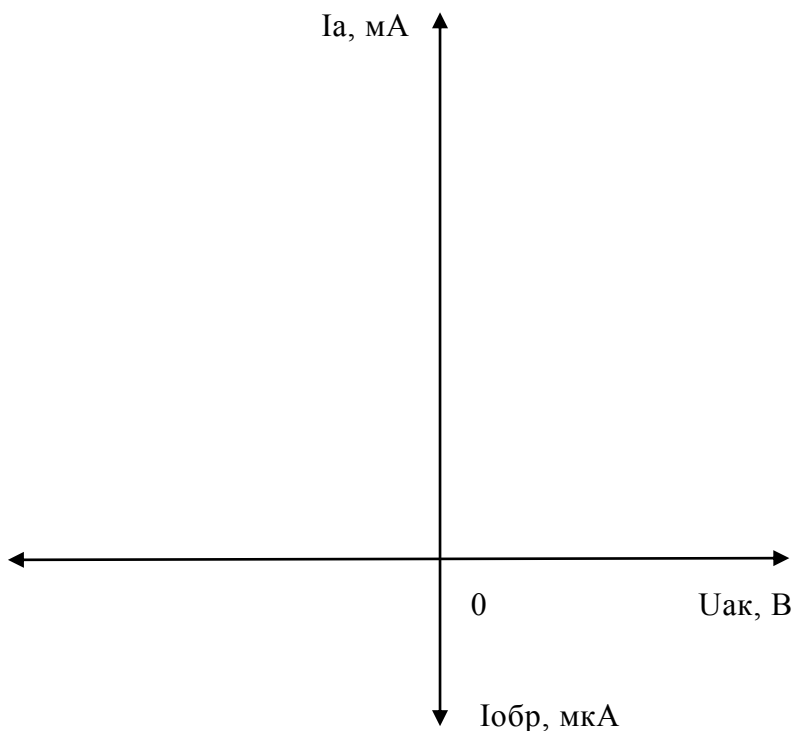


Рис.4 ВАХ диодов

7 Снятие ВАХ обратной ветви.

7.1 Изменить полярность подключения БП1 к исследуемой схеме и включить питание.

7.2 Повторить пункты 3, 4, 5.1, 5.2 и 5.3. Данные измерений занести в таблицу 3..

Таблица 3

Uак обр, В	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Iобр, мкА									

8 Выключить питание стенда и разобрать схему.

9 По результатам измерений построить на одном рисунке ВАХ VD1 и VD2 (рис.4).

По характеристикам рассчитать сопротивления диодов для $U_{ак пр} = +0,4 В$ и $U_{ак обр} = -3В$.

11 По заданию преподавателя ампервольтметром проверить работоспособность выпрямительных диодов.

12 Оформить отчет и представить его преподавателю.

Практическая работа №4

Тема 1.3 Полупроводниковые выпрямительные диоды.

Исследование стабилитрона

Цель работы: Исследование принципа действия стабилитрона. Получение практических навыков в анализе и оценке их работоспособности

Перечень используемого оборудования: измерительный стенд, модуль «Стабилитрон», образцы стабилитронов

Теоретическая часть:

Стабилитрон - полупроводниковый диод, на вольтамперной характеристике которого имеется участок со слабой зависимостью напряжения от проходящего тока и который предназначен для стабилизации постоянного напряжения на нагрузке.

Вольтамперная характеристика и условное графическое обозначение показаны на рис.1.

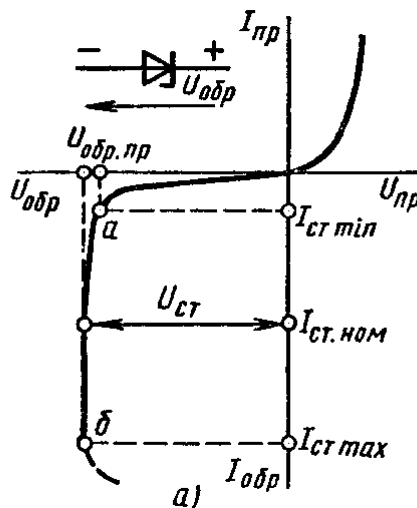


Рис.1 УГО и вольтамперная характеристика стабилитрона

Как известно, при превышении обратного максимального напряжения происходит лавинный пробой р-п-перехода. При этом наблюдается резкое возрастание обратного тока при почти неизменном уровне обратного напряжения. Это явление и используется в стабилитронах, нормальным включением которых в цепь источника постоянного напряжения является обратное.

Если обратный ток через стабилитрон не превышает некоторого значения $I_{ст\ max}$, то состояние электрического пробоя не приводит к выходу из строя диода.

В качестве полупроводникового материала при производстве стабилитронов используют кремний, что обусловлено незначительным обратным током в кремниевых диодах. Это исключает возможность их разогрева и теплового пробоя p-n-переходов.

Стабилитроны характеризуются следующими основными параметрами:

$U_{ст}$ - напряжением стабилизации при прохождении заданного тока стабилизации;

$\Delta U_{ст}$ - допуск (изменение напряжения при изменении тока от минимального до максимального);

$I_{ст.ном}$ – номинальный ток стабилизации.

Кроме $I_{ст.ном}$ указывают также минимальное ($I_{ст.мин}$) и максимальное ($I_{ст.макс}$) значения постоянных токов на участке стабилизации, при которых обеспечивается заданная точность.

Превышение тока $I_{ст.макс}$ приводит к тепловому пробоя p-n-перехода. Напряжение стабилизации современных стабилитронов лежит в пределах 1-1000 В, а значения минимального и максимального токов стабилизации соответственно в пределах $I_{ст.мин} = 1...10\ \text{мА}$, $I_{ст.макс} = 50...2000\ \text{мА}$;

Стабилизацию низковольтного напряжения в пределах 0,3...2 В можно получить при использовании прямой ветви вольтамперной характеристики кремниевых диодов, называемых стабисторами.

Ход работы

В работе исследуется стабилитрон Д814Б, параметры которого представлены в таблице 1. Исследования заключаются в снятии ВАХ стабилитрона и определении основных параметров параметрического стабилизатора.

Таблица 1. Параметры стабилитрона

$U_{ст}, \text{В}$	$\Delta U_{ст}, \%$	I $I_{ном}, \text{мА}$	$I_{макс}, \text{мА}$	$I_{мин}, \text{мА}$
8...9,5	-	5	36	3

1. Подготовить измерительный стенд. Для этого:

1.1 Переключатель «Сеть» - в положение О.

1.2 Ручки регулировки напряжения блоков питания 1 и 2 – в крайнее левое положение.

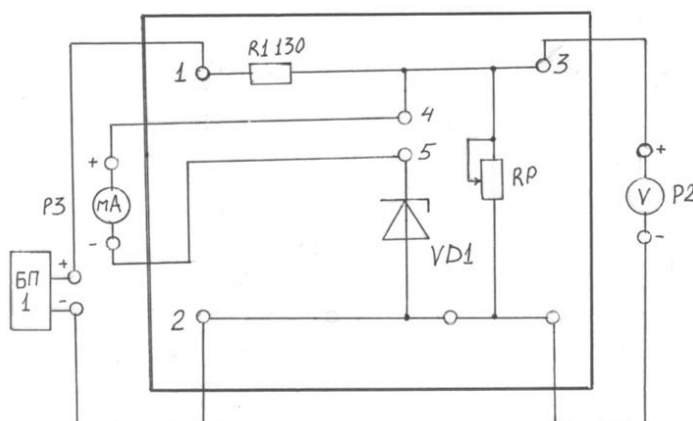


Рис.2 Схема исследования стабилитрона

1.3 Переключатели приборов P1, P2, P3, P4 – в положение «20».

2 Подключить стабилитрон к измерительному стенду в соответствии с рисунком.

3 Снятие вольтамперной характеристики стабилитрона.

3.1 Включить питание измерительного стенда.

3.2 Плавное изменяя напряжение на выходе БП1, измерять $U_{ак}$ обр.(прибор Р2) и ток $I_{ст}$ (прибор Р3).

Примечание: ток $I_{ст}$ не должен превышать 20 ма.

Данные измерений занести в таблицу 2.

Таблица 2

$U_{ак}, В$									
$I_{ст}, мА$									

3.3 Построить ВАХ стабилитрона и по характеристике определить $U_{ст}$, $I_{ст}$ ном.

3.4 Определить $\Delta U_{ст}$ (%) при изменении $I_{ст}$ от 3 до 10 мА по соотношению:

$$\Delta U_{ст} = (U_{ст \text{ макс}} - U_{ст \text{ мин}}) / 100.$$

3.5 Выключить питание стенда.

3.6 Провести анализ полученных результатов и справочных данных и сделать

выводы.

3.7 Выключить питание стенда.

4 Исследование параметрического стабилизатора.

4.1 На модуле установить РР в крайнее левое положение, что соответствует максимальному сопротивлению нагрузки (R_H).

4.2 Переключатели Р1, Р2 установить в положение 20, Р3 – в положение 200.

4.3 Включить питание стенда и по прибору Р2 установить напряжение на нагрузке $U_{H1} \approx 8,5 В$. Прибором Р1 измерить входное напряжение ($U_{ВХ1}$).

4.4 Увеличить входное напряжение на 1В ($U_{ВХ2}$) и измерить напряжение на нагрузке (U_{H2}).

4.5 Рассчитать коэффициент стабилизации ($K_{ст}$) по соотношению:

$$K_{ст} = (\Delta U_{ВХ} / U_{ВХ1}) / (\Delta U_H / U_{H1}),$$

где: $\Delta U_{ВХ} = U_{ВХ1} - U_{ВХ2}$; $\Delta U_H = U_{H1} - U_{H2}$.

5 Увеличить сопротивление нагрузки поворотом ручки РР на 90° и сделать вывод о влиянии его на U_H .

6 Оформить и сдать отчет.

Практическая работа №5

Тема 1.4. Транзисторы.

Исследование биполярного транзистора

Цель работы: Исследование принципа действия тиристоров. Получение практических навыков в анализе и оценке их работоспособности.

Перечень используемого оборудования 1 Измерительный стенд, модуль «Биполярный транзистор», образцы транзисторов.

Теоретическая часть:

Биполярным транзистором (БТ) называют полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими р – п - переходами и тремя выводами. Он имеет трехслойную структуру, состоящую из чередующихся областей с различными типами электропроводности: р-п-р или п-р-п. Структура таких транзисторов и их условные графические обозначения показаны на рис.1.

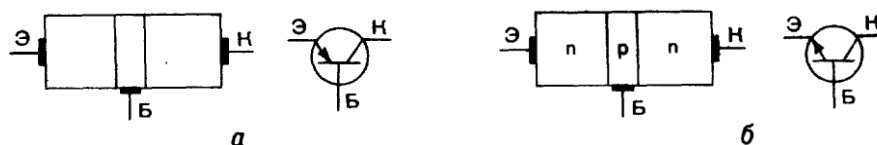


Рис.1 Трехслойные структуры и условные графические обозначения транзисторов типа р-п-р (а) и п-р-п (б).

Работа биполярного транзистора зависит от носителей заряда обеих полярностей - электронов и дырок, отсюда его название «биполярный».

Внутренняя область транзистора называется базой. Наружная область с наименьшей площадью соприкосновения с базой называется эмиттером, вторая наружная область – коллектором. Электронно-дырочный переход между эмиттером и базой называют эмиттерным переходом, а между коллектором и базой – коллекторным переходом.

Принцип действия транзисторов п-р-п и р-п-р- типов одинаков. Разница лишь в полярности подключаемых источников питания.

В зависимости от полярности напряжений, подключаемых к электродам, транзисторы могут работать в следующих режимах.

Если оба перехода смещены в прямом направлении, то такой режим называют режимом **насыщения**. В этом режиме через переходы протекают сравнительно большие прямые токи. При обратном смещении переходов транзистор работает в режиме **отсечки**, при котором токи отсутствуют, если пренебречь малыми обратными токами. В режимах насыщения и отсечки взаимодействие между переходами отсутствует.

Если эмиттерный переход напряжением $U_{ЭБ}$ смещен в прямом направлении, а коллекторный переход напряжением $U_{КБ}$ – в обратном, то режим работы транзистора называют **активным**. Это основной режим работы транзистора. При перемене полярности напряжений $U_{ЭБ}$ и $U_{КБ}$ получим **инверсный** режим работы. Этот режим используется редко. При изменении напряжений на электродах транзистора, они могут переходить из одного режима в другой.

Рассмотрим принцип действия БТ р-п-р- типа в активном режиме.

В активном режиме (рис.2.) к эмиттерному переходу должно быть приложено прямое напряжение, а к коллекторному – обратное. Если на эмиттерном переходе нет напряжения, то через коллекторный переход протекает очень небольшой обратный ток $I_{кобр}$. По сравнению с рабочим током им можно пренебречь для упрощения рассуждений и считать, что в коллекторной цепи тока нет, т. е. транзистор закрыт. При подаче на эмиттерный переход прямого напряжения от источника питания $E_Э$, происходит инжекция основных носителей заряда из эмиттера в базу, где они являются неосновными.

Для транзистора р-п-р этими носителями заряда являются дырки. Движение дырок в процессе инжекции через эмиттерный переход создает ток эмиттера $I_Э$.

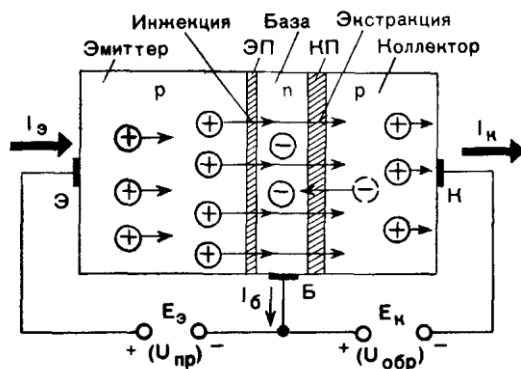


Рис.2. Принцип действия транзистора в активном режиме

Через эмиттерный переход из базы в эмиттер инжектируется небольшое количество электронов, что обуславливает в переходе ток $I_{Эп}$. Так как концентрация электронов в базе мала, этим током можно пренебречь. В результате в эмиттере нарушается электронейтральность и для ее восстановления лишние электроны стекают на $+E_Э$.

Появляется ток эмиттера:

$$I_Э = I_{Эр} + I_{Эп} \approx I_{Эр}.$$

Дырки, перешедшие в базу, имеют вблизи р-п перехода повышенную концентрацию, что вызывает их диффузию в базу. Толщина базы очень мала, поэтому дырки в процессе диффузии оказываются вблизи коллекторного перехода. Большая их часть не успевает

рекомбинировать с электронами базы и втягивается ускоряющим электрическим полем коллекторного перехода в область коллектора. Происходит экстракция дырок под действием обратного напряжения из базы в коллектор. Движение дырок в процессе экстракции из базы в коллектор создает ток коллектора $I_{кр}$, т.к. из-за нарушения электронейтральности в коллекторе в него поступают электроны от $-E_k$. Так как коллекторный переход смещен в обратном направлении, то через него также протекает небольшой обратный ток $I_{кбо}$ ($I_{кобр}$)

Таким образом, в коллекторе протекает суммарный ток:

$$I_k = I_{кр} + I_{кбо} = \alpha I_{эп} + I_{кбо},$$

где α – коэффициент, учитывающий процесс рекомбинации в дырок и электронов в базе.

$$\alpha = I_{кр}/I_{эп} \leq 1.$$

Этот коэффициент называют статическим коэффициентом передачи тока эмиттера, или коэффициентом передачи постоянного тока.

Количество рекомбинированных электронов пополняется из внешней цепи от источника $-E_э$. За счет этого в цепи базы протекает ток базы рекомбинации $I_{брк}$. Он очень мал из-за небольшой толщины базы и малой концентрации основных носителей заряда – электронов.

При этих условиях число рекомбинаций, определяющих величину тока базы, невелико. Таким образом, суммарный ток базы определяется уравнением:

$$I_b = I_{бп} + I_{брк} - I_{кбо},$$

где $I_{бп}$ – ток базы, обусловленный движением электронов от $-E_э$ на восполнение инжектированных в эмиттер.

Если суммировать токи I_k и I_b , получим уравнение, определяющее взаимосвязь между токами транзистора:

$$I_э = I_k + I_b.$$

Ток эмиттера может изменяться в больших пределах при малых изменениях прямого напряжения на эмиттерном переходе. Поэтому ток коллектора также будет изменяться, т.е. он управляется током эмиттера. Током базы в практических целях можно пренебречь.

Принцип действия транзистора $p-p-p$ - типа аналогичен, только носителями заряда, создающими токи через $p-p$ - переходы в процессе инжекции и экстракции, являются электроны. Полярность источников $E_э$ и E_k должна быть изменена на противоположную, соответственно изменятся и направления токов в цепях.

Схема включения транзистора имеет две цепи: входную и выходную (рис.3).

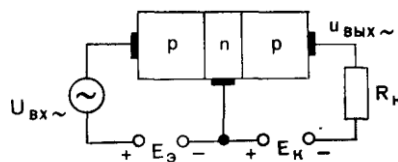


Рис.3

В зависимости от того, какой электрод является общим для входной и выходной цепей, существует три способа включения транзисторов: с общей базой (ОБ), с общим эмиттером (ОЭ), с общим коллектором (ОК) (рис.4).

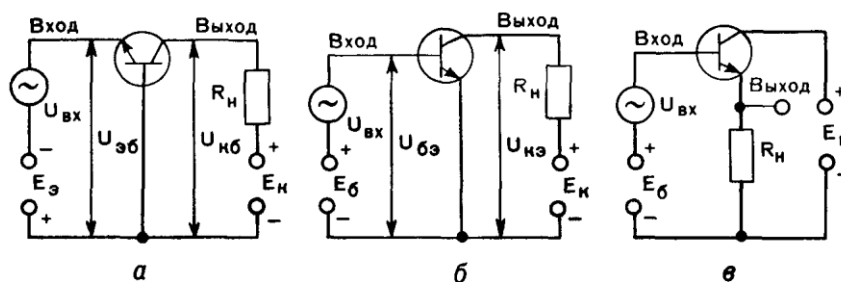


Рис.4. Способы включения транзистора типа $n-p-n$:

а- с общей базой; б - с общим эмиттером; в - с общим коллектором.

В схеме, на которой рассматривался принцип действия транзистора входной электрод –

эмиттер, выходной - коллектор, а общий - база; следовательно, это была схема ОБ.

При любой схеме включения постоянный ток проходит от плюса источника питания через соответствующие области транзистора к минусу источника питания. Стрелка эмиттера указывает направление проходящего через него тока в активном режиме.

Во всех трех схемах сохраняется рассмотренный принцип действия транзистора, но свойства схем различны.

Важным параметром, с помощью которого можно оценить способы включения, является коэффициент передачи тока h_{21} . Он определяется соотношением:

$$h_{21} = \Delta I_{\text{вых}} / \Delta I_{\text{вх}},$$

где Δ – обозначает переменную составляющую сигнала, действующую во входной и выходной цепях.

Для способа включения с ОБ:

$$h_{21\text{б}} = \Delta I_{\text{к}} / \Delta I_{\text{э}} = \alpha < 1.$$

Для способа включения с ОЭ:

$$h_{21\text{э}} = \alpha / (1 - \alpha) = \beta \gg 1 \text{ (При } \alpha = 0,99 \text{ } \beta = 99).$$

Для способа включения с ОК:

$$h_{21\text{к}} = \Delta I_{\text{э}} / \Delta I_{\text{б}} = 1 / (1 - \alpha) = \beta + 1.$$

Из анализа полученных соотношений видно, что наибольший коэффициент передачи тока имеют способы включения с ОЭ и ОК, поэтому они и используются чаще всего в электронных узлах.

Статические характеристики транзистора.

Статическими характеристиками называют зависимости одной физической величины от другой при неизменных других величинах. Такими величинами для транзистора являются входные и выходные токи и напряжения ($I_{\text{вх}}$, $U_{\text{вх}}$, $I_{\text{вых}}$, $U_{\text{вых}}$) при отсутствии нагрузки.

Основными характеристиками являются:

- входные;
- выходные;
- прямой передачи.

Вид характеристик транзистора зависит от способа его включения, но для схем ОЭ и ОК они практически одинаковы, поэтому пользуются обычно входными и выходными характеристиками для схем ОЭ.

Совокупность характеристик, снятых при разных значениях постоянной величины, представляет собой *семейство статических характеристик*.

Схема для снятия характеристик транзистора п-р-п- типа с ОЭ представлена на рис.5.

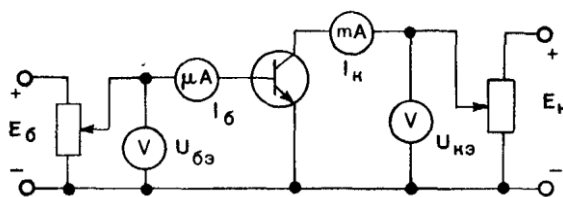


Рис.5 Схема для снятия характеристик транзистора, включенного с общим эмиттером

В любой схеме включения в каждой из двух цепей действует напряжение между двумя электродами и протекает ток: во входной цепи - $U_{\text{вх}}$ и $I_{\text{вх}}$, в выходной - $U_{\text{вых}}$ и $I_{\text{вых}}$. Эти электрические величины определяют режим работы транзистора и взаимно влияют друг на друга.

Для того чтобы одну из электрических величин можно было поддерживать постоянной, в схему для снятия характеристик надо включить только источники питания; нагрузку не включают. Для регулирования напряжений включают потенциометры, а для измерения напряжений и токов - измерительные приборы. При снятии каждой характеристики сначала устанавливают с помощью потенциометров значение постоянной величины, а затем, устанавливая

последовательно разные значения изменяемой величины, определяют соответствующее значение зависящей от нее другой величины.

Статические характеристики транзистора в схеме ОЭ. При таком способе включения входным током является ток базы I_b , выходным - ток коллектора I_k , входное напряжение создается между базой и эмиттером $U_{бэ}$, а выходное - между коллектором и эмиттером $U_{кэ}$.

Входные характеристики транзистора, включенного по схеме ОЭ (рис.6б), представляют собой зависимость тока базы от напряжения база - эмиттер при постоянном напряжении коллектор - эмиттер:

$$I_b = f(U_{бэ}) \text{ при } U_{кэ} = \text{const.}$$

Входные характеристики, как и прямая ветвь вольтамперной характеристики диода, начинаются не из начала координат, а при некотором значении напряжения базы, называемым пороговым $U_{пор}$.

Входное сопротивление транзистора в схеме ОЭ мало:

$$R_{вх} = U_{бэ}/I_b, \text{ при } U_{кэ} = \text{const, составляет сотни Ом.}$$

Выходные характеристики транзистора, включенного по схеме ОЭ, представляют собой зависимости тока коллектора от напряжения коллектор - эмиттер при постоянном токе базы:

$$I_k = f(U_{кэ}) \text{ при } I_b = \text{const.}$$

Семейство выходных характеристик представлено на рис. 6а.

Напряжение $U_{бэ}$ - это прямое напряжение на эмиттерном переходе, а обратное напряжение на коллекторном переходе $U_{кб}$ определяется разностью $U_{кэ} - U_{бэ}$. Но поскольку $U_{кэ} \gg U_{бэ}$, можно приближенно считать, что $U_{обр} \approx U_{кэ}$.

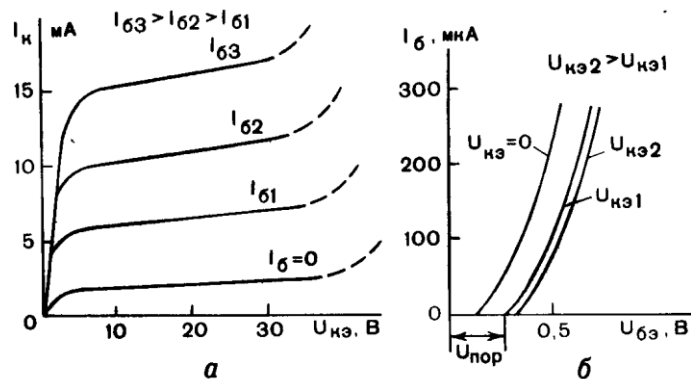


Рис.6 Характеристики транзистора, включенного по схеме ОЭ:

а — выходные, б — входные

При $U_{кэ} < U_{бэ}$ транзистор находится в режиме насыщения и с ростом $U_{кэ}$ приближается к активному. Поэтому на начальном участке характеристики наблюдается резкое увеличение тока I_k .

При $U_{кэ} > U_{бэ}$ полярность $U_{кб}$ изменяется на обратную для коллекторного перехода и транзистор работает в активном режиме. Изменение напряжения $U_{кэ}$ на этом участке характеристик мало влияет на величину тока коллектора; рабочий участок характеристики идет полого.

Выходное сопротивление транзистора в схеме с ОЭ велико:

$$R_{вых} = U_{кэ}/I_k \text{ при } I_b = \text{const, составляет десятки килоом.}$$

Увеличение коллекторного напряжения выше максимально допустимого приводит к пробое коллекторного перехода (штриховые линии).

Характеристикой прямой передачи называют зависимость выходного тока от входного. Для схемы ОЭ это зависимость тока коллектора от тока базы при постоянном напряжении коллектора:

$$I_k = f(I_b) \text{ при } U_{кэ} = \text{const.}$$

Ход работы

В работе исследуется БТ большой мощности низкой частоты КТ815А, основные параметры которого приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры KT815A

Ik макс,	Pк макс, Вт	Uкэ нас, В	h _{21 э}	Fгр, МГц
1,5	10	0,6	40	300

Исследования заключаются в снятии статических характеристик транзистора и определении по ним некоторых параметров.

1. Подготовить измерительный стенд. Для этого:

1.1 Переключатель «Сеть» - в положение О.

1.2 Ручки регулировки напряжения блоков питания 1 и 2 – в крайнее левое положение.

1.3 Переключатели приборов P1, P2, P4 – в положение «20», P3 – «2».

2 Подключить модуль к измерительному стенду в соответствии с рисунком 8.

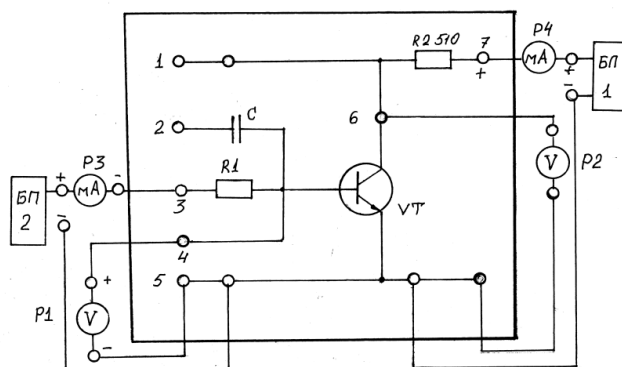


Рис.8 Схема исследования транзистора

3 Снятие входных характеристик $I_b = f(U_{бэ})$ при $U_{кэ} = \text{const.}$ и характеристик

3.1 Ручками «Грубо» и «Точно» БП1 по прибору P2 установить $U_{кэ} = 5$ В.

3.2 Ручкой «Точно» БП2 увеличивать напряжение $U_{бэ}$ от 0 до момента, когда оно прекращает увеличиваться. При этом измерять токи I_b и I_k и данные измерений заносить таблицу 2.

Таблица 2 $U_{кэ} = 5$ В

$U_{бэ}$, В					
I_b , мкА					
I_k , мА					

3.3 Выполнить такие же измерения для $U_{кэ} = 10$ В и данные измерений занести в аналогичную таблицу 3.

3.4 Все ручки регулировки напряжения вернуть в исходное состояние.

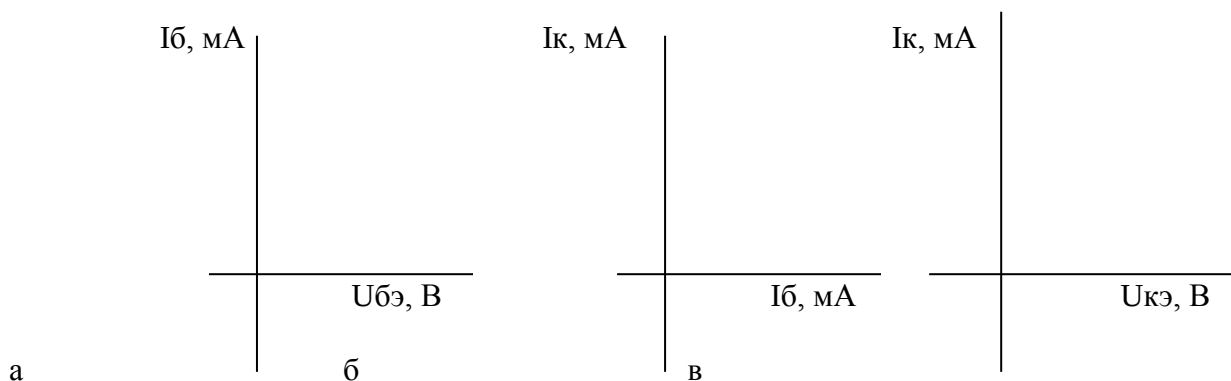


Рис. 9 Характеристики БТ: а) входные; б) прямой передачи; в) выходные

4 Снятие выходных характеристик $I_k = f(U_{кэ})$ при $I_b = \text{const.}$

4.1 Ручкой «Точно» БП2 установить по прибору P3 $I_b = 0,1$ мА.

4.2 Ручками «Грубо» и «Точно» БП1 изменять напряжение $U_{кэ}$ и при этом измерять ток I_k по прибору P4. Данные измерений занести в таблицу 3.

Таблица 3 $I_b = 0,1 \text{ мА}$

$U_{кэ}, \text{ В}$					
$I_{к}, \text{ мА}$					

4.3 Выполнить аналогичные действия для тока $I_k = 0.2 \text{ мА}$. Данные измерений занести в аналогичную таблицу 4.

5 Выключить питание стенда и разобрать схему.

6 Построить графики характеристик (рис.9).

7 В заданной преподавателем рабочей точке по графикам определить входное и выходное сопротивления транзистора, коэффициенты передачи тока $h_{21Э}$ и $h_{21Б}$.

8 Сделать выводы по работе.

Практическая работа №6

Тема 1.4. Транзисторы

Исследование полевого транзистора

Цель работы: Исследование принципа действия полевого транзистора. Получение практических навыков в анализе и оценке их работоспособности.

Перечень используемого оборудования: измерительный стенд, модуль «Полевой транзистор», образцы транзисторов.

Теоретическая часть:

Полевым транзистором называют полупроводниковый прибор, электрический ток в котором обусловлен потоком основных носителей заряда, протекающим через проводящий канал, управляемый электрическим полем.

В отличие от биполярного транзистора действие полевого транзистора обусловлено носителями заряда одной полярности - либо только электронами в канале n-типа, либо только дырками в канале p-типа. Поэтому их иногда называют униполярными.

Различают два основных вида полевых транзисторов: с управляющим p-n переходом и с изолированным затвором (МДП-транзисторы).

Полевой транзистор с управляющим p – n – переходом

Полевой транзистор с p-n переходом (рис.1) представляет собой полупроводниковую пластину n-типа, от торцов которой с помощью невыпрямляющих металлических контактов сделаны выводы электродов. Слой полупроводника между этими контактами, в котором регулируется поток носителей заряда, называют проводящим каналом (в данном случае n-типа). Электрод полевого транзистора, через который в проводящий канал втекают носители заряда, называют истоком (И), а электрод, через который из канала вытекают носители заряда, - стоком (С).

Электрод, на который подается напряжение, создающее электрическое поле для управления протекающим через канал током, называют затвором (З).

При создании p-n перехода только с одной стороны пластины (рис.1,а) канал n-типа образуется между областью p-n перехода и непроводящей подложкой, на которой укреплен пластина. Чаще всего создают p-n переходы с двух сторон пластины - на противоположных гранях - и электрически соединяют обе p - области в один вывод затвора (рис.1,б). В этом случае проводящий канал образуется в пластине между областями двух p-n переходов.

На рис.1,в,г показаны условные графические обозначения полевых транзисторов с каналами n-типа и p-типа соответственно.

В схеме включения полевого транзистора (рис.1,д) между истоком и стоком подается напряжение $U_{си}$ такой полярности, чтобы основные носители заряда (электроны в канале n-типа) двигались по каналу в направлении от истока к стоку. При этом через канал и по внешней цепи протекает ток стока I_c . На затвор относительно истока подается напряжение $U_{зи}$, обратное для p-n перехода. Оно создает поперечное по отношению к каналу электрическое поле, напряженность которого зависит от значения приложенного

напряжения. Чем больше это напряжение, а следовательно, сильнее электрическое поле, тем шире запирающий слой и уже канал (пунктир на рис.1,д). С уменьшением поперечного сечения канала уменьшается его проводимость, что приводит к уменьшению тока I_c в цепи.

Цепь между затвором и истоком является управляющей. Таким образом, принцип действия полевого транзистора с р-п переходом основан на изменении проводимости канала за счет изменения ширины области р-п перехода под действием поперечного электрического поля, которое создается напряжением затвор – исток.

Из принципа действия полевого транзистора следует, что, в отличие от биполярного транзистора, он управляется не током, а напряжением $U_{зи}$.

Поскольку это напряжение обратное, то в цепи затвора протекает очень малый ток, т.к. входное сопротивление очень большое. В этом преимущество полевого транзистора по сравнению с биполярным.

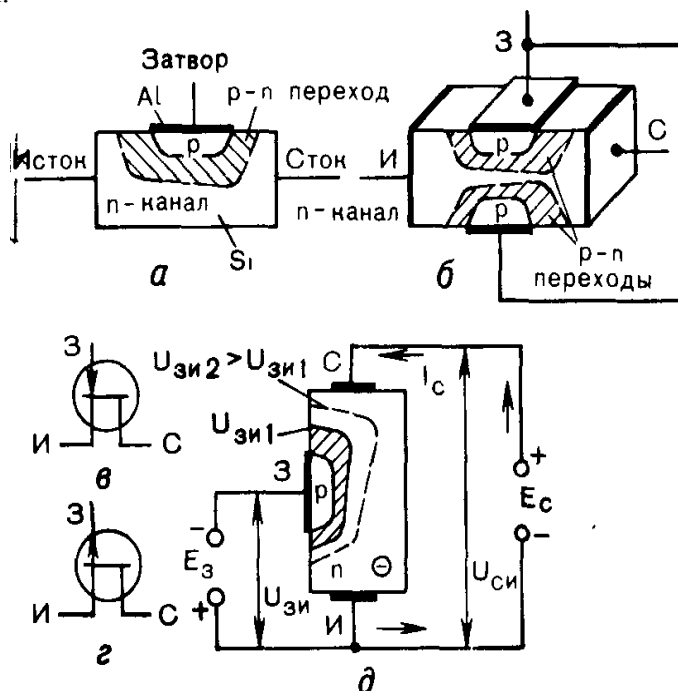


Рис.1 Полевой транзистор с управляющим р-п - переходом:

а, б - упрощенные структуры; в, г- условные графические обозначения с каналом п - типа и р - типа; д - схема включения, поясняющая принцип действия.

Такое же устройство и принцип действия имеют полевые транзисторы с р-п переходом и каналом р - типа; по сравнению с транзисторами с каналом п-типа они требуют противоположной полярности источников питания. Основные носители заряда в них - дырки.

Следует отметить, что при подаче на канал напряжения $U_{си}$ потенциалы точек канала относительно истока неодинаковы по его длине: они возрастают по мере приближения к стоку от нуля до полного напряжения $U_{си}$. В связи с этим увеличивается и обратное напряжение на р-п переходе в направлении от истока к стоку от значения, равного $U_{зи}$ около истока, до суммы $U_{зи} + U_{си}$ у стока. Это вызывает постепенное расширение области р-п -перехода по мере приближения к стоку и соответствующее сужение канала: его сечение уменьшается в направлении от истока к стоку. С увеличением $U_{си}$ возрастает влияние этого напряжения на сужение канала у стока.

Основные характеристики полевых транзисторов - выходные (стоковые) и передаточные (стоко- затворные).

Стоковая характеристика отражает зависимость тока стока от напряжения сток - исток при постоянном напряжении затвор - исток:

$$I_c = f(U_{си}), \text{ при } U_{зи} = \text{const.}$$

Характеристики, снятые при разных значениях постоянной величины $U_{зи}$, составляют семейство статических стоковых характеристик. На рис.2,а, приведено семейство характеристик для полевого транзистора с р-п переходом и каналом п - типа.

Полевой транзистор может быть использован не только в схемах усиления, но и в качестве управляемого омического сопротивления, если он работает в режиме, соответствующем начальному линейному участку стоковой характеристики.

Стоко-затворная характеристика - это зависимость тока стока от напряжения затвор - исток при неизменной величине напряжения сток - исток (рис.2,б):

$$I_c = f(U_{зи}) \text{ при } U_{си} = \text{const}.$$

Эта зависимость характеризует управляющее действие входного напряжения на величину выходного тока.

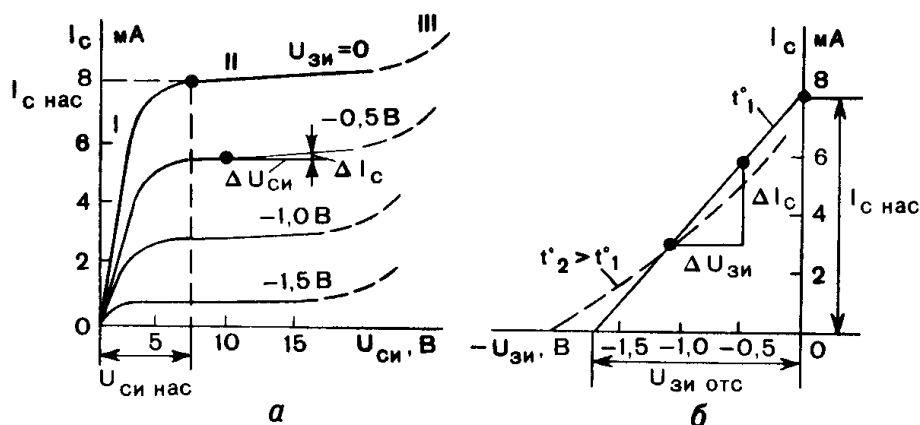


Рис.2.6 Семейство стоковых характеристик (а) и стоко-затворная характеристика (б) полевого транзистора с управляющим р-п - переходом и каналом п-типа.

При данном постоянном значении $U_{си}$, взятом в рабочем режиме, т. е. на участке насыщения, и при $U_{зи} = 0$ точка характеристики лежит на оси тока и соответствует величине, равной току насыщения $I_{с\text{ нас}}$. С увеличением напряжения $U_{зи}$ по абсолютной величине проводимость канала уменьшается, что приводит к уменьшению тока I_c . Увеличение напряжения $U_{зи}$ вызывает уменьшение сечения проводящего канала до тех пор, пока он не оказывается перекрытым; ток через канал прекращается, транзистор закрывается, так как сток и исток изолированы друг от друга. Напряжение затвор - исток, при котором ток через канал прекращается, называют напряжением отсечки $U_{зи\text{отс}}$.

На рис.2.б приведена одна стоко-затворная характеристика, поскольку изменение $U_{си}$ в режиме насыщения очень мало влияет на ток I_c и характеристики, снятые при разных значениях $U_{си}$, располагаются очень близко друг к другу.

Изменение температуры мало сказывается на работе полевого транзистора, что является еще одним его преимуществом перед биполярным. Это объясняется противоположным влиянием на сопротивление канала и величину выходного тока I_c двух факторов. С одной стороны, повышение температуры снижает потенциальный барьер р-п перехода, что ведет к уменьшению его ширины и расширению канала, сопротивление канала уменьшается, ток I_c возрастает. С другой стороны, при повышении температуры уменьшается подвижность основных носителей заряда, что вызывает рост сопротивления канала и уменьшает ток I_c . В результате ток I_c изменяется мало. Причем в области больших токов преобладает влияние второго фактора, и I_c с ростом температуры уменьшается, что очень благоприятно, а в области малых токов преобладает первый фактор, и ток немного возрастает (пунктирная кривая на рис.2,б).

Ход работы

В работе исследуется полевой транзистор с р-п – переходом и каналом р- типа малой мощности 2П103Г и МДП – транзистор с индуцированным каналом р – типа 2П301Б. Некоторые параметры транзисторов приведены в таблицах 1 и 2.

Исследования заключаются в снятии стоко-затворных и стоковых характеристик и определении по ним основных параметров транзисторов.

Таблица 1 2П103Г

Уси макс, В	Uзи.отс, В	Iс.нач, мА	Рмакс.,мВт
10	2 ...6	3 ...6	120

Таблица 2 2П301Б

Усимакс, В	Uзи пор,В	Iс.нач, мкА	Рмакс.,мВ	Uзимакс,В	S, мА/В	Iс max, мА
20	2,7...5,4	0,5	200	10 В	1...6	15

1 Исследование транзистора 2П103Г.

1.1 Подготовить измерительный стенд. Для этого:

1.1.1 Переключатель «Сеть» - в положение О.

1.1.2 Ручки регулировки напряжения блоков питания 1 и 2 – в крайнее левое положение.

1.1.3 Переключатели приборов Р1, Р2, Р3 Р4– в положение «20»..

1.1.4 Подключить модуль к измерительному стенду в соответствии с рисунком 3.

1.2 Снятие стоко-затворных характеристик $I_c = f(U_{зи})$ при $U_{си} = \text{const}$.

1.2.1 Включить питание измерительного стенда.

1.2.2 Ручкой «Грубо» и «Точно» БП1 установить напряжение $U_{си} = 5\text{В}$. $U_{зи}$ (БП2) = 0 В.

1.2.3 По прибору Р3 определить начальное значение тока $I_{с.нач}$ и записать его в таблицу 3.

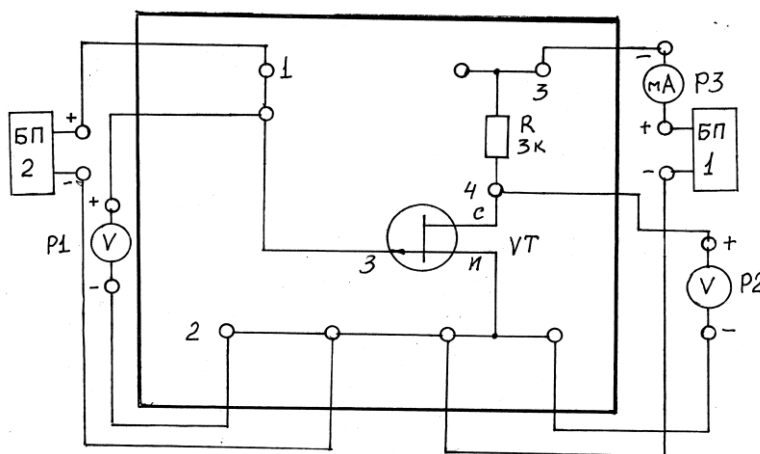


Рис.3 Схема исследования полевого транзистора

Таблица 3 $U_{си} = 5\text{В}$

Uзи,В									
Iс, мА									

1.2.4 Увеличивая ручкой «Точно» БП2 напряжение $U_{зи}$ до момента закрытия транзистора, (I_c станет = 0) измерять ток I_c . Данные измерений занести в таблицу.

1.2.5 Установить $U_{зи} = 0$, $U_{си} = 10\text{В}$.

1.2.6 Повторить измерения, записав их в аналогичную таблицу 4.

1.3 Снятие стоковых характеристик $I_c = f(U_{си})$, при $U_{зи} = \text{const}$.

1.3.1 Установить $U_{си}$ и $U_{зи} = 0$ В.

1.3.2 Изменяя $U_{си}$ (БП1) от 0 до 10 В, снять показания приборов Р2 и Р3 и данные измерений занести в таблицу 6.

Таблица 6 $U_{зи} = 0$ В

Uси, В									
--------	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Ис, мА									
--------	--	--	--	--	--	--	--	--	--

1.3.3 Вернуть ручки БП1 и 2 в исходное положение, затем установить $U_{зи} = 1В$ и повторить измерения, записав показания приборов в аналогичную таблицу 7.

1.4 Выключить питание стенда и разобрать схему.

1.5 По таблицам построить характеристики и по ним определить $U_{зи\text{ отс}}$, $I_{с\text{ нач}}$, S . Сравнить полученные результаты со справочными.

2 Исследование транзистора 2П301Б.

2.1 Собрать схему для исследования (рис.4).

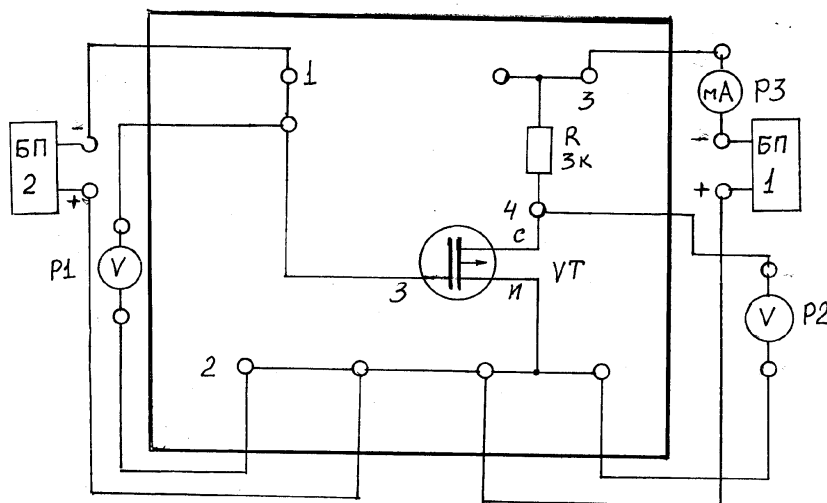


Рис. 4 Схема исследования

2.2 По вышеизложенной методике снять сток-затворные и стоковые характеристики при разных напряжениях на стоке и затворе.

2.3 Построить характеристики и по ним определить основные параметры.

2.4 Сделать выводы по работе.

Практическая работа №7

Тема 1.5. Тиристоры

Исследование тиристора

Цель работы: Исследование принципа действия тиристоров.

Перечень используемого оборудования: измерительный стенд, модуль «Тиристор», образцы тиристоров.

Теоретическая часть:

Тиристором называют полупроводниковый прибор, имеющий три основных рабочих состояния: непроводящее, закрытое и открытое.

Типичная структура тиристора - четырехслойная, с чередующимися слоями полупроводника р-типа и п-типа. На основе этой структуры в зависимости от числа выводов могут быть изготовлены два типа тиристоров: диодные, называемые динисторами, и триодные, называемые тринисторами.

Диодные тиристоры имеют два вывода: от наружного слоя р - вывод анода (А), от наружного слоя п - вывод катода (К). Условное графическое обозначение, структура и схема включения показаны на рис.1.

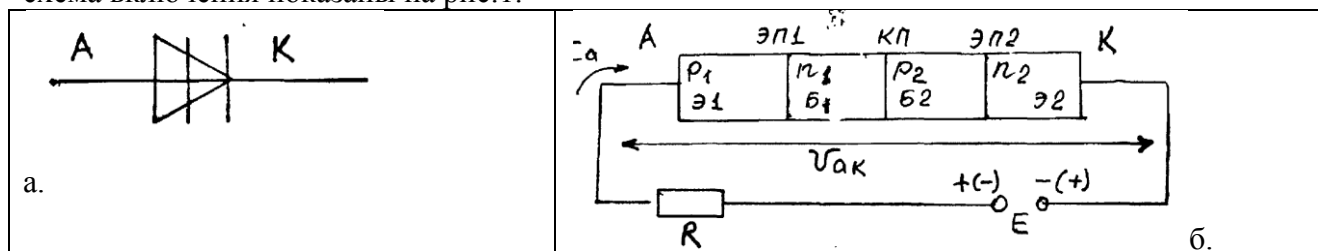


Рис.1 Условное графическое обозначение (а), структура и схема включения динистора (б)

Крайние слои тиристора называют эмиттерами (Э1 и Э2), средние – базами (Б1 и Б2). Средний переход называют коллекторным (КП), крайние – эмиттерными (ЭП1 и ЭП2). Вольтамперная характеристика динистора имеет вид (рис.2.).

Непроводящее состояние (участок 1) создается при подключении к тиристорному обратного напряжения.

При обратном напряжении между анодом и катодом переходы ЭП1 и ЭП2 находятся под обратным напряжением, а переход КП – под прямым. На переходе КП падение напряжения очень мало, поэтому все внешнее напряжение $U_{ак}$ распределяется фактически между переходами ЭП1 и ЭП2. В этом случае тиристор ведет себя так же, как диод при обратном напряжении; анодный ток практически отсутствует.

При прямом включении переходы ЭП1 и ЭП2 смещаются в прямом, а КП – в обратном направлении. Поэтому в цепи протекает незначительный анодный ток I_a , определяемый обратным током перехода КП – $I_{кобр}$ (участок 2 на характеристике тиристора).

При некотором напряжении, называемом напряжением включения или напряжением переключения ($U_{прк}$), начинается лавинное размножение носителей зарядов, сопровождающееся резким увеличением тока.

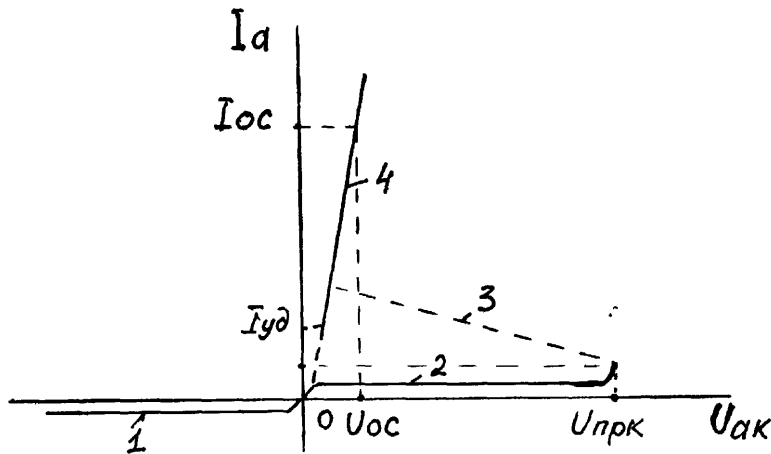


Рис.2. Вольтамперная характеристика динистора

Ток, протекающий через тиристор, определяется только источником питания E и сопротивлением нагрузки, т.к. падение напряжения на тиристоре в открытом состоянии $U_{оc}$ мало (для маломощных тиристоров оно составляет 0,5...1 В). И поэтому $I_a \approx E/R$.

Выключение тиристора - переход в закрытое состояние - может быть осуществлено уменьшением тока до значения меньше тока удержания ($I_{уд}$), или изменением полярности основного напряжения $U_{ак}$ на обратную. Обратная ветвь характеристики, как было сказано выше, соответствует обратной ветви вольтамперной характеристики диода (участок 1). При обратном напряжении, равном напряжению пробоя ($U_{обр проб}$) происходит лавинный пробой тиристора.

Триодный тиристор, или тринистор, помимо основной цепи между анодом и катодом имеет цепь управления. Для этой цепи нужен вывод управляющего электрода (УЭ).

Назначение цепи управления состоит в управлении моментом включения тиристора при напряжениях в основной цепи меньших, чем напряжение переключения $U_{прк}$. Если вывод управляющего электрода сделан от базового слоя p_2 , то источник управляющего тока E_u включается между УЭ и катодом. Такая схема управления и условные графические обозначения тиристоров разного типа приведены на рис.3.

Возможна и другая схема, в которой вывод управляющего электрода сделан от базового слоя p_1 . В этом случае осуществляется управление по аноду.

В обоих случаях источник E_u включается так, чтобы ток управления I_u протекал от него через один из эмиттерных переходов в прямом направлении.

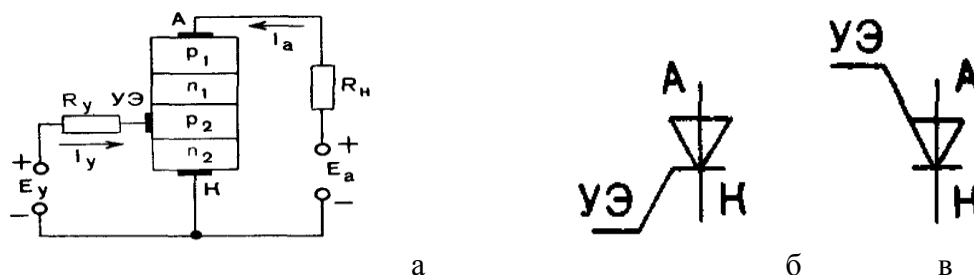


Рис.3 Структура, схема включения (а) и условные графические обозначения тринисторов с управлением по катоду (б) и по аноду (в)

Семейство характеристик тринистора при различных токах управления показано на рис.4.

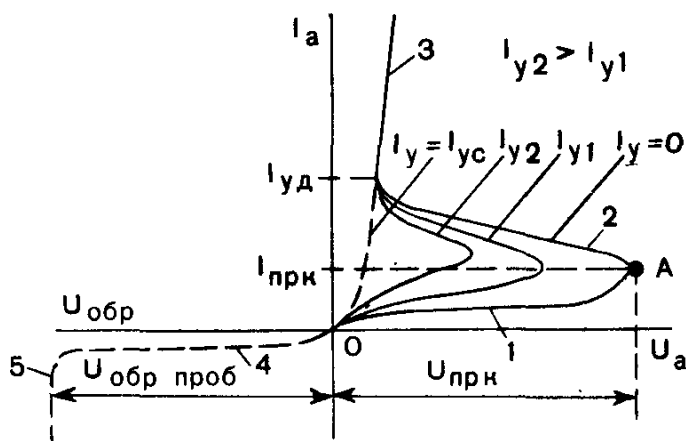


Рис.4 Вольтамперные характеристики тринистора

Наиболее важными параметрами тиристоров по основной цепи являются:

$I_{упр}$ и $I_{прк}$ -ток и напряжение переключения;

$I_{ос}$, $U_{ос}$ – ток и напряжение в открытом состоянии тиристора;

$I_{уд}$ - ток удержания;

$I_{обр}$ - обратный ток;

$I_{осмакс}$, $R_{осмакс}$ - максимально допустимые значения тока и мощности в открытом состоянии;

$U_{обр макс}$ – максимальное обратное напряжение.

К параметрам, характеризующим цепь управления, относятся отпирающий постоянный (или импульсный) ток управления $I_{уотп}$ и соответствующее ему отпирающее постоянное (или импульсное) напряжение управления $U_{уотп}$. Отпирающим током управления называют наименьший ток управления, необходимый для включения тиристора в заданном режиме.

Время включения тиристора $t_{вкл}$ - это интервал времени, в течение которого тиристор переходит из закрытого состояния в открытое. Время включения тиристора составляет 5...30 мкс.

Время выключения тиристора $t_{выкл}$ - это наименьший интервал времени, в течение которого восстанавливаются запирающие свойства, т. е. рассасываются накопленные в базах носители заряда после перемены полярности напряжения в основной цепи и рекомбинации оставшихся носителей.

Это время составляет от 5...10 до 200...250 мкс. После этого времени на тиристор снова может быть подано прямое напряжение. Он останется закрытым до следующего отпирающего импульса.

Время включения и время выключения тиристора характеризуют его частотные свойства.

По мощности тиристоры, как и диоды, подразделяют на тиристоры малой мощности (токи до 0,3 А), средней мощности (от 0,3 до 10 А) и большой мощности (больше 10 А)-силовые.

Ход работы:

В работе исследуется тиристор малой мощности 2У101И.

Таблица 1. Основные параметры тиристора

Иос,мА	Иобр, мА	Uос, В	Uобр.макс., В	Рср.макс, мВт
75	0,15	2,25	50	150

1 Подготовить измерительный стенд. Для этого:

- 1.1 Переключатель «Сеть» - в положение О.
- 1.2 Ручки регулировки напряжения блоков питания 1 и 2 – в крайнее левое положение.
- 1.3 Переключатели приборов Р1, Р2, Р3 – в положение «20», Р4 – 200мА.

2 Подключить модуль к измерительному стенду в соответствии с рисунком 5.

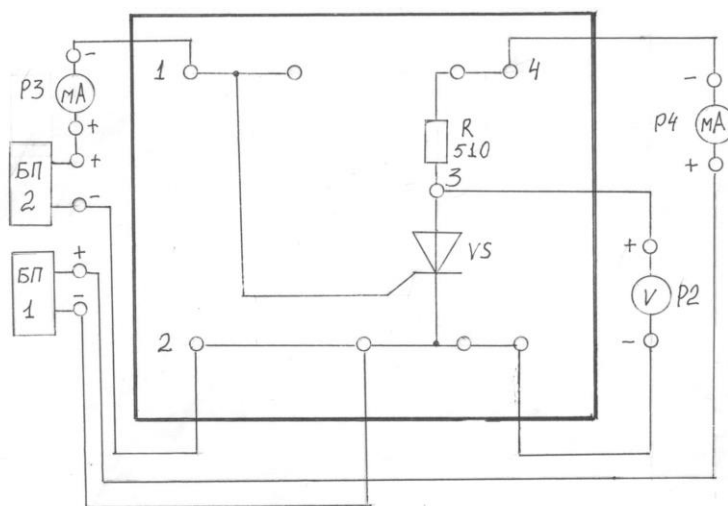


Рис.5 Схема исследования тиристора

3. Исследование тиристора в закрытом состоянии:

- 3.1 Включить питание стенда. и убедиться, что показания подключенных приборов соответствуют 0.
- 3.2 Установить ток управления от БП1 (по прибору Р3) $I_y = 0$.
- 3.3 Изменяя напряжение $U_{ак}$ ручкой «грубо» БП2 от 0 до 10В, снимать показания Р4. Данные измерений занести в таблицу 2 и убедиться, что анодный ток отсутствует.

Таблица 2

$U_{ак}, В$	0	3	5	10
$I_a, \mu A$				

4. Включение и выключение тиристора.

- 4.1 Установить $U_{ак} = 5В$ и изменяя ток управления от 0 до момента включения тиристора, измерять анодный ток (I_a) и напряжение $U_{ак}$. Данные измерений занести в таблицу 3.

Таблица 3

I_y, mA				
I_a, mA				
$U_{ак}, В$				

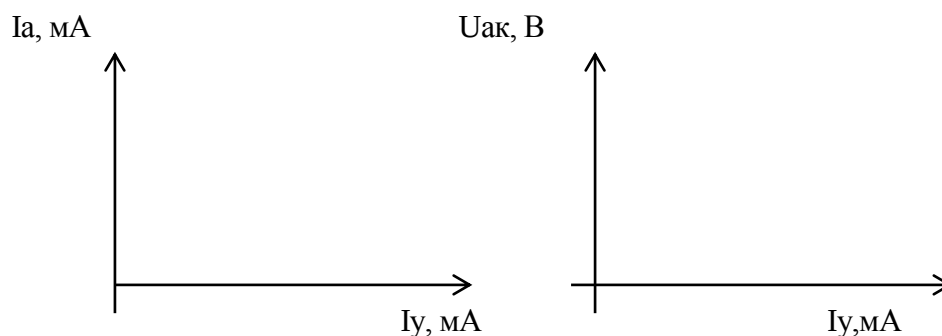


Рис. 6 Графики изменения тока и напряжения при включении тиристора

- 4.2 Уменьшить I_y до 0 и убедиться, что тиристор остается в открытом состоянии.
- 4.3 Выключить тиристор уменьшением U_{ak} до 0.
- 4.4 Установить $U_{ak} = 8\text{ В}$ и повторить включение и выключение тиристора. Данные измерений занести в аналогичную таблицу 4. Выключить питание стенда.
5. По данным таблиц 3 и 4 построить графики изменения анодного тока и напряжения (рис.6).
6. Сделать выводы о характере включения и выключения тиристора
7. Оформить отчет.

Практическая работа №8

Тема 1.7 Основы микроэлектроники.

Цель работы: расширить и систематизировать знания об основах микроэлектроники и операционных усилителях.

Теоретическая часть:

Блоки и узлы радиоэлектронной аппаратуры на втором этапе развития электронной техники (после электронных ламп) строились на полупроводниковых приборах. Но возникла мысль, а можно ли отдельные блоки и узлы создать в одном корпусе на одной подложке или в одном кристалле полупроводника. Эта идея начала реализовываться в мировой промышленности с конца шестидесятых годов.

Интегральная микросхема (ИС) — это конструктивно законченное изделие электронной техники, выполняющее определенную функцию, и содержащее совокупность транзисторов, полупроводниковых диодов, резисторов, конденсаторов и других элементов, электрически соединенных между собой.

Теория, методы расчета и технология изготовления ИС составляют основное содержание микроэлектроники.

По технологии изготовления различают полупроводниковые (т. е. монокристалльные), пленочные и гибридные ИС.

В полупроводниковой ИС все элементы и межэлементные соединения выполнены в объеме и на поверхности полупроводника, обычно кремния. Как правило, для полупроводниковых ИС характерно создание всех элементов одновременно в ходе единого технологического цикла.

В пленочных ИС все элементы и межэлементные соединения выполнены в виде проводящих, диэлектрических и резистивных пленок (слоев) на подложке. Такие ИС содержат, как правило, только пассивные элементы (резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, межсоединения). Вариантами пленочных ИС являются *тонкопленочные* с толщиной пленок 1...3 мкм и менее и *толстопленочные* с толщиной пленок свыше 3...5 мкм. Деление пленочных ИС обусловлено не столько толщиной пленок, сколько методом их нанесения в процессе создания пассивных элементов. Пассивные элементы тонкопленочных схем наносят на подложку преимущественно с использованием термовакuumного распыления и катодного осаждения, а пассивные элементы толстопленочных схем получают нанесением и вжиганием проводящих и резистивных паст. Наряду с полупроводниковой и пленочной широко используется гибридной

технология, в которой сочетаются тонкопленочные или пассивные толстопленочные элементы с полупроводниковыми активными, называемыми компонентами гибридной схемы. Частным случаем гибридной ИС является многокристальная ИС, содержащая в качестве компонентов несколько бескорпусных полупроводниковых схем на одной подложке. Наиболее распространены в настоящее время полупроводниковые и гибридные ИС.

Число элементов в данной ИС характеризует ее степень интеграции. В соответствии со степенью интеграции все ИС условно делят на малые (МИС — до 10^2 элементов на кристалл), *средние* (СИС — до 10^3), *большие* (БИС — до 10^4), *сверхбольшие* (СБИС — до 10^6), *ультрабольшие* (УБИС — до 10^9) и *гигабольшие* (ГБИС — более 10^9 элементов на кристалл). Иногда степень интеграции определяют величиной $k = \lg N$, где N число элементов, входящих в ИС, а значение k определяется до ближайшего целого числа в сторону увеличения. Например, ИС первой степени интеграции ($k = 1$) содержит до 10 элементов, второй степени интеграции ($k = 2$) — свыше 10 до 100, третьей степени интеграции ($k = 3$) — свыше 100 до 1000 и т. д.

При всем своем многообразии ИС по *функциональному* назначению делятся на два основных класса — аналоговые (частный случай — линейные) и цифровые. Аналоговые ИС предназначены для усиления, ограничения, частотной фильтрации, сравнения и переключения сигналов, изменяющихся по закону непрерывной функции.

Цифровые ИС предназначены для преобразования (обработки) сигналов, изменяющихся по закону дискретной функции (например, выраженных в двоичном или другом цифровом коде). Цифровые ИС представляют собой множество транзисторных ключей, обладающих двумя устойчивыми состояниями (разомкнутым и замкнутым). Основным видом цифровых схем являются логические ИС, выполняющие одну или несколько логических функций, простейшими из которых реализуются такие функции, как «И», «ИЛИ», «НЕ» и др.

Полупроводниковые ИС по конструктивно-технологическому принципу *бывают* *биполярные*, т.е. использующие биполярные транзисторы, и *МДП*, т. е. построенные на МДП- транзисторах. *Кристаллом ИС* называется структура, содержащая элементы, межэлементные соединения и контактные площадки (металлизированные участки, служащие для присоединения внешних выводов). В большинстве проводниковых ИС элементы располагаются в тонком (толщина 0,5...10 мкм) приповерхностном слое полупроводника. Так как удельное сопротивление полупроводника *невелико* (1...10 Ом), а элементы должны быть изолированы друг от друга, необходимы специальные *изолирующие области*

Элементы биполярных полупроводниковых ИС

Типичная структура полупроводниковой ИС, выполненная по биполярной технологии, показана на рис. 16.1. В такой ИС отдельные элементы, сформированные в «карманах» с проводимостью *n*-типа, оказываются электрически изолированными друг от друга обратносмещенным *p*-*n*-переходом, для чего на подложку *p*- типа кремния подается отрицательный потенциал. Предварительно создаваемые локальные области (называемые «карманами») служат для исключения взаимного влияния активных и пассивных элементов и могут быть изолированы друг от друга кроме *p*-*n*-переходом диэлектриком или комбинированным методом с применением *p* - *n*- переходов и диэлектрика.

В качестве резисторов в биполярных ИС используют участки однородного полупроводника; в качестве конденсаторов — обратносмещенные *p*-*n*-переходы. Индуктивность не создается в толще полупроводника, а может наноситься в виде спирали из металла на поверхности полупроводника.

Диоды и транзисторы, используемые в ИС, изготавливают по планарной технологии, то есть их выводы находятся на одной поверхности. Планарная технология позволяет в течение единого технологического процесса получать одновременно различные

элементы.

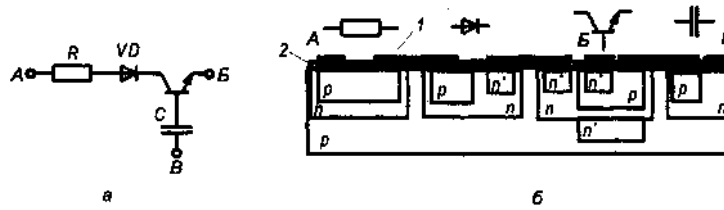


Рис. 16.1. Интегральная схема с изоляцией p - n -переходом:
а — электрическая схема; б — топология;
1 — металлическое межсоединение; 2 — слой SiO_2 ;
А, Б, В. — соответствующие друг другу точки на рис. а и б

При конструировании ИС стремятся применять диоды, эквивалентные переходам эмиттер-база или коллектор-база транзисторной структуры. В этом случае диоды изготавливают в едином технологическом цикле с остальными элементами.

Соединение элементов в полупроводниковой ИС может осуществляться несколькими способами, основным из которых является нанесение металлических тонкопленочных проводящих дорожек (чаще всего алюминиевых), изолированных от элементов кристалла слоем диэлектрика, чаще всего оксида кремния SiO_2 ; с помощью проволочных соединений.

Количество кристаллов ИС, получаемых в едином технологическом процессе на одной пластине, чаще всего кремния, зависит от размера кристалла, в свою очередь зависящего от количества элементов в схеме, и диаметра пластин. Площадь кристалла ИС в зависимости от ее сложности составляет $1...100 \text{ мм}^2$, наиболее распространены размеры $10...50 \text{ мм}^2$.

Элементы ИС на МДП- структуре

В качестве активных элементов в ИС могут использоваться кроме биполярных полевые транзисторы со структурой «металл-диэлектрик (оксид)-полупроводник», т. е. МДП-транзисторы или МОП- транзисторы. В соответствии с этим все монокристаллические ИС разделяются на три основных вида: МДП ИС (МОП ИС), биполярные и биполярно-полевые ИС. МДП ИС могут быть реализованы на транзисторах с каналом p - типа (p -МДП ИС, p - МОП ИС) и каналом n -типа (n -МДП ИС, n - МОП ИС), а также на комплементарных т. е. использующих одновременно p - и n - типы, МДП- транзисторах (КМДП ИС, КМОП ИС). Биполярно-полевые ИС представляют собой объединенные в одном кристалле биполярные и КМДП ИС (БиКМДП ИС, БиКМОП ИС).

Основными элементами современных МДП ИС являются МДП-транзисторы с каналом n -типа. Площадь этих транзисторов на кристалле значительно меньше, чем биполярных, поэтому в ИС на n -канальных МДП- резисторах достигается самая высокая (в 3-10 раз) степень интеграции, но они уступают биполярным ИС по быстродействию. В комплементарных МДП ИС применяют МДП- транзисторы с индуцированными каналами n - и p - типа, для этих ИС характерна очень малая потребляемая мощность.

МДП- транзистор может использоваться в качестве конденсатора и резистора, при этом значение емкости и сопротивления можно изменять в определенных пределах путем изменения потенциала на управляющем электроде (т. е. на затворе).

В качестве резистора МДП- транзистор используется при $U_{zu}=0$, т. е. при этом сопротивление канала имеет наибольшее значение. Сопротивление между выводами стока и истока в этом случае обратно пропорционально отношению ширины канала b к его длине L , т. е. b/L . Эта зависимость позволяет проводить расчет топологии для получения необходимого сопротивления резистора.

На рис. 16.2 приведена схема МДП- транзистора, используемого в качестве резистора. Структура МДП- конденсатора показана на рис 16.3. Диэлектриком в этом конденсаторе является термически выращенная пленка диоксида кремния SiO_2 . Одним из электродов является пленка напыленного металла на SiO_2 , являющимся диэлектриком, другим —

сильнолегированная n^+ - область кремния, лежащая под оксидом.

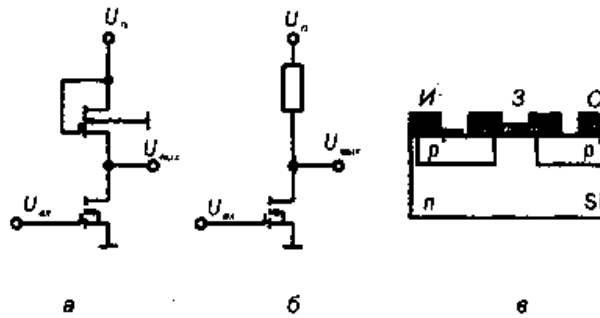


Рис. 16.2. Схема полевого транзистора с резистором:
а — топологическая схема; б — эквивалентная схема;
в — топология МОП-резистора

Высокоомный p -слой и p - кремний подложки образуют изолирующий $p - n$ -переход. Емкость МДП- конденсатора зависит прямо пропорционально от площади и обратно пропорционально от толщины оксидной пленки. Уменьшение толщины оксидной пленки для получения емкости большей величины имеет ограничения, так как неоднородность структуры очень тонкой пленки может привести к замыканию обкладок конденсатора.

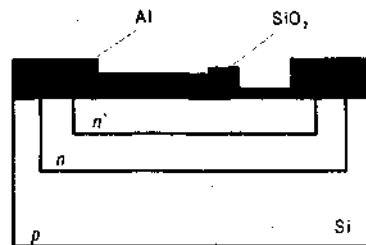


Рис. 16.3. МДП-конденсатор

Изготавливают МДП ИС методами планарной технологии. Трудоемкость изготовления МДП ИС на 30% ниже, чем биполярных ИС, так как технологический цикл изготовления МДП ИС состоит из 22 основных операций, а биполярных ИС — из 32.

Гибридные интегральные схемы

Исторически первыми (в середине шестидесятых годов прошлого века) были разработаны гибридные ИС. В этих схемах пассивные элементы (резисторы, конденсаторы) и все соединения изготавливаются из пленок различных материалов, нанесенных на диэлектрическую подложку, а в качестве активных элементов применяются бескорпусные или в малогабаритном корпусе полупроводниковые приборы и ИС.

Диэлектрические подложки изготавливают из керамики, ситала или стекла. Индуктивные катушки и конденсаторы большой емкости, как правило, применяют навесные.

При изготовлении гибридной схемы сначала создают соединения, для чего напыляют или наносят каким-либо другим способом полоски алюминия, серебра или золота. После этого напыляют сопротивление из тантала, хрома или специальных сплавов. Выбирая соответствующий материал, его толщину и площадь, подбирается обходимый номинал резистора. Необходимо отметить, что сопротивление резисторов можно «подгонять» до необходимой величины частичным удалением резистивной пленки. Таким образом, эти резисторы позволяют получить непрерывную шкалу номиналов. Для изготовления конденсатора напыляется металл, затем диэлектрик и снова металл. Как и резисторы, пленочные конденсаторы имеют непрерывную шкалу номиналов емкости. Считается целесообразным изготавливать пленочные конденсаторы с емкостью в пределах 100-5000 пФ. Пленочные индуктивности выполняют нанесением на диэлектрические подложки пленок в виде однослойных спиралей круглой или прямоугольной формы,

заканчивающихся контактными площадками. Затем устанавливают навесные элементы: диоды, транзисторы и другие элементы.

Гибридные ИС, в которых в качестве навесных элементов применены бескорпусные ИС, называют *многокристальными*.

Преимущества гибридно-пленочной технологии заключаются в высокой гибкости, т. е. в возможности выбора различных материалов и методов изготовления пленочных элементов, сравнительной простоте разработки и изготовления большинства схем в гибридном исполнении.

Как и полупроводниковые ИС гибридные ИС на заключительном этапе подлежат корпусированию. Перед герметизацией контактные площадки платы гибридной схемы соединяются с помощью проволоки с контактными площадками выводов корпуса, проволочные выводы развариваются или напаяются к контрастным площадкам.

Интегральные схемы с использованием оптоэлектронных элементов

На основе оптоэлектронных устройств разработано большое число оптоэлектронных ИС. Основные конструктивно-технологические концепции развития оптоэлектронных ИС аналогичны концепции развития ИС: это миниатюризация элементов оптоэлектронных схем, преимущественное развитие плоскостных конструкций панельного типа, применение в производстве групповых методов обработки. Существуют полупроводниковые и гибридные оптоэлектронные ИС.

Основным элементом любой оптоэлектронной ИС является оптронная пара. На рис. 16.9 показана оптронная пара, используемая в интегральной схеме. Она состоит из источника света 1, управляемого входным сигналом, и оптически связанного с ним с помощью иммерсионной среды 2 фотоприемника 3. В качестве иммерсионной среды используют диэлектрические материалы, выполняющие в оптроне также функции изолятора. Требования к иммерсионной среде следующие: иметь малый коэффициент поглощения света и показатель преломления, близкий к показателям преломления источника и фотоприемника.

На рис. 16.10 приведены примеры логических интегральных оптронных элементов. В схеме на рис. 16.10, а, если оба фоторезистора затемнены ($\Phi_1 = \Phi_2 = 0$), ток в цепи меньше порогового и светодиод не излучает. Только при одновременном освещении обоих фоторезисторов ток возрастает до величины, достаточной для появления светового потока Φ из светодиода. Схема выполняет операцию «И».

Схема, приведенная на рис. 16.10, б, выполняет операцию «НЕ» (инвертор). Световой поток Φ , подающий на фоторезистор, уменьшает его сопротивление. Светодиод открывается шунтированием и при облучении фоторезистора не излучает свет.

Если оба фоторезистора затемнены (рис. 16.10, в), то ток в цепи очень мал и светодиод не излучает. При появлении потока Φ_1 или Φ_2 светодиод излучает световой поток Φ . То же получается, если появляются одновременно потоки Φ_1 и Φ_2 поэтому схема выполняет операцию «И-ИЛИ».

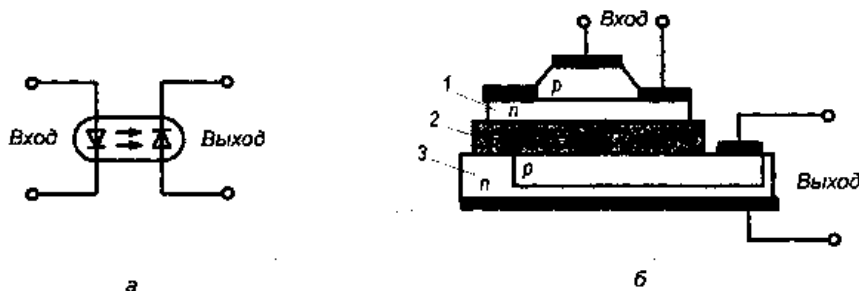


Рис. 16.9. Схема (а) и конструктивно-технологическое исполнение (б) оптронной пары в ИС



Рис. 16.10. Примеры логических интегральных оптронных элементов

Следует отметить, что логические оптроны пока не конкурируют со схемами транзисторной логики: быстродействие ограничено фоторезисторами, необходим источник света и др.

В микроэлектронике наиболее широко применяют оптоэлектронные ИС гальванической развязки предварительной обработки сигналов. К ним относят быстродействующие переключатели, коммутаторы аналоговых сигналов, ключи и аналоговые оптоэлектронные устройства, предназначенные для использования в системах функциональной обработки аналоговых сигналов.

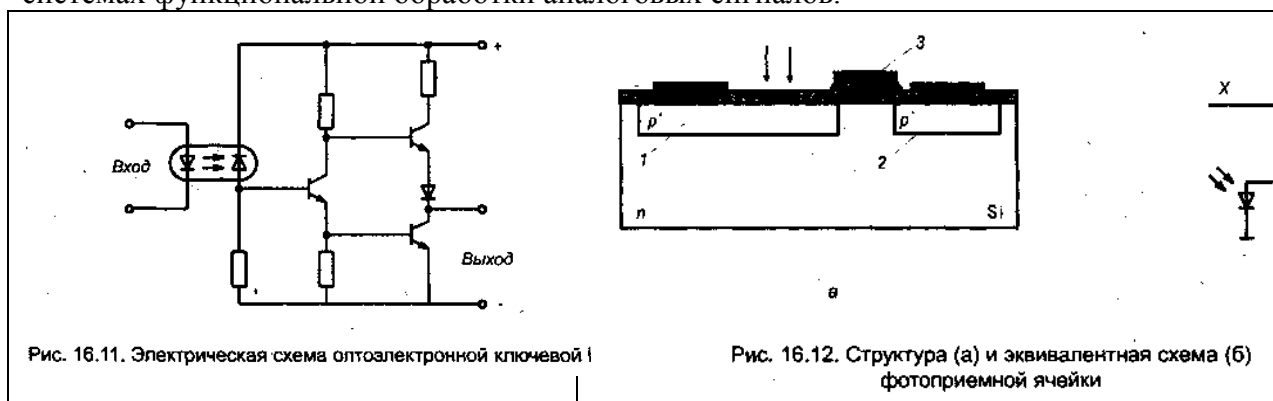


Рис. 16.11. Электрическая схема оптоэлектронной ключевой ИС

Рис. 16.12. Структура (а) и эквивалентная схема (б) фотоприемной ячейки

Для примера на рис. 16.11 показана электрическая схема ключевой ИС. Ключевая ИС включает в себя быстродействующую диодную оптоэлектронную пару, согласованную с монолитным кремниевым усилителем. Она предназначена для замены трансформаторных и релейных связей в логических устройствах ЭВМ и дискретной автоматики. Среди оптоэлектронных полупроводниковых ИС наибольшее распространение также получили схемы *многоэлементных фотоприемных устройств* (ФПУ), содержащие множество фоточувствительных элементов, преобразующих оптическое излучение в электрический сигнал.

Типичным примером многоканальных ФПУ являются устройства с кремниевыми фотодиодными матрицами, представляющие собой матрицу фотоприемных ячеек, каждая из которых содержит фотодиод и электронную схему управления и усиления на МДП-транзисторах. Ячейки соединяются с шинами строк и столбцов, с помощью которых осуществляется произвольная выборка при считывании информации. ИС имеет большее число выводов, определяемое числом строк и столбцов.

На рис. 16.12 показаны структура и эквивалентная схема простейшей фотоприемной ячейки.

Она представляет собой МДП- транзистор с индуцированным каналом р- типа и с увеличенной областью истока 1, при этом р-п-переход исток-подложка выполняет функцию фотодиода. Затвор 3 транзистора соединен с шиной строки X, а сток 2 — с шиной столбца Y. Существенный недостаток простейшей ячейки заключается в том, что полезный сигнал, выделяемый на шине Y, очень мал. Это обусловлено большой собственной емкостью шины. Поэтому шины Y подключаются к усилителям, размещение которых на том же кристалле сильно усложняет конструкцию ФПУ

Вопросы, выносимые на семинар:

1. Основные технологические процессы сборки интегральных схем.
2. Принципы классификации интегральных схем.
3. Критерии сложности микросхемы.
4. Цифровые и аналоговые микросхемы.
5. Преимущества электронной аппаратуры на интегральных микросхемах.
6. Особенности полупроводниковых интегральных микросхем.
7. Конструктивно-технологические типы интегральных микросхем: полупроводниковые, совмещенные и гибридные микросхемы.
8. Технология изготовления полупроводниковых микросхем: эпитаксия, диффузия примесей, ионное легирование, термическое окисление, травление, нанесение тонких пленок.
9. Проводники соединений и контакты в полупроводниковых микросхемах. Литография
10. Сборка полупроводниковых микросхем.
11. Технология изготовления гибридных микросхем.

Практическая работа №9**Тема 2.1. Вторичные источники питания****Исследование источника питания с трансформаторным входом****Цель работы:**

Экспериментально подтвердить теоретические положения по принципу действия источников питания.

Перечень используемого оборудования: измерительный стенд, модуль «Источник питания», осциллограф

Теоретическая часть:

Средства вторичного электропитания электронных устройств, называемые обычно источниками вторичного электропитания (ИВЭ), предназначены для формирования напряжений с заданными характеристиками. Они могут быть выполнены в виде отдельных блоков или входить в состав различных функциональных электронных узлов. Их основной задачей является преобразование энергии первичного источника в совокупность выходных напряжений, которые могут обеспечить нормальное функционирование электронного устройства.

По принципу действия ИВЭ можно разделить на две группы: трансформаторные и бестрансформаторные. В трансформаторных ИВЭ напряжение переменного тока, например, силовой сети, вначале изменяется по значению при помощи трансформатора, а затем выпрямляется и стабилизируется. В бестрансформаторных ИВЭ, наоборот, переменное напряжение сети вначале выпрямляется, а затем преобразуется в переменное напряжение более высокой частоты. В преобразователе может использоваться высокочастотный трансформатор, поэтому точнее эти источники называть несколько иначе: с трансформаторным или бестрансформаторным входом. Поскольку преобразователи в таких источниках обычно работают в импульсном режиме, то и ИВЭ такого типа часто называют импульсными.

По выходной мощности ИВЭ принято делить на микрометрические (1 Вт), маломощные (от 1 до 100 Вт), средней мощности (от 100Вт до 1 кВт) и мощные (> 1 кВт).

Структура ИВЭ зависит от типа первичного источника электрической энергии. Все используемые первичные источники можно разделить на две большие группы: источники переменного напряжения и источники постоянного напряжения. Источники переменного напряжения обычно вырабатывают напряжение гармонической формы с фиксированной частотой 50, 400 или 1000 Гц и фиксированным значением 110, 127, 220 или 380В.

Структурная схема ИВЭ, использующего электроэнергию, получаемую от сети переменного напряжения через силовой трансформатор, приведена на рис.1.

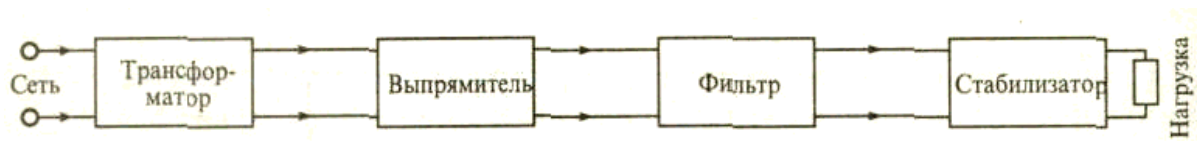


Рис.1 Структурная схема ИВЭ с трансформаторным входом:

Она состоит из силового сетевого трансформатора, нерегулируемого выпрямителя и сглаживающего фильтра пульсаций. В эту схему после фильтра включается стабилизатор с непрерывным или импульсным регулированием выходного напряжения. Удельная мощность такого ИВЭ невелика по двум основным причинам: наличию силового трансформатора, работающего на частоте силовой сети, и необходимости использования стабилизатора.

Выпрямителем называется устройство, предназначенное для преобразования переменного напряжения (тока) в постоянное. Основное назначение выпрямителя заключается в сохранении направления тока в нагрузке при изменении полярности приложенного напряжения. По количеству выпрямленных полуволн различают однополупериодные и двухполупериодные выпрямители. По числу фаз питающего напряжения различают однофазные, двухфазные, трехфазные и шестифазные выпрямители.

Основными параметрами выпрямителей, с помощью которых можно оценивать их качество являются:

-среднее значение выпрямленного (выходного) тока

$$I_0 = \frac{1}{T} \int_0^T i_2(t) dt,$$

- среднее значение выпрямленного (выходного) напряжения

$$U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u_2(t) dt,$$

- коэффициент пульсаций выходного напряжения (тока)

$$K_p = U_{m1} / U_0,$$

где: i_2 , u_2 – ток и напряжение на выходе выпрямителя;

T – период переменного тока (напряжения);

U_{m1} – амплитуда основной гармоники переменной составляющей выходного напряжения.

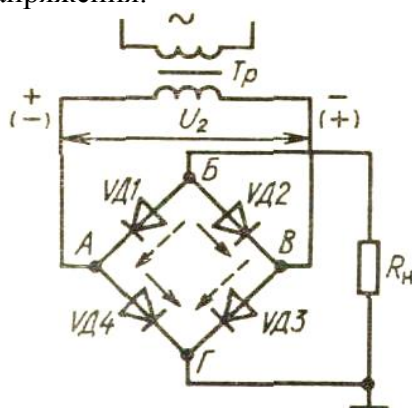


Рис.2 Двухполупериодный мостовой выпрямитель

. Широкое распространение получила двухполупериодная мостовая схема выпрямителя (рис.2). В ней используется трансформатор и четыре диода, включенных по мостовой схеме. Переменное напряжение подводится к одной диагонали моста, а выпрямленное напряжение снимается с другой. Рассмотрим работу мостовой схемы. Пусть в некоторый момент времени переменное напряжение на вторичной обмотке трансформатора таково, что потенциал точки А выше потенциала точки В. Тогда от точки А («+» источника напряжения) ток будет проходить через диод VD4 к точке Г, далее через нагрузку к точке Б и через диод VD2 к точке В («—» источника напряжения).

В течение следующего полупериода, когда потенциал точки В выше потенциала точки А, ток от точки В будет проходить через диод VD3, нагрузку и диод VD1 к точке А. Для первого полупериода направление тока показано сплошными стрелками, для второго полупериода направление тока показано пунктирными стрелками. В любой полупериод ток через нагрузку проходит в одном направлении.

Сглаживающим фильтром называют электронный узел, предназначенный для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения. Выпрямленное напряжение является пульсирующим, в котором можно выделить постоянные и переменные составляющие.

Коэффициенты пульсаций выпрямленных напряжений имеют следующие значения:

- для однополупериодного однофазного выпрямителя 1,57;
- для двухполупериодного однофазного выпрямителя 0,67;
- для трехфазного выпрямителя с нейтральным выводом 0,25;
- для трехфазного мостового выпрямителя 0,057.

С такими коэффициентами пульсаций выпрямленное напряжение в подавляющем большинстве случаев использовать нельзя, так как при этом работа электронных устройств резко ухудшается или вообще недопустима. В зависимости от назначения того или иного электронного устройства (усилителя, генератора и т. д.), его места в электронном устройстве или системе (на входе, выходе и т. д.) коэффициент пульсаций напряжения питания не должен превышать определенных значений. Основными элементами сглаживающих фильтров являются конденсаторы, индуктивные катушки и транзисторы, сопротивления которых различны для постоянного и переменного токов.

Основным параметром, характеризующим эффективность действия сглаживающего фильтра, является коэффициент сглаживания, равный отношению коэффициентов пульсаций на входе и выходе фильтра:

$$q = K_{п\text{ вх}}/K_{п\text{ вых.}}$$

Кроме выполнения требования к коэффициенту сглаживания фильтры должны иметь минимальное падение постоянного напряжения на элементах, минимальные габариты, массу и стоимость.

В зависимости от типа фильтрующего элемента различают емкостные, индуктивные и электронные фильтры. По количеству фильтрующих звеньев фильтры делятся на однозвенные и многозвенные.

Схема включения, временные диаграммы тока и напряжений двухполупериодного мостового выпрямителя с емкостным фильтром приведены на рис.3.

Анализ временных диаграмм показывает, что с изменением емкости конденсатора C_{ϕ} или сопротивления нагрузочного резистора R_H будет изменяться значение коэффициента пульсаций выпрямленного напряжения.



Рис.3 Двухполупериодный выпрямитель с емкостным фильтром

При этом, чем меньше разрядится конденсатор, тем меньше будут пульсации в выпрямленном токе i_H . Разряд конденсатора C_{ϕ} определяется постоянной времени разрядки $\tau_{\text{разр}} = C_{\phi} R_H$. При постоянной времени $\tau_{\text{разр}} = 10 T$ коэффициент пульсаций, определяемый по формуле $K_{п} = 1/2\pi f_{\text{осн}} \tau_{\text{разр}}$ ($f_{\text{осн}}$ - частота основной гармоники), не превышает 10^{-2} .

Работа выпрямителя с емкостным фильтром существенно зависит от изменения нагрузочного тока. Действительно, при увеличении тока i_H , что происходит при

уменьшении сопротивления R_H , постоянная времени $\tau_{\text{разр}}$ уменьшается. Уменьшается и среднее значение выпрямленного напряжения U_0 , а пульсации возрастают.

При использовании емкостного фильтра следует учитывать, что максимальное значение тока диода определяется лишь сопротивлениями диода и вторичной обмотки трансформатора, поэтому в момент включения питания, когда диод разряжен ток может достигать значений, больших $I_{\text{прmax}}$. Такой большой ток может вывести из строя диод. Для предотвращения этого последовательно с диодом необходимо включать добавочный резистор.

Емкостный фильтр целесообразно применять при высокоомной нагрузке.

Значительное снижение пульсаций достигается при использовании многосвязных фильтров.

Г-образные фильтры. Г-образные фильтры являются простейшими многосвязными фильтрами. Например, фильтр может быть RC- типа (рис.4).

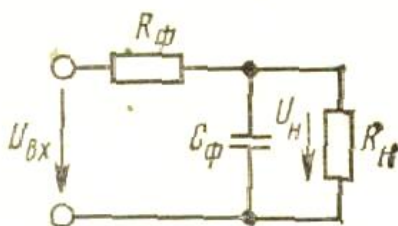


Рис.4 Г – образный емкостный фильтр

Их применяют тогда, когда с помощью односвязных фильтров не выполняется предъявляемое к ним требование с точки зрения получения необходимых коэффициентов сглаживания. П-образный фильтр состоит из емкостного фильтра (Cφ) и Г-образного RC-фильтра (рис.5).

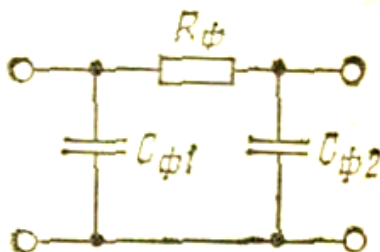


Рис.5 П – образный емкостный фильтр

Стабилизатором напряжения (тока) называют устройство, автоматически обеспечивающее поддержание напряжения (тока) нагрузочного устройства с заданной степенью точности.

Напряжение (ток) нагрузочного устройства может сильно изменяться не только при изменениях нагрузочного тока I_H , но и за счет воздействия ряда дестабилизирующих факторов. Одним из них является изменение напряжения промышленных сетей переменного тока.

Другими дестабилизирующими факторами являются изменение температуры окружающей среды, колебание частоты тока и так далее. Стабилизаторы классифицируют по ряду признаков:

- 1) по роду стабилизируемой величины - стабилизаторы напряжения и тока;
- 2) по способу стабилизации - параметрические и компенсационные стабилизаторы.

Основным параметром, характеризующим качество работы всех стабилизаторов, является коэффициент стабилизации. Как отмечалось, определяющими дестабилизирующими факторами, из-за которых изменяются выходные величины стабилизатора, являются входное напряжение стабилизатора $U_{\text{вх}}$ и нагрузочный ток I_H .

Для стабилизатора напряжения коэффициент стабилизации по напряжению:

$$K_{CTU} = (\Delta U_{BX}/U_{BX})/(\Delta U_{ВЫХ}/U_{ВЫХ}),$$

где ΔU_{BX} и $\Delta U_{ВЫХ}$ – приращения входного и выходного напряжений, а U_{BX} и $U_{ВЫХ}$ – номинальные значения входного и выходного напряжений.

Для стабилизатора тока коэффициент стабилизации тока:

$$K_{CTI} = (\Delta U_{BX}/U_{BX})/(\Delta I_H/I_H),$$

где ΔI_H и I_H – соответственно приращение и номинальное значение нагрузочного тока.

Параметрические стабилизаторы напряжения. Схема простейшего параметрического стабилизатора напряжения изображена на рис.6. С помощью такого стабилизатора, в котором применяется полупроводниковый стабилитрон Д, можно получать стабилизированное напряжение от нескольких вольт до нескольких сотен вольт при токах от единиц миллиампер до единиц ампер.

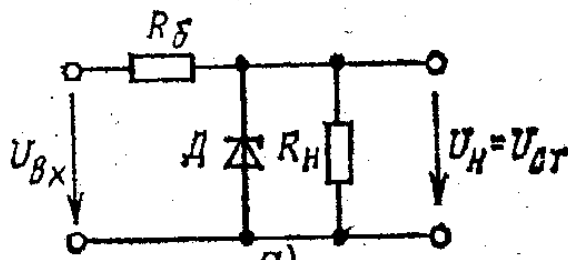


Рис.6 Схема параметрического стабилизатора напряжения на полупроводниковом стабилитроне

Стабилитрон в параметрическом стабилизаторе включают параллельно нагрузочному резистору R_H . Последовательно со стабилитроном для создания требуемого режима работы включают балластный резистор $R_б$.

Коэффициент стабилизации параметрического стабилизатора напряжения на полупроводниковом стабилитроне может достигать 30 – 50.

Основными достоинствами параметрических стабилизаторов напряжения являются простота конструкции и надежность работы. К недостаткам следует отнести небольшой коэффициент полезного действия не превышающий 0,3, большое внутреннее сопротивление стабилизатора (5 – 20 Ом), а также узкий и нерегулируемый диапазон стабилизируемого напряжения.

Порядок выполнения работы

В работе исследуется источник питания с двухполупериодным мостовым выпрямителем, с емкостным сглаживающим фильтром и параметрическим стабилизатором напряжения (рис.7). Резисторы R_2 и R_P выполняют функцию нагрузки.

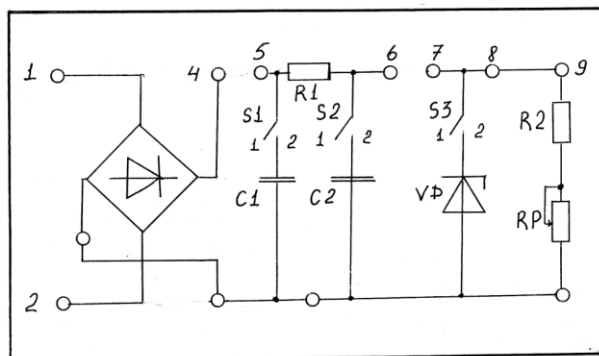


Рис.7 Источник питания

1 Исследование двухполупериодного выпрямителя.

1.1 Включить осциллограф и подготовить его к работе.

1.2 Переключатели S_1 , S_2 и S_3 на модуле поставить в положение 1, резистор R_P – в крайнее правое положение.

- 1.3 Гнездо 4 соединить с гнездом 7.
- 1.4 Осциллограф подключить к нагрузке (гн.9).
- 1.5 К выпрямителю (гн.1 и2) подключить источник переменного тока с амплитудой 5 В и частотой 50 Гц.
- 1.6 Отобразить в отчете осциллограмму U_n .
- 1.7 С помощью осциллографа или вольтметра измерить переменную (U_d) и постоянную (U_o) составляющие напряжения U_n и рассчитать коэффициент пульсаций:

$$K_p = \sqrt{2} U_d / U_o.$$

2 Исследование двухполупериодного выпрямителя с емкостным фильтром.

- 2.1 Соединить перемычками гн.4 и 5, 6 и 7.
- 2.2 Последовательно включить сначала S2, затем S1 и отобразить осциллограммы напряжения U_n и рассчитать K_p . Сделать выводы о влиянии фильтра на пульсации.
- 2.3 Рассчитать коэффициент сглаживания ρ .

3 Исследование источника питания со стабилизатором напряжения.

- 3.1 Поставить переключатель S3 в положение 2.
 - 3.2 Повторить п.п.1.6 и 1.7.
 - 3.3 Уменьшить сопротивление нагрузки, изменив положение ручки резистора RP на 90° и сделать вывод о влиянии нагрузки на U_n .
 - 3.4 По значению U_0 определить номинальное напряжение стабилитрона $U_{ст ном}$.
- 4 Оформить отчет и сдать преподавателю.

Практическая работа №10.

Тема 2.2. Усилительные устройства

Исследование усилителя на биполярном транзисторе

Цель работы: Экспериментальное подтверждение теоретических положений по принципу действия усилителей.

Перечень используемого оборудования: измерительный стенд, модуль «Усилитель», осциллограф.

Теоретическая часть:

Электронным усилителем называют устройство, предназначенное для повышения мощности входных электрических сигналов при сохранении всех остальных параметров (формы, частоты, фазы и др.).

Усиление сигнала осуществляется за счет энергии источника постоянного тока (источника питания).

Процесс усиления сигналов осуществляется с помощью усилительных элементов: транзисторов, электронных ламп, тиристоров и других элементов, обладающих управляющими свойствами.

Обобщенная схема усилительного каскада приведена на рис.1. К входу усилителя (зажимы 1 - 2) подключен источник входного сигнала с действующим значением ЭДС E_n и внутренним сопротивлением R_n . Маломощный входной сигнал управляет расходом энергии источника питания значительно большего уровня мощности. Таким образом, благодаря использованию управляющего элемента (например, транзистора) и более мощного источника питания осуществляется усиление мощности входного сигнала.

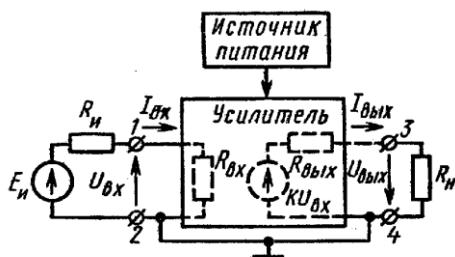


Рис.1 Обобщенная схема усилителя

В выходной цепи усилителя действует усиленный сигнал, что отражено на схеме наличием источника напряжения $KU_{вх}$ с выходным сопротивлением $R_{вых}$. Внешняя нагрузка R_n , потребляющая энергию усиленного сигнала, подключена к выходу усилителя (зажимы 3 - 4). Входное и выходное сопротивления усилителя в общем случае являются комплексными. Однако для большинства рассматриваемых далее усилителей их можно считать активными.

Усилитель, содержащий несколько ступеней усиления, называют многокаскадным.

Свойства усилителя оценивают параметрами, основными из которых являются коэффициент усиления, входное и выходное сопротивления и коэффициент полезного действия, а также частотной и фазовой характеристиками.

Коэффициент усиления. Этот важнейший параметр представляет собой отношение напряжения или тока (мощности) на выходе усилителя к напряжению или току (мощности) на его входе и численно показывает увеличение выходного сигнала по сравнению с входным.

В соответствии с назначением усилителя различают коэффициенты усиления напряжения K_u , тока K_i и мощности K_p . В общем случае коэффициент усиления зависит от частоты усиливаемых сигналов ω и является величиной комплексной.

В технической документации на усилители, как правило, указываются коэффициенты усиления действующих значений напряжения, тока и мощности в определенном диапазоне частот:

$$K_u = U_{вых}/U_{вх}, \quad K_i = I_{вых}/I_{вх}, \quad K_p = P_{вых}/P_{вх} = K_i \cdot K_u.$$

Амплитудно-частотная характеристика. Зависимость модуля коэффициента усиления от частоты ($\omega = 2\pi f$) представляет собой амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) усилителя. Графическое изображение АЧХ для наиболее распространенного класса усилителей переменного напряжения с емкостной связью показано на рис. 2. Поскольку модуль коэффициента усиления на разных частотах имеет разные значения, гармонические составляющие сложного входного сигнала усиливаются не одинаково и, следовательно, форма выходного сигнала будет отлична от формы входного сигнала. Такие искажения усиливаемого сигнала называют частотными (линейными) искажениями.

Причиной частотных искажений являются реактивные элементы усилителя (индуктивности и емкости), сопротивления которых зависят от частоты, а также зависимость от частоты физических параметров полупроводниковых приборов, как активных элементов усилителя.

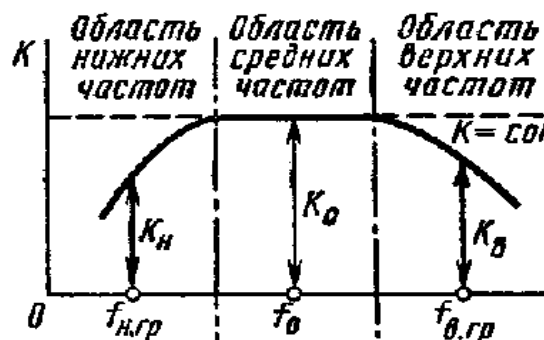


Рис.2 Амплитудно-частотная характеристика усилителя

Режимы работы усилителей. В зависимости от режима работы активного усилительного элемента усилителя по постоянному току различают следующие режимы работы усилительного каскада - режимы классов А, В, АВ, С, D. Рассмотрим этот вопрос на примере транзисторного усилителя. Режим работы по постоянному току определяется положением рабочей точки на динамической характеристике транзистора. От положения рабочей точки зависят значения постоянных составляющих токов входного и выходного электродов транзистора и напряжений на этих электродах, а, следовательно, мощность, потребляемая усилителем от источника питания. В свою очередь, выбор положения рабочей точки в значительной степени регламентируется амплитудой, формой и полярностью входного переменного сигнала. В соответствии с этим рассмотрим особенности работы усилительного каскада на транзисторе по

схеме ОЭ при воздействии на входе переменного сигнала синусоидальной формы.

В режиме класса А начальное положение рабочей точки выбирают по середине участка динамической характеристики, где изменению базового (входного) тока соответствуют пропорциональные изменения коллекторного (выходного) тока, а ее перемещение, вызванное воздействием двойной амплитуды входного сигнала, ограничивается этим участком. На выходной характеристике (рис.3) этот участок отмечен линией АВ. Поэтому выходной коллекторный ток проходит в течение всего периода усиливаемого сигнала, что является характерной особенностью режима класса А.

Так как рабочая точка не выходит за пределы линейного участка динамической входной характеристики, то нелинейные искажения, вносимые усилителем, невелики и тем меньше, чем меньше амплитуда входного сигнала. Однако низок и КПД усилителя.

В режиме класса В начальное положение рабочей точки на динамической характеристике выбирают при токе коллектора, близком к $I_{кб0}$ (рис.3). Поэтому при наличии переменного входного сигнала переменная составляющая коллекторного тока с амплитудой $I_{кт}$ проходит лишь в течение половины периода сигнала, а в другую половину периода транзистор заперт. Транзистор работает с отсечкой тока. При этом угол отсечки тока θ , под которым понимают половину времени за период прохождения тока через транзистор, примерно равен $\pi/2$.

Важной особенностью режима класса В является высокий КПД усилителя, достигающий 60-70%, поскольку постоянная составляющая коллекторного тока, поступающая от источника питания при отсутствии усиливаемого сигнала, почти равна нулю.

Режим класса АВ является промежуточный между классами А и В и характеризуется углом отсечки в $(120-130^\circ)$ и меньшими нелинейными искажениями, однако является более экономичным, чем режим класса А.

Режиму класса С соответствует угол отсечки $\theta < \pi/2$. Такой режим является наиболее экономичным (КПД достигает 85%), так как при отсутствии усиливаемого сигнала транзистор почти не потребляет мощности.

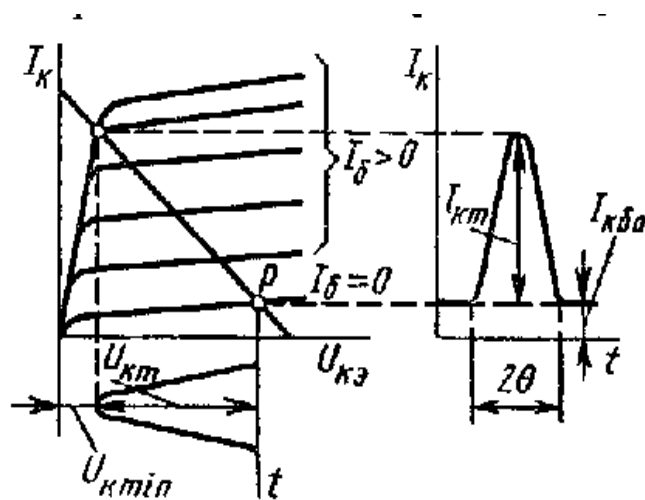


Рис.3 К пояснению режимов работы усилителей

Режим класса D характеризуется переходом рабочей точки при усилении сигналов большой амплитуды из области, соответствующей режиму отсечки, в область, соответствующей режиму насыщения.

Режимы класса С и D применяется в усилителях - формирователях, которые работают при превышении входным сигналом некоторого порогового значения.

Обратные связи в усилителях. Обратной называют такую связь между входом и выходом усилителя, при которой часть энергии выходного сигнала передается на вход. При этом образуется замкнутый контур, состоящий из усилителя и цепи обратной связи — петля обратной связи (ОС). Различают однопетлевую (рис.4,а) и многопетлевую (рис.4,б) обратные связи. В последней схеме можно выделить общую петлю обратной связи, охватывающую весь усилитель с коэффициентом усиления K , и местную петлю обратной связи, охватывающую

отдельный усилительный каскад.

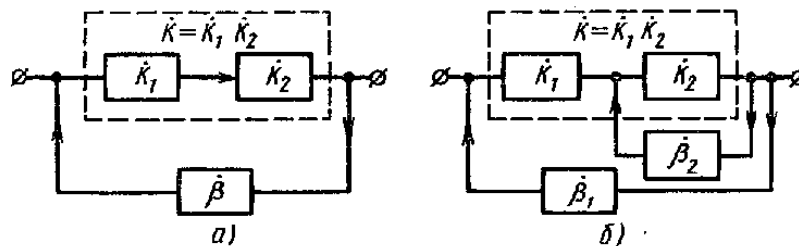


Рис. 4. Однопетлевая (а) и многопетлевая (б) обратные связи

Основной показатель обратной связи - коэффициент передачи цепи обратной связи β , показывающий, какая часть выходного сигнала передается на вход.

Если напряжение обратной связи U_{oc} (рис.5) пропорционально выходному напряжению на нагрузке усилителя, то имеем обратную связь по напряжению (рис. 5,а), а в случае пропорциональности U_{oc} току в нагрузке - обратную связь по току (рис.5,б). Кроме того, возможна смешанная обратная связь (комбинация обратной связи по напряжению и по току).

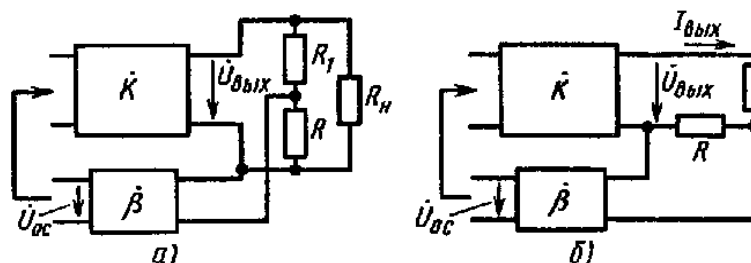


Рис.5 Обратные связи по напряжению (а) и по току (б)

По способу передачи энергии через цепь обратной связи на вход усилителя различают последовательную и параллельную обратные связи. В первом случае напряжение обратной связи подключают последовательно с напряжением источника входного сигнала усилителя (рис.6,а), а во втором - параллельно (рис.6,б).

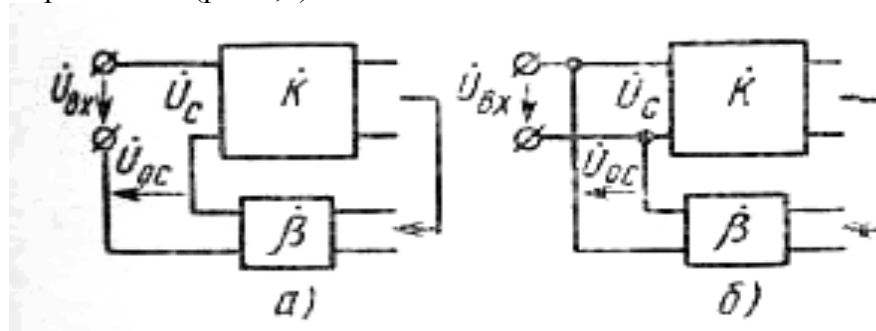


Рис.6 Обратные связи: последовательная (а) и параллельная (б)

Коэффициент усиления усилителя K и коэффициент передачи цепи ОС β являются частотно-зависимыми. Комплексный коэффициент усиления усилителя определяется соотношением:

$$\dot{K} = \dot{K} / (1 - \beta \dot{K}).$$

Поэтому возможен сдвиг фазы сигнала с выхода цепи ОС относительно входного сигнала. Если фазы сигналов совпадают, то такую ОС называют положительной (ПОС). При этом коэффициент усиления усилителя с ОС определяется соотношением:

$$K_{oc} = K / (1 - \beta K).$$

При условии $\beta K \rightarrow 1$, $K_{oc} \rightarrow \infty$, что может привести к самовозбуждению усилителя. Это обстоятельство позволяет использовать усилители с ПОС для реализации генераторов электрических сигналов.

Если сигнал обратной связи поступает на вход усилителя в противофазе с входным сигналом, то коэффициент усиления усилителя определяется соотношением:

$$K_{ос} = 1/(1 + \beta K).$$

Т.е. он уменьшается в $(1 + \beta K)$ раз. Такую обратную связь называют отрицательной обратной связью (ООС). Несмотря на уменьшение усиления, отрицательную обратную связь широко используют в усилителях, так как с ее введением увеличивается входное и уменьшается выходное сопротивления, расширяется полоса пропускания, увеличивается стабильности усилителя, уменьшаются частотные, фазовые и нелинейные искажения.

Рассмотрим простейшую схему усилителя на БТ п-р-п- типа, включенного по схеме с общим эмиттером (рис.7,а).

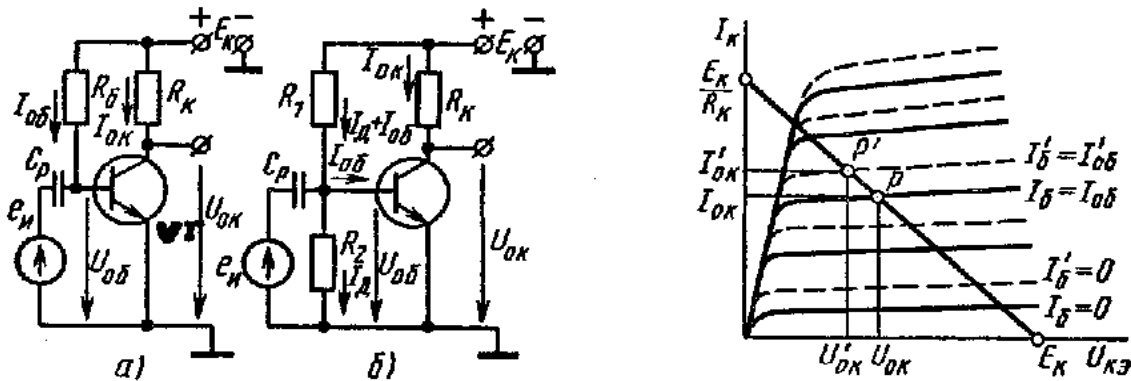


Рис.7 Схема усилителя на БТ с общим эмиттером

Назначение элементов усилителя. E_K – источник питания постоянного тока, энергия которого преобразуется в энергию усиленного сигнала; VT – транзистор – основной усилительный элемент, с помощью которого осуществляется преобразование энергии; R_b – резистор, определяющий ток базы I_{b0} и тем самым задающий режим работы транзистора по постоянному току; R_K – резистор, предназначенный для выделения усиленного сигнала; C_p – разделительный конденсатор, предназначенный для разделения усилительного каскада по постоянной составляющей сигналов от предыдущей цепи.

Режим покоя. Режимом покоя (исходным состоянием) называют режим работы электронного устройства при отсутствии входного сигнала $U_{вх} = 0$.

В режиме покоя конденсаторы C_p отделяет вход усилителя от предыдущего каскада. Если бы конденсатора не было, то резисторы других каскадов были бы подключены параллельно к резисторам усилителя и поэтому режим усилителя по постоянному току был бы нарушен.

Режим покоя задается выбором рабочей точки А (рис.8) так, чтобы не было нелинейных искажений сигнала. При выборе рабочей точки пользуются входными и выходными характеристиками транзистора.

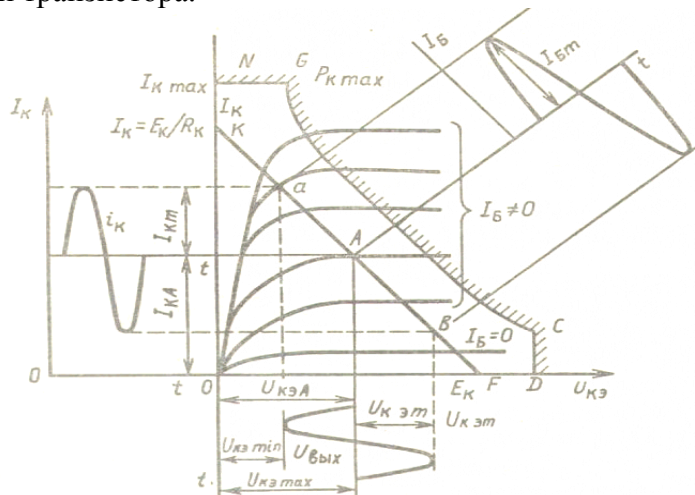


Рис.8 Диаграммы, поясняющие принцип действия усилителя

Рабочая область выходных характеристик ограничена линией NGCD. При работе транзистора ток его коллектора не должен превышать максимально допустимый $I_{k \max}$.

NG соответствует этому режиму. Каждый транзистор способен рассеивать мощность на коллекторе не выше максимально допустимой ($P_{k \max}$). Линия GC ограничивает область допустимых мощностей рассеяния на коллекторе. Транзистор работает при некотором вполне определенном напряжении между коллектором и эмиттером. При превышении этого допустимого максимального напряжения транзистор выходит из строя. Линия CD определяет область допустимых напряжений $U_{кэ}$.

При усилении разнополярных сигналов (к ним относится и гармонический сигнал) рабочую точку А на характеристиках следует выбирать так, чтобы она находилась на середине линейных участков входной и выходной характеристик, при этом нелинейные искажения будут минимальные. Для определения рабочей точки на статических выходных характеристиках строится линия нагрузки (линия KF) в соответствии с уравнением:

$$U_{кэ} = E_k - I_{kR_k}.$$

Положение рабочей точки на нагрузочной линии определяется током базы I_b , который можно рассчитать:

$$I_{b0} = (E_k - U_{бэ})/R_б \approx E_k/R_б.$$

Напряжением $U_{бэ}$ можно пренебречь, т.к. оно на прямосмещенном эмиттерном переходе незначительно.

Рабочая точка характеризуется током коллектора I_k А и напряжения $U_{кэ}$ А.

Принцип действия. При действии положительной полуволны входного сигнала ток базы I_b увеличивается, транзистор приоткрывается, что вызывает увеличение тока коллектора I_k и уменьшение напряжения на коллекторе $U_{кэ}$. При действии отрицательной полуволны процессы протекают в обратном порядке. Т.к. выходные ток и напряжение значительно превышают входные, то мощность выходного сигнала также значительно больше входного. При чем выходной сигнал повторяет форму входного.

Из анализа работы данного усилителя видно, что он кроме усиления мощности сигнала изменяет его фазу на 180° .

Цепи смещения предназначены для задания режима работы усилителя по постоянному току (исходного состояния). Цепи смещения можно разделить на два вида: цепи фиксированного смещения и цепи автосмещения. Наиболее простой цепью фиксированного смещения является резистор $R_б$ (Рис.7,а). На практике используется цепь фиксированного смещения в виде делителя напряжения R_1, R_2 (рис.7,б).

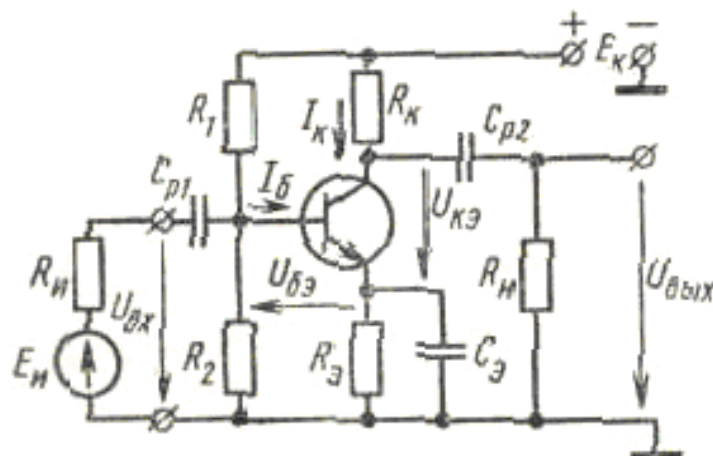


Рис.9 Схема усилителя с цепями смещения

Недостатками такой цепи смещения являются: при замене транзистора необходимо заново рассчитать параметры цепи и зависимость режима работы от температуры.

Для термостабилизации совместно с фиксированной цепью применяют цепь автосмещения. Она реализуется включением в эмиттер транзистора резистора $R_э$ (рис.9). Этот резистор создает

отрицательную обратную связь по току. Напряжение на эмиттерном переходе определяется соотношением:

$$U_{бэ} = \phi_6 - \phi_э = \phi_6 - I_э R_э.$$

Из этого соотношения видно, что температурные изменения токов коллектора и эмиттера вызывают изменения напряжения $U_{бэ}$ в направлении препятствующем этим изменениям.

Для уменьшения действия отрицательной обратной связи по переменному сигналу резистор $R_э$ шунтируется конденсатором $C_э$. Емкость конденсатора выбирается из условия

$$X_c = 1 / \omega C_э \ll R_э,$$

где ω – частота усиливаемого сигнала.

Порядок выполнения работы

В работе исследуются усилители на транзисторах КТ315Б (рис.10). Исследования заключаются в выборе исходного режима, определении коэффициента усиления и оценке влияния обратных связей на процесс усиления различных каскадов усилителей.

1 Подготовить измерительный стенд. Для этого:

- 1.1 Переключатель «Сеть» - в положение О.
- 1.2 Ручки регулировки напряжения блоков питания 1 и 2 – в крайнее левое положение.
- 1.3 Переключатели приборов P1, P2, P3, P4 – в положение «20».
- 1.4 Питание модуля осуществляется напряжением 12В кабелем ОМЦ.

2 Включить питание осциллографа и подготовить его к работе.

3 Исследование однокаскадного усилителя с фиксированной цепью смещения без ОС (соответствующий рис.7,б).

- 3.1 Соединить перемычкой гн.4 с корпусом.
- 3.2 Включить питание измерительного стенда.
- 3.3 Подключить осциллограф к выходу «20dB» ГНЧ и с его помощью установить на

выходе

ГНЧ гармонический сигнал частотой $f = 1$ кГц и амплитудой $U_{вх} = 0,02$ В.

3.4 Задание исходного режима усилителя:

- подключить вольтметр P1 к коллектору транзистора;
- устанавливая резистор RP в крайние положения, измерить напряжение $U_{кэ}$, соответствующее режимам насыщения и отсечки транзистора;
- рассчитать среднее значение и установить его резистором RP, это будет соответствовать режиму класса А.

3.5 Подключить ГНЧ к входу (C1), а осциллограф – выходу усилителя (Гн.5).

3.6 Получить устойчивое изображение усиленного сигнала.

Примечание: Если усиленный сигнал искажен, т.е. имеет ограничения сверху или снизу, резистором RP подкорректировать режим работы. Если имеются ограничения и сверху и снизу, уменьшить амплитуду сигнала на выходе генератора.

3.7 Измерить его амплитуду $U_{вых}$ и частоту f .

3.8 Рассчитать коэффициент усиления по напряжению:

$$K_u = U_{вых} / U_{вх}.$$

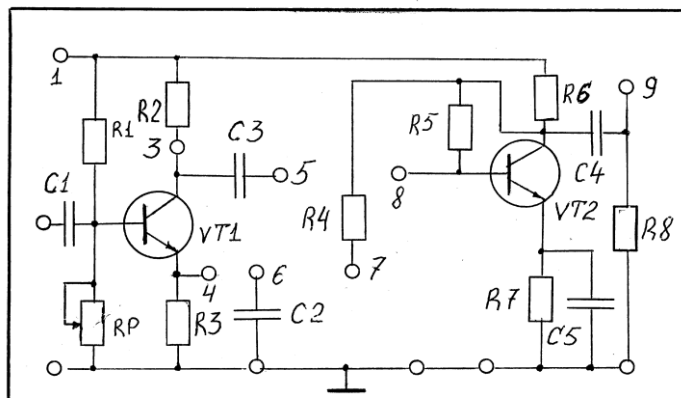


Рис.10 Двухкаскадный усилитель

4 Исследование однокаскадного усилителя с цепью автосмещения (соответствующий рис.9):

4.1 Снять перемычку между гнездами 4 и $\perp$. Тем самым вводится ООС по току в первом каскаде. Осциллографом измерить амплитуду $U_{вых}$ и рассчитать K_u . Сделать вывод о влиянии ООС на K_u .

4.2 Соединить гнезда 4 и 6, тем самым устраняется ООС по переменной сигналу и реализуется цепь автосмещения. Если наблюдаются искажения усиленного сигнала, необходимо подкорректировать режим работы усилителя резистором R_P .

4.3 Определить K_u и сделать вывод об усилительных свойствах усилителя.

5 Исследование двухкаскадного усилителя.

5.1 Соединить гнезда 5 и 8, а осциллограф подключить к гнезду 9.

5.2 Если наблюдаются искажения сигнала, уменьшить амплитуду входного сигнала.

5.3 Рассчитать K_u двухкаскадного усилителя.

5.4 Ввести ООС по напряжению всего усилителя, соединив гнездо 9 с гнездом 4(6).

Определить K_u и сделать вывод об усилительных свойствах усилителя.

6 Выключить питание стенда, сделать выводы по работе.

Практическая работа №11

Тема 2.2.. Усилительные устройства

Исследование дифференциального усилителя.

Цель работы: исследование принципа действия дифференциального усилителя.

Перечень используемого оборудования: измерительный стенд, модуль «Дифференциальный усилитель», осциллограф

Теоретическая часть:

Дифференциальный усилитель, являющийся основой линейных интегральных микросхем, представляет собой балансный УПТ. На рис.1,а показана типичная простейшая схема ДУ.

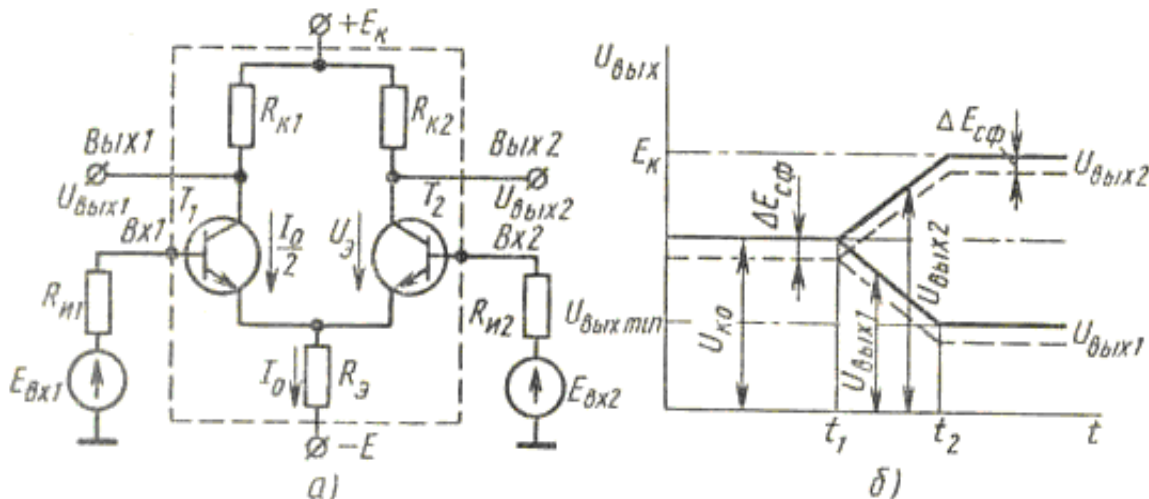


Рис.1. Дифференциальный УПТ

УПТ параллельного баланса выполнен в виде моста, двумя плечами которого являются внутренние сопротивления транзисторов T_1 и T_2 , а двумя другими - резисторы R_{K1} и R_{K2} . К одной диагонали моста подключено напряжение источника питания E_K , а к другой - внешняя нагрузка R_H (между точками Вых1 и Вых2). Усилитель имеет два входа (V_{X1}, V_{X2}) и два выхода (V_{Y1} и V_{Y2}).

При симметричных плечах схемы (транзисторы идентичны, а $R_{K1} = R_{K2} = R_K$) и отсутствии входных сигналов ДУ сбалансирован и напряжение между коллекторами ($U_{ВЫХ}$) равно нулю. Поскольку ток I_0 делится пополам между плечами, потенциалы коллекторов обоих транзисторов одинаковы: $U_{K0} = U_{ВЫХ1} = U_{ВЫХ2} = E_K - (I_0 R_K)/2$ (рис.1,б).

В частном случае напряжение входного сигнала может быть подано лишь на один вход ($E_{вх1} = 0$ или $E_{вх2} = 0$). Напряжение выходного сигнала снимается либо между коллекторами транзисторов (симметричный выход), либо с коллектора одного из транзисторов относительно общего провода (несимметричный выход).

Сопротивление $R_э$ должно значительно превышать внутреннее сопротивление усилителя со стороны его выхода с тем, чтобы $I_0 = (E - U_{бэ})/R_э$ не зависел от напряжения на входе ДУ и сохранял постоянное значение даже при наличии короткого замыкания в цепи нагрузки источника этого тока. Поэтому вместо резистора $R_э$ включают генератор стабильного тока (ГСТ).

Важнейшей особенностью ДУ является способность высокого усиления разностного (дифференциального) сигнала $E_{вх1} - E_{вх2}$ (когда входные сигналы переменного тока противофазны или разнополярны в случае сигналов постоянного тока) и значительного ослабления суммарного (синфазного) входного сигнала, когда $E_{вх1} = E_{вх2}$.

Таким сигналом в частном случае является импульсный сигнал помехи.

Если в момент времени t_1 на вход транзистора Т1 поступил положительный сигнал при $E_{вх2} = 0$, то на выходе левого плеча схемы, представляющего собой усилительный каскад ОЭ, появится усиленный сигнал $U_{вых1}$ противоположной полярности (инвертированный сигнал, как в схеме ОЭ). Одновременно на эмиттерном сопротивлении

$$R'_э = R_э R_{вх об} / (R_э + R_{вх об}),$$

где $R_{вх об}$ – входное сопротивление транзистора Т2 по эмиттерному входу, появится положительный импульс $U_э$, равный по амплитуде входному импульсу $E_{вх1} > 0$. Этот импульс поступает на эмиттер транзистора Т2 вызывая появление на коллекторе усиленного импульса также положительной полярности (сдвиг по фазе отсутствует, как в схеме ОБ) с амплитудой $U_{вых2} \approx U_{вых1}$. Следовательно, выходной сигнал с напряжением $U_{вых2}$ не инвертирован по отношению к входному сигналу.

При увеличении амплитуды входного сигнала $E_{вх1}$ ток транзистора Т1 увеличивается, а напряжение на его коллекторе $U_{вых1}$ снижается и, наоборот, ток транзистора Т2 уменьшается, что сопровождается ростом напряжения $U_{вых2}$ [(участок $t_1 - t_2$ на потенциальной диаграмме сигналов (рис.1,б)]. В момент времени t_2 ток транзистора Т1 достигает максимально возможного значения I_0 , а ток транзистора Т2 равен нулю. При этом разность выходных сигналов: $U_{вых2} - U_{вых1} = I_0 R_k$. Описанный процесс справедлив, если между входами прикладывается разностный (разнополярный) входной сигнал, называемый дифференциальным.

При наличии так называемого синфазного входного сигнала $E_{сф} = E_{вх1} = E_{вх2}$ и в случае идеального источника тока ($R_э \rightarrow \infty$) реакция ДУ на выходе отсутствует.

Если на вход ДУ поступает разностный сигнал $E_{вх1} - E_{вх2} \neq 0$, то, взяв отношение разности сигналов на выходе $U_{вых2} - U_{вых1}$ к разности сигналов на входе, получим дифференциальный коэффициент усиления:

$$K_d = (U_{вых2} - U_{вых1}) / E_{вх}.$$

При синфазном входном сигнале $E_{вх1} = E_{вх2} = E_{сф}$, взяв отношение приращения выходного синфазного напряжения на любом выходе схемы $\Delta U_{вых.сф}$ к $E_{сф}$, получим коэффициент передачи синфазного напряжения, который характеризует степень ослабления синфазного сигнала:

$$K_{сф} = \Delta U_{вых.сф} / E_{сф}.$$

В случае интегрального ДУ в качестве эмиттерной нагрузки ($R_э$) используется генератор стабильного тока, имеющий значительное сопротивление переменной составляющей тока $I_э$.

Ход работы

В работе исследуется ДУ на биполярных транзисторах КТ3102 (рис.2). Питание усилителя

осуществляется от источника $\pm 6В$.

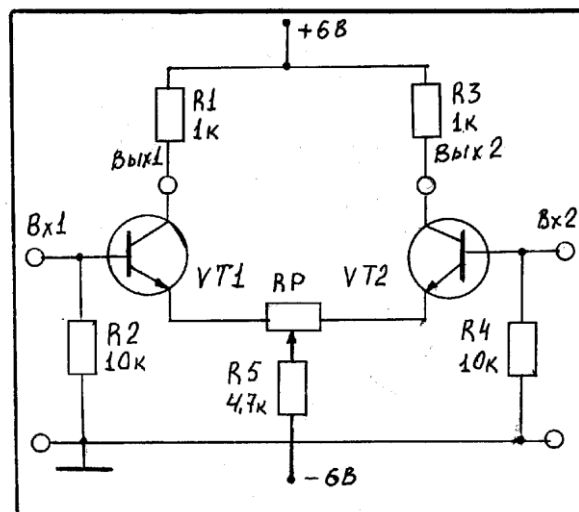


Рис.2 Дифференциальный усилитель

1 Подготовить измерительный стенд, для этого:

- 1.1 Переключатели приборов Р1 и Р2 установить в положение 20 В.
- 1.2 Подключить вольтметр Р1 к гнездам Вых1 и Вых2.
- 2 Включить питание и изменением эмиттерной нагрузки RP сбалансировать ДУ, при этом $U_{вых}$ должно быть равно 0.
- 3 Установить на выходе БП2 с помощью Р2 напряжение, равное 0,2 В и подать его на Вх1, при этом Вх2 подключить к гн. «⊥».
- 4 Определить $U_{вых}$ и его полярность и рассчитать K_u .
- 5 Подключить БП2 к Вх2, а Вх1 к «⊥» и рассчитать K_u по второму входу.
- 6 Определить инвертирующий и неинвертирующий входы.
- 7 Подать на оба входа напряжение от БП2. Если $U_{вых} \neq 0$, выяснить причину и сбалансировать усилитель.
- 8 Ручкой «Точно» увеличить и уменьшить входное напряжение и убедиться в неизменности $U_{вых}$.
- 9 Отключить БП2 и Р1 от усилителя.
- 10 С помощью осциллографа установить на выходе ГНЧ (20dB) гармонический или импульсный сигнал с $f = 1\text{кГц}$ и амплитудой $U = 0,2\text{В}$.
- 11 ГНЧ подключить к Вх1 усилителя, а осциллограф – к выходу. Измерить $U_{вых}$ и рассчитать K_u .
- 12 Подключить ГНЧ к обоим входам усилителя и убедиться, что ДУ подавляет синфазные сигналы.
- 13 Снять и построить передаточную характеристику усилителя по инвертирующему входу, подавая входной сигнал от БП2.

Практическая работа №12.

Тема 2.4. Генераторы гармонических колебаний

Исследование LC- генератора

Цель работы: Экспериментальное подтверждение теоретических положений по принципу действия генератора.

Перечень используемого оборудования: измерительный стенд, модуль «LC - генератор», осциллограф

Теоретическая часть:

Генератором электрических сигналов называют устройство, преобразующее энергию источника постоянного тока в энергию незатухающих электрических колебаний заданной формы, частоты и мощности.

В зависимости от формы выходного напряжения различают: генераторы

гармонических колебаний (синусоидальной формы) и генераторы негармонических колебаний (импульсные или релаксационные генераторы).

Генераторы могут работать в одном из двух режимов: режим автоколебаний и ждущий режим (режим запуска внешними сигналами).

При охвате усилителя положительной обратной связью возможно самовозбуждение, так как коэффициент усиления на определенных частотах достигает бесконечно большого значения. Такая схема работает в автоколебательном режиме и является автогенератором.

Таким образом, автогенератор гармонических колебаний представляет собой усилительное звено с коэффициентом усиления K_U , охваченное положительной обратной связью с коэффициентом передачи напряжения β (рис.1).

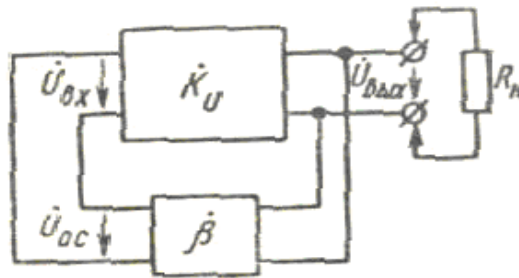


Рис.1 Структурная схема автогенератора

Следовательно, установившиеся колебания будут существовать в схеме при условии, если $K_U \beta = 1$.

Так как $K_U \beta$ - величина комплексная, процесс самовозбуждения автогенератора, можно охарактеризовать двумя формулами:

$$K_U \beta = 1 \quad \text{и} \quad \varphi_K + \varphi_\beta = 2\pi n,$$

где: φ_K – сдвиг фазы, вносимый усилителем;

φ_β - сдвиг фазы, вносимый цепью обратной связи.

Первое уравнение показывает, что для существования автоколебательного режима ослабление сигнала, вносимое звеном обратной связи, должно компенсироваться усилителем. Это уравнение называют условием баланса амплитуд.

Второе уравнение является условием баланса фаз, при котором сдвиг фаз в замкнутой цепи автоколебательной системы должен равняться $2\pi n$, где $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

При $n = 0$ осуществляется генерация синусоидальных (гармонических) колебаний, а при $n > 0$ – негармонических колебаний.

Условие $n = 0$ означает, что для генерации колебаний синусоидальной формы система автогенератора должна содержать частотно-избирательный четырехполюсник, обуславливающий выполнение условий баланса фаз и амплитуд на одной и той же частоте.

Автогенератор с индуктивной связью на транзисторе

Схема автогенератора с резонансным LC-контуром показана на рис.2,а. В этой схеме используется индуктивная связь обмотки резонансного контура $L_k C_k$, являющегося нагрузкой однокаскадного усилителя по схеме ОЭ, со вторичной обмоткой, включённой в цепь базы и выполняющей функцию цепи обратной связи. Обмотка L_b включается встречно обмотке L_k , чем обеспечивается сдвиг фазы на π .

Элементы R_1, R_2, R_3 и C_Σ предназначены для обеспечения необходимого режима по постоянному току и его термостабилизации. Сопротивления r_k и r_b учитывают активные потери соответственно в контурной и базовой обмотках. За счет конденсатора C_Σ , реактивное сопротивление которого на частоте генерации незначительно, заземляется один конец базовой обмотки.

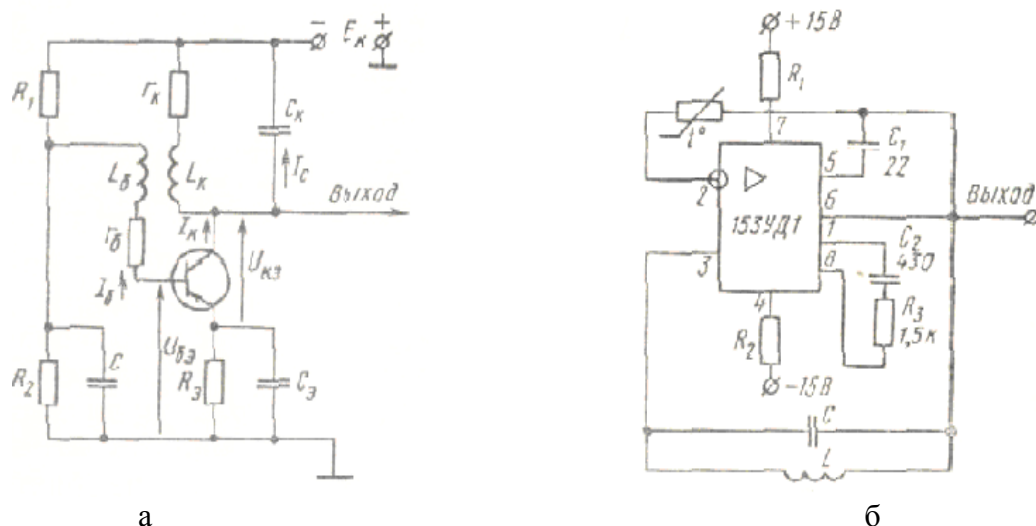


Рис.2 Генератор гармонических колебаний на транзисторе (а) и операционном усилителе (б)

Сопротивление контура на резонансной частоте носит чисто активный характер и равно $L_k / (g_k C_k)$. Поэтому при воздействии на базу сигнала переменного тока с частотой, равной частоте резонанса, напряжение на коллекторе будет сдвинуто по фазе на π (как для каскада усиления по схеме ОЭ). Таким образом, общий фазовый сдвиг в замкнутой цепи усилитель – звено обратной связи будет равен нулю. Это обеспечивает выполнение условия баланса фаз.

Минимальное усиление, обеспечивающее выполнение условия баланса амплитуд на резонансной частоте (частоте генерации), определяется выражением

$$h_{21\varepsilon} = h'_{11\varepsilon} g'_k C_k / M + M / L'_k, \quad (*)$$

где g'_k и L'_k – сопротивление активных потерь и индуктивность колебательного контура с учетом параллельно подключенной выходной проводимости транзистора $h_{22\varepsilon}$; $h'_{11} = g_b + h_{11\varepsilon}$, M – коэффициент взаимоиנדукции.

Таким образом, для получения устойчивого автоколебательного процесса с частотой колебаний f_0 необходимо выбрать транзистор, у которого значение $h_{21\varepsilon}$ не менее рассчитанного по формуле (*). При этом частота колебаний LC-автогенератора выражается формулой:

$$f_0 = 1 / (2\pi \sqrt{L'_k C_k}).$$

Высокими техническими показателями обладают LC-автогенераторы, в которых в качестве усилительных звеньев используют операционные усилители. В связи с избыточностью коэффициента усиления таких усилителей это позволяет кроме положительной обратной связи через частотно-избирательный резонансный контур вводить достаточно глубокие отрицательные обратные связи, что существенно повышает стабильность частоты генерируемых колебаний.

Один из типичных вариантов LC-автогенератора на операционном усилителе типа 153УД1 показан на рис.2,б. В этой схеме LC - контур включён в цепь положительной обратной связи между выходом (вывод 6) и неинвертирующим входом (вывод 3) операционного усилителя. Включение в цепь отрицательной обратной связи между выходом и инвертирующим входом усилителя (вывод 2) терморезистора обеспечивает высокий уровень стабилизации амплитуды и частоты генерируемых колебаний.

Технические характеристики LC-автогенераторов в диапазоне низких частот существенно снижаются, так как в соответствии с выражением непомерно увеличиваются индуктивность и емкость колебательного контура. Это приводит к увеличению омического сопротивления обмотки катушки и токов утечки конденсатора, снижению добротности колебательного контура и стабильности частоты автогенератора. Поэтому в автогенераторах гармонических колебаний низкочастотного диапазона используют частотно-избирательные цепочки из элементов R и C в

зависимости от создаваемого ими фазового сдвига на квазирезонансной частоте инвертирующие или неинвертирующие усилители.

Ход работы

В работе исследуется генератор гармонических сигналов на биполярном транзисторе с индуктивной положительной обратной связью, схема которого представлена на рис.3. Питание генератора осуществляется от источника напряжением +12В.

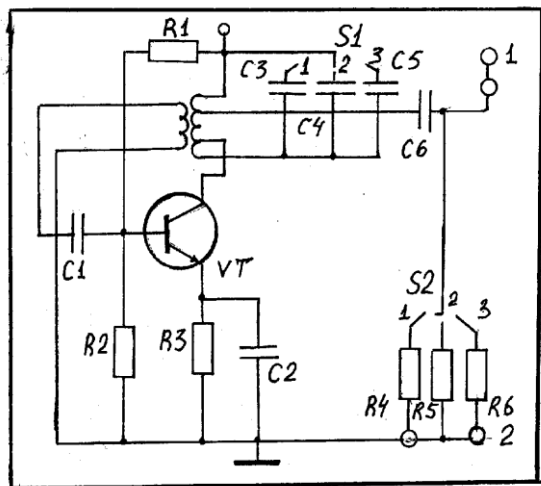


Рис.3 LC – генератор с индуктивной связью

1. Включить осциллограф, подготовить к работе и подключить его к выходу генератора (тн.1 и 2).
2. На модуле переключатели S1 и S2 поставить в положение 1.
3. Включить питание стенда.
4. На экране осциллографа должен появиться гармонический сигнал.
Примечание: При отсутствии сигнала выключить питание и включить снова.
5. Изобразить его осциллограмму в отчете, измерить период и амплитуду сигнала, рассчитать частоту.
6. Выполнить п.5 при положении переключателя S1 в положении 2 и 3.
7. Сделать вывод о влиянии параметров колебательного контура на основные параметры генерируемого сигнала.
8. Изменить сопротивление нагрузки генератора, поставив переключатель S2 в положение 2, и также измерить параметры генерируемого сигнала. То же проделать при изменении переключателя в положении 3.
9. Сделать выводы о влиянии нагрузки на параметры генерируемого сигнала.

Практическая работа №13.

Тема 3.1. Логические элементы.

Исследование логических элементов

Цель работы: исследование принципа действия логических элементов.

Перечень используемого оборудования: измерительный стенд, модуль «Логические элементы», осциллограф

Теоретическая часть:

Логические элементы (ЛЭ) представляют собой электронные устройства, реализующие логические операции.

В соответствии с перечнем логических операций различают три основных логических элемента: И, ИЛИ, НЕ. Условные графические обозначения этих ЛЭ показаны на рис.1.

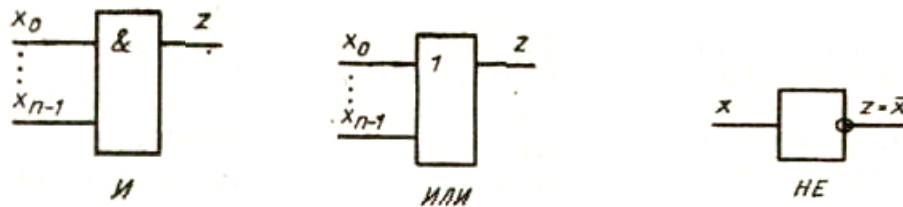


Рис.1 Условные графические обозначения логических элементов

Число входов элементов И, ИЛИ может быть произвольным. Элемент НЕ имеет всегда только один вход.

Функционально полной системой (базисом) называется совокупность ЛЭ, позволяющая реализовать логическую функцию произвольной сложности, и системы двух элементов И и НЕ, а также ИЛИ и НЕ наравне с системой из трех элементов (И, ИЛИ, НЕ) являются функционально полными. На практике широкое применение нашли ЛЭ, совмещающие функции элементов указанных выше функционально полных систем. Это элементы И - НЕ и ИЛИ - НЕ, которые называют соответственно штрих Шеффера и стрелка Пирса. По определению каждый из этих элементов так же образует базис. Их условные графические обозначения приведены на рис.2.

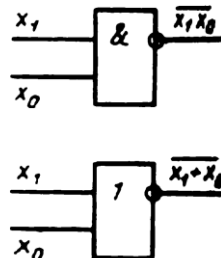


Рис.2 Условное графическое обозначение элементов И-НЕ и ИЛИ - НЕ на 2 входа

На рис.3 показана реализация основных логических операций на базе элементов 2И-НЕ

Логические элементы характеризуются рядом параметров, по которым производится их выбор для реализации конкретного устройства.

U1 и U0 - уровни логических 1 и 0 (см. рис.4).

Коэффициент объединения по входу ($K_{об}$) - равен числу логических входов элемента. На них поступают логические переменные, над которыми данный элемент осуществляет логическую операцию.

Коэффициент разветвления по выходу ($K_{раз}$) численно равен количеству входов аналогичных элементов, которыми можно нагрузить выход данного элемента. Этот коэффициент характеризует нагрузочную способность элемента и определяется структурой его выходного каскада.

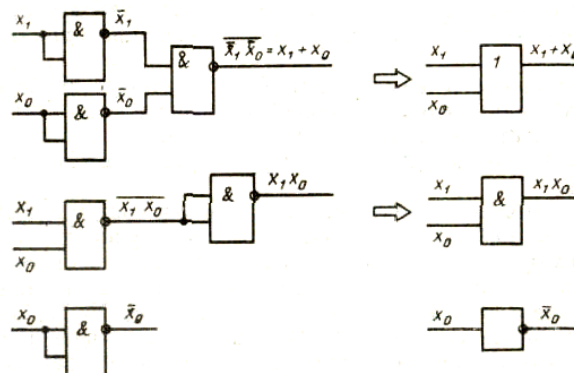


Рис.3 Реализация основных логических операций на базе элементов 2И - НЕ

Время задержки ($t_{\text{зад}}$) обычно оценивают полусуммой задержек перепадов на выходе элемента относительно входных перепадов, переключающих его из состояния 1 в состояние 0 ($t_{\text{з}}^{1-0}$) и обратно ($t_{\text{з}}^{0-1}$) (рис.4). При этом каждая задержка измеряется между серединами перепадов (на уровне $0,5 U$).

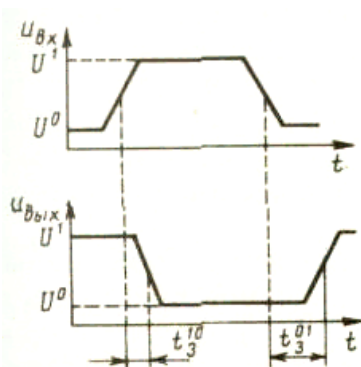


Рис.4. К определению времени задержки

Время задержки определяет важное свойство ЛЭ – быстродействие.

Помехоустойчивость - оценивается наибольшим напряжением помехи $U_{\text{пом}}$, действующей на входе, которое не вызывает ложного переключения элемента из 1 в 0 или наоборот. Помехоустойчивость логического элемента можно оценить по передаточной характеристике - зависимости выходного напряжения от входного (рис.5).

На рис.5а показана идеализированная передаточная характеристика, в соответствии с которой переключение элемента из одного состояния в другое осуществляется, когда входное напряжение окажется равным пороговому ($U_{\text{вх}} = U_{\text{пор}}$).

Пока $U_{\text{вх}} < U_{\text{пор}}$, на выходе элемента логическая 1, $U_{\text{вых}} = U^1$, когда $U_{\text{вх}} > U_{\text{пор}}$, напряжение $U_{\text{вых}} = U^0$.

Помехоустойчивость элемента соответствует разности входных напряжений:

$U^1 - U_{\text{пор}}$ (когда $U_{\text{вых}} = U^0$) и $U_{\text{пор}} - U^0$ (когда $U_{\text{вых}} = U^1$).

Передаточная характеристика, более близкая к реальной, изображена на рис.5,б. Наклонный участок характеристики соответствует активному (усилительному) режиму элемента: незначительные изменения $U_{\text{вх}}$ вызывают во много раз большие изменения $U_{\text{вых}}$.

Кроме приведенных параметров логический элемент характеризуется потребляемой мощностью и напряжением питания.

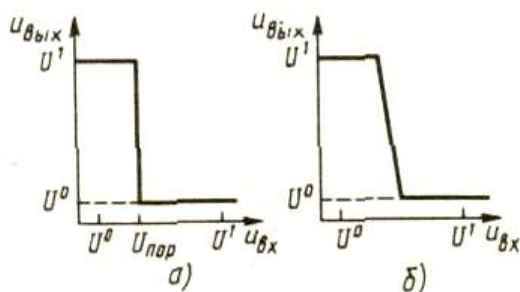


Рис.5 К определению помехоустойчивости ЛЭ

Логическое устройство, реализованное в базисе И - НЕ (ИЛИ - НЕ), имеет преимущества по сравнению с устройством, реализованным в базисе И, ИЛИ, НЕ. Одно состоит в уменьшении номенклатуры элементов до одного типа, что упрощает компоновку устройства и его ремонт; другое связано с наличием в каждом элементе инвертора (усилителя), который компенсирует затухание потенциалов при передаче их через конъюнктор или дизъюнктор элемента. Благодаря этому не накапливается

затухание сигнала при прохождении его через ряд последовательно включенных элементов, что могло бы вызвать снижение уровня U^1 до уровня U^0 . Кроме того, инвертор увеличивает нагрузочную способность элемента: подключение допустимого числа других элементов к его выходу не вызывает заметного уменьшения на нем уровней потенциалов, что особенно важно для U^1 , а наличие емкости на выходе не вызывает длительного переходного процесса при смене потенциалов.

Ход работы

Исследования заключаются в снятии передаточной характеристики ЛЭ ТТЛ 2И-НЕ, реализованных в виде ИМС К155ЛА8. Основные параметры элемента представлены в таблице 1.

Таблица 1

Упит, В	U^0 , В	U^1 , В	$P_{\text{стат}}$, мВт	$t_{\text{зд р ср}}$, нс	$U_{\text{пом}}$, В
$5 \pm 5\%$	$\leq 0,4$	$\geq 2,4$	≤ 25	19	0,4

1 Подготовить измерительный стенд.

Для этого:

- 1.1 Переключатель «Сеть» - в положение О.
- 1.2 Ручки регулировки напряжения блоков питания 1 и 2 – в крайнее левое положение.
- 1.3 Переключатели приборов Р1, Р2, Р3, Р4 – в положение «20».
- 1.4 Питание ИМС осуществляется кабелем ОМС.

2 Снятие переходной характеристики ЛЭ.

- 2.1 Подключить один из логических элементов модуля к измерительному стенду в соответствии с рисунком 6.

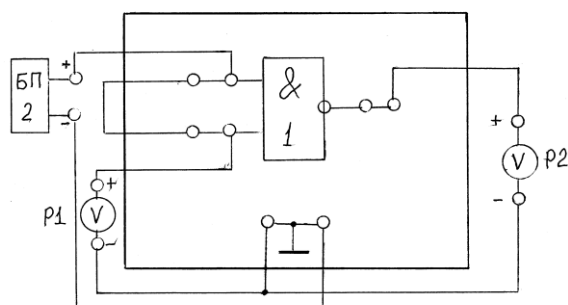


Рис.6 Схема исследования ЛЭ



Рис.7 Переходная характеристика ЛЭ И-НЕ

- 2.2 Включить питание стенда и, увеличивая $U_{\text{вх}}$ (БП2) от 0 до 4,5В, измерять $U_{\text{вых}}$ (по прибору Р2).

Результаты измерений записать в таблицу 2. Аналогичные измерения выполнить при уменьшении $U_{\text{вх}}$.

Таблица 2

U _{вх} , В									
U _{вых} , В (увел)									
U _{вых} , В (умен)									

2.3 Выключить питание стенда.

2.4 По таблице построить характеристику (рис.7).

2.5 По характеристике определить U^0 , U^1 , $U_{пор1}$, $U_{пор2}$ и рассчитать статическую помехоустойчивость элемента.

2.6 Результаты исследования сравнить с таблицей 1 и сделать выводы.

3 Определение времени задержки.

3.1 Включить осциллограф и подготовить его к работе.

3.2 Собрать схему исследования в соответствии с рисунком 8.

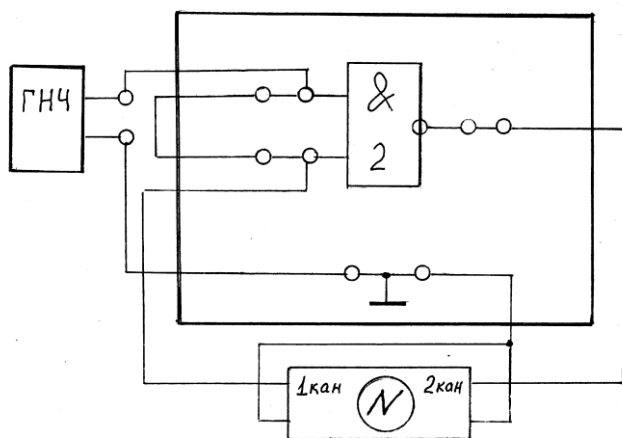


Рис. 8 К определению времени задержки

3.3 Включить измерительный стенд.

3.4 Установить выходе ГНЧ «20dB» сигналы прямоугольной формы с частотой 1кГц и амплитудой 1 В и подключить его к входу элемента.

3.5 Получить устойчивое изображение входного и выходного сигналов на экране осциллографа (сигнал на экране не должен превышать один период). Изобразить осциллограммы сигналов в отчете.

3.6 На уровне $0,5 U$ измерить время задержки $t_{з}^{0-1}$ и $t_{з}^{1-0}$. Рассчитать среднее время задержки:

$$t_{з} = (t_{з}^{0-1} + t_{з}^{1-0}) / 2.$$

3.7 Отключить ГНЧ и осциллограф от модуля.

4 Реализация основных логических операций на основе ЛЭ И-НЕ.

4.1 Собрать поочередно схемы указанные на рис.9 и подавая на входы комбинации сигналов, соответствующие цифрам 1 и 0, составить таблицы условий работы. Сигнал, соответствующий 0, подается соединением входа с корпусом. Отсутствие такого соединения равносильно подаче на вход 1. Состояние выходного сигнала контролируется вольтметром.

4.2 По таблицам определить какие логические операции выполняются этими устройствами.

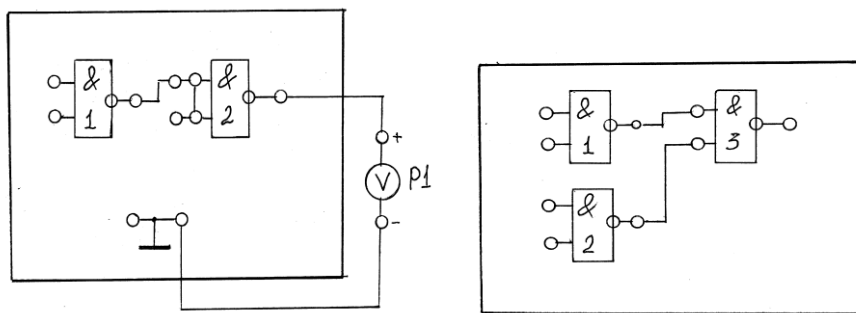


Рис.9 Схемы логических элементов

4.3 Собрать схему ЛЭ ИЛИ-НЕ и проверить его работоспособность.

5 Выключить питание установки и разобрать схему.

6 Подготовить отчет и сделать выводы по работе.

Практическая работа №14.

Тема 3.2. Операционные усилители

Исследование операционного усилителя

Цель работы: исследование принципа действия операционного усилителя

Перечень используемого оборудования: измерительный стенд, модуль «Операционный усилитель», осциллограф.

Теоретическая часть:

Операционным усилителем называют усилитель, имеющий большой коэффициент усиления и применяемый для выполнения различных операций по преобразованию электрических сигналов.

ОУ с использованием цепей положительных и отрицательных обратных связей позволяют усиливать, ослаблять, генерировать электрические сигналы, осуществлять сложение, вычитание, дифференцирование, интегрирование и другие операции.

В настоящее время наиболее широкое распространение получили трехкаскадные ОУ. Структурная схема трехкаскадного ОУ приведена на рис.1. Первый каскад обычно выполняют по схеме простого дифференциального усилителя (ДУ), имеющего два входа и два выхода. Второй каскад - усилитель напряжения (УН), также выполняемый по схеме дифференциального усилителя, обладает значительным коэффициентом усиления напряжения.

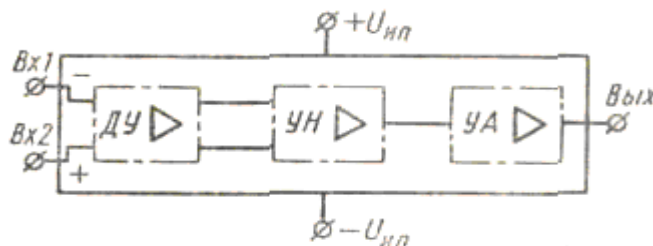


Рис.1 Структурная схема ОУ

Выходной каскад является усилителем амплитуды сигнала (УА) и выполняется по схеме ОК. Общий коэффициент усиления трехкаскадного ОУ достигает сотен тысяч. Входные характеристики ОУ практически полностью определяются входными характеристиками дифференциального усилителя, а выходные - аналогичными показателями каскада по соответствующей схеме включения.

Условные графические обозначения и схема включения показаны на рис.2.

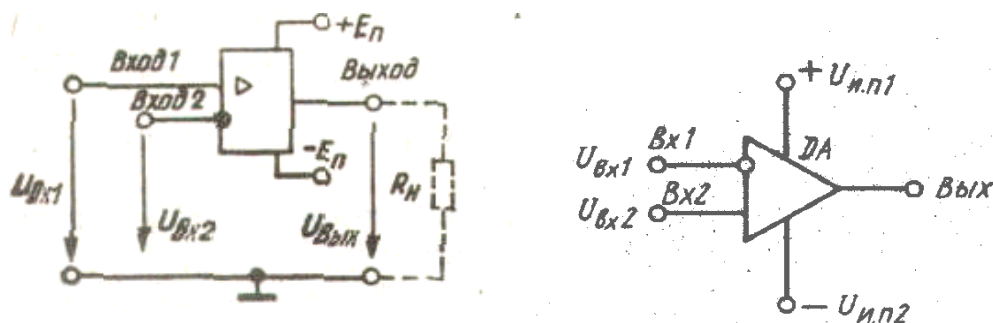


Рис.2 Условное графическое обозначение ОУ

Вход 1 является неинвертирующим, вход 2 – инвертирующим (обозначен кружком). Выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ связано со входными соотношением:

$$U_{\text{вых}} = K_u (U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}}),$$

где K_u – собственный коэффициент усиления ОУ по напряжению.

Как правило, ОУ питается от двух источников питания, подключаемых разными полюсами.

Применение двух источников питания при подключении нагрузки к их общей точке позволяет формировать на выходе двухполярное напряжение.

Следовательно, передаточная характеристика усилителя расположена в двух квадрантах. На рис.3 приведены передаточные характеристики ОУ соответственно для неинвертирующего и инвертирующего входов. Из этих характеристик следует, что максимальное выходное напряжение ОУ ($U_{\text{вых max}}$) всегда меньше напряжения питания.

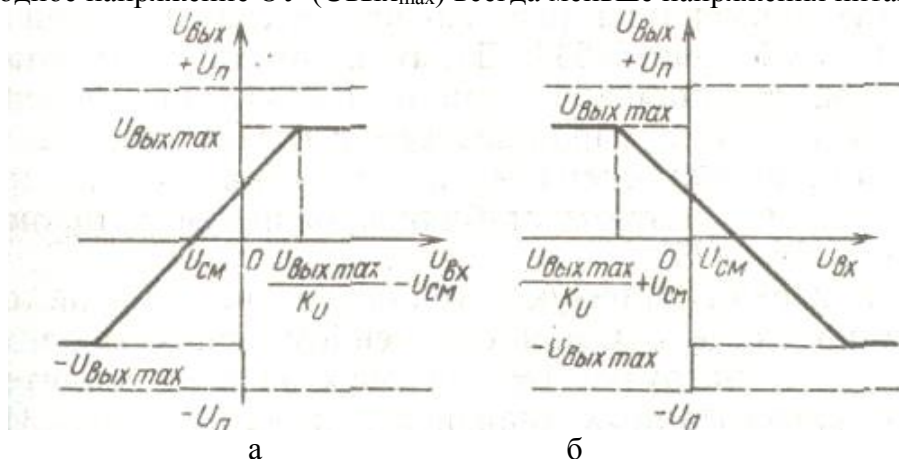


Рис.3 Передаточные характеристики ОУ: а – по неинвертирующему входу; б – по инвертирующему входу

Примеры использования ОУ

При рассмотрении основных типовых применений ОУ будем полагать, что влиянием собственных параметров усилителя с учетом того, что K_u и $R_{\text{вх}}$ достаточно велики, а $R_{\text{вых}}$ мало, можно пренебречь.

Типовая схема усилителя с обратными связями представлена на рис.4.

Входной сигнал и сигнал обратной связи подаются на один и тот же инвертирующий вход. При этом образуется цепь параллельной отрицательной обратной связи по напряжению.

Сопротивления резисторов Z , реализующих обратную связь, в общем случае имеют комплексный характер.

В этом случае, предполагая, что $K_u \rightarrow \infty$, коэффициент передачи усилителя с обратными связями определяется равенством :

$$K_{\text{оос}} = -Z_{\text{ос}}/Z_1.$$

Минус означает, что фазы входного и выходного напряжений сдвинуты относительно друг друга на 180° .

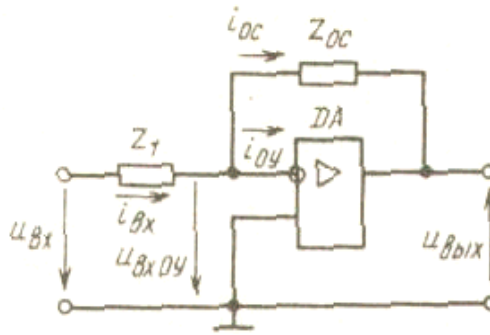


Рис.4 Усилитель с обратными связями

Рассмотрим некоторые примеры применения ОУ.

Масштабный усилитель. Если в цепь обратной связи включить резисторы R_{oc} и R_1 , то выходное напряжение будет определяться соотношением:

$$U_{вых}(t) = - (R_{oc}/R_1)U_{вх}(t).$$

Отношение R_{oc}/R_1 называют масштабным коэффициентом.

При условии $R_{oc} = R_1 = R$ усилитель становится инвертором, т.е.:

$$U_{вых}(t) = -U_{вх}(t).$$

Суммирующий усилитель. Суммирующий усилитель предназначен для формирования напряжения, равного усиленной алгебраической сумме нескольких входных сигналов, т. е. выполняет математическую операцию суммирования нескольких сигналов. При этом выходной сигнал дополнительно инвертируется. В качестве примера на рис.5 приведена схема устройства, выполняющего данную операцию для трех входных напряжений.

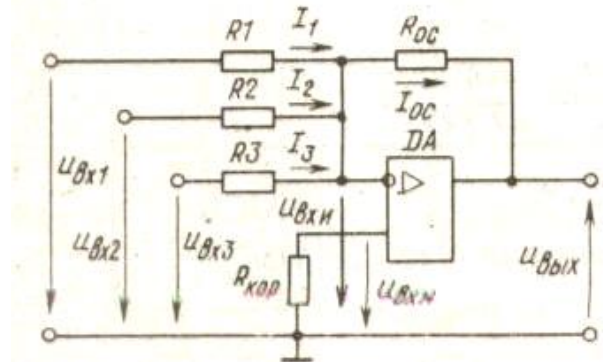


Рис.5 Суммирующий усилитель

Соотношение для определения выходного напряжения имеет вид:

$$U_{вых} = -(U_{вх1}R_{oc}/R_1 + U_{вх2}R_{oc}/R_2 + U_{вх3}R_{oc}/R_3).$$

Сигнал на выходе равен алгебраической сумме входных сигналов, взятых со своими масштабными коэффициентами, но с обратным знаком.

В частном случае, если $R_1 = R_2 = R_3 = R_{oc}$, получим

$$U_{вых} = -(U_{вх1} + U_{вх2} + U_{вх3}).$$

Интегрирующий усилитель (интегратор). Интегратором называется электронное устройство, выходной сигнал которого пропорционален интегралу по времени от его входного сигнала. Простейшая схема интегратора, выполненная на ОУ, приведена на рис.6.

Данная схема является инвертирующим усилителем, в цепь обратной связи которого включен конденсатор C . При этом коэффициент передачи усилителя находится как:

$$U_{вых}(t) = -1/RC \int_0^t U_{вх}(t)dt.$$

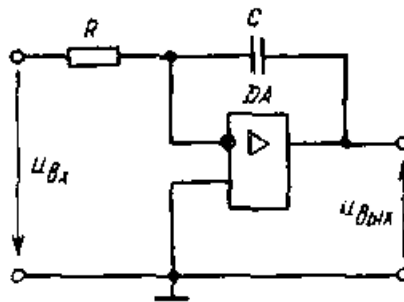


Рис.6 Интегрирующий усилитель

Дифференцирующий усилитель (дифференциатор). Дифференциатором называется устройство, выходной сигнал которого пропорционален производной от его входного сигнала. Другими словами, выходной сигнал дифференциатора пропорционален скорости изменения его входного сигнала.

Простейшая схема дифференциатора, выполненная на ОУ, приведена на рис.7.

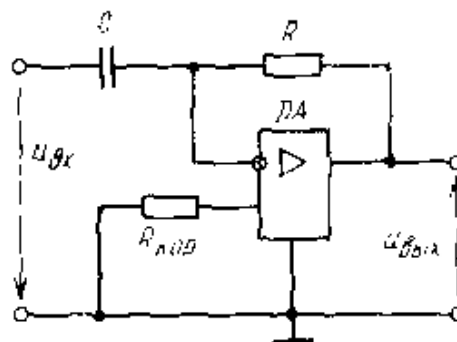


Рис.7 Дифференцирующий усилитель

Выходное напряжение данного усилителя определяется соотношением:

$$U_{\text{вых}}(t) = -RC \frac{dU_{\text{вх}}(t)}{dt}.$$

Ход работы

В работе исследуется интегральный ОУ 153УД1А. Питание микросхемы осуществляется от источников +6В и -6В.

1 Подготовить измерительный стенд. Для этого:

- 1.1 Ручки регулировки напряжения блоков питания 1 и 2 – в крайнее левое положение.
- 1.2. Переключатели приборов Р1, Р2 – в положение «20».

2 В работе используется модуль схема которого имеет вид (рис.8):

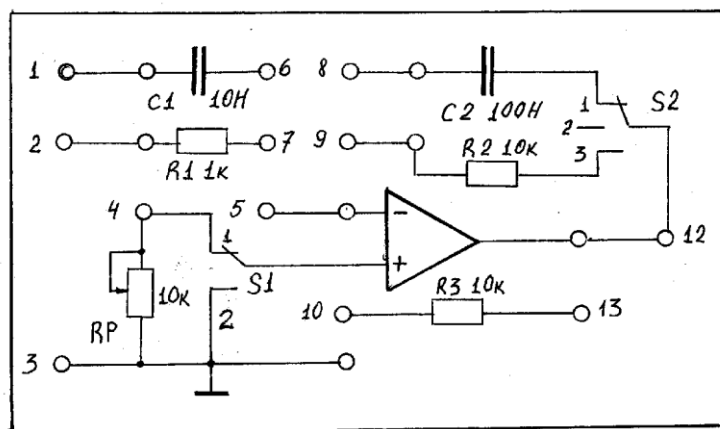


Рис.8 Схема модуля для исследования ОУ

3 Исследование усилителя с ООС.

- 3.1 Включить осциллограф и измерительный стенд.
- 3.2 С помощью осциллографа установить на выходе ГНЧ гармонический сигнал с амплитудой

$U_m = 5 \text{ мВ}$ и частотой $f = 10 \text{ кГц}$.

3.3 Собрать схему усилителя с ООС (рис.9):

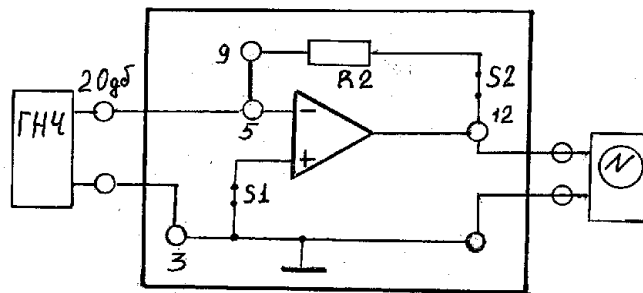


Рис.9 ОУ с ООС

3.4 Измерить амплитуду выходного сигнала и рассчитать K_u .

4 Исследование масштабного усилителя.

4.1 Установить на выходе БП 2 напряжение $U = +0,1 \text{ В}$.

4.2 Собрать схему (рис.10):

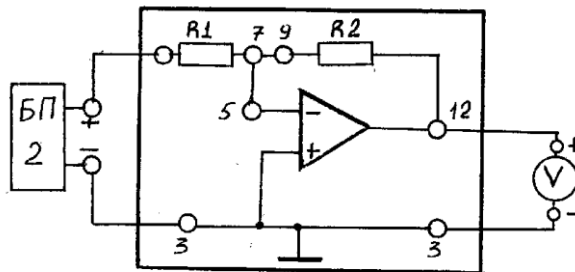


Рис.10 Масштабный усилитель

4.3 Измерить вольтметром $U_{\text{вых}}$ и рассчитать масштабный коэффициент:

$$K = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}.$$

Сравнить его с коэффициентом, определяемым по параметрам цепи ОС:

$$K = R_2 / R_1.$$

4.4 Вместо R_1 включить $R_3 = 10 \text{ кОм}$ и вновь рассчитать K .

Сделать выводы.

5 Исследование дифференцирующего усилителя.

5.1 Установить на выходе ГНЧ импульсный сигнал с $f = 1 \text{ кГц}$ амплитудой $U_a = 0,5 \text{ В}$.

5.2 Собрать схему (рис.11):

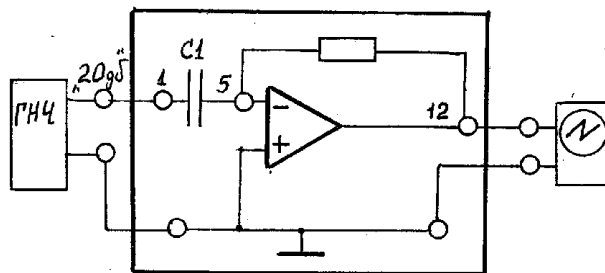


Рис.11 Дифференцирующий усилитель

5.3 Изобразить осциллограммы входного и выходного сигналов в отчете.

6 Исследование интегрирующего усилителя.

6.1 В цепи обратной связи включить вместо C_1 – R_1 , вместо R_2 – C_2 .

6.2 Установить на выходе ГНЧ импульсный сигнал с $f = 100 \text{ Гц}$ и $U_a = 0,5 \text{ В}$ и подключить его к входу (гн.1).

6.3 Убедиться, что выходной сигнал имеет пилообразную форму.

6.4 Осциллограммы сигналов отобразить в отчете.

7 Подготовить и сдать отчет

Практическая работа №15.

Тема 3.3 Операционные усилители

Исследование мультивибраторов на логических элементах и операционном усилителе

Цель работы: Экспериментальное подтверждение теоретических положений по принципу действия мультивибраторов (МВ).

Перечень используемого оборудования: измерительный стенд, модули «Логические элементы», «Операционный усилитель», осциллограф.

Теоретическая часть:

Мультивибраторы относятся к релаксационным генераторам, вырабатывающим электрические колебания, близкие по форме к прямоугольным.

Мультивибратор (от латинских слов *multim* – много и *vibro* – колеблю).

Мультивибраторы выполняются на дискретных компонентах (в частности, транзисторах), операционных усилителях, цифровых интегральных схемах.

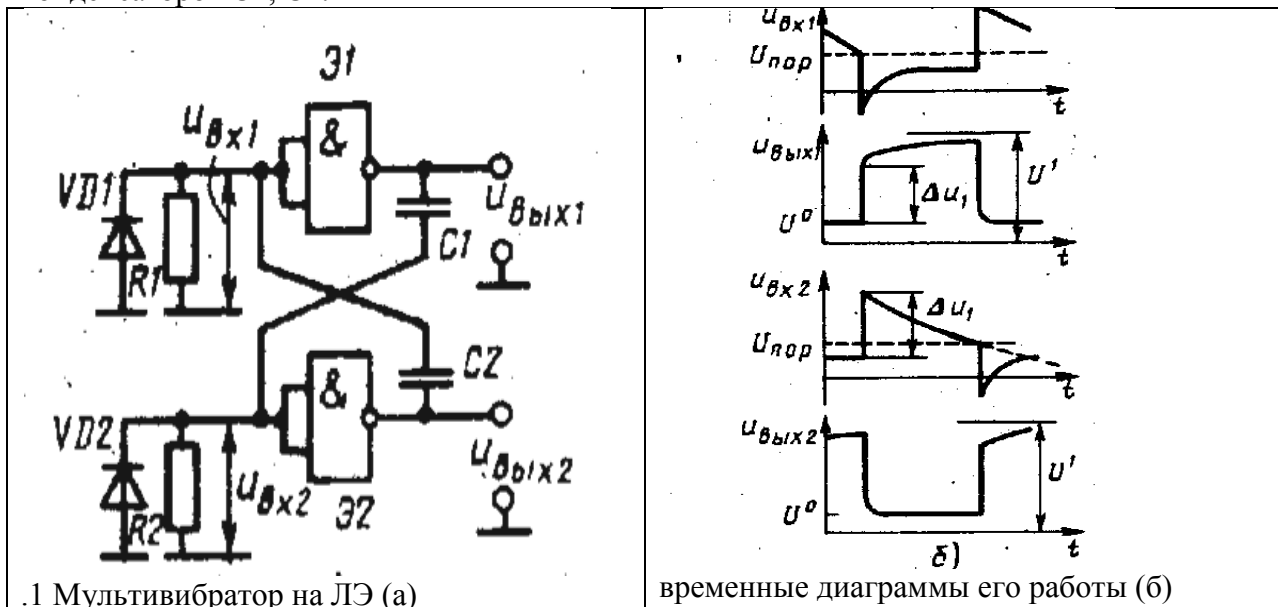
Различают МВ автоколебательные и ждущие.

Рассмотрим мультивибратор на логических элементах И – НЕ. Предполагается, что мультивибраторы выполнены на микросхемах ТТЛ.

При включении питания за счет положительной обратной связи в схеме МВ развивается лавинообразный процесс, благодаря чему переход выходного напряжения с одного уровня на другой происходит с большой скоростью.

Автоколебательный мультивибратор. Схема автоколебательного мультивибратора приведена на рис.1,а. Входы каждого из элементов Э1 и Э2 соединены – элементы использованы как усилители-инверторы. Выход одного элемента связан со входом другого цепью $C1 - R2$ ($C2 - R1$), за счет чего создается положительная обратная связь.

Диоды $VD1, VD2$ являются защитными, напряжение на них не может быть ниже $U_{д\text{отп}} \approx -0,7\text{В}$. В отсутствие $VD1, VD2$ на входы элементов через конденсаторы будут передаваться значительные отрицательные перепады напряжений, что выведет микросхемы из строя. Если защитные диоды имеются внутри самих микросхем, то необходимость установки их снаружи отпадает. Изменения потенциалов на выходах элементов обусловлены перезарядкой конденсаторов $C1, C2$.



Рассмотрим процессы в схеме, начиная с момента, когда на выходе Э1 потенциал скачком увеличился на ΔU_1 , а на выходе Э2 – скачком уменьшился (рис.1,б). Вслед за этим под действием высокого уровня $U_{вых1}$ конденсатор $C1$ начинает заряжаться через выходное сопротивление элемента Э1 и резистор $R2$. Напряжения на резисторе $R2$ от тока зарядки $C1$ имеет положительную полярность на входе Э2 и поддерживает этот элемент в открытом состоянии ($U_{вых2} = U^0$). В это время конденсатор $C2$ быстро разряжается через малое выходное

сопротивление открытого элемента Э2 и диод VD1, напряжение на входе элемента Э1) мало, и он удерживается запертым ($U_{\text{вых1}} \approx U^1$). По мере зарядки конденсатора C1 ток зарядки уменьшается. За счет этого снижается падение напряжения на выходном сопротивлении элемента Э1 (благодаря чему $U_{\text{вых1}}$ возрастает), а также уменьшается напряжение $U_{\text{вх2}}$ на входе элемента Э2.

В некоторый момент напряжение $U_{\text{вх2}}$ уменьшается до значения, при котором рабочая точка элемента Э2 выходит на активный участок передаточной характеристики, где уменьшение $U_{\text{вх2}}$ вызывает увеличение $U_{\text{вых2}}$. Через конденсатор C2 это воздействует на вход элемента Э1. После того как $U_{\text{вх1}}$ возрастет до определенного уровня, рабочая точка элемента Э1 тоже выйдет на активный участок передаточной характеристики.

Когда оба элемента будут находиться в активном (усилительном) режиме, вступит в действие положительная обратная связь, за счет которой $U_{\text{вых2}}$ лавинообразно увеличивается, а $U_{\text{вых1}}$ аналогично уменьшается. В результате Э1 открывается ($U_{\text{вых1}} = U^0$), а Э2 закрывается ($U_{\text{вых2}} \approx U^1$). На рис.1,б это соответствует тому, что $U_{\text{вх2}}$ становится равным пороговому напряжению $U_{\text{пор}}$.

После этого конденсатор C2 начинает заряжаться, а конденсатор C1 быстро разряжается через диод VD2 и выходное сопротивление открытого элемента Э1 – наступает второй полу-период, процессы в котором подобны описанным.

Приближенное значение длительности импульса на выходе Э2:

$$t_{и2} = 2,3 \tau_1 \lg(U^1/U_{\text{пор}}),$$

где $\tau_1 = C1(R2 + R_{\text{вых1}})$ – постоянная времени зарядки конденсатора C1.

Аналогично, длительность импульса на выходе элемента Э1

$$t_{и1} = 2,3 \tau_2 \lg(U^1/U_{\text{пор}}),$$

где $\tau_2 = C2(R1 + R_{\text{вых2}})$.

Период колебаний мультивибратора:

$$T = t_{и1} + t_{и2}.$$

При $C1 = C2 = C$ и $R1 = R2 = R$, $\tau_1 = \tau_2 = C(R + R_{\text{вых}})$, $t_{и1} = t_{и2} = t_{и}$.

В этом случае мультивибратор называют симметричным.

Автоколебательный мультивибратор на операционном усилителе.

Возможность построения мультивибратора на интегральной микросхеме операционного усилителя (ИМС ОУ) обусловлена тем, что напряжение на ее выходе может скачком переходить от U^+ нас к U^- нас и наоборот при изменении знака разности входных напряжений $u(+)$ – $u(-)$.

Чтобы получить последовательность прямоугольных импульсов (реализовать автоколебательный мультивибратор), знак указанной разности должен изменяться периодически в ходе процессов, протекающих непосредственно в самой схеме.

Для периодического изменения знака $u(+)$ – $u(-)$ на вход (+) ИМС ОУ (рис.2,а) с делителя $R2 - R3$ подается часть выходного напряжения, неизменная в течение полупериода $u_{\text{вых}}$:

$$u(+)=\gamma U_{\text{нас}},$$

где $\gamma = R3/(R3 + R2)$, а на вход (–) – напряжение с конденсатора C, заряжающегося под действием всего значения $u_{\text{вых}} = U_{\text{нас}}$.

За счет этого в процессе зарядки конденсатора напряжение на входе (–) может превышать по абсолютному значению напряжение на входе (+), в результате чего напряжение на выходе скачкообразно изменяет знак.

Временные диаграммы (рис.2,б) иллюстрируют сказанное. Если, $u_{\text{вых}} = U^+$ нас, то конденсатор C заряжается до момента времени t_1 , когда напряжение на нем (u_c) окажется чуть больше γU^+ нас. Вслед за этим, как только транзисторы ИМС выходят из насыщения, восстанавливается действие положительной обратной связи: уменьшение $u^{(+)} = U_{R3}$ вызывает дальнейшее уменьшение $u_{\text{вых}}$ и т. д. В результате, выходное напряжение весьма быстро достигает уровня U^- нас (рис.2,в). С этого момента конденсатор перезаряжается до тех пор, пока напряжение на нем (при $t = t_2$) не станет чуть меньше γU^- нас, после чего начинается переключение $u_{\text{вых}}$, к уровню U^+ нас.

Как следует из изложенного, подключение цепи $R1C$ к выходу ИМС обеспечивает

автоматическое переключение конденсатора с зарядки (когда $u_{\text{вых}} = U_{\text{нас}}^+$) на разрядку (когда $u_{\text{вых}} = U_{\text{нас}}^-$) и, как следствие этого, изменение знака $u^{(+)} - u^{(-)}$.

Ход работы

В работе исследуются два мультивибратора, реализованные на ЛЭ и ОУ соответственно. Питание модулей осуществляется от источника $\pm 6\text{В}$.

1 Исследование МВ на ЛЭ.

- 1.1 Включить питание осциллографа и подготовить его к работе.
- 1.2 На модуле «Логические элементы» собрать схему (рис.3).
- 1.3 Включить питание стенда и на экране осциллографа получить устойчивое изображение генерируемого сигнала.

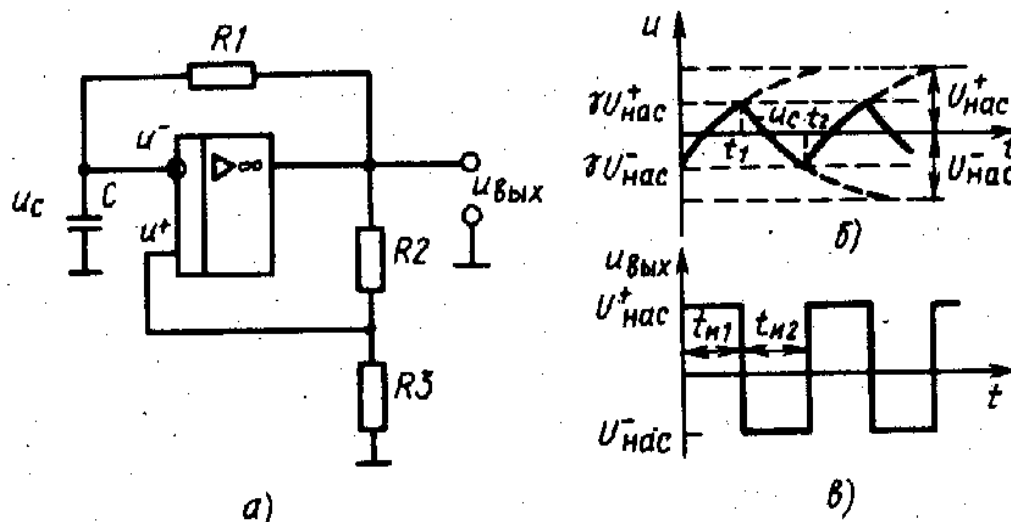


Рис.2 Мультивибратор на операционном усилителе (а) и временные диаграммы его работы (б)

Примечание: если сигнала нет, разорвать связь с R1 (или R2) и восстановить её.

- 1.4 С помощью осциллографа определить основные параметры генерируемого сигнала (амплитуду, частоту, период).

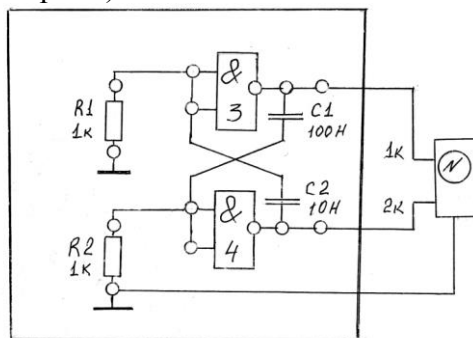


Рис.3 Мультивибратор на логических элементах

- 1.5 Изобразить осциллограммы напряжений на выходах и входах элементов (рис.4).

2 Исследование мультивибратора на операционном усилителе.

- 2.1 На модуле «Операционный усилитель» собрать схему (рис.5).
- 2.2 Резистор R_P установить в среднее положение.
- 2.3 Включить питание стенда. На экране осциллографа должен появиться генерируемый сигнал.
- 2.4 Изобразить в отчете осциллограммы напряжений на инвертирующем входе и на выходе мультивибратора.
- 2.5 Определить основные параметры сигнала.

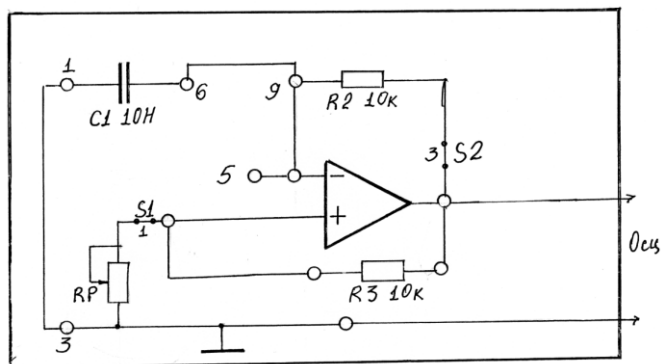


Рис. 5 МВ на операционном усилителе

2.6 Изменить положение резистора R_P и определить какие параметры изменяются при изменении сопротивления R_P .

3 Сделать выводы по работе

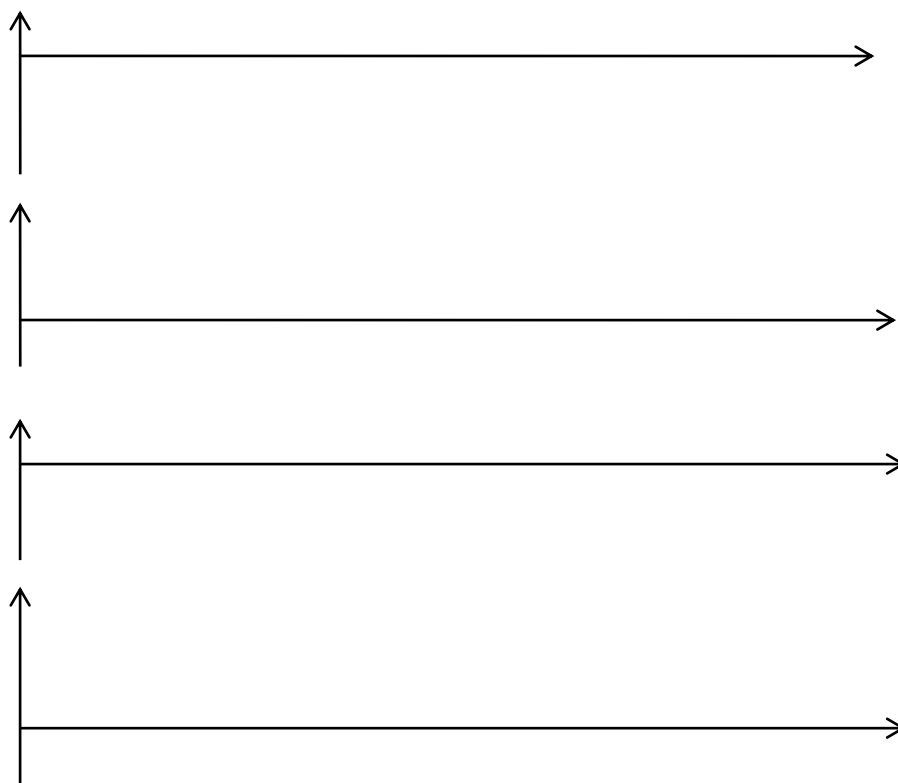


Рис.4 Осциллограммы напряжений

Практическая работа №16.

Тема 3.3. Триггеры

Исследование триггеров на логических элементах

Цель работы: Исследование принципа действия триггеров.

Перечень используемого оборудования: измерительный стенд, модуль «Логические элементы»

Теоретическая часть:

Триггером называют устройство, имеющее два устойчивых состояния, и способное изменять эти состояния под воздействием входных управляющих сигналов. Триггер используется самостоятельно как элемент памяти цифр двоичной системы счисления 0 или 1. Триггеры применяются также для построения различных цифровых устройств, таких как регистры, счетчики, сумматоры, формирователи сигналов и для других целей.

По функциональному назначению триггеры можно разделить на четыре группы:

- триггеры с отдельными входами (RS – триггеры);
- триггеры со счетным входом (Т – триггеры);
- триггеры задержки (D – триггеры);
- триггеры универсальные (JK – триггеры).

Условное графическое обозначение RS – триггера имеет вид (рис.1).

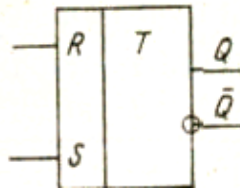


Рис.1 Условное графическое обозначение RS - триггера

Вход S предназначен для установки (Set) триггера в состояние 1, а вход R – для сброса (Reset) т.е. в состояние 0.

Триггеры бывают асинхронными (неактивируемыми) и синхронными (активируемыми). Асинхронный триггер имеет лишь информационные входы, сигналы на которых с момента их появления определяют состояние триггера. Синхронный триггер кроме информационных входов имеет синхронизирующий (активирующий, тактовый) вход; сигналы на информационных входах воздействуют на такой триггер только при сигнале на синхронизирующем входе.

Асинхронный RS-триггер на элементах И – НЕ. На выходе элемента И – НЕ имеется инвертор (усилитель). Поэтому на двух таких элементах можно выполнить триггер, если вход одного элемента соединить с выходом другого.

Полученный таким образом триггер является асинхронным триггером. Он имеет два входа: S – установки триггера в 1, R – установки триггера в 0.

Асинхронный RS-триггер – простейший интегральный триггер, применяющийся самостоятельно, а также входящий в состав более сложных интегральных триггеров в качестве запоминающей ячейки.

Для элемента И – НЕ активным сигналом является логический 0: наличие его хотя бы на одном входе обуславливает на выходе логическую 1 независимо от сигналов на других входах. Логическая 1 для такого элемента является пассивным сигналом: с ее поступлением на вход состояние выхода элемента не изменяется.

В силу сказанного триггер на элементах И – НЕ (рис.2,а) переключается логическим 0. На условном изображении такого триггера (рис.2,б) это отражают инверсными входами.

Для данного триггера комбинация входных сигналов $S = 0, R = 0$ является запрещенной, т.к. после изменения входных сигналов появляется неопределенность, а комбинация $S = 1, R = 1$ не меняет его предыдущего состояния, т.е. является комбинацией хранения.

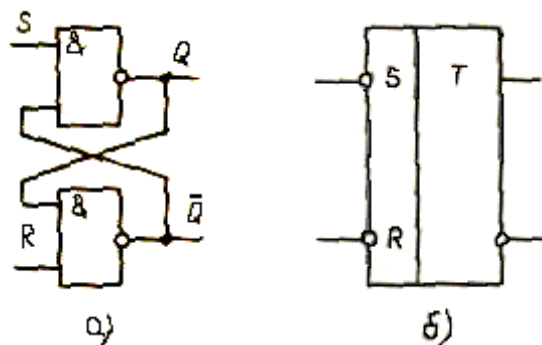


Рис.2 Асинхронный триггер на элементах И-НЕ (а) и его УГО (б)

Синхронный RS-триггер. На входы логического элемента или устройства сигналы не всегда поступают одновременно, так как перед этим они могут проходить через разное число узлов, не обладающих к тому же одинаковой задержкой. Это явление называют

состязаниями или гонками. В результате его в течение некоторого времени на входах создается непредвиденная ситуация: новые значения одних сигналов сочетаются с предыдущими значениями других, что может привести к ложному срабатыванию элемента (устройства).

Последствия гонок можно устранить временным стробированием, когда на элемент кроме информационных сигналов подаются тактирующие (синхронизирующие) импульсы, к моменту прихода которых информационные сигналы заведомо успевают установиться на входах.

Одноступенчатый синхронный RS-триггер. Схема тактируемого RS-триггера и его условное изображение приведено на рис.3.

Основу триггера составляет асинхронный RS-триггер Т1 с инверсными входами (аналогичный изображенному на рис.2). Вход С является синхронизирующим. Чтобы обеспечить переключающий логический 0 на соответствующем входе Т1, в схему добавлены элементы И – НЕ. Логический 0 на выходе такого элемента будет при логических 1 на его входах, т. е. при $S = 1$, $C = 1$ или при $R = 1$, $C = 1$.

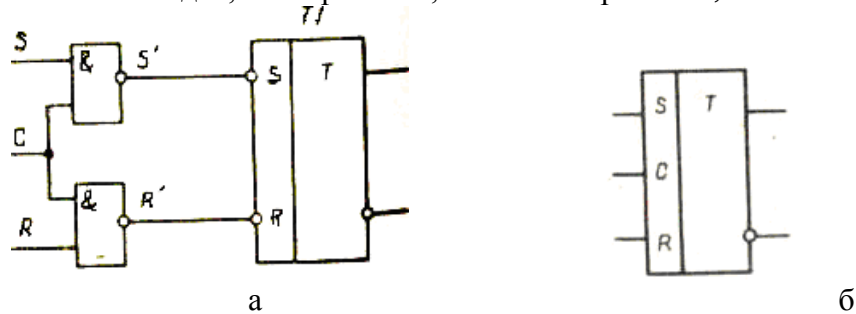


Рис.3 Синхронный RS – триггер (а) и его УГО (б)

Тактируемый RS-триггер сокращенно обозначают RSC.

Триггер со счетным входом (Т – триггер).

Триггер со счетным входом переключается каждым импульсом на входе Т (счетным импульсом).

Т-триггер реализуется на базе двухступенчатого RSC – триггера (см. рис.4).

С появлением импульса на входе Т триггер Т1 первой ступени переключается в состояние, противоположное состоянию триггера Т2. Но это не вызывает изменения потенциалов на выходах Q и $\bar{Q}$, так как на тактовом входе триггера Т2 за счет инвертора сейчас присутствует логический 0. Только после окончания импульса на входе переключится триггер Т2 и произойдет изменение потенциалов на выходах Q и $\bar{Q}$, а также на R- и S-входах первой ступени.

Таким образом, первая ступень переключается по переднему фронту входного импульса, а вторая – по срезу.

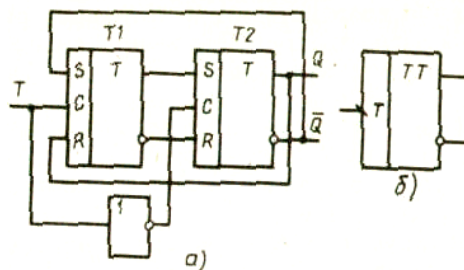


Рис.4 Двухступенчатый Т-триггер (а) и его условное изображение (б)

Триггер задержки (D – триггер).

D - триггер имеет один информационный D - вход и тактовый C - вход. Он состоит RS-триггера, дополненного двумя элементами И-НЕ (рис.5).

Триггер переходит в состояние 1, если в момент прихода синхросигнала на его информационном входе имеется сигнал, соответствующий 1. Таким образом, при $C = 1$ D-триггер является повторителем: на выходе Q повторяется потенциал входа D . Однако это повторение начинается только с поступлением синхроимпульса на вход C , т. е. с задержкой относительно сменившегося потенциала на D -входе (рис.5,б).

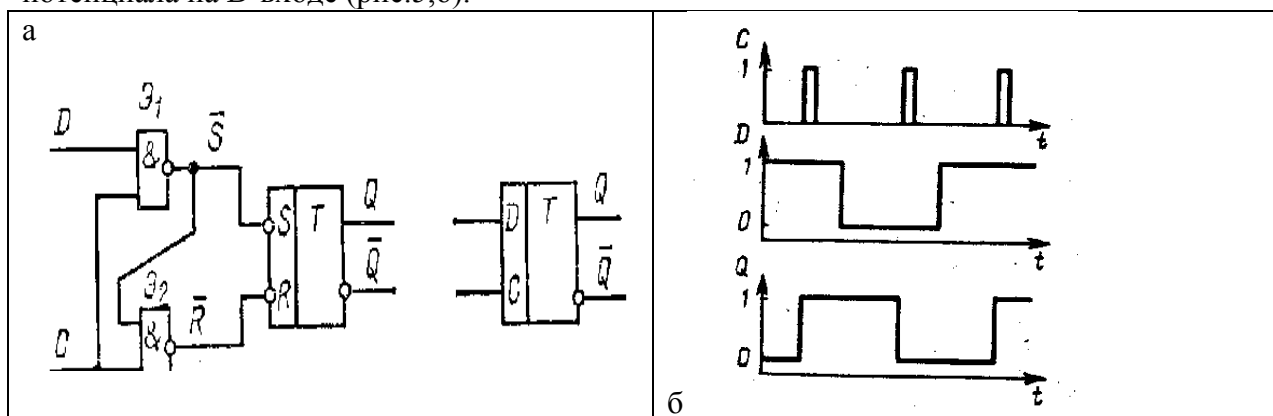


Рис.5 Схема D - триггера (а) и временные диаграммы его работы (б)

Если D -вход соединить с выходом $\bar{Q}$, то D-триггер будет работать в счетном режиме (рис.6).

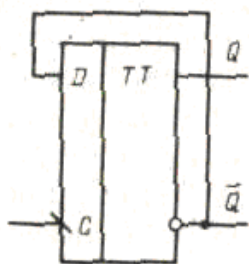


Рис.6 Включение D – триггера в счетном режиме

Универсальный триггер (JK – триггер)

JK - триггеры обычно выполняются синхронными. Такой JK-триггер имеет информационные входы J и K , которые по своему влиянию аналогичны входам S и R тактируемого RSC-триггера: при $J = 1, K = 0$ триггер по тактовому импульсу устанавливается в состояние $Q = 1$; при $J = 0, K = 1$ – переключается в состояние $Q = 0$, а при $J = K = 0$ – хранит ранее принятую информацию. Но в отличие от RSC-триггера одновременное присутствие логических 1 на информационных входах не является для JK-триггера запрещенной комбинацией. При $J = K = 1$ триггер работает в счетном режиме, т. е. переключается каждым тактовым импульсом.

На рис.7 приведена таблица, отображающая принцип действия JK-триггера, в которой Q^{t+1} – состояние триггера после переключения по тактовому импульсу. При $J = K = 0$ $Q^{t+1} = Q^t$ – триггер сохраняет предыдущее состояние; комбинация $J = K = 1$ приводит к тому, что тактовым импульсом триггер переключается в состояние, противоположное предыдущему: $Q^{t+1} = \bar{Q}^t$. Сочетания $J = 1, K = 0$ и $J = 0, K = 1$ дают триггеру разрешение переключиться соответственно в состояния $Q = 1$ и $Q = 0$.

J	K	Q^{t+1}
0	0	Q^t
1	0	1
0	1	0
1	1	$\bar{Q}^t$

Рис.7 Таблица условий работы JK- триггера

JK-триггер называют универсальным, т.к. он может работать как RS - триггер (рис.8,а), D - триггер (рис.8,б) и T-триггер (рис.8,в).

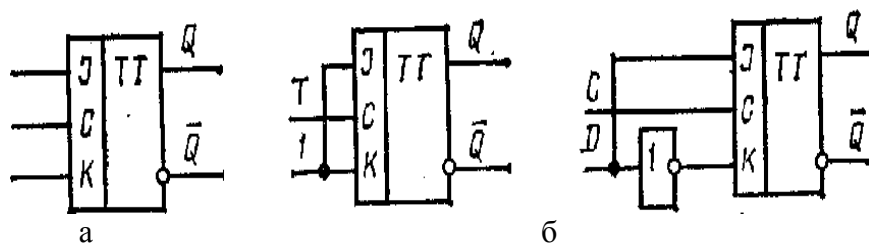


Рис.8 Включение JK – триггера как RS (а), D (б), T (в) - триггер

Ход работы

В работе исследуются триггеры, реализованные на ЛЭ И-НЕ ТТЛ (см. рис.9). Для таких элементов подачу сигналов, соответствующих цифре 0, можно осуществить подключением входа к гн. « $\perp$ », а, подача сигнала, соответствующего цифре «1» - отсутствием такого соединения.

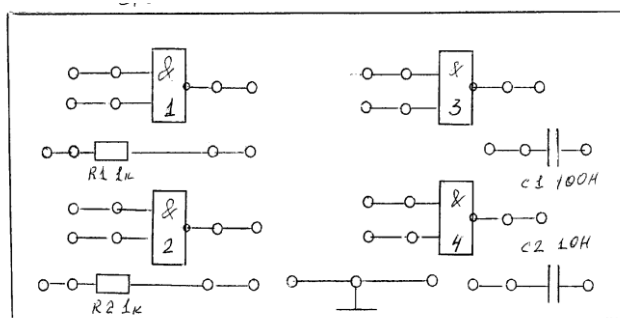


Рис.9 Модуль «Логические элементы»

1 На измерительном стенде переключатели вольтметров P1 и P2 установить в положение – 20.

2 Исследование асинхронного RS – триггера..

2.1 Собрать на модуле схему триггера в соответствии с рис.10.

Включить питание стенда и по приборам P1 и P2 определить состояние триггера.

2.3 Поочередно подавая на входы комбинации сигналов 00,01,10, 11, по приборам P1 и P2 определять состояние триггера.

2.4 Определить какие сигналы являются активными, т.е. изменяют состояние триггера, и обозначить входы S и R. Изобразить УГО триггера.

2.5 Подключить к схеме элементы &1 и &2 (рис.11) и выполнить такие же действия как и п.п.2.3, 2.4.

2.6 Выключить питание стенда.

3. Исследование синхронного RS – триггера (рис.12).

3.1 Собрать схему (рис.12).

3.2 Включить питание стенда.

Рис.10

3.3 Вход С подключить к гн. « $\perp$ ».

Рис.11

3.4 Подавать на входы S и R установочные сигналы, убедиться, что состояние триггера не изменяется.

3.5 Повторить подачу установочных сигналов с подачей на вход C сигнала, соответствующего 1. Убедиться в работоспособности триггера.

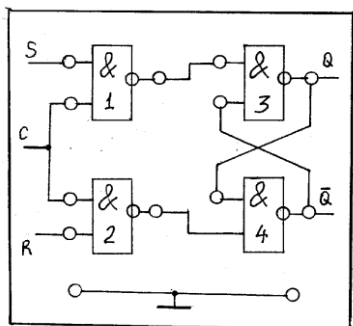


Рис.12

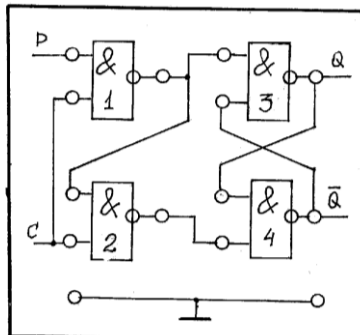


Рис.13

4 Исследование D - триггера

4.1 Собрать схему (рис.13).

4.2 Вход C подключить к «1».

4.3 Определить состояние триггера и на вход D подать сигнал, изменяющий его состояние. Затем на вход C подать 1 и убедиться, что состояние триггера изменяется только с приходом сигнала по входу C. Проверить работу триггера при разных установочных сигналах на входе D.

4.4 Включение D – триггера в счетном режиме (T – триггера). Соединить инверсный выход триггера с входом D и, последовательно подавая сигнал 1 на вход C, убедиться, что триггер изменяет свое состояние.

5. Сделать выводы по работе

Практическая работа №15.

Тема 3.3. Операционные усилители

Исследование операционного усилителя

Цель работы: исследование принципа действия операционного усилителя

Перечень используемого оборудования: измерительный стенд, модуль «Операционный усилитель», осциллограф

Теоретическая часть:

Операционным усилителем называют усилитель, имеющий большой коэффициент усиления и применяемый для выполнения различных операций по преобразованию электрических сигналов.

ОУ с использованием цепей положительных и отрицательных обратных связей позволяют усиливать, ослаблять, генерировать электрические сигналы, осуществлять сложение, вычитание, дифференцирование, интегрирование и другие операции.

В настоящее время наиболее широкое распространение получили трехкаскадные ОУ. Структурная схема трехкаскадного ОУ приведена на рис.1. Первый каскад обычно выполняют по схеме простого дифференциального усилителя (ДУ), имеющего два входа и два выхода. Второй каскад - усилитель напряжения (УН), также выполняемый по схеме дифференциального усилителя, обладает значительным коэффициентом усиления напряжения.

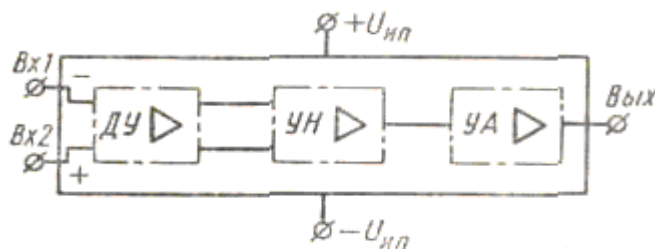


Рис.1 Структурная схема ОУ

Выходной каскад является усилителем амплитуды сигнала (УА) и выполняется по схеме ОК. Общий коэффициент усиления трехкаскадного ОУ достигает сотен тысяч. Входные характеристики ОУ практически полностью определяются входными характеристиками дифференциального усилителя, а выходные - аналогичными показателями каскада по соответствующей схеме включения.

Условные графические обозначения и схема включения показаны на рис.2.

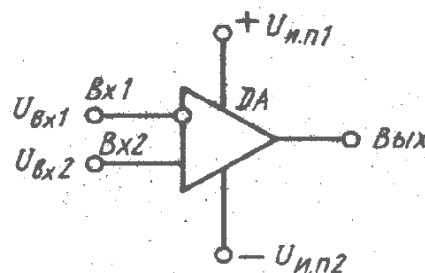
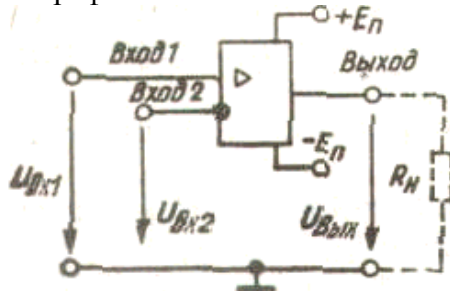


Рис.2 Условное графическое обозначение ОУ

Вход 1 является неинвертирующим, вход 2 – инвертирующим (обозначен кружком). Выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ связано со входными соотношением:

$$U_{\text{вых}} = K_u (U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}}),$$

где K_u – собственный коэффициент усиления ОУ по напряжению.

Как правило, ОУ питается от двух источников питания, подключаемых разными полюсами.

Применение двух источников питания при подключении нагрузки к их общей точке позволяет формировать на выходе двухполярное напряжение.

Следовательно, передаточная характеристика усилителя расположена в двух квадрантах. На рис.3 приведены передаточные характеристики ОУ соответственно для неинвертирующего и инвертирующего входов. Из этих характеристик следует, что максимальное выходное напряжение ОУ ($U_{\text{вых max}}$) всегда меньше напряжения питания.

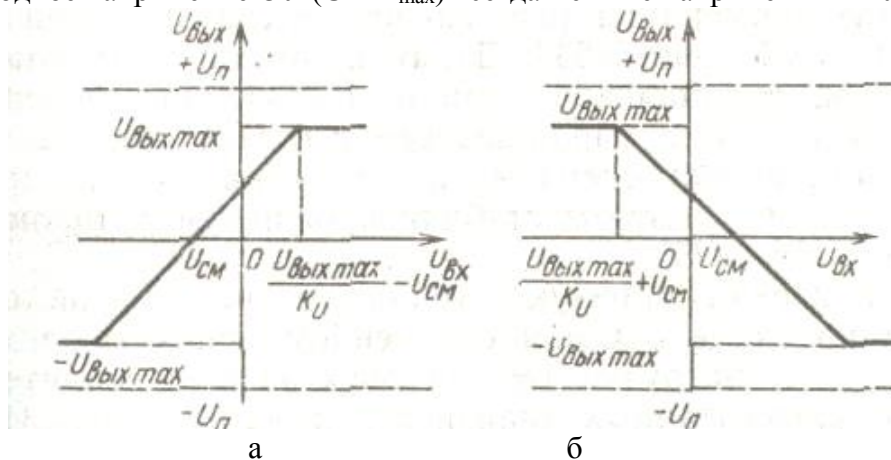


Рис.3 Передаточные характеристики ОУ: а – по неинвертирующему входу; б – по инвертирующему входу

Примеры использования ОУ

При рассмотрении основных типовых применений ОУ будем полагать, что влиянием собственных параметров усилителя с учетом того, что K_U и $R_{вх}$ достаточно велики, а $R_{вых}$ мало, можно пренебречь.

Типовая схема усилителя с обратными связями представлена на рис.4.

Входной сигнал и сигнал обратной связи подаются на один и тот же инвертирующий вход. При этом образуется цепь параллельной отрицательной обратной связи по напряжению.

Сопротивления резисторов Z , реализующих обратную связь, в общем случае имеют комплексный характер.

В этом случае, предполагая, что $K_U \rightarrow \infty$, коэффициент передачи усилителя с обратными связями определяется равенством :

$$K_{u\text{ оос}} = -Z_{oc}/Z_1.$$

Минус означает, что фазы входного и выходного напряжений сдвинуты относительно друг друга на 180° .

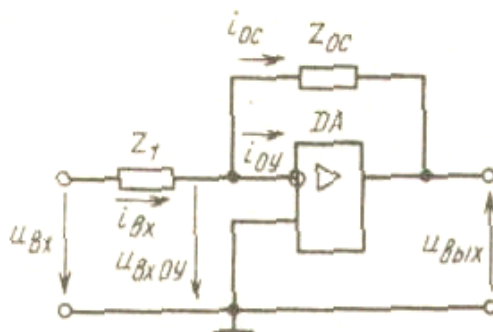


Рис.4 Усилитель с обратными связями

Рассмотрим некоторые примеры применения ОУ.

Масштабный усилитель. Если в цепь обратной связи включить резисторы R_{oc} и R_1 , то выходное напряжение будет определяться соотношением:

$$U_{вых}(t) = - (R_{oc}/R_1) U_{вх}(t).$$

Отношение R_{oc}/R_1 называют масштабным коэффициентом.

При условии $R_{oc} = R_1 = R$ усилитель становится инвертором, т.е.:

$$U_{вых}(t) = -U_{вх}(t).$$

Суммирующий усилитель. Суммирующий усилитель предназначен для формирования напряжения, равного усиленной алгебраической сумме нескольких входных сигналов, т. е. выполняет математическую операцию суммирования нескольких сигналов. При этом выходной сигнал дополнительно инвертируется. В качестве примера на рис.5 приведена схема устройства, выполняющего данную операцию для трех входных напряжений.

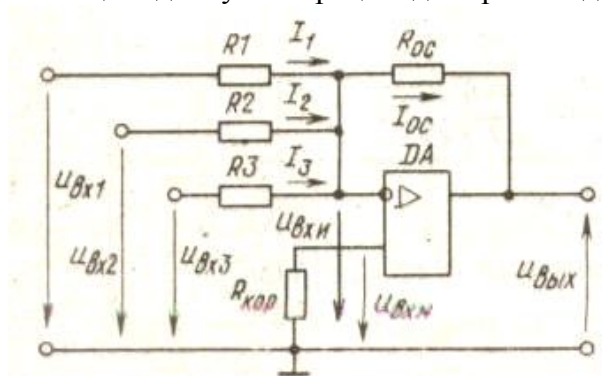


Рис.5 Суммирующий усилитель

Соотношение для определения выходного напряжения имеет вид:

$$U_{вых} = -(U_{вх1}R_{oc}/R_1 + U_{вх2}R_{oc}/R_2 + U_{вх3}R_{oc}/R_3).$$

Сигнал на выходе равен алгебраической сумме входных сигналов, взятых со своими масштабными коэффициентами, но с обратным знаком.

В частном случае, если $R_1 = R_2 = R_3 = R_{oc}$, получим

$$U_{вых} = -(U_{вх1} + U_{вх2} + U_{вх3}).$$

Интегрирующий усилитель (интегратор). Интегратором называется электронное устройство, выходной сигнал которого пропорционален интегралу по времени от его входного сигнала. Простейшая схема интегратора, выполненная на ОУ, приведена на рис.6.

Данная схема является инвертирующим усилителем, в цепь обратной связи которого включен конденсатор С. При этом коэффициент передачи усилителя находится как:

$$U_{вых}(t) = -1/RC \int_0^t U_{вх}(t) dt.$$

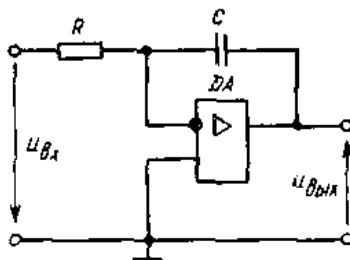


Рис.6 Интегрирующий усилитель

Дифференцирующий усилитель (дифференциатор). Дифференциатором называется устройство, выходной сигнал которого пропорционален производной от его входного сигнала. Другими словами, выходной сигнал дифференциатора пропорционален скорости изменения его входного сигнала.

Простейшая схема дифференциатора, выполненная на ОУ, приведена на рис.7.

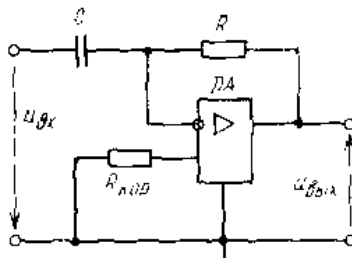


Рис.7 Дифференцирующий усилитель

Выходное напряжение данного усилителя определяется соотношением:

$$U_{вых}(t) = -RC dU_{вх}(t)/dt.$$

Ход работы

В работе исследуется интегральный ОУ 153УД1А. Питание микросхемы осуществляется от источников +6В и -6В

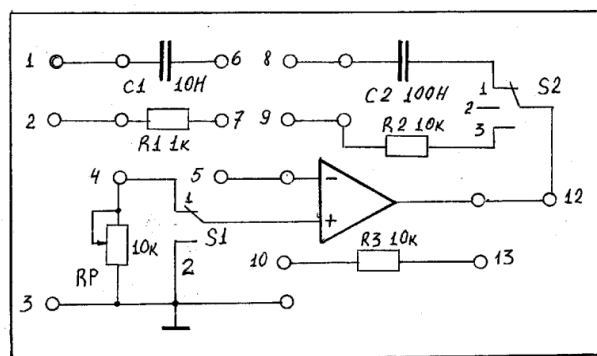


Рис.8 Схема модуля для исследования ОУ

Подготовить измерительный стенд. Для этого

- 1.1 Ручки регулировки напряжения блоков питания 1 и 2 – в крайнее левое положение.
- 1.2. Переключатели приборов Р1, Р2 – в положение «20».
- 2 В работе используется модуль схема которого имеет вид (рис.8):

3 Исследование усилителя с ООС.

- 3.1 Включить осциллограф и измерительный стенд.
- 3.2 С помощью осциллографа установить на выходе ГНЧ гармонический сигнал с амплитудой $U_m = 5$ мВ и частотой $f = 10$ кГц.
- 3.3 Собрать схему усилителя с ООС (рис.9):

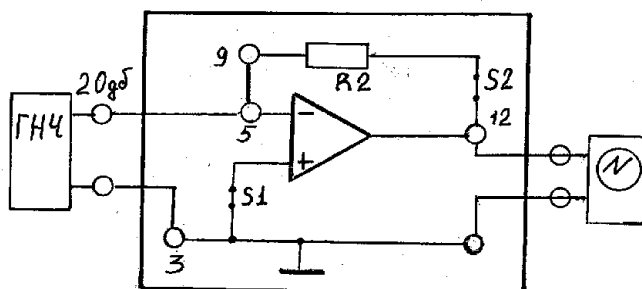


Рис.9 ОУ с ООС

- 3.4 Измерить амплитуду выходного сигнала и рассчитать K_u .

4 Исследование масштабного усилителя.

- 4.1 Установить на выходе БП 2 напряжение $U = +0,1$ В.
- 4.2 Собрать схему (рис.10):

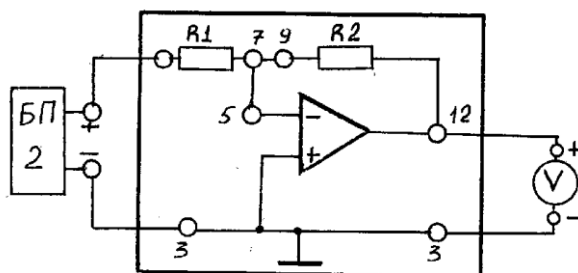


Рис.10 Масштабный усилитель

- 4.3 Измерить вольтметром $U_{вых}$ и рассчитать масштабный коэффициент:

$$K = U_{вых} / U_{вх} .$$

Сравнить его с коэффициентом, определяемым по параметрам цепи ОС:

$$K = R_2 / R_1 .$$

- 4.4 Вместо R_1 включить $R_3 = 10$ кОм и вновь рассчитать K .

Сделать выводы.

5 Исследование дифференцирующего усилителя.

- 5.1 Установить на выходе ГНЧ импульсный сигнал с $f = 1$ кГц амплитудой $U_a = 0,5$ В.
- 5.2 Собрать схему (рис.11):

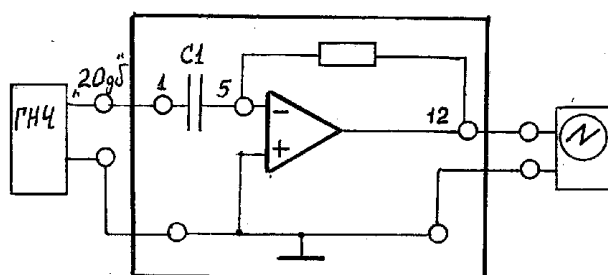


Рис.11 Дифференцирующий усилитель

5.3 Изобразить осциллограммы входного и выходного сигналов в отчете.

6 Исследование интегрирующего усилителя.

6.1 В цепи обратной связи включить вместо $C1 - R1$, вместо $R2 - C2$.

6.2 Установить на выходе ГНЧ импульсный сигнал с $f = 100$ Гц и $U_a = 0,5$ В и подключить его к входу (гн.1).

6.3 Убедиться, что выходной сигнал имеет пилообразную форму.

6.4 Осциллограммы сигналов отобразить в отчете.

7 Подготовить и сдать отчет

Практическая работа №16.

Тема 3.3 Операционные усилители

Исследование мультивибраторов на логических элементах и операционном усилителе

Цель работы: Экспериментальное подтверждение теоретических положений по принципу действия мультивибраторов (МВ).

Перечень используемого оборудования: измерительный стенд, модули «Логические элементы», «Операционный усилитель», осциллограф.

Теоретическая часть:

Мультивибраторы относятся к релаксационным генераторам, вырабатывающим электрические колебания, близкие по форме к прямоугольным.

Мультивибратор (от латинских слов *multim* – много и *vibro* – колеблю).

Мультивибраторы выполняют на дискретных компонентах (в частности, транзисторах), операционных усилителях, цифровых интегральных схемах.

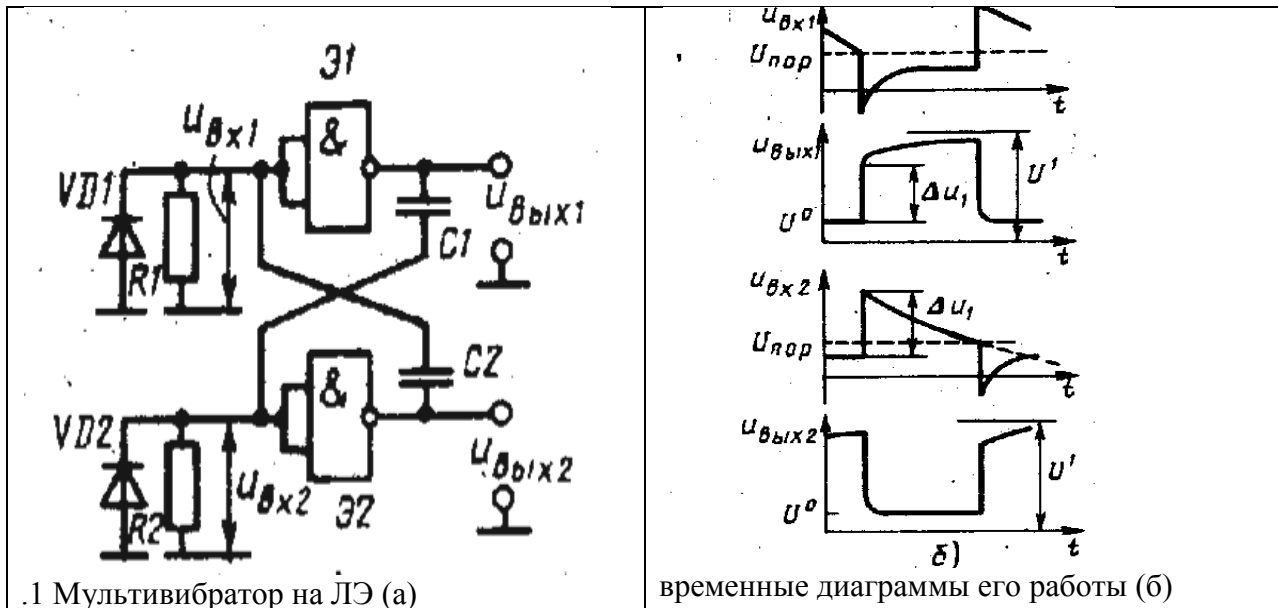
Различают МВ автоколебательные и ждущие.

Рассмотрим мультивибратор на логических элементах И – НЕ. Предполагается, что мультивибраторы выполнены на микросхемах ТТЛ.

При включении питания за счет положительной обратной связи в схеме МВ развивается лавинообразный процесс, благодаря чему переход выходного напряжения с одного уровня на другой происходит с большой скоростью.

Автоколебательный мультивибратор. Схема автоколебательного мультивибратора приведена на рис.1,а. Входы каждого из элементов Э1 и Э2 соединены – элементы использованы как усилители-инверторы. Выход одного элемента связан со входом другого цепью $C1 - R2$ ($C2 - R1$), за счет чего создается положительная обратная связь.

Диоды $VD1, VD2$ являются защитными, напряжение на них не может быть ниже $U_{д отп} \approx -0,7$ В. В отсутствие $VD1, VD2$ на входы элементов через конденсаторы будут передаваться значительные отрицательные перепады напряжений, что выведет микросхемы из строя. Если защитные диоды имеются внутри самих микросхем, то необходимость установки их снаружи отпадает. Изменения потенциалов на выходах элементов обусловлены перезарядкой конденсаторов $C1, C2$.



1. Мультивибратор на ЛЭ (а)

временные диаграммы его работы (б)

Рассмотрим процессы в схеме, начиная с момента, когда на выходе Э1 потенциал скачком увеличился на Δu_1 , а на выходе Э2 – скачком уменьшился (рис.1,б). Вслед за этим под действием высокого уровня $U_{вых1}$ конденсатор $C1$ начинает заряжаться через выходное сопротивление элемента Э1 и резистор $R2$. Напряжение на резисторе $R2$ от тока зарядки $C1$ имеет положительную полярность на входе Э2 и поддерживает этот элемент в открытом состоянии ($U_{вых2} = U^0$). В это время конденсатор $C2$ быстро разряжается через малое выходное сопротивление открытого элемента Э2 и диод $VD1$, напряжение на входе элемента Э1 мало, и он удерживается запертым ($U_{вых1} \approx U^1$). По мере зарядки конденсатора $C1$ ток зарядки уменьшается. За счет этого снижается падение напряжения на выходном сопротивлении элемента Э1 (благодаря чему $U_{вых1}$ возрастает), а также уменьшается напряжение $U_{вх2}$ на входе элемента Э2.

В некоторый момент напряжение $U_{вх2}$ уменьшается до значения, при котором рабочая точка элемента Э2 выходит на активный участок передаточной характеристики, где уменьшение $U_{вх2}$ вызывает увеличение $U_{вых2}$. Через конденсатор $C2$ это воздействует на вход элемента Э1. После того как $U_{вх1}$ возрастет до определенного уровня, рабочая точка элемента Э1 тоже выйдет на активный участок передаточной характеристики.

Когда оба элемента будут находиться в активном (усилительном) режиме, вступит в действие положительная обратная связь, за счет которой $U_{вых2}$ лавинообразно увеличивается, а $U_{вых1}$ аналогично уменьшается. В результате Э1 открывается ($U_{вых1} = U^0$), а Э2 закрывается ($U_{вых2} \approx U^1$). На рис.1,б это соответствует тому, что $U_{вх2}$ становится равным пороговому напряжению $U_{пор}$.

После этого конденсатор $C2$ начинает заряжаться, а конденсатор $C1$ быстро разряжается через диод $VD2$ и выходное сопротивление открытого элемента Э1 – наступает второй полупериод, процессы в котором подобны описанным.

Приближенное значение длительности импульса на выходе Э2:

$$t_{и2} = 2,3 \tau_1 \lg(U^1/U_{пор}),$$

где $\tau_1 = C1(R2 + R_{вых1})$ – постоянная времени зарядки конденсатора $C1$.

Аналогично, длительность импульса на выходе элемента Э1

$$t_{и1} = 2,3 \tau_2 \lg(U^1/U_{пор}),$$

где $\tau_2 = C2(R1 + R_{вых2})$.

Период колебаний мультивибратора:

$$T = t_{и1} + t_{и2}.$$

При $C1 = C2 = C$ и $R1 = R2 = R$, $\tau_1 = \tau_2 = C(R + R_{вых})$, $t_{и1} = t_{и2} = t_{и}$.

В этом случае мультивибратор называют симметричным.

Автоколебательный мультивибратор на операционном усилителе.

Возможность построения мультивибратора на интегральной микросхеме операционного

усилителя (ИМС ОУ) обусловлена тем, что напряжение на ее выходе может скачком переходить от $U^+_{нас}$ к $U^-_{нас}$ и наоборот при изменении знака разности входных напряжений $u(+)-u(-)$.

Чтобы получить последовательность прямоугольных импульсов (реализовать автоколебательный мультивибратор), знак указанной разности должен изменяться периодически в ходе процессов, протекающих непосредственно в самой схеме.

Для периодического изменения знака $u(+)-u(-)$ на вход (+) ИМС ОУ (рис.2,а) с делителя $R2-R3$ подается часть выходного напряжения, неизменная в течение полупериода $u_{вых}$:

$$u(+)=\gamma U_{нас},$$

где $\gamma=R3/(R3+R2)$, а на вход (–) – напряжение с конденсатора C , заряжающегося под действием всего значения $u_{вых}=U_{нас}$.

За счет этого в процессе зарядки конденсатора напряжение на входе (–) может превышать по абсолютному значению напряжение на входе (+), в результате чего напряжение на выходе скачкообразно изменяет знак.

Временные диаграммы (рис.2,б) иллюстрируют сказанное. Если, $u_{вых}=U^+_{нас}$, то конденсатор C заряжается до момента времени t_1 , когда напряжение на нем (u_c) окажется чуть больше $\gamma U^+_{нас}$. Вслед за этим, как только транзисторы ИМС выходят из насыщения, восстанавливается действие положительной обратной связи: уменьшение $u^{(+)}=U_{R3}$ вызывает дальнейшее уменьшение $u_{вых}$ и т. д. В результате, выходное напряжение весьма быстро достигает уровня $U^-_{нас}$ (рис.2,в). С этого момента конденсатор перезаряжается до тех пор, пока напряжение на нем (при $t=t_2$) не станет чуть меньше $\gamma U^-_{нас}$, после чего начинается переключение $u_{вых}$, к уровню $U^+_{нас}$.

Как следует из изложенного, подключение цепи R_1C к выходу ИМС обеспечивает автоматическое переключение конденсатора с зарядки (когда $u_{вых}=U^+_{нас}$) на разрядку (когда $u_{вых}=U^-_{нас}$) и, как следствие этого, изменение знака $u^{(+)}-u^{(-)}$.

Ход работы

В работе исследуются два мультивибратора, реализованные на ЛЭ и ОУ соответственно. Питание модулей осуществляется от источника $\pm 6V$.

1 Исследование МВ на ЛЭ.

- 1.1 Включить питание осциллографа и подготовить его к работе.
- 1.2 На модуле «Логические элементы» собрать схему (рис.3).
- 1.3 Включить питание стенда и на экране осциллографа получить устойчивое изображение генерируемого сигнала.

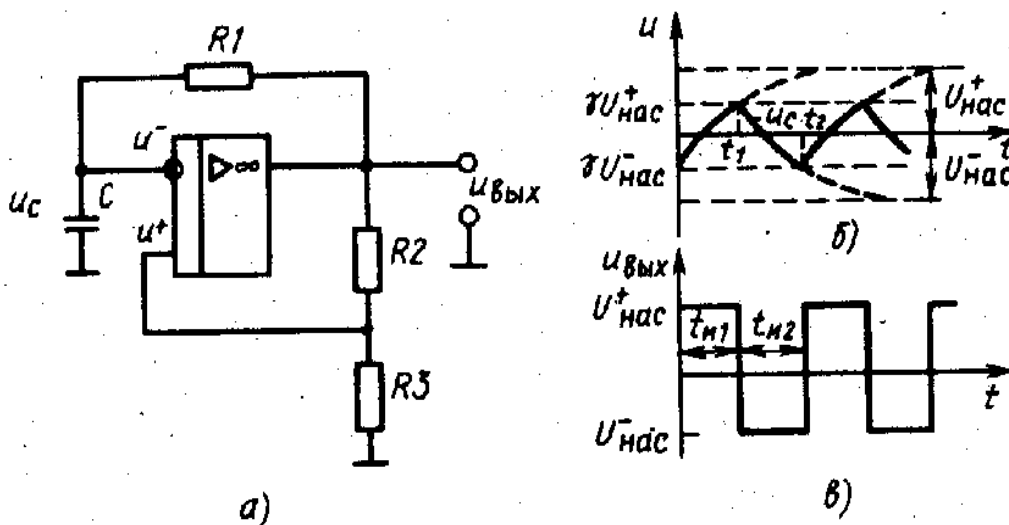


Рис.2 Мультивибратор на операционном усилителе (а) и временные диаграммы его работы (б)

Примечание: если сигнала нет, разорвать связь с $R1$ (или $R2$) и восстановить её.

- 1.4 С помощью осциллографа определить основные параметры генерируемого сигнала (амплитуду, частоту, период).

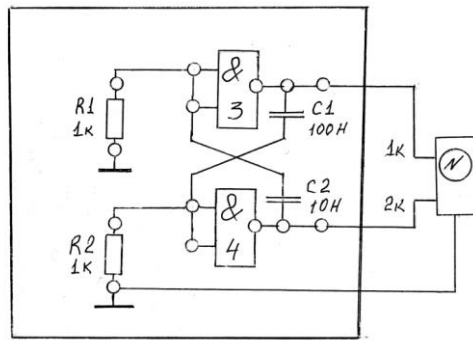


Рис.3 Мультивибратор на логических элементах

1.5 Изобразить осциллограммы напряжений на выходах и входах элементов (рис.4).

2 Исследование мультивибратора на операционном усилителе.

2.1 На модуле «Операционный усилитель» собрать схему (рис.5).

2.2 Резистор R_P установить в среднее положение.

2.3 Включить питание стенда. На экране осциллографа должен появиться генерируемый сигнал.

2.4 Изобразить в отчете осциллограммы напряжений на инвертирующем входе и на выходе мультивибратора.

2.5 Определить основные параметры сигнала.

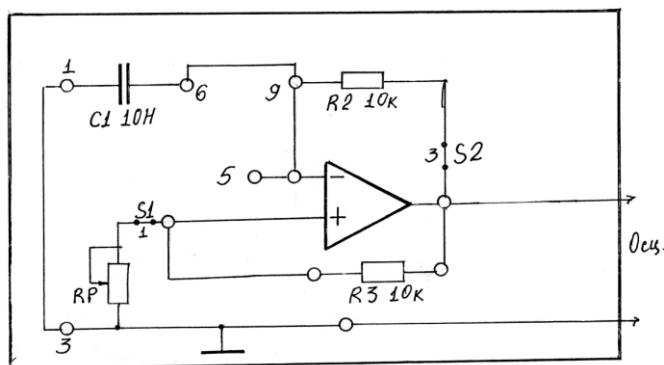


Рис. 5 МВ на операционном усилителе

2.6 Изменить положение резистора R_P и определить какие параметры изменяются при изменении сопротивления R_P .

3 Сделать выводы по работе

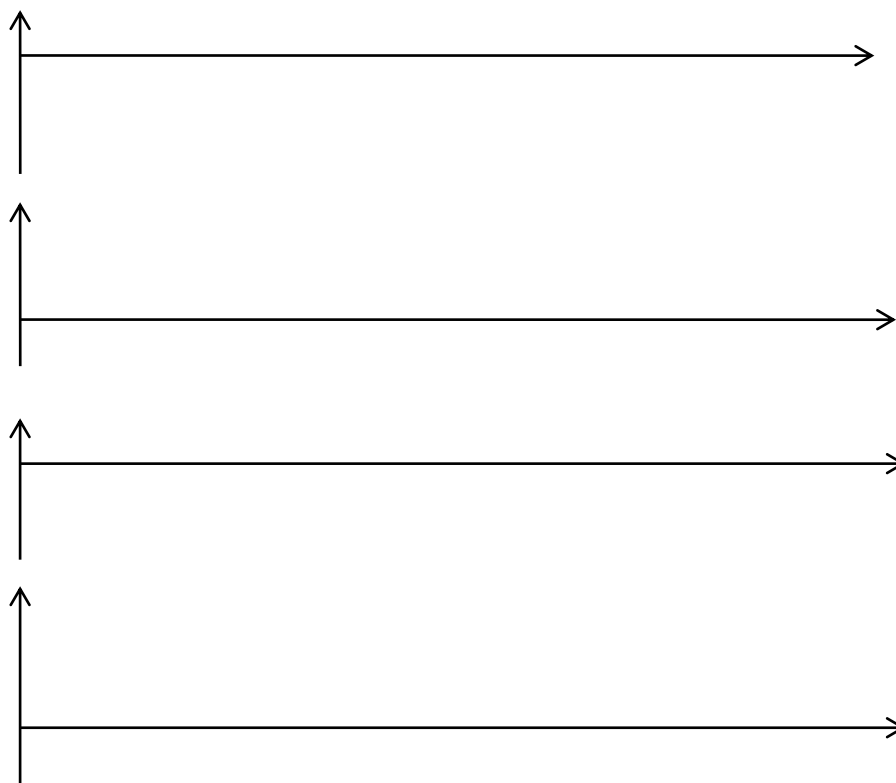


Рис.4 Осциллограммы напряжений

Литература

Основные источники:

1. Федоров, С. В. Электроника : учебник для СПО / С. В. Федоров, А. В. Бондарев. — Саратов : Профобразование, 2020. — 217 с. — ISBN 978-5-4488-0717-6. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/92209.html>.
2. Электроника и схемотехника : учебное пособие для СПО / В. И. Никулин, Д. В. Горденко, С. В. Сапронов, Д. Н. Резеньков. — Саратов, Москва : Профобразование, Ай Пи Ар Медиа, 2020. — 159 с. — ISBN 978-5-4488-0835-7, 978-5-4497-0522-8. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/94215.html>.
3. Шошин, Е. Л. Электроника и схемотехника : учебное пособие для СПО / Е. Л. Шошин. — Саратов, Москва : Профобразование, Ай Пи Ар Медиа, 2020. — 125 с. — ISBN 978-5-4488-0840-1, 978-5-4497-0538-9. — Текст : электронный //

Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL:
<http://www.iprbookshop.ru/94932.html>.

Дополнительные источники:

1. Игнатович, В. М. Электротехника и электроника: электрические машины и трансформаторы [Электронный ресурс] : учебное пособие для СПО / В. М. Игнатович, Ш. С. Ройз. — Электрон. текстовые данные. — Саратов : Профобразование, 2019. — 124 с. — 978-5-4488-0037-5. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/83122.html>.
2. Дементьев Ю.Н. Электротехника и электроника. Электрический привод [Электронный ресурс]: учебное пособие для СПО / Ю.Н. Дементьев, А.Ю. Чернышев, И.А. Чернышев. — Электрон. текстовые данные. — Саратов: Профобразование, 2017. — 223 с. — 978-5-4488-0144-0. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/66403.html>.

Интернет источники:

1. <http://www.college.ru/enportal/physics/content/chapter4/section/paragraph8/theory.html>
(сайт содержит информацию по теме «Электрические цепи п