

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
КАРАГАНДИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. АКАДЕМИКА Е.А. БУКЕТОВА

Г.П. Амочаева, Д.А. Афанасьев

ПРИКЛАДНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Учебное пособие

Караганда
2018

УДК 621.39 (075)

ББК 32.85я7

А61

*Рекомендовано к опубликованию Ученым советом
Карагандинского государственного университета
им. академика Е.А. Букетова*

Рецензенты

Н.А. Маженов, к.ф.-м.н. профессор Карагандинского государственного технического университета;

Р.Ж. Гимазетдинов, руководитель отдела исследования и разработки ТОО «Казцентрэлектропровод»

Амочаева Г.П.

А61 Прикладная электроника: учеб. пособие / Г.П. Амочаева, Д.А. Афанасьев. — Караганда: Изд-во КарГУ, 2018. — 127 с.

ISBN 978-9965-859-93-9

В учебном пособии рассмотрены принципы работы, устройство и основные технические характеристики дискретных полупроводниковых приборов широкого применения; описаны типовые узлы современных аналоговых и цифровых электронных устройств. Кроме теоретических сведений даны описания лабораторных работ.

Пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки бакалавров по специальности «Техническая физика». Также может быть использовано для подготовки к проведению лабораторных работ по курсу «Основы электронной и измерительной техники» и «Основы электроники и автоматики» для специальностей «Радиотехника, электроника и телекоммуникации» и «Приборостроение».

УДК 621.39 (075)

ББК 32.85я7

ISBN 978-9965-859-93-9

© Амочаева Г.П.,
Афанасьев Д.А., 2018
© Карагандинский
государственный
университет, 2018

В в е д е н и е

Для разработки современного электронного оборудования и грамотного его использования необходимо знать принципы работы основных элементов полупроводниковой электроники. Одними из основных разделов электроники, необходимых для изучения, являются аналоговая и цифровая электроника. Оба раздела электроники представлены в учебном пособии «Прикладная электроника» для специальности «Техническая физика».

Учебное пособие «Прикладная электроника» содержит пять глав. В первую главу пособия включены основные сведения по физике полупроводниковых материалов и принципы работы р-п перехода. Уделено внимание основным функциям, выполняемым различными полупроводниковыми диодами (выпрямление переменного тока, стабилизация напряжения и т.д.).

Во второй главе пособия приведена информация о полупроводниковых элементах с двумя и более р-п переходами. К таким элементам принято относить биполярные и полевые транзисторы, тиристоры. Также приведена краткая информация из теории четырехполюсников, необходимая для математического описания транзисторов. Показаны основные схемы подключения транзисторов и основные технические характеристики, необходимые для расчетов, связанных с

конструированием электронных схем на полупроводниковых транзисторах.

Отдельной главой приведена информация об основных схемах усилителей электрических сигналов. Одним из важных элементов современной электроники является операционный усилитель. Поэтому в пособии приведена информация о принципах построения усилителей на базе операционного усилителя.

Раздел *«Элементы цифровой электроники»* содержит информацию об алгебре Буля как математической основе цифровой электроники и о базовых элементах цифровой электроники.

Для лучшего усвоения материала теоретический материал пособия подкреплен лабораторными работами по соответствующим темам.

Приведены описания 13 лабораторных работ, которые охватывают основные разделы курса и предназначены для более глубокого освоения теории и приобретения практических навыков.

ГЛАВА 1. ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

1.1. Носители заряда в полупроводниках. Электронно-дырочный переход

Полупроводники представляют собой широкий класс материалов, проводимость которых обусловлена переносом электронов, концентрация подвижных носителей заряда в полупроводниках ниже концентрации атомов, но может меняться под воздействием температуры, освещения, небольшого количества примесей. Классические полупроводниковые материалы, такие как Si и Ge, являются кристаллами, но существуют и аморфные полупроводники. Кристаллическая решетка кремния называется тетраэдрической. Одним из отличительных свойств полупроводниковых материалов является возрастание электропроводности с ростом температуры. При температуре, близкой к температуре абсолютного нуля, электрическая проводимость стремится к нулю. При нагревании нарушаются валентные связи, что приводит к образованию свободных электронов и пустых мест – дырок – вблизи тех атомов, от которых оторвались электроны. Это приводит к росту электрической проводимости полупроводника. Дырка ведет себя подобно частице с элементарным положительным зарядом.

Проводимость полупроводника, обусловленная парными носителями теплового происхождения, в беспримесном полупроводнике называется собственной.

Проводимость, обусловленная наличием атомов, нарушающих структуру кристаллической решетки, называется примесной.

При введении в кремний атома 5-валентного фосфора четыре из его валентных электронов вступают в связь с 4

электронами соседних атомов кремния. Пятый электрон оказывается слабо связанным с ядром, легко от него отрывается и делается свободным. Проводимость такого полупроводника делается электронной, а полупроводник называется n-типа. Примесь, обуславливающая электронную проводимость, называется донорной.

При введении в кремний атома 3-валентного бора для образования устойчивой 8-электронной оболочки недостает одного электрона. Образуется свободная дырка. Такие полупроводники называются типа p, а соответствующие примеси акцепторными. Поскольку в примесных полупроводниках один тип подвижных носителей заряда превалирует над другим, принято те носители, которые составляют большинство, называть основными, а те, которые составляют меньшинство – неосновными носителями заряда.

В области вблизи контакта полупроводников с электронной и дырочной электропроводностью происходит формирование электронно-дырочного перехода (p-n-переход). Вначале градиент концентрации основных носителей заряда вызывает их диффузию. Вследствие диффузии основных носителей заряда через границу раздела полупроводников с разным типом проводимости происходит электронно-дырочная рекомбинация. Рекомбинация основных носителей заряда нарушает компенсацию ими заряда ионизированных атомов примесей. Нескомпенсированный заряд ионизированных примесей на границе раздела приводит к появлению электрического поля, называемого диффузионным и направленным так, что оно препятствует переходу основных носителей заряда через контакт p- и n-полупроводников. Внутреннее (диффузионное) электрическое поле вызывает перенос (дрейф) неосновных носителей заряда через границу раздела полупроводников p- и n-типа проводимости. В результате под действием внутреннего электрического поля растет дрейфовый ток неосновных носителей заряда. После того, как величина дрейфового тока сравняется с величиной диффузионного тока, наступает равновесное состояние, при котором суммарный ток через p-n-переход будет равен нулю.

В полупроводниковом кристалле вследствие сближения атомов кремния и действия других дополнительных сил,

обусловленных взаимодействиями между ядрами и электронами разных атомов, происходит формирование энергетических зон (рис. 1.1, а). Наиболее важными для формирования проводимости являются валентная и запрещенная зоны, зона проводимости. Энергетическая зона, образованная от валентных уровней атомов, называется валентной зоной. Полностью свободная от электронов энергетическая зона, расположенная выше валентной зоны, называется зоной проводимости. Заполняться электронами зона проводимости может, если электроны из валентной зоны получат дополнительную энергию, равную энергии ширины запрещенной зоны, расположенной между зоной проводимости и валентной зоной.

При построении энергетической диаграммы в полупроводнике по вертикальной оси откладывается полная энергия электронов, равная величине $\mathcal{E} - q\varphi$, где φ - потенциал макроскопического поля, q - элементарный заряд, а по горизонтальной - геометрическая координата. При этом в областях, где существует электрическое поле, границы энергетических зон получаются наклонными (рис. 1.1, б); причем угловой коэффициент пропорционален напряженности электрического поля, а относительное смещение зон - разности потенциалов.

Энергетические зоны в полупроводнике при наличии макроскопического электрического поля показаны на рис. 1.1.

Вдали от контакта электрическое поле отсутствует или относительно невелико по сравнению с полем в электронно-дырочном переходе. Поэтому энергетические зоны в этих областях изображены горизонтальными. Взаимное положение границ зон при этом остается таким же, как в однородном полупроводнике.

В физике полупроводников важным понятием является уровень Ферми (E_F). Уровень Ферми соответствует уровню энергии, вероятность заполнения электронами которого равна 0,5. В собственных полупроводниках уровень Ферми располагается посередине запрещенной зоны. В равновесном состоянии уровень Ферми в n- и p-областях выравнивается (рис. 1.1).

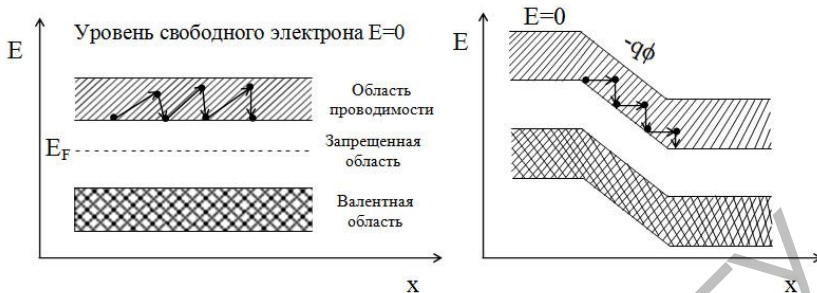


Рисунок 1.1

Так как напряженность электрического поля в электронно-дырочном переходе направлена от n- к p-полупроводнику, на диаграмме соответствующие энергетические зоны для области n-типа электропроводности должны быть ниже, чем для области p-типа. Величина этого сдвига определяется тем, что в равновесном состоянии уровень Ферми E_F должен быть одинаковым для всей системы.

Пространственное распределение зарядов и энергетические зоны вблизи электронно-дырочного перехода представлены на рис.1.2.

Позиции а на рисунке 1.2 соответствует отсутствие внешнего напряжения ($U=0$), б – прямое внешнее напряжение.

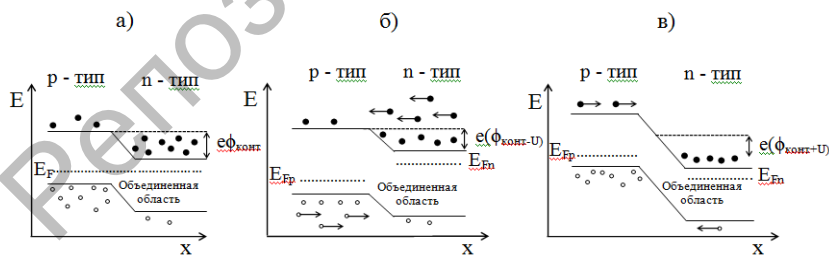


Рисунок 1.2

При этом падение потенциала в области объемного заряда (контактная разность потенциалов)

$$\varphi_{\text{кон}} = \frac{kT}{q} \cdot \ln \frac{n_{n_0} p_{p_0}}{n_i^2}$$

где

$$n_{n_0} = n_i \exp \frac{\mathcal{E}_\phi - \mathcal{E}_i}{kT}$$

$$p_{p_0} = n_i \exp \frac{\mathcal{E}_i - \mathcal{E}_\phi}{kT}$$

При нарушении равновесия электронно-дырочного перехода внешним электрическим полем через него начинает протекать ток. Если напряженность внешнего электрического поля противоположна по направлению диффузионному, то суммарная напряженность поля в области объемного заряда падает и ширина области объемного заряда уменьшается. При этом часть основных носителей с наибольшей энергией могут преодолеть потенциальный барьер и перейти в область объемного заряда.

Это приводит к появлению сравнительно большого тока через переход. Напряжение рассмотренной полярности называют прямым.

Если созданное внешним источником электрическое поле совпадает с диффузионным, то напряженность возрастает. Ширина области объемного заряда растет. Потенциальный барьер перехода повышается, что еще больше затрудняет пересечение области объемного заряда основными носителями. Напряжение рассмотренной полярности называется обратным.

Для неосновных носителей (дырок в n-области и электронов в p-области) потенциальный барьер отсутствует и они втягиваются полем в область объемного заряда (экстракция). В данном случае через переход проходит относительно небольшой обратный ток.

1.2. Статические и динамические характеристики полупроводниковых диодов

Двухэлектродный полупроводниковый элемент – **диод** – содержит **n**- и **p**-проводящие слои (рис. 1.3). В n-проводящем

слое в качестве свободных носителей заряда преобладают **электроны**, а в р-проводящем слое – **дырки**. В результате диффузии электронов из n-области в р-область и, наоборот, дырок из р-области в n-область на границе создается потенциальный барьер (рис. 1.3, а и б).

При прямом приложенном напряжении («+» к слою р, «-» к слою n) потенциальный барьер уменьшается, и диод начинает проводить ток (диод открыт). При обратном напряжении потенциальный барьер увеличивается (диод заперт).

Вольтамперная характеристика диода имеет вид, изображённый на рис. 1.3, в.

Прямой ток через **p-n-переход** определяется носителями заряда, неосновными для того слоя, куда они проникают. В процессе движения они сталкиваются с основными носителями данного слоя и рекомбинируют. С увеличением прямого тока падение напряжения на диоде несколько возрастает. При рекомбинации может выделяться энергия в виде излучения. Это явление используется в светодиодах.

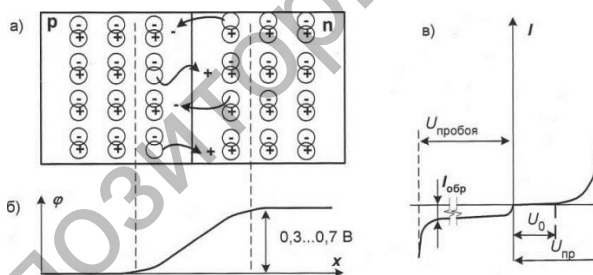


Рисунок 1.3

В обратном направлении через диод протекает только небольшой ток утечки, обусловленный неосновными носителями. С увеличением обратного напряжения выше предельно допустимого для данного типа диода наступает пробой **p-n-перехода**. В диодах различных типов он протекает по-разному: в обычных выпрямительных диодах – это необратимое разрушение **p-n-перехода** в результате его перегрева, в лавинных –

происходит лавинное размножение неосновных носителей, что приводит к резкому уменьшению обратного напряжения на нём и уменьшению нагрева, в стабилитронах – при увеличении обратного тока имеется достаточно протяжённый участок вольтамперной характеристики, на котором напряжение мало зависит от тока (электрический (зенеровский) пробой).

Основные статические параметры диодов, такие как пороговое напряжение U_0 , прямое падение напряжения $U_{пр}$, дифференциальное сопротивление R_d , обратный ток $I_{обр}$, напряжение стабилизации стабилитрона $U_{ст}$, можно определить по вольтамперной характеристике, снятой на постоянном или медленно изменяющемся токе.

Переключение диода из закрытого состояния в открытое происходит не мгновенно. Это можно наблюдать на экране осциллографа, если приложить к диоду напряжение прямоугольной формы высокой частоты (рис. 1.4).

При переходе из закрытого в открытое состояние требуется время $t_{вкл}$, необходимое для рассасывания избыточных зарядов потенциального барьера и достижения диффузионного равновесия.

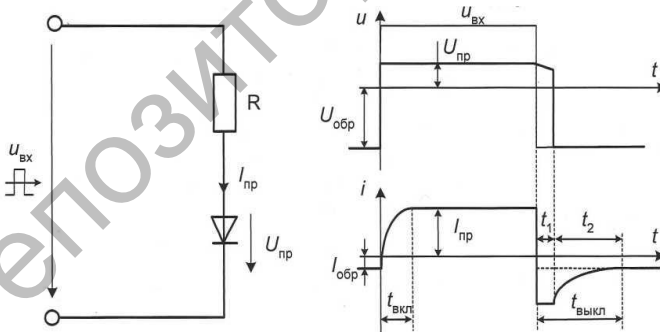


Рисунок 1.4

При переходе из открытого состояния в закрытое необходимо время t_1 , за которое рассасываются избыточные носители, и время t_2 , за которое вновь устанавливается потенциальный барьер. Общее время выключения $t_{выкл} = t_1 + t_2$. На этапе t_1 через диод протекает большой обратный ток, а напряжение на нём

убывает, сохраняя прямое направление. На этапе t_2 обратный ток убывает до нормального значения. Реальная картина, наблюдаемая на экране осциллографа, может несколько отличаться от описанной из-за влияния входной ёмкости осциллографа и монтажа электрической схемы.

1.3 Полупроводниковый стабилитрон

Стабилитрон представляет собой кремниевый диод, характеристика которого в открытом состоянии такая же, как у выпрямительного диода. Отличие стабилитрона заключается в относительно низком напряжении пробоя при обратном напряжении. Когда это напряжение превышено, ток обратного направления возрастает (электрический пробой, или пробой Зенера). В выпрямительных диодах такой режим является аварийным, а стабилитроны нормально работают при обратном токе, не превышающем максимально допустимого значения.

Наличие почти горизонтального участка на вольтамперной характеристике стабилитрона делает его пригодным для стабилизации постоянного напряжения на нагрузке. Для этого нагрузку включают параллельно стабилитрону. Чтобы избежать перегрузки, последовательно со стабилитроном включают балластный резистор.

Принцип действия стабилитрона: при уменьшении входного напряжения ток через стабилитрон и падение напряжения на R_0 тоже уменьшаются, но напряжение на стабилитроне и на нагрузке, исходя из вольтамперной характеристики (рис. 1.5.), остаются постоянными. При увеличении входного напряжения ток через стабилитрон и U_{R_0} увеличиваются, а напряжение на нагрузке так же остаётся неизменным. Стабилитрон поддерживает постоянство напряжения при изменении тока через него от значений $I_{cm.min}$ до значений $I_{cm.max}$.

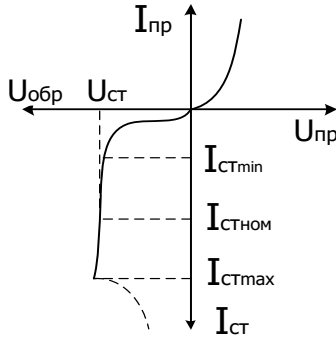


Рисунок 1.5

Схема подключения стабилитрона представлена на рис. 1.6. Резистор R_0 подбирается таким, чтобы протекающий через стабилитрон ток $I_{ст}$ соответствовал среднему (называемому номинальным $I_{ст.ном}$) значению тока рабочего режима стабилитрона между $I_{ст.min}$ и $I_{ст.max}$.

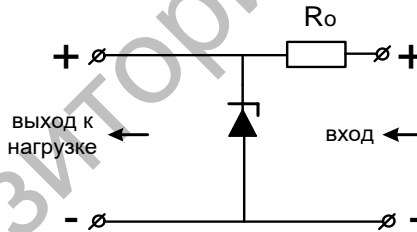


Рисунок 1.6

Величина его вычисляется следующим образом:

$$R_0 = (U_{раб} - U_{ст}) / (I_{ст} + I_{нагр}),$$

где $U_{раб}$ – приложенное рабочее напряжение,

$U_{ст}$ – напряжение стабилизации стабилитрона испытываемого типа,

$I_{ст}$ – допустимый ток стабилизации,

$I_{нагр}$ – ток в резисторе нагрузки R_n , включенном параллельно стабилитрону.

1.4 Емкостные свойства полупроводникового диода. Варикап.

Обедненный слой в полупроводниковом диоде можно рассматривать как слой диэлектрика между двумя проводящими поверхностями. Следовательно, при наличии переменного тока в цепи перехода следует учитывать собственную емкость, включенную параллельно переходу. Для работы на высоких частотах делают приборы с возможно малой емкостью, т.е. с малой площадью сечения полупроводникового диода. В противном случае емкостное сопротивление будет шунтировать переход. В переходе, смещенном в прямом направлении, появляется так называемая диффузионная емкость. Так как диффузия носителей зарядов через переход существенно изменяет величину зарядов в n - и p -областях, то это эквивалентно появлению дополнительной емкости - диффузионной. Емкость обратного смещенного перехода также связана с образованием зарядов в p - n -области перехода; ее называют барьерной.

Варикап – обратносмещенный полупроводниковый диод, предназначенный для применения в качестве элемента с электрически управляемой емкостью. У варикапов нормируют (и обеспечивают при производстве) емкость p - n -перехода при определенном напряжении смещения на нем и добротность. При увеличении обратного напряжения емкость варикапа уменьшается по закону

$$C_{\sigma} = C_0 \left(\frac{\varphi_k}{\varphi_k + U_{\sigma}} \right)^n,$$

где C_{σ} – емкость диода;

C_0 – емкость диода при нулевом обратном напряжении;

φ_k – контактная разность потенциалов;

n – коэффициент, зависящий от типа варикапа ($n = 1/2 - 1/3$);

U_{σ} – обратное напряжение на варикапе.

К основным параметрам варикапа относят:

Общая емкость варикапа C_{σ} – емкость, измеренная при определенном обратном напряжении (измеряется при $U = 5$ В и составляет десятки-сотни пФ);

Коэффициент перекрытия по емкости $K_n = C_{в\ max}/C_{в\ min}$ – отношение емкостей варикапа при двух крайних значениях обратного напряжения ($K_n = 5 - 8$ раз);

Добротность варикапа $Q = X_c/r_n$,

где X_c – реактивное сопротивление варикапа;

r_n – сопротивление активных потерь.

Обратный ток $I_{обр}$ – постоянный ток, протекающий через варикап в обратном направлении при заданном обратном напряжении.

1.5 Выпрямительные свойства полупроводниковых диодов

В цепи с полупроводниковым диодом (рис. 1.7) установившийся ток может протекать только при определенной полярности приложенного к диоду напряжения. При изменении полярности напряжения диод запирается и ток прекращается. В результате при синусоидальном приложенном напряжении $u_{вх}$ в нагрузке протекает пульсирующий ток одного направления. Такую же форму имеет и выпрямленное напряжение на нагрузке U_d . Для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения применяются сглаживающие фильтры. Простейшим фильтром является конденсатор, подключенный параллельно нагрузке. Тогда при открытом состоянии диода конденсатор заряжается, а при закрытом – разряжается на нагрузку. Ток и напряжение на нагрузке становятся непрерывными, пульсации уменьшаются и увеличивается среднее значение напряжения на нагрузке. Кривая $U_d(t)$ для этого случая показана на рис. 1.7 пунктиром.

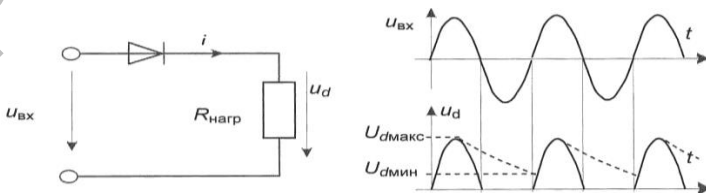


Рисунок 1.7

При исследовании выпрямителей применяются следующие обозначения:

$u_{вх}$, $U_{ВХ}$, $U_{вхmax}$ – мгновенное, действующее и амплитудное значения синусоидального входного напряжения;

U_d , U_{dmax} , U_{dmin} – мгновенное, среднее, максимальное, минимальное значения выходного (выпрямленного) напряжения;

$U_{max~}$ – амплитуда переменной составляющая выпрямленного напряжения, которая в первом приближении может быть определена их графика (рис. 1.7):

$$U_{max} \approx \cong \frac{U_{dmax} - U_{dmin}}{2};$$

$f_{п}$ – частота пульсаций выходного напряжения;

$m = f_{пульс}/f_{вх}$ – число пульсаций выпрямленного напряжения за один период напряжения питания;

$k_{пульс} = U_{max~}/U_d$ – коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения.

В однополупериодном выпрямителе без фильтра:

$$U_d = \frac{U_{вхmax}}{\pi} = \frac{\sqrt{2}U_{вх}}{\pi} \approx 0,45U_{вх};$$

$$U_{max} \approx \cong \frac{U_{вхmax}}{2};$$

$$k_{пульс} = \frac{\pi}{2} = 1,57.$$

Двухполупериодный мостовой выпрямитель состоит из четырёх диодов (рис. 1.8).

При положительном полупериоде входного напряжения диоды Д2 и Д4 открыты и через них течёт ток в нагрузку. Диоды Д1 и Д3 в этот момент закрыты. При отрицательном полупериоде диоды Д2 и Д4 закрываются, но открываются диоды Д1 и Д3, пропуская ток в нагрузку в том же направлении. По сравнению с однополупериодным выпрямителем в двухполупериодном в два раза увеличивается постоянная составляющая выпрямленного напряжения и в два раза увеличивается частота пульсации, что облегчает задачу сглаживания пульсаций фильтрами.

В двухполупериодном выпрямителе без фильтра:

$$U_d \cong \frac{2U_{\text{exmax}}}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}U_{\text{ex}}}{\pi} \cong 0,9U_{\text{ex}};$$

$$U_{\text{max}} \cong \frac{U_{\text{exmax}}}{2},$$

$$k_{\text{пульс}} = \frac{\pi}{4} = 0,785.$$

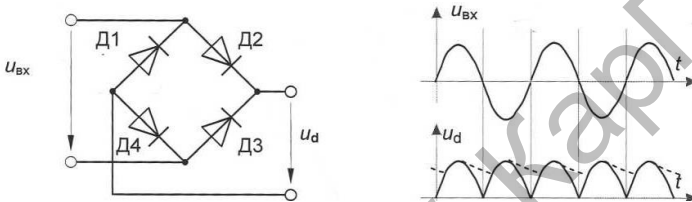


Рисунок 1.8

1.6 Трёхфазное мостовое выпрямление электрического тока

Потребители большой мощности питаются выпрямленным трехфазным переменным током. Несколько большая в сравнении с однофазным выпрямителем стоимость трехфазного выпрямителя многократно окупается за счет более простого сглаживания выходного напряжения.

Чаще всего используется мостовая схема выпрямления трёхфазного напряжения (рис. 1.9 а). Она состоит из 6 вентилей (полупроводниковых диодов) и питается линейными напряжениями трёхфазного источника. На рис. 1.9, б показаны кривые фазных напряжений источника питания u_A , u_B , u_C и кривая выпрямленного напряжения u_d . Выпрямленное напряжение образуется разностью фазных напряжений, т.е. линейными напряжениями. В нечётной группе вентилей в открытом состоянии находится тот вентиль, у которого на аноде

положительное наибольшее напряжение, а в чётной – тот вентиль, у которого на катоде отрицательное наименьшее напряжение. Разность наибольшего положительного напряжения и наименьшего отрицательного напряжения и есть выпрямленное напряжение на выходе трёхфазного моста. Эта разность на рис. 1.9, б заштрихована. Так, на отрезке $30^\circ < \omega t < 150^\circ$ открыт диод Д1, так как напряжение u_d на этом отрезке имеет наибольшее значение. В чётной группе вентилях на отрезке $90^\circ < \omega t < 240^\circ$ открыт диод Д2, так как у него на катоде напряжение u_c имеет наименьшее значение. При $\omega t = 150^\circ$ диод Д1 закрывается и открывается диод Д3, а при $\omega t = 240^\circ$ закрывается диод Д2 и открывается Д4. На рис. 1.9, в показаны графики токов в диодах.

Средняя величина выпрямленного напряжения в трёхфазном мосте

$$U_d = \frac{3U_{л\max}}{\pi} = \frac{3\sqrt{2}U_{л}}{\pi} \cong 1,35U_{л} = 2,34U_{ф}.$$

Амплитуда пульсаций

$$U_{\max} \cong \frac{1 - \cos 30^\circ}{2} U_{л\max} \cong 0,067 U_{л\max}.$$

Коэффициент пульсаций

$$k_{пульс} = \frac{0,067\pi}{3} \cong 0,07.$$

Частота пульсаций $m = f_{пульс} / f_{вх} = 6$.

Для сглаживания пульсаций применяются ёмкостный, индуктивный или индуктивно-ёмкостный фильтры. Ёмкостный фильтр эффективен, когда ток нагрузки невелик, т.е. сопротивление нагрузки велико по сравнению с ёмкостным сопротивлением фильтра. Индуктивный фильтр, наоборот, эффективен при больших токах, когда сопротивление нагрузки мало по сравнению с индуктивным сопротивлением фильтра. Смешанный индуктивно-ёмкостный фильтр хорошо сглаживает в широком диапазоне изменения нагрузки: при малых токах сглаживание происходит в основном за счёт ёмкости, а при больших за счёт индуктивности.

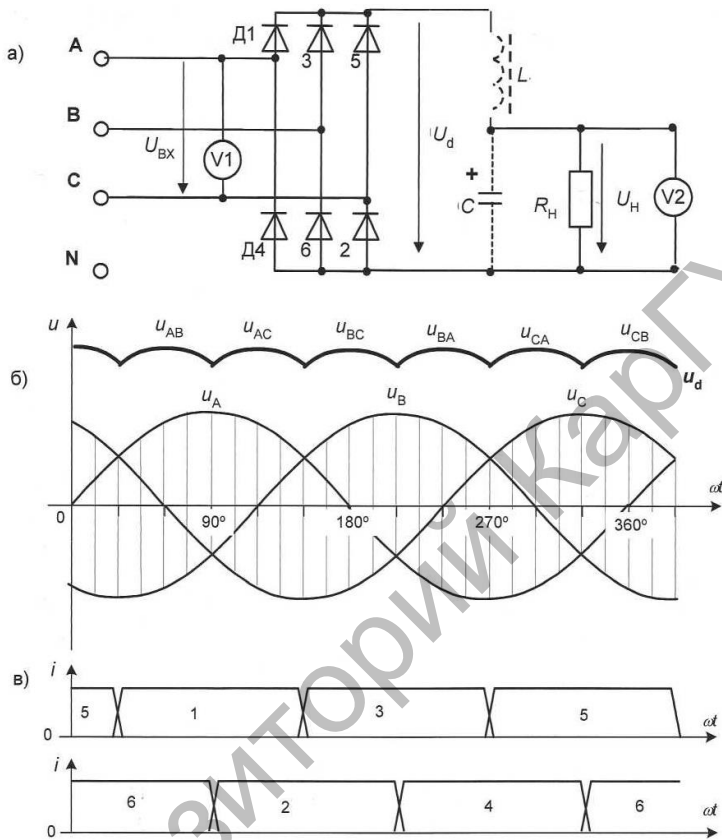


Рисунок 1.9

Глава 2. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ С ДВУМЯ И БОЛЕЕ P-N-ПЕРЕХОДАМИ

2.1 Статические характеристики биполярного транзистора

Транзисторы представляют собой электропреобразовательные полупроводниковые приборы с одним или несколькими электрическими переходами, пригодные для усиления мощности сигнала и имеющие три или более внешних электрода. Наиболее распространенные транзисторы имеют два p-n-перехода. В двухпереходных транзисторах используют два различных типа носителей заряда, поэтому их называют *биполярными*. Переходы образуются на границах трех слоев, из которых состоит транзистор. В зависимости от типа проводимости крайних слоев различают транзисторы p-n-p и n-p-n (рис.2.1).

Переход, работающий в прямом направлении, называется эмиттерным, а соответствующий крайний слой – *эмиттером*. Средний слой называется *базой*. Второй переход, смещенный в обратном направлении, называется коллекторным, а соответствующий крайний слой – *коллектором*. На каждый p-n-переход может быть подано как прямое, так и обратное напряжение. Соответственно различают четыре режима работы транзистора:

1. *режим отсечки* – на оба p-n-перехода подано обратное смещение;
2. *режим насыщения* – на оба p-n-перехода подано прямое смещение;

3. *режим усиления* – на эмиттерный переход подано прямое, а на коллекторный переход обратное смещение;

4. *инверсный режим* – на эмиттерный переход подано обратное, а на коллекторный переход прямое смещение.

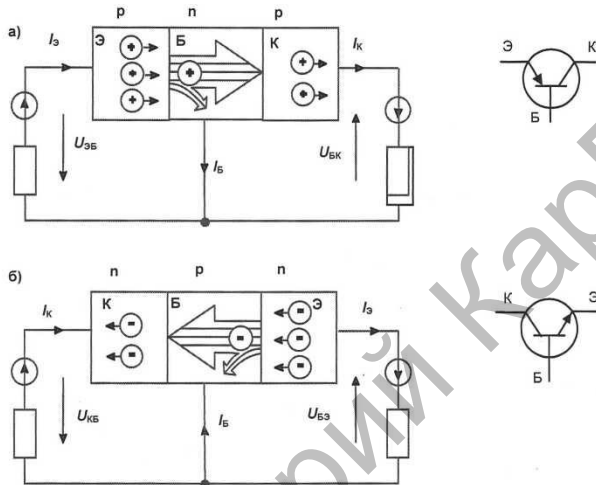


Рисунок 2.1

Для работы транзисторов к их электродам подключают постоянные напряжения внешних источников энергии. Помимо постоянных напряжений к электродам подводят сигналы, подлежащие преобразованию. В связи с этим различают входную цепь, к которой подводят сигнал, и выходную, с которой он снимается. Работу биполярного транзистора можно анализировать в рамках теории четырехполосников. Четырехполосник имеет четыре пары выводов. Два вывода входной цепи 1, 1' и два вывода выходной цепи 2, 2' (рис. 2.2). Теория четырехполосников, исходя из общих закономерностей, использует уравнения, связывающие между собой входные и выходные характеристики (токи и напряжения). В зависимости от связи между входными ($i^{(1)}$, $u^{(1)}$) и выходными характеристиками ($i^{(2)}$, $u^{(2)}$) существуют различные наборы параметров четырехполосников (A, B, H, G, Y, Z).

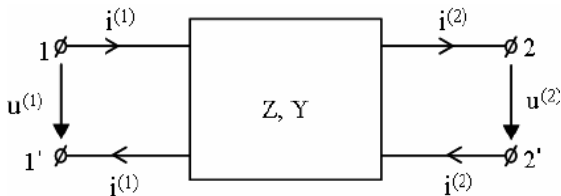


Рисунок 2.2

В зависимости от того, какой из электродов при включении транзистора является общим для входной и выходной цепей, различают схемы с общей базой (ОБ), общим эмиттером (ОЭ) и общим коллектором (ОК) (рис. 2.3).

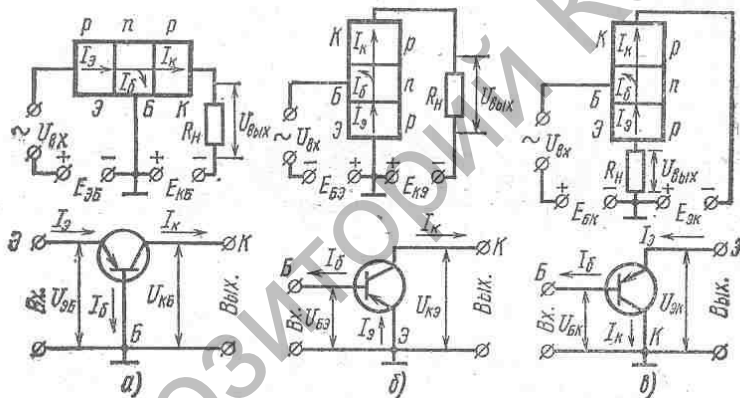


Рисунок 2.3

Свойства транзисторов для наиболее интенсивно используемой схемы подключения (ОЭ) описываются следующими четырьмя семействами характеристик:

- входная характеристика показывает зависимость тока базы I_B от напряжения в цепи база/эмиттер $U_{БЭ}$ (при $U_{КЭ} = \text{const}$).
- выходная характеристика показывает зависимость тока коллектора I_K от напряжения цепи коллектор/эмиттер $U_{КЭ}$ при различных фиксированных значениях тока базы.

- характеристика управления представляет собой зависимость тока коллектора I_k от тока базы $I_б$ (при $U_{кэ} = \text{const}$).

- характеристика обратной связи есть зависимость напряжения цепи база/эмиттер $U_{бэ}$ от напряжения цепи коллектор/эмиттер $U_{кэ}$ при различных фиксированных значениях тока базы.

В случае подключения транзистора по схеме с общей базой в транзисторе *p-n-p*-типа (рис. 2.1, а) ток от эмиттера к коллектору через базу обусловлен неосновными для базы носителями заряда – дырками. При положительном направлении напряжения $U_{эб}$ эмиттерный p-n-переход открывается, и дырки из эмиттера проникают (инжектируются) в область базы. Часть из них уходит к источнику напряжения $U_{эб}$, а другая часть достигает коллектора. Возникает так называемый транзитный ток от эмиттера к коллектору. Он резко возрастает с увеличением $I_{эб}$ и тока базы.

В транзисторе *n-p-n*-типа (рис. 2.1, б) транзитный ток через базу обусловлен так же неосновными для нее носителями заряда – электронами. Они инжектируются из эмиттера, если к эмиттерному *p-n-переходу* прикладывается напряжение $U_{эб}$.

В биполярном транзисторе токи эмиттера, коллектора и базы связаны между собой уравнением первого закона Кирхгофа:

$$I_k = I_э - I_б.$$

Ток базы существенно меньше I_k и $I_э$, но от него сильно зависит как I_k , так и $I_э$. В схеме с общей базой коэффициент усиления по току:

$$\alpha = \Delta I_{в\text{ых}} / \Delta I_{в\text{х}} = \Delta I_k / \Delta I_э.$$

Поэтому в схеме с общей базой возможно усиление входного сигнала по напряжению, но не по току.

В схеме подключения транзистора с общим эмиттером отношение приращения тока коллектора к приращению тока базы называется коэффициентом усиления по току:

$$\beta = \Delta I_k / \Delta I_б.$$

Он может иметь значения от нескольких десятков до нескольких сотен. Поэтому с помощью сравнительно малого тока базы можно регулировать относительно большие токи коллектора (и эмиттера).

Коэффициенты усиления по току α и β относятся к набору собственных параметров биполярных транзисторов. Другим часто используемым набором параметров является набор h-параметров. При малом уровне сигнала транзистор рассматривают как активный линейный четырехполюсник, у которого переменные токи и напряжения на входе (i_1, U_1) и на выходе (i_2, U_2) связаны соотношениями:

$$\begin{cases} U_1 = h_{11} \cdot i_1 + h_{12} \cdot U_2 \\ i_2 = h_{21} i_1 + h_{22} U_1 \end{cases}$$

где

$$h_{11} = \left. \frac{U_1}{i_1} \right|_{U_2=0} \quad \text{- выходное сопротивление транзистора,}$$

$$h_{12} = \left. \frac{U_1}{U_2} \right|_{i_1=0} \quad \text{- коэффициент обратной связи по напряжению,}$$

$$h_{21} = \left. \frac{i_2}{i_1} \right|_{U_2=0} \quad \text{- коэффициент передачи тока,}$$

$$h_{22} = \left. \frac{i_2}{U_2} \right|_{i_1=0} \quad \text{- выходная проводимость транзистора.}$$

В основном в справочной литературе по биполярным транзисторам приводятся h-параметры для схемы подключения с общим эмитером, реже с общей базой. Одним из преимуществ h-параметров, приведших к их использованию, стала возможность определения их из экспериментальных измерений.

2.2 Статические характеристики полевого транзистора

Транзистор, принцип действия которого основан на использовании носителей заряда только одного знака (электронов или дырок), называют униполярным (полевым).

Полевой (униполярный) транзистор – это трехэлектродный полупроводниковый прибор, у которого ток между стоком и истоком создается внешним продольным напряжением, а управление сечением канала (током в канале) осуществляется за счет эффекта поля, создаваемого поперечным напряжением, приложенным к управляющему электроду – затвору.

Структура и условное обозначение полевых транзисторов с **p-n-переходом** и каналами типа *n* и типа *p* показаны на рис. 2.4, а и 2.4, б. На рис. 2.4, в показан примерный вид выходных характеристик $I_c(U_{си})$ и стоко-затворная характеристика $I_c(U_{зи})$ транзистора с каналом типа *n*. Три вывода транзистора обозначаются: И – исток, С – сток, З – затвор.

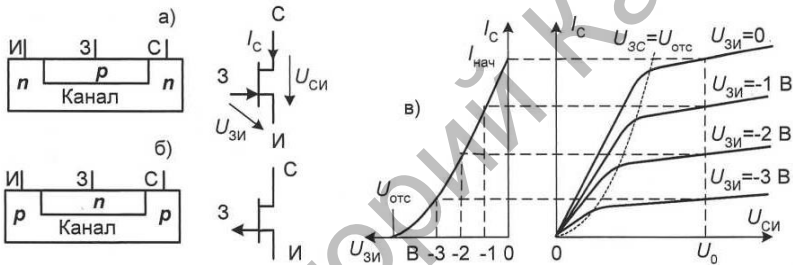


Рисунок 2.4

Когда напряжение $U_{зи}$ равно нулю, а между стоком и истоком приложено постоянное напряжение $U_{си} = U_0$, по каналу протекает начальный ток стока $I_c = I_{нач}$, который обеспечивается свободными электронами, имеющимися в канале типа *n*. Если же между затвором и истоком приложено управляющее отрицательное напряжение, то вблизи затвора увеличивается объёмный положительный заряд, количество свободных электронов уменьшается, сопротивление канала возрастает, и ток стока уменьшается. При $U_{зи} = U_{отс}$ (напряжение отсечки) канал полностью перекрывается и ток прекращается.

При постоянном напряжении $U_{зи}$ и увеличении напряжения $U_{си}$ от нуля ток стока сначала возрастает по линейному закону, но при этом возрастает и напряжение $U_{сз}$, что приводит к сужению канала, за счет модуляции обедненной зоны p-n переходаю.

Когда это напряжение достигает значения $U_{отс}$, наклон характеристики $I_c(U_{си})$ резко уменьшается, и она становится почти горизонтальной. Эта область семейства выходных характеристик называется зоной насыщения. Именно в ней обеспечивается линейное усиление сигналов.

Важной характеристикой транзистора является крутизна стоко-затворной характеристики в области насыщения:

$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}}.$$

Все эти обозначения и рассуждения применимы также к транзистору с каналом типа p (рис. 2.4, б), с той лишь разницей, что полярность напряжений $U_{си}$ и $U_{зи}$ должно быть противоположными.

2.3 Полевой транзистор с изолированным затвором и индуцированным каналом

Полевые транзисторы с изолированным затвором отличаются тем, что затвор выполнен в виде слоя металла, отделённого от полупроводникового канала тонким изолирующим слоем оксида кремния. Поэтому их называют МОП-транзисторами (металл-оксид-полупроводник). Канал между истоком и стоком МОП-транзистора может быть встроенным, т.е. специально изготовленным или наведённым. В первом случае характеристики МОП-транзистора аналогичны характеристикам транзистора с p - n -переходом, но отличаются возможностью работы с прямым смещением затвора (в режиме обогащения). На рис. 2.5 показаны структура, условное обозначение и характеристики транзистора с встроенным каналом типа n .

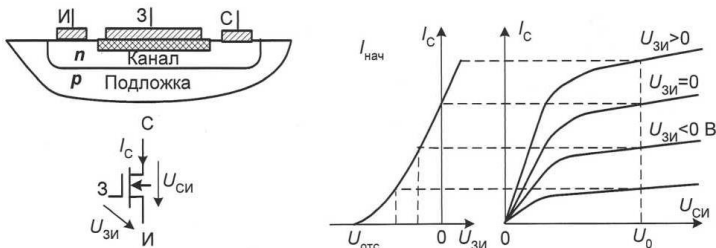


Рисунок 2.5

Структура, условное обозначение и стоко-затворная характеристика МОП-транзистора с индуцированным каналом типа n показана на рис. 2.6. В подложке типа p изготовлены только небольшие области противоположного типа проводимости. При подаче на затвор положительного напряжения относительно истока к затвору будут притягиваться электроны, в то время как дырки от него будут оттесняться. При некотором напряжении, называемом пороговым ($U_{зи\text{пор}}$), под затвором образуется n -слой, перемыкающий n -области под истоком и стоком. Вся стоко-затворная характеристика будет находиться области обогащения.

Все эти обозначения и рассуждения применимы также к МОП-транзистору с каналом типа p (рис. 2.6), с той лишь разницей, что полярности напряжений $U_{си}$ и $U_{зи}$ должны быть противоположными.

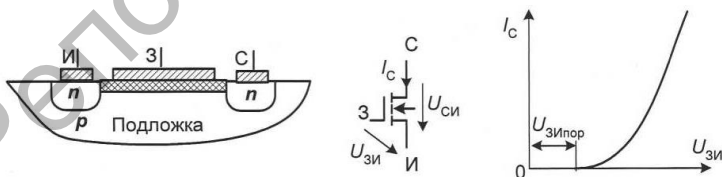


Рисунок 2.6

2.4 Тиристоры

Тиристоры – переключающие полупроводниковые приборы, имеющие четырёхслойную структуру. Они имеют два устойчивых состояния: открытое (проводящее) и закрытое (непроводящее). Они выпускаются с двумя или тремя выводами. В первом случае они называются динисторами (или диодными тиристорами), во втором – тринисторами (триодными или управляемыми тиристорами). Их условные обозначения показаны на рис. 2.6. Выводы обозначаются: А – анод, К – катод, УЭ – управляющий электрод. Производятся также симметричные динисторы и тиристоры (симисторы), которые могут проводить ток в обоих направлениях и эквивалентны двум динисторам или тиристорам, соединённым встречно-параллельно.

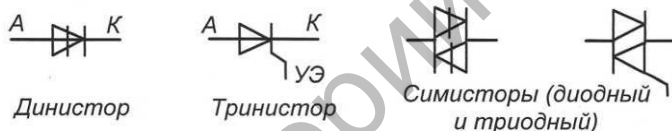


Рисунок 2.6

Четырёхслойная структура динистора представлена на рис. 2.7, а. Для уяснения принципа действия четырёхслойный прибор можно представить как два трёхслойных прибора (рис. 2.7, б) или два транзистора, соединённых, как показано на рис. 2.7, в.

При прямом приложенном напряжении, показанном на рисунках, левый и правый p - n -переходы открыты, а средний закрыт. Через тиристор протекает лишь незначительный ток неосновных носителей (рис. 2.7, г). По мере увеличения прямого напряжения энергия носителей заряда, проходящих через запертый $p_1 - p_2$, увеличивается и при некотором напряжении ($U_{вкл}$) возникает ударная ионизация атомов полупроводника в зоне $p_1 - p_2$ перехода, ток резко возрастает, два транзистора (рис. 2.7, в) открываются, напряжение на тиристоре резко падает, и он переходит в открытое состояние. Вольтамперная характеристика открытого тиристора аналогична вольтамперной характеристике

диода. При снижении тока тиристор остаётся в открытом состоянии до некоторого небольшого тока, называемого током удержания ($I_{уд}$). Он несколько меньше тока включения, показанного на рис. 2.7, г.

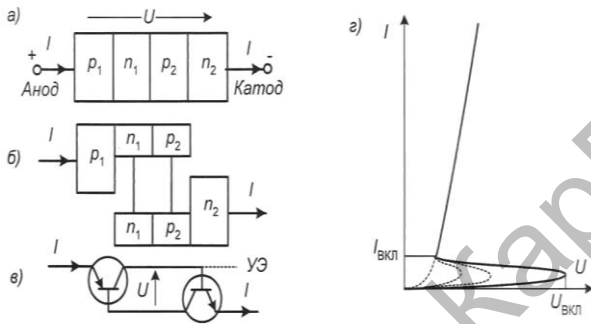


Рисунок 2.7

Управляемые тиристоры имеют помимо основных выводов «анод» и «катод» третий вывод «управляющий электрод». Он показан на рис. 2.7, в пунктиром. Подавая на него импульс тока положительной полярности, мы принудительно открываем один из транзисторов, второй транзистор тоже открывается, так как через его базу начинает протекать ток коллектора другого транзистора. Напряжение включения уменьшается, как показано на рис.2.7, г пунктиром. При токе управления, превышающем открывающий ток управления ($I_{откр.у}$), вольтамперная характеристика тиристора полностью аналогична характеристике диода.

Важно, что управляемый тиристор остаётся во включенном состоянии и после снятия управляющего тока. Он выключается только при снижении тока через него ниже тока удержания. Причём, чтобы тиристор не включился самопроизвольно при следующей подаче на него прямого напряжения, он должен находиться в выключенном состоянии определённое время, называемое временем восстановления запирающих свойств. Кроме того, скорость нарастания анодного напряжения не должна превышать для данного типа тиристоров допустимую величину.

Глава 3. УСИЛИТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

3.1 Усилительный каскад по схеме с общим эмиттером

В зависимости от способа включения транзистора различают три типа усилительных каскадов на биполярных транзисторах: с общим эмиттером (ОЭ) (рис. 3.1, а), с общим коллектором (ОК) (рис. 3.1, б) и с общей базой (ОБ) (рис. 3.1, в). Все схемы могут быть выполнены как на $p-n-p$, так и на $n-p-n$ -транзисторе.

В каждой из этих схем один из выводов транзистора является общей точкой, а два других являются входом и выходом. При этом на эмиттерный переход подаётся напряжение смещения в прямом направлении, а на коллекторный – в обратном направлении. Напряжение смещения задаётся резисторами R_1 и R_2 . В цепи эмиттера и (или) коллектора включают сопротивления для ограничения тока и придания усилителю определённых свойств. На входе усилительного каскада (часто и на выходе) включается разделительный конденсатор $C_{вх}$ для предотвращения протекания постоянного тока через источник переменного сигнала.

Схема с ОЭ (рис. 3.1, а) используется наиболее часто. В ней входной сигнал подаётся на входную цепь транзистора (база – эмиттер), а выходное напряжение снимается с выходной цепи транзистора (коллектор – эмиттер). Данная схема имеет большой коэффициент усиления как по напряжению (k_U), так и по току (k_I).

В схеме с ОК (рис. 3.1, б) входной сигнал подаётся на цепь база–коллектор, а выходной снимается с цепи эмиттер–коллектор. Это утверждение не противоречит рис. 3.1, б, т.к. для

переменного сигнала общая точка имеет такой же потенциал, как и $+U_{\text{пит}}$. Эту схему называют ещё эмиттерным повторителем, так как выходное напряжение в ней почти равно входному ($k_U < 1$). Схема имеет большой коэффициент k_I , высокое входное сопротивление и низкое выходное.

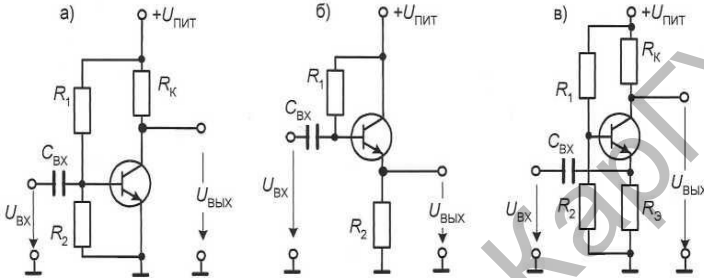


Рисунок 3.1

В схеме с ОБ (рис. 3.1, в) входное напряжение подаётся на цепь эмиттер–база, а выходное снимается с цепи коллектор–база. Здесь также нет противоречия с рисунком 3.1, в, так как для переменного сигнала общая точка имеет такой же потенциал, как и потенциал базы. Эта схема имеет большой коэффициент k_U , но ток на выходе почти равен току на входе ($k_I < 1$). В противоположность схеме с общим коллектором схема имеет малое входное сопротивление, но большое выходное.

Схема с ОЭ изменяет фазу входного сигнала на 180° , тогда как в схемах с ОК и ОБ выходное напряжение совпадает по фазе с входным.

3.2 Двухтактный усилитель мощности на биполярных транзисторах

В зависимости от диапазона усиливаемого входного сигнала и качества его передачи через усилитель выделяют различные классы усилителей. Можно выделить такие классы, как А, АВ, В, С, D.

В зависимости от положения рабочей точки на характеристике прямой передачи усилительного прибора и формирования тока коллектора (анода, стока) различают следующие виды аналоговых (токовых) режимов:

1. усилитель класса А – рабочая точка выбирается в середине линейного участка статической характеристики;
2. усилитель класса В – рабочая точка выбирается в начале линейного участка статической характеристики;
3. усилитель класса С – рабочая точка выбирается ниже начала линейного участка статической характеристики (усиление только ЧМ сигналов).

Для передачи значительного тока и мощности в нагрузку выходные каскады усилителей, как правило, работают в классе В, т.е. каждая полуволна синусоиды формируется своим транзистором. Простой и часто используемый эмиттерный повторитель на комплементарных транзисторах показан на рис. 3.2, а. Такому повторителю свойственны специфические нелинейные искажения, обусловленные нелинейностью начального участка входных характеристик транзистора (рис. 3.2, б). В результате передаточная характеристика каскада имеет излом в области малого входного сигнала (рис. 3.2, в). При индуктивной и ёмкостной нагрузке искажения смещаются в область максимального выходного напряжения.

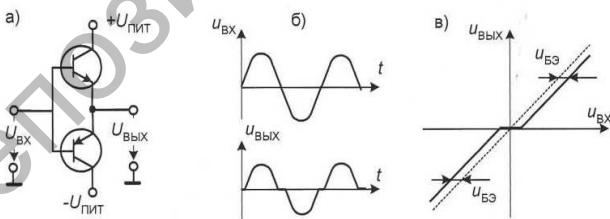


Рисунок 3.2

Исключить или уменьшить эти искажения можно, выбрав точку покоя транзисторов в области активного усиления вблизи зоны отсечки. Тогда при нулевом входном сигнале оба транзистора будут слегка приоткрыты, потребляя некоторый незначительный ток от источника (один из возможных способов

реализации этого решения показан на рис. 3.3). В этой схеме между базами включены два диода, падение напряжения на которых компенсирует потенциальные барьеры эмиттер–база двух транзисторов.

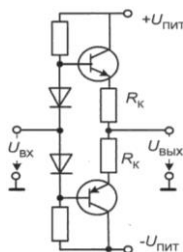


Рисунок 3.3

Кроме того, в этой схеме в цепь коллектора каждого транзистора включено небольшое сопротивление, создающее отрицательную обратную связь для компенсации температурной нестабильности характеристик транзисторов.

3.3 Операционный усилитель

Операционный усилитель (ОУ) представляет собой усилитель постоянного тока с высокоомным дифференциальным входом, высоким коэффициентом усиления и малым значением напряжения смещения нуля. Два часто употребляемых условных обозначения ОУ приведены на рис. 3.4.



Рисунок 3.4

При подаче сигнала на инвертирующий вход приращение выходного сигнала противоположно по знаку (фазе) с приращениями входного сигнала (инвертирующее включение ОУ). Если же сигнал подан на неинвертирующий вход, то приращение выходного сигнала совпадает по знаку (фазе) с входным сигналом (неинвертирующее включение). При подаче сигналов на оба входа (дифференциальное включение) приращение сигнала на выходе пропорционально разности входных сигналов. Эти три схемы представлены на рис. 3.5.

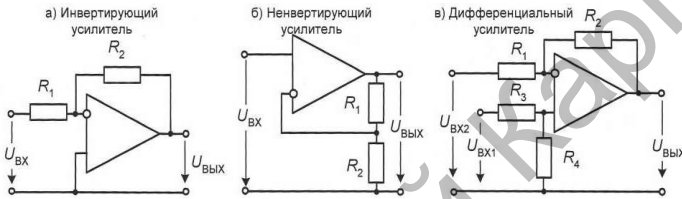


Рисунок 3.5

Преобразование сигналов в цепях с операционными усилителями почти исключительно определяется свойствами цепей внешних обратных связей.

Так, в схемах на рис. 3.5, а, 3.5, б и 3.5, в коэффициенты усиления входного напряжения выражаются через внешние сопротивления следующим образом:

$$а) K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = -\frac{R_2}{R_1}.$$

$$б) K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}.$$

$$в) K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}}} = \frac{R_2}{R_1}, \text{ при } \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}.$$

На операционных усилителях возможно построение множества различных устройств, преобразующих величину и форму сигналов или генерирующих сигналы различной формы.

Глава 4. ЭЛЕМЕНТЫ ЦИФРОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

4.1 Основы булевой алгебры

Булева алгебра разработана в середине XIX века ирландским математиком Дж. Булем. Булева алгебра (алгебра логики) – раздел математики, изучающий закономерности и взаимосвязи между простыми высказываниями, образующими сложные высказывания. Какую информацию несет то или иное высказывание, булеву алгебру не интересует. Важно лишь то, что высказывание может быть либо ложным, либо истинным, т.е. принимать только два значения. На основе простых высказываний можно построить сложные, истинность которых связана с истинностью или ложностью простых. Эта взаимосвязь описывается булевыми функциями $Y = F(X_1, X_2, \dots, X_n)$.

Сложные высказывания, в свою очередь, могут быть истинными и ложными, поэтому булевы функции могут иметь только два значения. Если истинности приписать значение 1, а ложности – 0, то и все аргументы в булевой алгебре будут принимать только два значения: 0 и 1.

Над переменными в булевой алгебре можно производить только три действия: дизъюнкцию (логическое сложение); конъюнкцию (логическое умножение); инверсию (логическое отрицание).

Логическое сложение (дизъюнкция, операция ИЛИ) – обозначается символом «+» или «v» (от vel (лат.) – или):

$$0+0=0, 0+1=1, 1+0=1, 1+1\dots+1=1.$$

Событие истинно, если истинен хотя бы один из аргументов или все аргументы истинны одновременно.

Логическое умножение (конъюнкция, операция И) – обозначается точкой или символом «&»:

$$0\cdot 0=0, 0\cdot 1=0, 1\cdot 0=0, 1\cdot 1\dots\cdot 1=1.$$

Событие истинно, если истинны все аргументы одновременно.

Логическое отрицание (инверсия, операция НЕ) – обозначается чертой над обозначением аргумента:

$$\bar{0}=1, \bar{1}=0, \overline{\bar{0}}=0, \overline{\bar{1}}=1.$$

Инверсия логической суммы двух событий называется стрелка Пирса: $F = \overline{X+Y} - F = X \downarrow Y$ (ИЛИ-НЕ).

Инверсия логического произведения называется штрих Шеффера: $F = \overline{X \cdot Y} - F = X / Y$ (И-НЕ).

В алгебре логики используются свои законы и аксиомы. Некоторые из основных законов алгебры логики (переменная «a» может принимать значения 0 или 1):

$$\begin{aligned} a+0 &= a & a\cdot 0 &= 0 \\ a+1 &= 1 & a\cdot 1 &= a & \overline{\bar{a}} &= a. \\ a+a+\dots+a &= a & a\cdot a\cdot\dots\cdot a &= a \\ a+\bar{a} &= 1 & a\cdot\bar{a} &= 0 \end{aligned}$$

4.2 Базовые элементы цифровой электроники

Логические элементы – устройства, с помощью которых реализуются логические функции. Их используют для построения сложных преобразователей цифровых сигналов.

Логические элементы относятся к комбинационным логическим устройствам (без внутренней памяти). Выходные сигналы в них не зависят от предыстории и однозначно

определены входными сигналами в данный момент времени. Другой разновидностью являются последовательные логические устройства – выходной сигнал зависит от входного сигнала в данный момент времени и выходных сигналов и памяти в предыдущие моменты времени.

Различают 6 основных типов логических элементов (по основным логическим операциям). В качестве самостоятельного функционального узла также рассматривается логический элемент «ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ» или сумматор по модулю 2.

Два различных состояния выходных параметров логического элемента могут быть представлены:

- а) двумя уровнями выходного напряжения;
- б) появлением или отсутствием выходных импульсов в определенные промежутки времени.

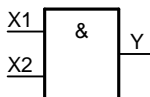
Первый способ – потенциальный способ задания логических элементов; второй способ – импульсный.

Потенциальный способ наиболее распространен. При нем различают отрицательную и положительную логику.

Элемент «И»

X1	X2	Y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Таблица истинности

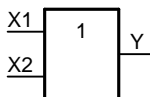


Условное обозначение

Элемент «ИЛИ»

X1	X2	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Таблица истинности

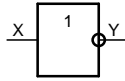


Условное обозначение

Элемент «НЕ»

X	Y
0	1
1	0

Таблица истинности

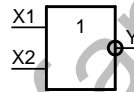


Условное обозначение

Элемент «ИЛИ-НЕ» (стр. Пирса)

X1	X2	Y
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

Таблица истинности

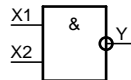


Условное обозначение

Элемент «И-НЕ» (штр. Шеффера)

X1	X2	Y
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Таблица истинности

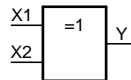


Условное обозначение

Элемент «ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ» (сумматор по модулю 2)

X1	X2	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Таблица истинности



Условное обозначение

Положительная логика – высокий уровень выходного напряжения принимают за логическую единицу, низкий уровень за логический ноль.

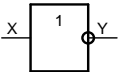
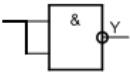
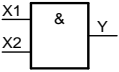
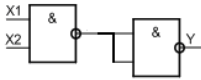
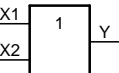
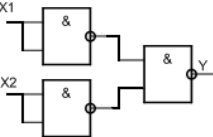
Отрицательная логика – высокий уровень принимают за «0», низкий уровень – «1».

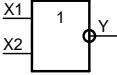
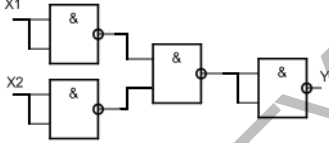
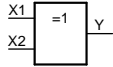
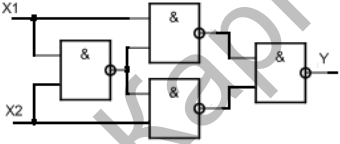
Универсальный характер логического элемента И-НЕ

В рекламной и справочной литературе логические элементы И-НЕ представлены более широко по сравнению со многими другими типами логических элементов. Имея это в виду, мы покажем, каким образом можно реализовать все другие логические функции на основе универсального логического элемента И-НЕ.

В таблице 4.1 показано, как нужно соединять логические элементы И-НЕ для реализации любых других основных логических функций, записанных в левом столбце; условные обозначения соответствующих логических элементов помещены во втором столбце таблицы 4.1.

Т а б л и ц а 4.1

Логическая функция	Условное обозначение	Схема с использованием только логических элементов И-НЕ
1	2	3
Инвертор		
И		
ИЛИ		

Логическая функция	Условное обозначение	Схема с использованием только логических элементов И-НЕ
1	2	3
ИЛИ-НЕ		
Исключающее ИЛИ		

Глава 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИКЛАДНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

5.1 Экспериментальное оборудование и правила работы с ним

Правила техники безопасности

В лаборатории используется напряжение переменного и постоянного тока до 250 В. При несоблюдении правил по технике безопасности эта величина напряжения представляет серьезную опасность.

Сопротивление тела человека определяется главным образом сопротивлением кожного покрова, которое существенно зависит от степени увлажнения, наличия повреждений и т.п. Поэтому сопротивление тела человека может изменяться в очень широких пределах. В расчетах по технике безопасности обычно сопротивление тела человека принимают равным 1 кОм.

Электрический ток, проходя через тело человека, производит тепловое, химическое и биологическое воздействие, тем самым нарушая нормальную жизнедеятельность.

Химическое действие тока ведет к электролизу крови и других содержащихся в организме растворов, что приводит к изменению их химического состава.

Биологическое действие электрического тока проявляется в опасном возбуждении живых клеток организма, что может сопровождаться судорогами, явлениями паралича.

Степень поражения человека и тяжесть электрического удара зависят главным образом от значения тока, проходящего через тело человека, пути тока в теле человека и длительности его прохождения.

Основные правила по технике безопасности следующие:

1. Перед началом сборки схемы необходимо убедиться в том, что автомат на стенде находится в выключенном состоянии.

2. Рабочее место не должно загромождаться посторонними предметами, а проходы – стульями.

3. Измерительные приборы и исследуемые аппараты необходимо размещать таким образом, чтобы в процессе выполнения работы была исключена возможность случайного прикосновения к оголенным токоведущим частям.

4. Не допускается использование приборов и аппаратов с неисправленными зажимами, проводов с поврежденной изоляцией, неисправных реостатов, тумблеров и другого оборудования. О неисправности сообщить инженеру или преподавателю.

5. Сборку схемы необходимо выполнять по возможности без пересечения проводов, нельзя натягивать и сворачивать провода. Неиспользованные соединительные провода необходимо убрать с рабочего места.

6. Категорически запрещается проводить какие-либо операции на главных распределительных щитах, а также за пределами рабочего места.

7. Напряжение на схему подают только после разрешения преподавателя, предупредив об этом всех студентов, работающих на данном рабочем месте. При этом рукоятки регуляторов напряжения должны находиться на нулевой отметке.

8. В случае прекращения опыта или перерыва в работе схему необходимо отключить от сети.

9. Во время лабораторной работы запрещается:

- производить переподключение в схеме, находящейся под напряжением;
- прикасаться к оголенным токоведущим частям электрического аппарата;
- включать схему после каких-либо изменений соединений в ней до проверки преподавателем;
- оставлять без наблюдения схему, находящуюся под напряжением.

10. Во всех случаях обнаружения неисправного оборудования, измерительных приборов, проводов, при появлении специфического запаха, дыма нужно выключить напряжение и немедленно поставить в известность преподавателя.

11. После окончания работы необходимо выключить напряжение, разобрать схему, привести в порядок рабочее место.

12. Студенты допускаются к лабораторным работам после ознакомления с настоящими правилами, что должно быть зафиксировано в специальном журнале.

Общие правила выполнения измерений электрических величин

Нередко, выполняя многие производственные работы, необходимо измерять различные электрические величины. В каждом таком конкретном случае необходимо выбирать требующийся прибор в зависимости от соответствующих действий по измерению.

При измерении электрических величин крайне важно строго соблюдать правила техники безопасности.

Выполнять измерения и подготавливать приборы нужно в следующем порядке:

1. Выбрать прибор с учетом необходимых условий измерений, а также степени точности.
2. Установить переключатель на нужный предел измерения (если он имеется).
3. Определить цену деления шкалы.

4. Расположить прибор в надлежащее положение.
5. С помощью корректора установить стрелку на нулевую отметку шкалы.
6. Включить прибор в цепь согласно схеме.
7. Снять информацию с измерительного прибора.
8. По окончании работы отключить цепь и, при необходимости, отсоединить прибор от других элементов цепи.

Описание лабораторного оборудования

Комплект типового лабораторного оборудования «Основы аналоговой электроники» предназначен для проведения лабораторного практикума по одноимённым разделам курсов «Промышленная электроника», «Электроника и микроэлектроника», «Электронная техника» и др. в высших и средних образовательных учреждениях.

Основными компонентами комплекта «Основы аналоговой электроники» являются:

- блок генераторов напряжений с наборным полем;
- набор мини-блоков;
- блок мультиметров;
- двухканальный осциллограф, имеющий режим X – Y;
- соединительные провода и перемычки, питающие кабели.

Общая компоновка типового комплекта оборудования в стендовом исполнении показана на рис. 5.1. На лабораторном столе закреплена рама, в которой устанавливаются блок генераторов с наборным полем, блок мультиметров и блок однофазного источника питания. Расположение блоков в раме не фиксировано жёстко. Оно может изменяться для удобства проведения того или иного конкретного эксперимента. На стол устанавливается осциллограф.

Однофазный источник питается от трехпроводной однофазной сети (фаза, ноль и земля). В нём смонтированы устройство защитного отключения при нарушении изоляции, автомат для защиты от сверхтоков и блок розеток и разъёмов (на тыльной стороне блока) для подключения всех остальных блоков и осциллографа.

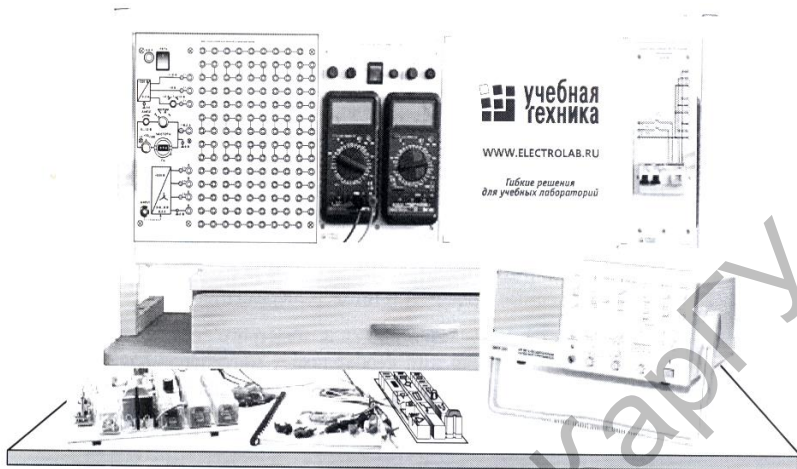


Рисунок 5.1

Блок генераторов напряжений с наборным полем

Блок генераторов напряжения с наборным полем (БГННП) предназначен для формирования однофазных сигналов различной формы, регулируемых по амплитуде и частоте, формирования трёхфазного напряжения и постоянных напряжений для питания исследуемых схем. БГННП содержит наборное поле для сборки электрических схем с использованием набора мини-блоков.

Синусоидальное, прямоугольное или импульсное напряжение на выходе генератора задается переключателем «ФОРМА». Амплитуда выходного напряжения устанавливается ручкой «АМПЛИТУДА» в пределах от 0 до 12 В. Диапазон регулирования частоты генератора напряжений специальной формы – от 0,2 Гц до 200 кГц. Частота устанавливается ручкой энкодера-потенциометра. При горящем состоянии светодиода частота меняется по декадам. При мигающем состоянии светодиода частота меняется с минимально возможным шагом. Переключение между режимами производится путем нажатия кнопки энкодера-потенциометра.

Генератор постоянных напряжений предназначен для получения стабилизированных напряжений +15 В, -15 В и

регулируемого напряжения от 0 до 13 В. Все генераторы имеют общую точку «+».

Общий вид блока генераторов напряжений показан на рис. 2. В левой части расположены органы управления источников питания, в правой – гнезда для подключения исследуемых элементов электрической цепи (мини-блоков). В нижней части показан фрагмент электрической цепи, собранной на наборном поле.

Все источники напряжений включаются и выключаются общим выключателем «СЕТЬ» и защищены от внутренних коротких замыканий плавким предохранителем с номинальным током 0,5 А.

На лицевой панели блока указаны номинальные напряжение и ток каждого источника напряжения, а также диапазоны изменения регулируемых выходных величин. Все источники напряжений имеют общую точку «⊥», не соединённую с заземлённым корпусом блока. Источники защищены от перегрузок и внешних коротких замыканий самовосстанавливающимися предохранителями с номинальным током 0,2 А. О срабатывании предохранителя свидетельствует индикатор «I >», расположенный в правой нижней части стенда.

Наборная панель, расположенная справа от генератора напряжений, служит для расположения на ней мини-блоков в соответствии со схемой данного опыта.

Гнезда на этой панели соединены в узлы, как показано на ней линиями. Поэтому часть соединений выполняется автоматически при установке мини-блоков в гнезда панели. Остальные соединения выполняются проводами и перемычками. Так, на фрагменте цепи, показанной на рис. 5.2, напряжение от фазы С трёхфазного источника подводится с помощью перемычки к одной из обмоток трансформатора. К другой обмотке подключены резистор и конденсатор, соединённые последовательно.

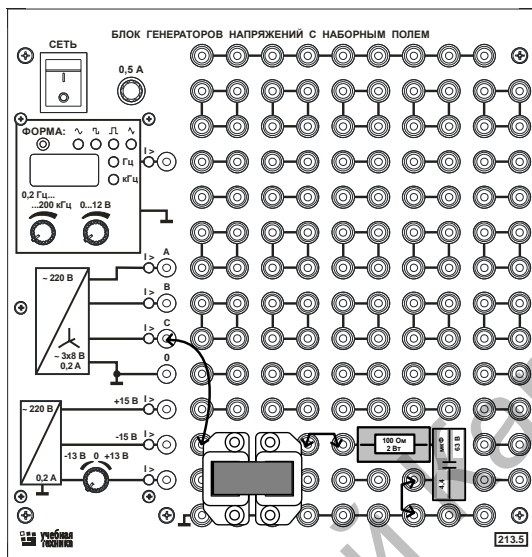


Рисунок 5.2

Для измерения токов в ветвях цепи удаляется одна из перемычек и в образовавшийся разрыв включается амперметр.

Для измерения напряжений на элементах цепи параллельно рассматриваемому элементу включается вольтметр.

Набор мини-блоков

Мини-блоки представляют собой отдельные элементы электрических цепей (резисторы, конденсаторы, индуктивности, диоды, транзисторы и т.п.), помещённые в прозрачные корпуса, имеющие штыри для соединения с гнездами наборной панели. Некоторые мини-блоки содержат несколько элементов, соединённых между собой, или более сложные функциональные блоки. На этикетках мини-блоков изображены условные обозначения элементов или упрощённые электрические схемы их соединения, показано расположение выводов и приведены основные технические характеристики. Мини-блоки хранятся в специальном контейнере. Общий вид контейнера с мини-блоками представлен на рис. 5.3 и 5.4.

Характеристики одноэлементных мини-блоков:

1. Резисторы с номинальными значениями: 2 Ом – 1 шт.; 2,2 Ом – 1 шт.; 4,7 Ом – 1 шт.; 10 Ом – 1 шт.; 22 Ом – 1 шт.; 33 Ом; 47 Ом – 1 шт.; 100 Ом – 2 шт.; 150 Ом – 1 шт.; 220 Ом – 1 шт.; 330 Ом – 1 шт.; 470 Ом – 2 шт.; 1 кОм – 3 шт.; 2,2 кОм – 1 шт.; 4,7 кОм – 1 шт.; 10 кОм – 2 шт.; 22 кОм – 1 шт.; 47 кОм – 1 шт..
2. Конденсаторы с номинальными значениями: 0,01 мкФ – 1 шт.; 0,1 мкФ – 1 шт.; 0,22 мкФ – 1 шт.; 0,47 мкФ – 1 шт.; 1 мкФ – 2 шт.; 4,4 мкФ – 1 шт. (2 шт. по 2,2 мкФ); 10 мкФ – 1 шт.; 100 мкФ – 1 шт.; 470 мкФ – 1 шт..
3. Потенциометр СП4-2М 1 кОм – 1 шт.
4. Лампа сигнальная СМН-10 55 – 1 шт.
5. Стабилитрон КС456А, 5,6 В – 6 шт.
6. Светодиод АЛ 307 Б – 6 шт.
7. Диоды КД 226 (1N5408) 1А, 100 В – 1 шт.
8. Микропереключатель (тумблер) – 1 шт.
9. Мини-блоки «Амперметр» – 1 шт.
10. Индуктивности: 33 мГн, 50 мА (09P333J); 100 мГн, 50 мА (3 шт. 09P333J) – 1 шт.
11. Транзистор биполярный КТ503Г (вывод базы справа) – 1 шт.
12. Мини-блок «Трансформатор» – 1.
13. Транзистор биполярный КТ503Г (вывод базы слева) – 1.
14. Мини-блок «Трансформатор» – 1.

Характеристики сложных мини-блоков:

1. **Мини-блок «Трансформатор».** Трансформатор выполнен на разъемном U-образном сердечнике из электротехнической стали с толщиной листа 0,08 мм. Сечение сердечника 16×12 мм. На сердечнике установлены катушки 900 и 300 витков. Номинальные параметры трансформатора при частоте 50 Гц приведены в табл. 5.1. Если между половинками сердечника вставить полоски бумаги (немагнитный зазор), то устройство можно использовать в качестве дросселя.

Т а б л и ц а 5.1

Номинальные параметры трансформатора при частоте 50 Гц

W (кол. витков)	$U_n, В$	$I_n, мА$	R, Ом	$S_n, ВА$
300	7	200	4,8	1,4
900	21	66,7	37	1,4

2. **Мини-блок «140УД608»** содержит операционный усилитель КР140УД608 или импортный аналог ОР-07С, подстроенный резистор для балансировки и два диода, защищающие микросхему от подачи обратного напряжения питания.

Основные характеристики: напряжение питания +15 В, потребляемый ток < 5 мА, входной ток < 7 нА, напряжение смещения < 150 мкВ, коэффициент усиления > 27000, частота единичного усиления > 0,3 МГц.

Блок мультиметров

Блок мультиметров предназначен для измерения напряжений, токов, сопротивлений, а также для проверки диодов и транзисторов. Общий вид блока представлен на рис. 5.5. В нём установлены 2 серийно выпускаемых мультиметра МУ60, МУ62 или МУ64. Подробная техническая информация о них и правила применения приводится в руководстве по эксплуатации изготовителя. В блоке установлен источник питания мультиметров от сети с выключателем и предохранителем на 1 А. На лицевую панель блока вынесены также четыре предохранителя защиты токовых цепей мультиметров.

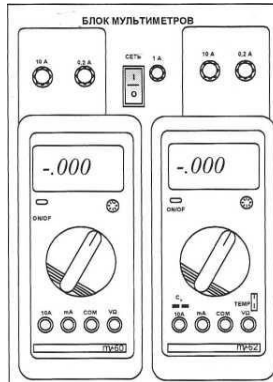


Рисунок 5.5

Для обеспечения надёжной длительной работы мультиметров соблюдайте следующие правила:

Не превышайте допустимых перегрузочных значений, указанных в заводской инструкции для каждого рода работы.

Когда порядок измеряемой величины неизвестен, устанавливайте переключатель пределов измерения на наибольшую величину.

Перед тем, как повернуть переключатель для смены рода работы (не для изменения предела измерения!), отключайте щупы от проверяемой цепи.

Не измеряйте сопротивление в цепи, к которой подведено напряжение.

Не измеряйте ёмкость конденсаторов, не убедившись, что они разряжены.

Будьте внимательны при измерении тока мультиметрами МУ62 и МУ64. Предохранитель 0,2 А этих мультиметров может перегореть от источников напряжения, имеющих в данном стенде. Мультиметр МУ60 защищён предохранителем 2 А, который не может перегореть от токов, создаваемых источниками данного стенда.

До подключения мультиметра к цепи необходимо выполнить следующие операции:

- выбрать измеряемую величину: – V, ~ V, – A, ~ A или \square ;
- выбрать диапазон измерений соответственно ожидаемому результату измерений;
- правильно подсоединить зажимы мультиметра к исследуемой цепи.

Присоединение мультиметра как вольтметра, амперметра и омметра показано на рис. 5.6.

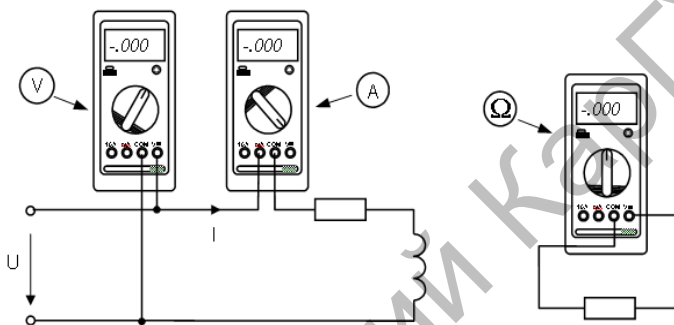




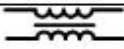
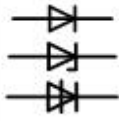

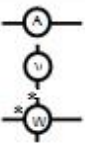



Рисунок 5.6

Условные обозначения основных элементов электрических цепей приведены в таблице 5.2.

Т а б л и ц а 5.2

Наименование элемента	Условное обозначение	Наименование элемента	Условное обозначение
1	2	3	4
Источники электрической энергии		Проводники электрической цепи:	
источник напряжения (ЭДС) постоянного тока (идеальный)		одиночный	
гальванический элемент или аккумулятор		пересекающиеся, несоединенные	
источник напряжения (ЭДС) синусоидального тока		пересекающиеся, соединенные	

Наименование элемента	Условное обозначение	Наименование элемента	Условное обозначение
1	2	3	4
Резисторы: Постоянный линейный Переменный линейный Нелинейный		Выключатели: однополюсные двухполюсные	
Индуктивности: Линейная Со магнитопроводом		Конденсаторы: Общее обозначение Нелинейный	
Трансформатор		Диоды и тиристоры: Выпрямительный диод Стабилитрон Диодный тиристор	
Транзистор: Биполярный		Измерительные приборы: амперметр вольтметр ваттметр	
Лампы накаливания: Светильная сигнальная			

Описание комплекта типового лабораторного оборудования «Основы цифровой техники»

Комплект типового лабораторного оборудования «Основы цифровой техники» предназначен для приобретения навыков сборки и тестирования комбинационных и последовательностных логических цепей, собранных из стандартных элементов транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ) – серий КР1533 или 74ALS.

Блок испытания цифровых устройств

Блок испытания цифровых устройств включает:

1. Источник питания +5 В/1 А с защитой от перегрузок и коротких замыканий.

2. Индикатор логических уровней.

3. Источники логических сигналов ТТЛ.

4. Наборное поле с разводкой шин питания.

Образ лицевой панели блока испытания цифровых устройств приведен на рис. 5.7.

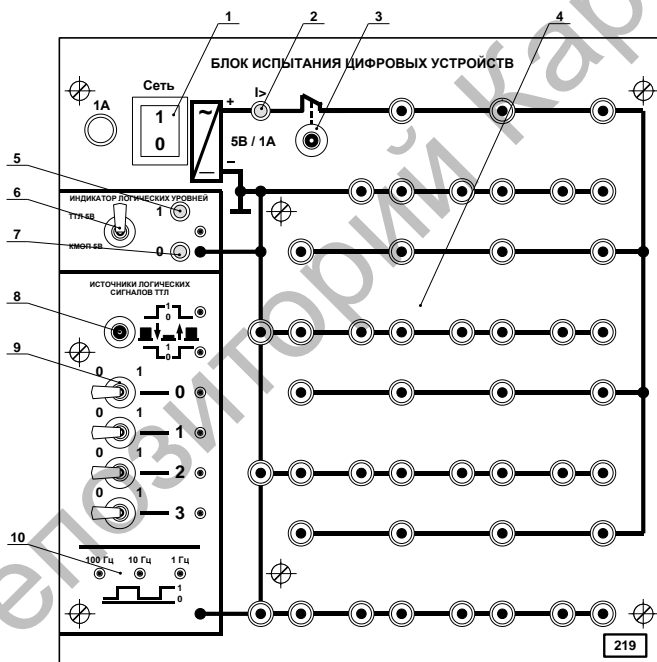


Рисунок 5.7

Источник питания

Источник питания подает напряжения +5 В на индикатор логических уровней, источники логических сигналов ТТЛ и

гнезда наборного поля. Установка мини-блока в гнезда наборного поля автоматически подключает мини-блок к общим шинам питания блока испытания цифровых устройств. При этом сборка логической цепи сводится к соединению выходов и входов логических элементов, источников и индикаторов логических сигналов, уже имеющих общую цепь питания.

Сборку цепей необходимо выполнять при отключенном питании блока испытания цифровых устройств, т.е. при отключенном выключателе 1 («Сеть»). Включать выключатель 1 («Сеть») следует только после сборки и проверки цепи. Если ток нагрузки источника питания превысит 1,3...1,5 А или произойдет короткое замыкание, напряжение питания будет отключено и сработает индикатор перегрузки 2 («I>»). Если после устранения причины перегрузки питание не восстановится автоматически, т.е. не погаснет индикатор 2 («I>»), то необходимо нажать и отпустить кнопку 3.

Индикатор логических уровней

Индикатор логических уровней отображает состояние подключенного к его входу логического сигнала. Для подключения индикатора достаточно одного провода, т.к. он имеет общую цепь питания с остальными частями блока испытания цифровых устройств. Свечение красного светодиода 5 указывает, что входной сигнал соответствует уровню логической 1 (2...5 В для элементов ТТЛ или 3,5...5 В для элементов КМОП). Зеленый светодиод 7 соответствует уровню логического 0 (0...0,8 В для элементов ТТЛ или 0...1,5 В для элементов КМОП логики). Если светодиоды не светятся, уровень логического сигнала не соответствует ни 0, ни 1. Свечение обоих светодиодов свидетельствует о постоянном переключении сигнала между уровнями 0 и 1. Пороги срабатывания индикаторов (ТТЛ/КМОП) определяются положением переключателя 6.

Источники логических сигналов ТТЛ

Логические сигналы на выходах источников 8, 9 и 10 соответствуют уровням ТТЛ элементов. Источники логических сигналов имеют общую цепь питания с наборным полем и

индикатором логических уровней. Поэтому для их подключения достаточно использовать один провод, соединяющий выход источника с входами логических элементов.

Кнопка 8 управляет двумя логическими сигналами, переключающимися в противофазе. Специальные цепи устраняют дребезг механических контактов кнопки, поэтому данные сигналы необходимо использовать для надежного управления последовательностными схемами (триггерами, счетчиками и т.п.).

Группа четырех тумблеров 9 предназначена для задания статических логических сигналов и не имеет цепей устранения дребезга контактов.

Генератор 10 вырабатывает импульсы с частотами 100, 10 и 1 Гц и скважностью 0,5.

Набор мини-блоков

Общий вид спереди набора мини-блоков приведен на рис. 5.8.

1 – Мини-блок, содержащий два логических элемента И. Микросхема КР1533ЛИ1 (74ALS08).

2 – Мини-блок, содержащий два логических элемента ИЛИ. Микросхема КР1533ЛЛ1 (74ALS32).

3 – Мини-блок, содержащий четыре логических элемента НЕ. Микросхема КР1533ЛН1 (74ALS04).

4 – Мини-блок, содержащий два логических элемента И-НЕ. Микросхема КР1533ЛА3 (74ALS00).

5 – Мини-блок, содержащий два логических элемента ИЛИ-НЕ. Микросхема КР1533ЛЕ1 (74ALS02).

6 – Мини-блок, содержащий два логических элемента Искл.-ИЛИ. Микросхема КР1533ЛП5 (74ALS86).

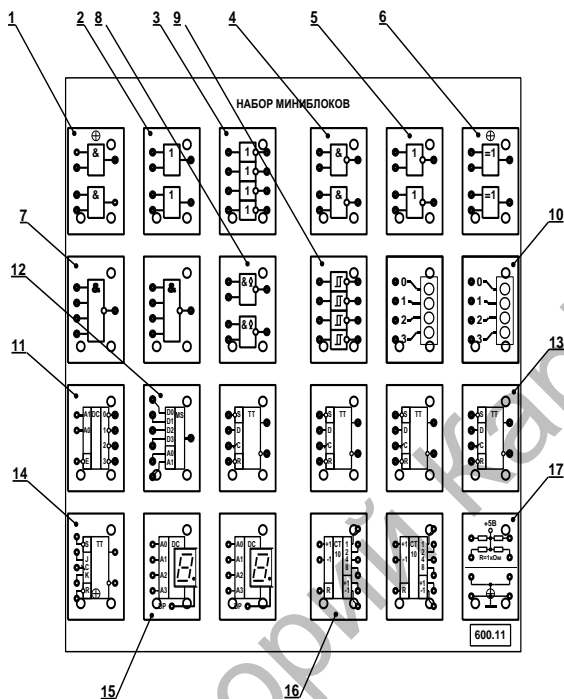


Рисунок 5.8

7 – Мини-блок, содержащий логический элемент И-НЕ (4 входа). Микросхема КР1533ЛА1 (74ALS20).

8 – Мини-блок, содержащий два логических элемента И-НЕ с открытым коллектором. Микросхема КР1533ЛА9 (74ALS03).

9 – Мини-блок, содержащий индикатор логических уровней со светодиодами (КР1533ЛА9, 74ALS03). Свечение индикатора соответствует логической 1 на соответствующем входе мини-блока.

10 – Мини-блок, содержащий цепи подключения входов микросхем к шинам питания.

Схема электропитания лабораторного оборудования

При выполнении всех лабораторных работ блок испытания цифровых устройств А1 для повышения электробезопасности

подключается к сети через однофазный источник питания G1, включающий устройство защитного отключения, в соответствии со схемой, приведенной на рис. 5.9.

При выполнении лабораторной работы необходимо соблюдать следующий порядок подачи питания на исследуемую цепь:

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электропитания (рис. 5.9).
- Соберите исследуемую логическую цепь на наборном поле блока испытания цифровых устройств A1.
- Включите устройство защитного отключения и автоматический выключатель в однофазном источнике питания G1.
- Включите выключатель «СЕТЬ» блока испытания цифровых устройств A1.
- Протестируйте работу логической схемы. При необходимости изменения исследуемой схемы отключите выключатель «СЕТЬ» блока испытания цифровых устройств A1, измените схему, включите выключатель «СЕТЬ».
- По завершении работы отключите выключатель «СЕТЬ» блока испытания цифровых устройств A1 и автоматический выключатель в однофазном источнике питания G1.

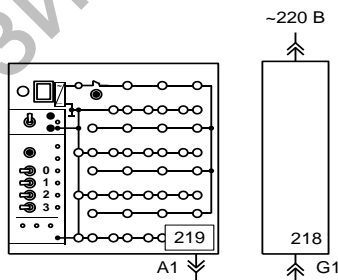


Рисунок 5.9 Схема электропитания блока испытания цифровых устройств

5.2 Лабораторная работа «Исследование характеристик полупроводниковых диодов на постоянном и переменном токах»

Цель работы: ознакомление с основными параметрами полупроводниковых диодов и снятие экспериментальным путем их вольтамперных характеристик.

Задание

Снять вольтамперные характеристики выпрямительного диода (типа КД226, 1N5408), импульсного диода (типа КД521, КД522, 1N4148), диода Шоттки (типа 1N5819), по характеристикам определить основные параметры и сравнить их. На экране осциллографа пронаблюдать процессы включения и выключения диода, определить время включения и выключения.

Порядок выполнения эксперимента

1. Соберите цепь (рис. 5.10, а) для снятия прямой ветви вольтамперной характеристики диодов. Монтажная схема изображена на рис. 5.11. *Обратите внимание, что вольтметр по этой схеме подключён к точке «В» (после амперметра) и на его показания не влияет падение напряжения на амперметре, которое соизмеримо с прямым падением напряжения на диоде. В то же время ток через вольтметр несоизмеримо мал с прямым током диода и не вносит заметной погрешности в показания амперметра.*

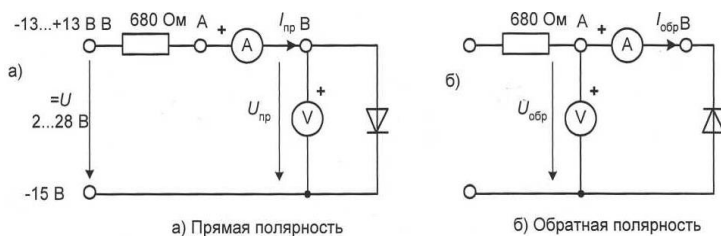


Рисунок 5.10

- Устанавливая токи, указанные в табл. 5.3, снимите прямую ветвь вольтамперной характеристики сначала выпрямительного диода, затем импульсного и, наконец, диода Шоттки. По результатам измерений постройте графики вольтамперных характеристик.

- Измените схему для снятия обратной ветви вольтамперных характеристик, переключив вольтметр в точку А (до амперметра) и перевернув диод. **В этой схеме через амперметр не протекает ток вольтметра, который теперь соизмерим и даже больше обратного тока через диод. В то же время падение напряжения на амперметре ничтожно мало по сравнению с обратным напряжением на диоде.**

- Устанавливая напряжения, указанные в табл. 5.4, снимите обратную ветвь вольтамперной характеристики диода Шоттки. Убедитесь, что обратный ток выпрямительного и импульсного диодов настолько мал, что его невозможно измерить приборами, имеющимися в стенде.

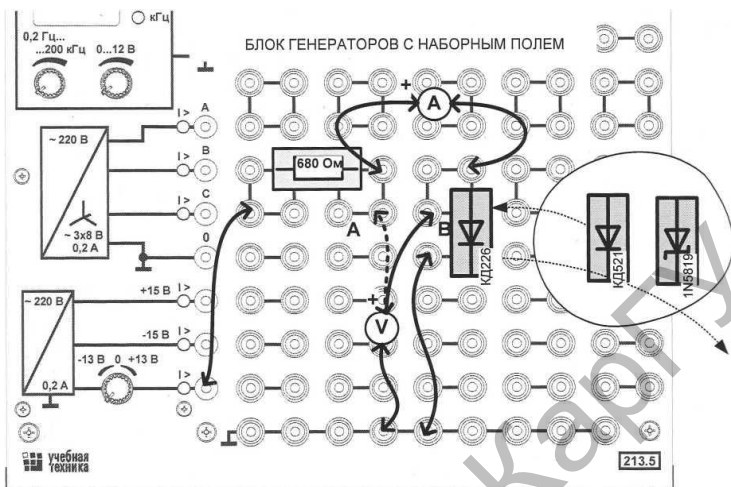


Рисунок 5.11

Т а б л и ц а 5.3

Прямая ветвь

I, mA		0,1	0,2	0,5	0,75	1	1,5	2	5	10
U, V	КД226									
	КД522									
	1N5819									

Т а б л и ц а 5.4

Обратная ветвь

U, V		2	5	10	15	20	25	30
$I, \text{мкА}$	КД226							
	КД521							
	1N5819							

- По таблицам 5.3 и 5.4 построить вольтамперную характеристику диода.

До подключения мультиметра к цепи необходимо выполнить следующие операции:

- Для исследования характеристик диодов на переменном токе соберите на наборном поле цепь согласно электрической схеме рис. 5.12. Измерительные приборы в схему не включайте, так как они могут создать дополнительные паразитные ёмкости. Не забудьте включить инвертирование сигнала по каналу II, чтобы отклонение луча вверх соответствовало прямому току через диод.

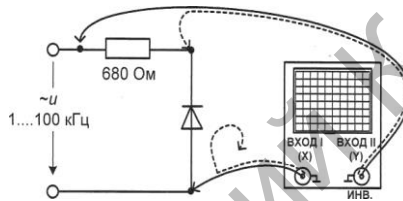


Рисунок 5.12

- Для начала включите в цепь выпрямительный диод, подайте на вход синусоидальное напряжение частотой 1 кГц, установите ручку регулятора амплитуды примерно в среднее положение (4 ... 6 В) и отрегулируйте развертку, синхронизацию и усиление по двум каналам осциллографа так, чтобы на экране помещались 1,5 ... 2 периода кривых тока и напряжения.

- Переключая множитель развертки осциллографа $\times 1$, $\times 10$, $\times 100$ и регулируя каждый раз длительность развёртки осциллографа, наблюдайте за изменением кривой тока. Объясните результаты (*имейте в виду, что в положении множителя $\times 100$ выходное напряжение генератора снижается примерно в 2 раза*).

- Переключите осциллограф в режим X-Y. При этом на экране появится изображение динамической вольтамперной характеристики диода: прямой ток по оси Y вверх, прямое падение напряжения – по оси X вправо.

- Снова попереключайте множитель частоты, наблюдая за изменением динамической вольтамперной характеристики. Объясните, почему при низкой частоте динамическая вольтамперная характеристика совпадает со статической, а при высокой – не совпадает.

- Попробуйте повторить эти опыты с импульсным диодом и с диодом Шоттки. Объясните отличия.

- Снова включите в цепь выпрямительный диод, переключите осциллограф в режим развёртки и установите на входе прямоугольное двухполярное напряжение частотой примерно 40 ... 50 кГц и небольшой амплитуды (2 ... 3 В), для исключения возможных искажений на высоких выходных напряжениях генератора.

- Настройте изображение, перерисуйте осциллограмму в отчёт, не забыв указать масштабы по осям (масштаб по оси тока вычисляется как масштаб напряжения по каналу II, делённый на сопротивление, с которого снимается сигнал).

- Определите по осциллограмме время включения $t_{\text{вкл}}$ и время выключения $t_{\text{выкл}}$.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Электрические схемы проводимых измерений.
3. Таблицы с результатами измерений.
4. Вольтамперные характеристики.
5. Результаты графоаналитических анализов.
6. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Принципы формирования полупроводников с n- и p-типами проводимости.

2. Как происходит формирование обедненной свободными носителями заряда области в p-n-переходе?
3. Как изменяется электрический потенциал в области p-n-перехода?
4. Чем определяется концентрация носителей заряда в беспримесных и легированных полупроводниках?
5. Перечислите основные параметры диодов.
6. Как зависит прямое напряжение на диоде от температуры?
7. Как зависит обратный ток диода от температуры?
8. С какой целью соединяют полупроводниковые диоды последовательно?
9. Какие типы диодов существуют? Каково их применение на практике?
10. Почему у диода Шоттки пороговое напряжение меньше, чем у выпрямительного диода и импульсного диода, а обратный ток больше?
11. Какой из диодов имеет наименьшее быстродействие и почему?
12. Чем отличается вольтамперная характеристика диода, снятая при высокой частоте, от статической характеристики?

5.3 Лабораторная работа «Определение основных характеристик стабилитрона и исследование параметрического стабилизатора напряжения»

Цель работы: ознакомиться с принципом работы стабилитрона и исследование вольтамперных характеристик стабилитрона.

Задание

Снять с помощью осциллографа вольтамперную характеристику и определить напряжение стабилизации $U_{ст}$ стабилитрона. Исследовать зависимость выходного

напряжения и тока стабилитрона от входного напряжения в цепи параметрического стабилизатора напряжения.

Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь согласно электрической схеме (рис. 5.13) или монтажной (рис. 5.14). Подайте на вход синусоидальное напряжение от генератора напряжения специальной формы частотой 0,5... 1 кГц максимальной амплитуды.

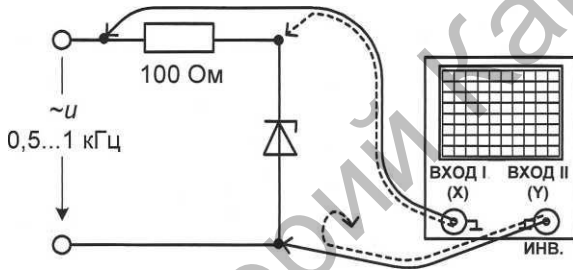


Рис. 5.13

- Включите и настройте осциллограф в режиме X-Y. Включите инвертирование вертикального входа.

- Перенесите изображение с экрана осциллографа на график (рис.5.15).

- Определите по осциллограмме напряжение стабилизации, напряжение на стабилитроне при прямом токе, дифференциальное сопротивление в середине диапазона стабилизации.

- Увеличьте частоту в 10 раз и посмотрите, как изменится вольтамперная характеристика. Объясните, почему.

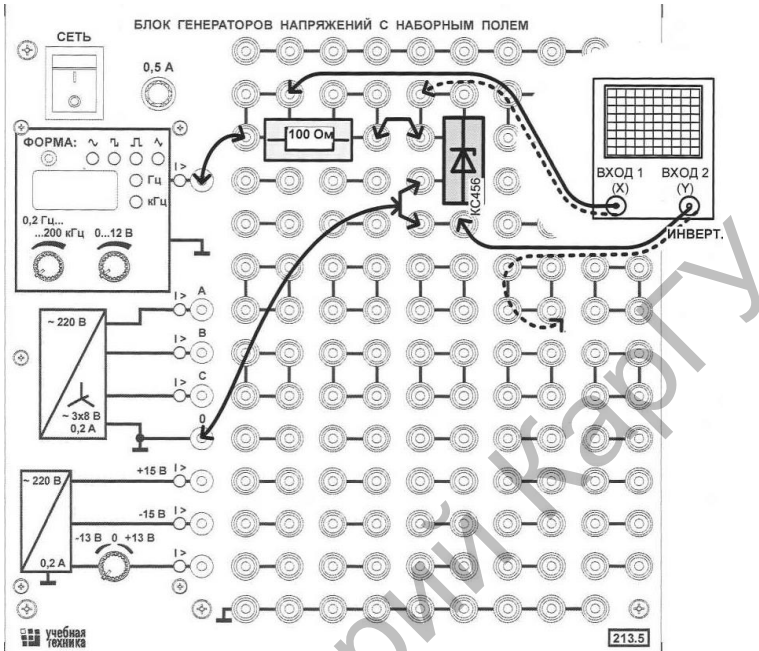


Рис. 5.14

Масштабы

По каналу X: $m_I = m_U/R_{ш} =$ мА/дел

По каналу Y: $m_U =$ В/дел.

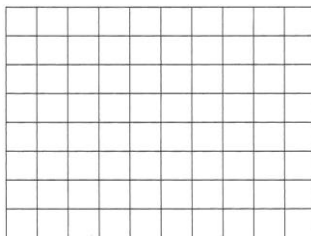


Рис. 5.15

Из осциллограммы:

$U_{СТ} = \dots\dots\dots В;$

$U_{ПР} = \dots\dots\dots В.$

$R_{диф} = \dots\dots\dots Ом.$

• Соберите цепь параметрического стабилизатора согласно электрической схеме (рис. 5.16), сначала не включая в неё сопротивление нагрузки.

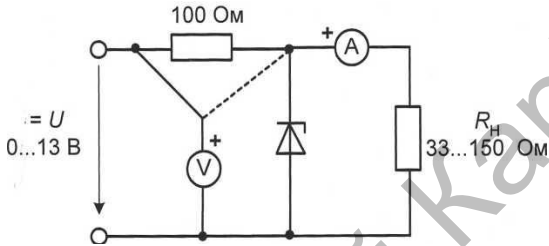


Рис. 5.16

• Включите генератор напряжений и, изменяя постоянное напряжение на входе стабилизатора от 0 до максимального значения 13 ... 14 В, снимите зависимость выходного напряжения от входного на холостом ходу. Результаты записывайте в табл. 5.4.

Таблица 5.4

$U_{ВХ},$ В	0	2	4	6	8	10	12	
$U_{ВЫХ},$ В								

• Установите максимальное напряжение на входе и, включая различные сопротивление нагрузки, согласно табл. 5.5, снимите зависимость выходного напряжения стабилизатора от тока нагрузки.

Таблица 5.5

$R_H,$ ОМ	∞	150	100	47+22	47+10	47	33+10	33
$I_H,$ МА	0(х.х.)							
$U_{\text{ВЫХ}},$ В								

На рис. 5.17,а и б постройте графики $U_{\text{ВЫХ}}(U_{\text{ВХ}})$ и $U_{\text{ВЫХ}}(I_H)$.

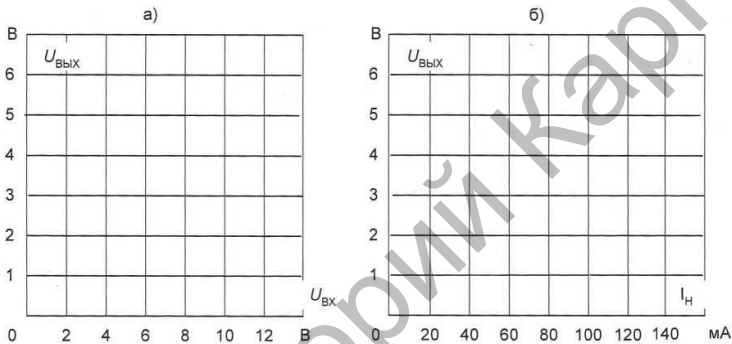


Рис. 5.17

На графиках укажите минимально допустимое входное напряжение, максимально допустимый ток нагрузки и определите коэффициенты стабилизации по напряжению и по току, приняв $U_{\text{ВХ НОМ}} = 8 \text{ В}$ и $I_{\text{Н НОМ}} = 80 \text{ МА}$.

$$K_{\text{СТ } U} = \frac{\Delta U_{\text{ВХ}}}{U_{\text{ВХ НОМ}}} : \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВЫХ НОМ}}} = \frac{\delta U_{\text{ВХ}}}{\delta U_{\text{ВЫХ}}} = \dots$$

$$K_{\text{СТ } I} = \frac{\Delta I_{\text{Н}}}{I_{\text{Н НОМ}}} : \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВЫХ НОМ}}} = \frac{\delta I_{\text{Н}}}{\delta U_{\text{ВЫХ}}} \dots$$

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Упрощенные схемы исследований.
3. Таблицы с результатами измерений.
4. Вольтамперные характеристики.
5. Результаты графоаналитических анализов.
6. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Как изменяется вольтамперная характеристика стабилитрона при увеличении частоты и почему?
2. Напряжение питания параметрического стабилизатора напряжения 10 В, напряжение стабилизации стабилитрона 5,6 В, ток стабилизации – от 3 до 160 мА, сопротивление нагрузки – 100 Ом. Определите величину балластного сопротивления так, чтобы в нормальном режиме ток через стабилитрон был равен 80 мА.
3. Какой вид имеет ВАХ стабилитрона?
4. В каких пределах ВАХ прямой ветви стабилитрона можно считать линейной?
5. Есть ли на обратной ветви стабилитрона участки > 1 В, которые можно аппроксимировать линейной зависимостью?
6. Как следует расставить точки по напряжению, чтобы снять обратную ветвь ВАХ стабилитрона?

5.4 Лабораторная работа «Исследование диода с переменной ёмкостью (варикапа)»

Цель работы: ознакомление с основными параметрами и характеристиками варикапов.

Задание

Снять с помощью осциллографа вольтамперную характеристику варикапа. В параллельном резонансном контуре изучить зависимость резонансной частоты от обратного напряжения варикапа и влияние этого напряжения на емкость обедненного (запирающего) слоя.

Порядок выполнения работы

- Р-n-переход запирающего кремниевого диода подобен диэлектрику конденсатора. Приложенное обратное напряжение влияет на толщину р-n-перехода и, соответственно, на емкость запирающего слоя. Для измерения этой ёмкости в работе используется резонансный метод в параллельном резонансном контуре. В работе нужно учесть также собственную ёмкость катушки индуктивности, которая соизмерима с ёмкостью варикапа. Она определяется по собственной резонансной частоте катушки индуктивности и затем вычитается из общей резонансной ёмкости.

- Соберите цепь согласно электрической схеме (рис. 5.18). На горизонтальный вход (X) подайте напряжение с варикапа, а на вертикальный (Y) – напряжение с сопротивления, пропорциональное току. Включите инвертирование канала Y, чтобы положительному току соответствовало отклонение луча осциллографа вверх.

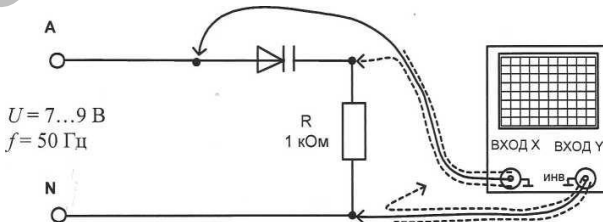


Рисунок 5.18

- Перерисуйте осциллограмму на график.
- Соберите цепь параллельного резонансного контура согласно электрической схеме (рис. 5.19) или монтажной (рис. 5.20). Конденсатор $C = 0,22$ мкФ служит для исключения пути протекания постоянного тока через катушку и ввиду большой емкости не влияет на параметры резонансного контура.
- Установите частоту напряжения генератора синусоидальной формы между 10 и 20 кГц и максимальную амплитуду. Включите и настройте осциллограф, который служит в данном опыте для измерения напряжения высокой частоты.

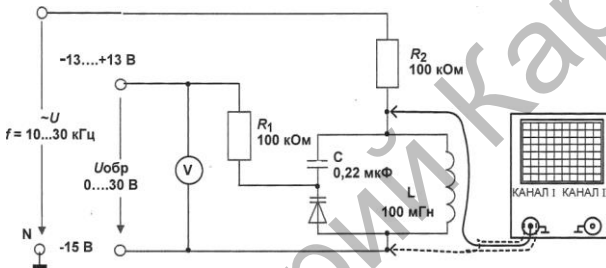


Рисунок 5.19

- Постройте график изменения резонансной частоты от обратного напряжения варикапа.
- Вычислите общую ёмкость резонансной цепи по измеренным резонансным частотам и индуктивности по формуле:

$$C = \frac{10^{-12}}{(2\pi f_{рез})^2 L},$$

где C – общая емкость цепи в пФ,
 L – индуктивность катушки в Гн,
 $f_{рез}$ – резонансная частота в Гц.

- Определите собственную ёмкость катушки. Для этого уберите из цепи диод и конденсатор и снова подберите и измерьте резонансную частоту. Собственную ёмкость катушки определите по такой же формуле:

$$C_{кат} = \frac{10^{-12}}{(2\pi f_{рез})^2 L} \text{ пФ.}$$

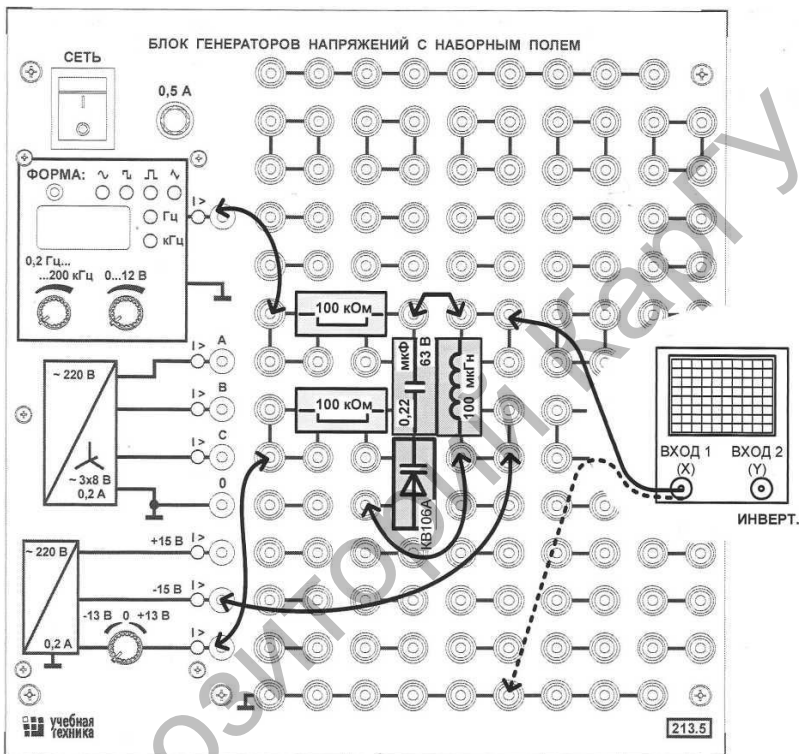


Рисунок 5.20

- Определите ёмкость варикапа как разность общей ёмкости при каждом значении обратного напряжения и неизменной собственной ёмкости катушки:

$$C_{вар} = C - C_{кат}.$$

- Занесите значения емкости варикапа в табл. 5.6. Затем постройте зависимость его емкости $C_{вар}$ от обратного напряжения $U_{ОБР}$.

Т а б л и ц а 5.6

$U_{обр}, В$	$f_{рез}, кГц$	$L, мГн$	$C, пФ$	$C_{ВАР}, пФ$
2				
5				
10				
15				
20				
25				
30				

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Упрощенные схемы исследований.
3. Таблицы с результатами измерений.
4. Вольтамперные характеристики.
5. Результаты графоаналитических анализов.
6. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Какие полупроводниковые диоды называют варикапами?
2. Назначение варикапов, нарисовать пример применения варикапа, пояснить принцип его работы.
3. Перечислить основные параметры варикапов.
4. Как изменится емкость варикапа при увеличении обратного напряжения?
5. Что такое варактор?
6. Можно ли использовать в качестве варикапа обычный полупроводниковый диод или, например, коллекторный (эмиттерный) переход биполярного транзистора?

7. Как экспериментально снять вольтфарадную характеристику варикапа?
8. Как определить полосу пропускания контура?
9. Что такое добротность, как она определяется для варикапа и резонансного контура?
10. Как в лабораторной работе снималась зависимость добротности контура в полосе рабочих частот?
11. Какова величина порогового напряжения варикапа?
12. Как ведет себя емкость запорного слоя при увеличении обратного напряжения и почему?
13. Как изменяется вольтамперная характеристика стабилитрона при увеличении частоты и почему?
14. Напряжение питания параметрического стабилизатора напряжения 10 В, напряжение стабилизации стабилитрона 5,6 В, ток стабилизации – от 3 до 160 мА, сопротивление нагрузки – 100 Ом. Определите величину балластного сопротивления так, чтобы в нормальном режиме ток через стабилитрон был равен 80 мА.
15. Какой вид имеет ВАХ стабилитрона?
16. В каких пределах ВАХ прямой ветви стабилитрона можно считать линейной?
17. Есть ли на обратной ветви стабилитрона участки > 1 В, которые можно аппроксимировать линейной зависимостью?
18. Как следует расставить точки по напряжению, чтобы снять обратную ветвь ВАХ стабилитрона?

5.5 Лабораторная работа «Исследование однополупериодной и мостовой схем выпрямления»

Цель работы: исследование однофазного однополупериодного и мостового выпрямителей.

Задание

Исследовать экспериментально основные параметры однополупериодного и двухполупериодного выпрямителей.

Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь согласно схеме (рис. 5.21) и монтажной (рис. 5.22) сначала без сглаживающего фильтра ($C = 0$). Включите мультиметры: V1 – для измерения действующего значения синусоидального напряжения, V2 – для измерения постоянного напряжения.

- Включите и настройте осциллограф. Установите развертку 5 мс/дел.

- Сделайте измерения и запишите в табл. 5.7 значения: $U_{вх}$ – по мультиметру V1, U_d – по мультиметру V2, U_{dmax} и U_{dmin} – по осциллографу, $m = f_{пульс}/f_{вх}$.

- Рассчитайте и запишите в табл. 5.7 значения $U_d/U_{вх}$, U_{max} и $k_{пульс}$.

- Параллельно нагрузочному резистору R_H подключите сглаживающие конденсаторы C с емкостями, указанными в табл. 5.7 (**не ошибитесь с полярностью при подключении электролитических конденсаторов!**), повторите измерения и вычисления.

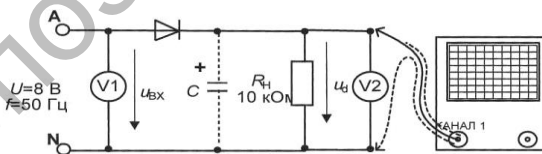


Рисунок 5.21

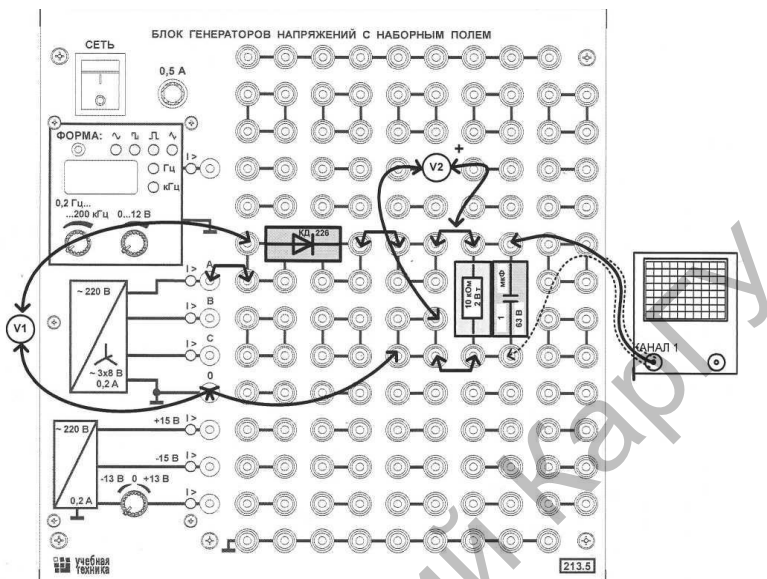


Рисунок 5.22

Т а б л и ц а 5.7

C , мкФ	0	1	10	100
$U_{вх}$, В				
U_d , В				
U_{dmax} , В				
U_{dmin} , В				
m				
$U_d / U_{вх}$				
$U_{max\sim}$				
$k_{пульс}$				

• Соберите цепь двухполупериодного мостового выпрямителя (рис. 5.23), повторите все измерения и вычисления. Результаты сведите в табл. 5.8.

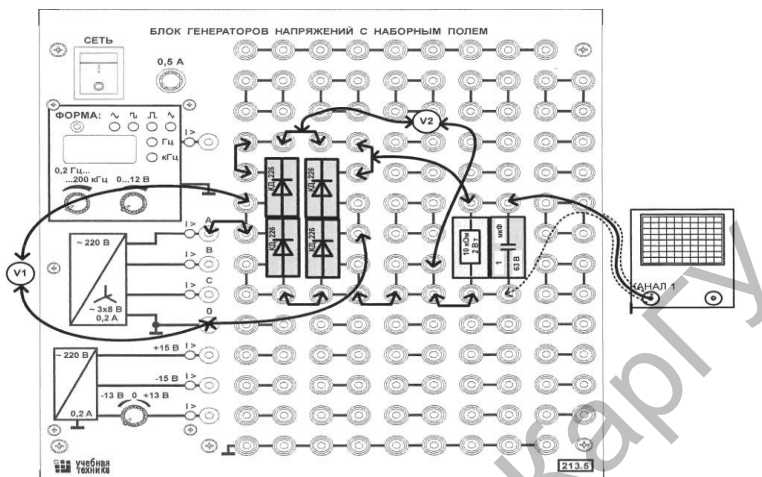


Рисунок 5.23

Т а б л и ц а 5.8

$C, \text{ мкФ}$	0	1	10	100
$U_{\text{вх}}, \text{ В}$				
$U_{\text{д}}, \text{ В}$				
$U_{\text{dmax}}, \text{ В}$				
$U_{\text{dmin}}, \text{ В}$				
m				
$U_{\text{д}} / U_{\text{вх}}$				
$U_{\text{max}\sim}$				
$k_{\text{пульс}}$				

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Упрощенные схемы исследований.
3. Таблицы с результатами измерений.

4. Вольтамперные характеристики.
5. Результаты графоаналитических анализов.
6. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Что называется процессом выпрямления и сглаживания?
2. Какие бывают типы выпрямительных устройств, из каких частей они состоят и какие схемы выпрямления исследуются в работе?
3. Какие типы вентилях вам известны, какие из них исследуются в работе, их марки, условные графические изображения и основные параметры?
4. Основные показатели выпрямительного устройства. Какая зависимость называется внешней характеристикой? Как она снимается?
5. Как будет отличаться внешняя характеристика выпрямителя без фильтра от внешней характеристики с емкостным фильтром и почему?
6. Чем отличается П-образный фильтр от Г-образного и в чем его преимущество?
7. Какой вид имеют осциллограммы напряжения на нагрузке двухполупериодного выпрямителя: а) без фильтра; б) с емкостным фильтром; в) с Г-образным LC-фильтром?
8. Покажите на схеме стенда часть вторичной обмотки трансформатора, напряжение, с которой подается на мостовую схему выпрямления.
9. Объясните, почему на стенде для мостовой схемы в каждом плече включено два диода последовательно и для чего они зашунтированы сопротивлениями.

5.6 Лабораторная работа «Исследование трёхфазной мостовой схемы выпрямления и сглаживающих фильтров»

Цель работы: исследование неуправляемого трехфазного выпрямителя с нулевым выводом и трехфазного мостового выпрямителя (схема Ларионова).

Задание

Выпрямить выходное напряжение трехфазного источника посредством трехфазного мостового выпрямителя. Измерить параметры выпрямителя и сравнить с параметрами однофазных выпрямителей. Исследовать влияние индуктивного, ёмкостного и ёмкостно-индуктивного фильтров на форму выпрямленного напряжения при различных сопротивлениях нагрузки.

Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь трехфазного мостового выпрямителя согласно монтажной схеме (рис. 5.24). На схеме (рис. 5.24) $V1$ – мультиметр для измерения действующего значения синусоидального напряжения, $V2$ – мультиметр для измерения постоянного (выпрямленного) напряжения. Сопротивление нагрузки R_N состоит из двух последовательно соединённых резисторов – постоянного 100 Ом и переменного 1000 Ом – и в первом опыте может быть любым – от 100 до 1100 Ом. В качестве индуктивности используйте катушку трансформатора 900 витков, вставив между половинками сердечника полоски обычной писчей бумаги в один-два слоя, чтобы в магнитопроводе образовался немагнитный зазор. В первом опыте $C = 0$ и $L = 0$ (на монтажной схеме конденсатор отсутствует, а перемычка П1 находится в исходном положении, показанном сплошной

линией). Для наблюдения формы выпрямленного напряжения в схему включён осциллограф.

- Подайте на вход схемы переменное трехфазное напряжение максимальной величины, которую может дать источник, включите осциллограф и установите развертку 5 мс/дел, отрегулируйте усиление.

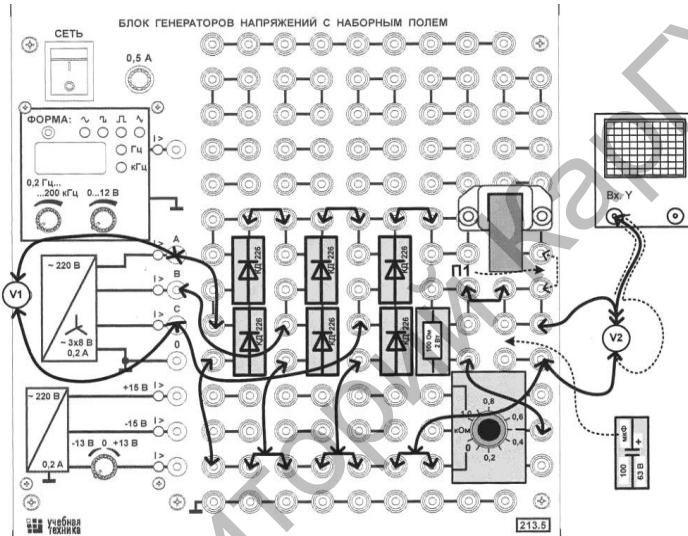


Рисунок 5.24

- Сделайте измерения и запишите в табл. 5.9 значения: $U_{вх}$ – действующее (по вольтметру V1), U_d – среднее (по вольтметру V2), $\Delta U_{пульс}$ (по осциллографу), $m = f_{пульс} / f_{вх}$. Попробуйте изменять сопротивление нагрузки, вращая влево и вправо ручку потенциометра. Проследите, меняется ли при этом величина и форма выпрямленного напряжения. Объясните результаты.

- Рассчитайте и запишите в табл. 5.9 коэффициенты $U_d/U_{вх}$ и $k_{пульс}$.

- Параллельно нагрузочному резистору R_H подключите конденсатор 100 мкФ, как показано на монтажной схеме пунктирной стрелкой (при этом не перепутайте полярность!).

Т а б л и ц а 5.9

$U_{вх}, В$	$U_d, В$	$\Delta U_{пульс}, В$	m	$U_d/U_{вх}$	$k_{пульс}$

• Изменяя сопротивление нагрузки от 100 до 1100 Ом и наоборот, наблюдайте на осциллографе за изменением формы выпрямленного напряжения и сделайте вывод.

• Уберите из схемы конденсатор и включите индуктивность. Для этого переставьте переключку П1, как показано пунктирной стрелкой. Опять изменяя сопротивление нагрузки от 100 до 1100 Ом, проследите за изменением формы выпрямленного напряжения.

• Включите в схему и катушку, и конденсатор и повторите ещё раз опыт с изменением сопротивления нагрузки.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Упрощенные схемы исследований.
3. Таблицы с результатами измерений.
4. Вольтамперные характеристики.
5. Результаты графоаналитических анализов.
6. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Причины использования схем трехфазного выпрямления?
2. Какова частота пульсаций выходного напряжения $u_{вых}$ трехфазного выпрямителя с нулевым выводом?
3. Как влияет сопротивление нагрузки на величину и форму выходного напряжения выпрямителя без сглаживающего фильтра?

4. Как влияет сопротивление нагрузки на величину и форму выходного напряжения выпрямителя с ёмкостным фильтром? С индуктивным фильтром? С ёмкостно-индуктивным фильтром?

5.7 Лабораторная работа «Испытание *p-n*-переходов биполярного транзистора и снятие его статических характеристик на постоянном токе»

Цель работы: ознакомление с основными параметрами биполярного транзистора и снятие опытным путем статических характеристик транзистора на постоянном токе.

Задание

Протестировать *p-n*-переходы *p-n-p*- и *n-p-n*-транзисторов мультиметром в режиме тестирования диодов. Исследовать влияние тока базы на вольтамперную характеристику $I_K(U_{кэ})$ *p-n-p*-транзистора с помощью осциллографа. Экспериментально снять и построить графики четырех семейств характеристик биполярного транзистора *n-p-n*-типа.

Порядок выполнения работы

- Переключите мультиметр в режим тестирования диодов и измерьте падение напряжения на *p-n*-переходах транзисторов по приведённым в табл. 5.10 схемам. **Примечание:** в режиме тестирования диодов мультиметр измеряет падение напряжения на открытом *p-n*-переходе при определённом токе (примерно 1 мА), создаваемом самим прибором. В обратном направлении он показывает обрыв цепи (1 в старшем разряде).

- Соберите цепь согласно схеме (рис. 5.25). В этой цепи между эмиттером и коллектором действуют полуволны

синусоидального напряжения, а между базой и эмиттером – регулируемое постоянное напряжение. Диод VD1 включён для защиты эмиттерного перехода транзистора от пробоя при «неправильной» полярности источника постоянного напряжения, а диод VD2 – для исключения обратного напряжения между эмиттером и коллектором.

Т а б л и ц а 5.10

Схемы измерений								
$\Delta U, \text{ мВ}$								

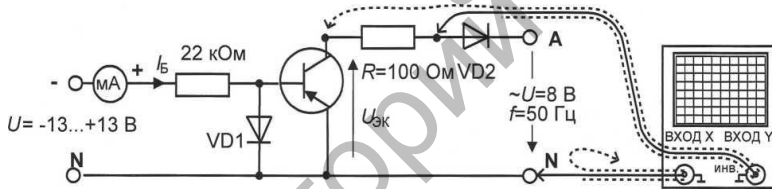


Рисунок 5.25

- Включите осциллограф, настройте усиление и установите режим X-Y. Включите инвертирование канала Y для правильного отображения полярности сигнала.

- Регулируя ток базы от 0 до максимального значения и обратно, наблюдайте за изменением кривой $I_K(U_{КЭ})$ на осциллографе. При нескольких значениях тока базы (включая нулевое и максимальное) перерисуйте кривую $I_K(U_{КЭ})$ с осциллографа. Не забудьте указать масштабы по осям и токи базы для каждой кривой.

- На семействе кривых $I_K(U_{КЭ})$ выберите какое-либо постоянное напряжение $U_{КЭ}$ (например, 5 В) и постройте зависимость $I_K(I_б)$ для этого значения напряжения $U_{КЭ}$. Рассчитайте и на этом же рисунке постройте график $\beta(I_б) = \Delta I_K / \Delta I_б$.

- Соберите цепь согласно схеме (рис. 5.25, 5.26). Потенциометр 1 кОм используется для регулирования тока базы, резисторы 100 и 47 кОм – для ограничения максимального тока базы. Регулирование напряжения $U_{кэ}$ осуществляется регулятором источника постоянного напряжения. Для предотвращения подачи обратного напряжения на транзистор в цепь коллектора включён диод. Переход эмиттер-база также защищён шунтирующим диодом. Измерение тока базы I_b и напряжения $U_{бэ}$ производятся мультиметрами на пределах 200 μ А и 2 В соответственно. Пределы измерения тока коллектора I_c и напряжения $U_{кэ}$ изменяются в ходе работы по мере необходимости. При сборке схемы предусмотрите перемычки для переключения амперметра из одной ветви в другую.

- Установите первое значение тока базы 20 μ А, переключите миллиамперметр в цепь коллектора и, изменяя напряжение $U_{кэ}$ согласно значениям, указанным в табл. 5.11, снимите зависимости $I_c(U_{кэ})$ и $U_{бэ}(U_{кэ})$. Повторите эти измерения при каждом значении I_b , указанном в таблице.

Примечание: характеристики транзистора изменяются в ходе работы из-за его нагрева. Поэтому для большей определенности рекомендуется установить нужные значения $U_{бэ}$ и $U_{кэ}$, выключить на 30 секунд блок генераторов напряжений, затем включить его и быстро записать показания приборов V1 и A2.

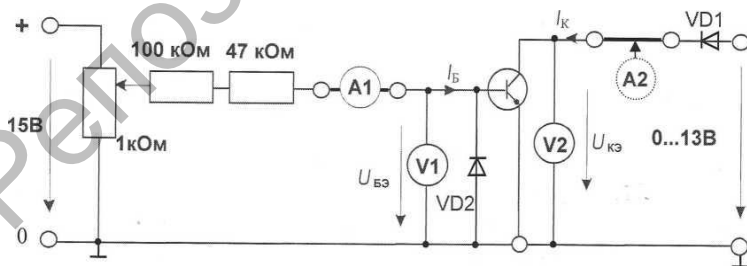


Рисунок 5.26

Т а б л и ц а 5.11

$U_{кэ},$ В	$I_6 = 20 \mu\text{A}$		$I_6 = 40 \mu\text{A}$		$I_6 = 60 \mu\text{A}$		$I_6 = 80 \mu\text{A}$	
	$I_к, \text{mA}$	$U_{бэ}, \text{В}$	$I_к, \text{mA}$	$U_{бэ}, \text{В}$	$I_к, \text{mA}$	$U_{бэ}, \text{В}$	$I_к, \text{mA}$	$U_{бэ}, \text{В}$
0								
0,5								
1								
2								
5								
10								
15								

• Постройте графики семейства выходных характеристик $I_к(U_{кэ})$ и семейство характеристик обратной связи $U_{бэ}(U_{кэ})$, не забыв указать, какому току базы соответствует каждая кривая.

• Установите $U_{кэ} = 0$ и, изменяя ток базы в соответствии со значениями, указанными в табл. 5.12, снимите зависимость $U_{бэ}(I_6)$. Увеличьте напряжение $U_{кэ}$ до 5 В и снова снимите зависимость $U_{бэ}(I_6)$, а также и $I_к(I_6)$. Повторите этот опыт при $U_{кэ} = 15$ В. (При проведении этих измерений учитывайте примечание к предыдущему опыту).

• Постройте графики входных $I_6(U_{бэ})$ и регулировочных I_6 характеристик, указав для каждой кривой соответствующие значения $U_{кэ}$.

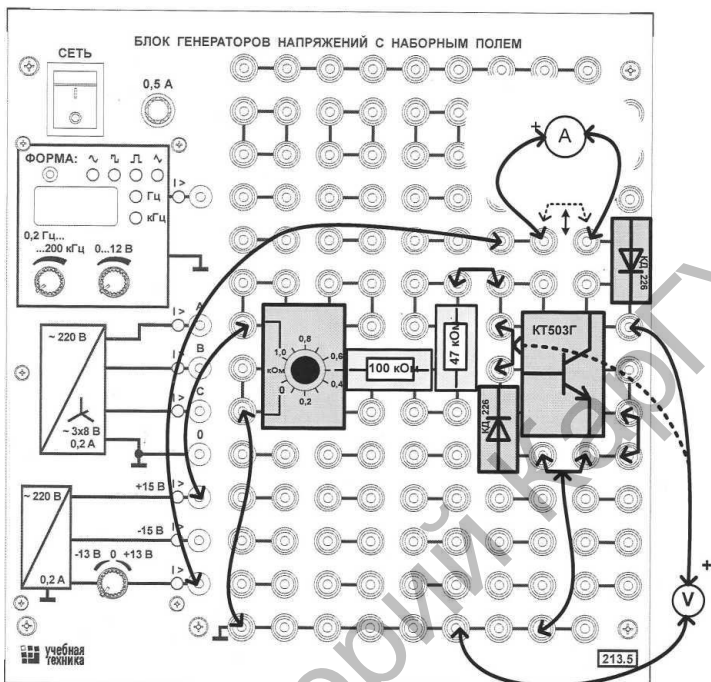


Рисунок 5.27

Т а б л и ц а 5.12

I_0 , μA	$U_{кз} = 0 \text{ В}$		$U_{кз} = 5 \text{ В}$		$U_{кз} = 15 \text{ В}$	
	$U_{бэ}$, В	I_k , мА	$U_{бэ}$, В	I_k , мА	$U_{бэ}$, В	I_k , мА
0						
5						
10						
20						
50						
80						

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Электрические схемы измерений.
3. Таблицы с результатами измерений.
4. Вольтамперные характеристики.
5. Результаты графоаналитических анализов.
6. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Объясните принцип действия биполярного транзистора.
2. Какие параметры биполярных транзисторов вы знаете?
3. Какие основные схемы включения биполярных транзисторов существуют?
4. Существует ли связь между коэффициентами α и β биполярного транзистора?
5. Почему рабочую точку выбирают в середине линейного участка переходной характеристики транзистора?
6. Где на практике применяются биполярные транзисторы?
7. В каких направлениях проводит ток $p-n-p$ -транзистор и в каких $n-p-n$ -транзистор?
8. Почему с увеличением $U_{кэ}$ ток $I_{к}$ вначале быстро растёт, а затем увеличивается медленно?
9. Как можно построить характеристику управления по семейству выходных характеристик?

5.8 Лабораторная работа «Снятие статических характеристик полевого транзистора с $p-n$ -переходом»

Цель работы: снятие и анализ вольтамперных характеристик полевого транзистора.

Задание

Протестировать транзисторы типа n и типа p с помощью мультиметра, снять статические выходные характеристики и стоко-затворную характеристику. Исследовать влияние сопротивления нагрузки на стоко-затворную характеристику и коэффициент усиления напряжения.

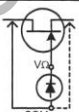
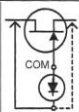
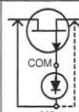
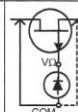
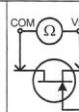
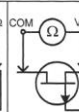
Порядок выполнения работы

- Переключите мультиметр в режим тестирования диодов и измерьте падение напряжения на p - n -переходах транзисторов по первым четырём схемам, приведённым в табл. 5.13.

Примечание: в режиме тестирования диодов мультиметр измеряет падение напряжения на открытом p - n -переходе при определённом токе (примерно 1 мА), создаваемом самим прибором. В обратном направлении он показывает обрыв цепи (1 в старшем разряде).

- Переключите мультиметр в режим измерения сопротивлений и измерьте сопротивление «сток – исток» при $U_m = 0$ по двум последним схемам табл. 5.13.
-

Т а б л и ц а 5.13

Схемы измерений						
ΔU , мВ					$R_{ис} = \dots \Omega$	$R_{ис} = \dots \Omega$

- Соберите цепь для снятия характеристик транзистора (рис. 5.28). Диод включен в схему для предотвращения подачи отрицательного напряжения на транзистор при снятии выходных характеристик, а между точками А и В включена перемычка, удалив которую, можно включить в цепь стока сопротивление нагрузки.

- Включите блок генераторов напряжений и мультиметры. Регулируя напряжение на затворе потенциометром, определите начальный ток стока и напряжение отсечки.

$$I_{\text{нач}} = \dots\dots\dots \text{мА}; U_{\text{отс}} = \dots\dots\dots \text{В}.$$

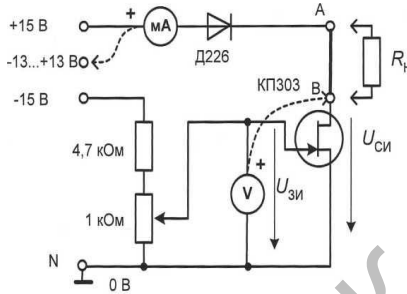


Рисунок 5.28

- Изменяя напряжение на затворе потенциометром от нуля до напряжения отсечки, снимите стоко-затворную характеристику (табл. 5.14).
- Постройте график стоко-затворной характеристики и определите крутизну:

$$S = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{зи}} = \dots\dots\dots \text{мА/мВ}.$$

Т а б л и ц а 5.14

$U_{зи}, \text{В}$	0	-1	-2	-3	-3,5		
$I_C, \text{мА}$							

- Для снятия выходных характеристик транзистора переключите питание на регулируемый источник постоянного напряжения -13 ... +13 В, как показано на схеме пунктиром, установите напряжение на затворе равным нулю и переключите вольтметр для измерения напряжения $U_{си}$.

- Регулируя напряжение питания от 0 до максимального значения (13... 14 В), снимите зависимость $I_C(U_{си})$ при $U_{зи} = 0$ (табл. 5.15).

- Переключите снова вольтметр для измерения напряжения $U_{зи}$, установите потенциометром $U_{зи} = -1$ В, переключите вольтметр обратно для измерения напряжения $U_{си}$ и снимите зависимость $I_c(U_{си})$ при $U_{зи} = -1$ В.

Т а б л и ц а 5.15

$U_{си}, В$		0	0,5	1	1,5	2	3	4	6	8	12	
$I_c,$ мА	при $U_{зи} = 0$ В											
	при $U_{зи} = -1$ В											
	при $U_{зи} = -2$ В											
	при $U_{зи} = -3$ В											

- Аналогично снимите выходные характеристики при других значениях $U_{зи}$.
- Постройте графики выходных характеристик.
- Для исследования влияния нагрузочного сопротивления на крутизну стоко-затворной характеристики и коэффициент усиления напряжения вновь переключите питание на нерегулируемый источник +15 В, удалите из схемы перемычку и включайте вместо неё различные сопротивления нагрузки, указанные в табл. 5.16.
- При каждом сопротивлении записывайте в табл. значения I_c и $U_{си}$ при двух значениях напряжения на затворе.

Т а б л и ц а 5.16

$R_H, кОм$	1		2,2		4,7		10	
	1	2	3	4	5			
$U_{зи}, В$	-1	-1,5	-1,5	-2	-2	-2,5	-2,5	-3
$U_{си}, В$								

1	2	3	4	5
$I_c, \text{мА}$				
$\Delta U_{зи}, \text{В}$				
$\Delta U_{си}, \text{В}$				
$\Delta I_c, \text{мА}$				
$k_U = \Delta U_{си} / \Delta U_{зи}$				
$S = \Delta I_c / \Delta U_{зи}$				

• Вычислите по этим значениям коэффициенты усиления напряжения и крутизну затворно-стоковой характеристики. Постройте графики и проанализируйте их.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Упрощенные схемы исследований.
3. Таблицы с результатами измерений.
4. Вольтамперные характеристики.
5. Результаты графоаналитических анализов.
6. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Объясните принцип действия полевого транзистора.
2. Почему полевой транзистор иногда называют униполярным?
3. Каково применение на практике полевых транзисторов?
4. Что такое зона насыщения и зона линейного изменения сопротивления?
5. Почему коэффициент усиления по напряжению увеличивается при увеличении сопротивления нагрузки?
6. Как можно построить стоко-затворную характеристику по семейству внешних характеристик при $R_n = 0$ и при $R_n \neq 0$?

5.9 Лабораторная работа «Измерение статических характеристик полевого транзистора с изолированным затвором и индуцированным каналом»

Цель работы: измерить вольтамперные характеристики полевых транзисторов с изолированным затвором и индуцированным каналом, отобразить их графически и рассчитать основные электрические параметры.

Задание

Снять статические выходные характеристики и стоко-затворную характеристику МОП-транзистора с индуцированным каналом типа n , определить пороговое напряжение $U_{зи\ пор}$, максимальную крутизну стоко-затворной характеристики S , сопротивления канала в ключевом режиме (в закрытом состоянии $R_{си\ закр}$ и в открытом – $R_{си\ откр}$).

Порядок выполнения работы

- Соберите цепь для снятия характеристик транзистора (рис. 5.29). Диод Д226 включен в схему для предотвращения подачи отрицательного напряжения на транзистор при снятии выходных характеристик. Диод, показанный внутри микросхемы IRFD024, является паразитным элементом, обусловленным конструкцией p - n -переходов в транзисторах подобного типа.

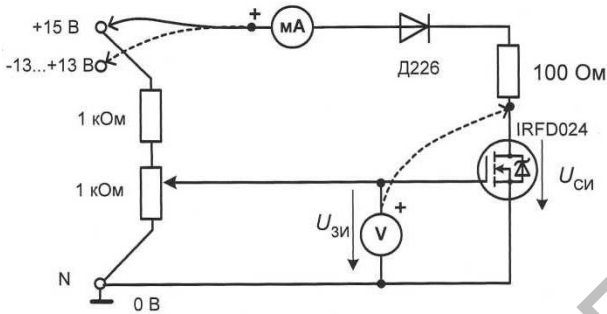


Рисунок 5.29

- Включите блок генераторов напряжений и мультиметры. Регулируя напряжение на затворе потенциометром, определите пороговое напряжение, при котором появляется ток стока.

$U_{зи\ пор} = \dots\dots\dots$ В.

- Устанавливая потенциометром напряжения на затворе, указанные в табл. 5.17, снимите стоко-затворную характеристику.

Т а б л и ц а 5.17

$U_{зи}$, В	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0	4,1	4,2	4,3	4,4
I_c , мА										

- Постройте график стоко-затворной характеристики и определите крутизну:

$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} = \dots\dots\dots$ мА/мВ.

- Для снятия выходных характеристик транзистора переключите питание на регулируемый источник постоянного напряжения -13...+13 В, как показано на схеме пунктиром, установите напряжение на затворе равным 3,9 В и переключите вольтметр для измерения напряжения $U_{си}$. Регулируя напряжение питания от 0 до максимального значения (13... 14 В), снимите зависимость $I_c(U_{си})$ при $U_{зи} = 3,9$ В (табл. 5.18).

Т а б л и ц а 5.18

$U_{си}, В$		0	0,2	0,5	1	1,5	2	4
$I_c,$ мА	при $U_{зи}$ = 3,9 В							
	при $U_{зи}$ = 4 В							
	при $U_{зи}$ = 4,1 В							
	при $U_{зи}$ = 4,2 В							

• Переключите снова вольтметр для измерения напряжения $U_{зи}$, установите потенциометром $U_{зи} = 4 В$, переключите вольтметр обратно для измерения напряжения $U_{си}$ и снимите зависимость $I_c(U_{си})$ при $U_{зи} = 4 В$.

• Аналогично снимите выходные характеристики при других значениях $U_{зи}$.

• Постройте графики выходных характеристик.

• Установите такое напряжение на затворе, при увеличении которого ток стока не изменяется (полностью открытое состояние транзистора), и определите сопротивление:

$$R_{си\text{ откр}} = U_{си}/I_c \dots \dots \dots \text{Ом.}$$

• Установите на затворе напряжение равным нулю и определите сопротивление транзистора в закрытом состоянии:

$$R_{си\text{ закр}} = U_{си}/I_c \dots \dots \dots \text{Ом.}$$

Примечание: В последнем опыте ток весьма мал, поэтому для его измерения необходимо отключить вольтметр и переключить прибор на минимальный предел измерения тока.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Упрощенные схемы исследований.
3. Таблицы с результатами измерений.
4. Вольтамперные характеристики.

5. Результаты графоаналитических анализов.
6. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Объясните физический смысл процессов, лежащих в основе принципа действия полевых транзисторов с управляющим переходом.
2. Назовите основные параметры полевого транзистора.
3. Опишите устройство полевого транзистора с барьером Шоттки.
4. В чем отличие полевых транзисторов с изолированным затвором от транзисторов с управляющим р-п-переходом и барьером Шоттки?
5. Каким математическим выражением описывается линейная область статических выходных ВАХ:
 - а) полевого транзистора с барьером Шоттки;
 - б) полевого транзистора с изолированным затвором.
6. Поясните устройство и принцип действия МОП-транзистора.
7. Перечислите схемы включения полевых приборов.
8. Опишите область применения различных полевых транзисторов.

5.10 Лабораторная работа «Экспериментальное определение основных характеристик тиристоров»

Цель работы: снятие экспериментальным путем вольтамперной характеристики тиристора и его пусковой характеристики.

Задание

Снять статические вольтамперные характеристики динистора, управляемого тиристора и триодного симистора. Определить напряжение включения динистора, минимальные открывающие токи и токи удержания тиристора и симистора.

Порядок выполнения работы

- Соберите цепь для снятия вольтамперной характеристики динистора согласно схеме (рис. 5.30).

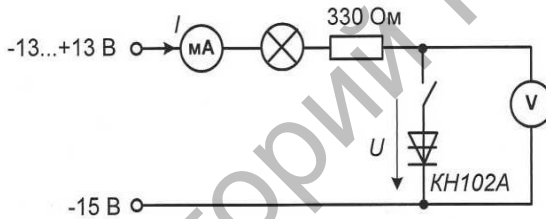


Рисунок 5.30

- Для определения напряжения включения установите регулятором напряжения какое-нибудь напряжение, например 5 В. Включая и выключая динистор тумблером, определите по показаниям амперметра и вольтметра, включается динистор или нет. При включении динистора напряжение на нём падает, а ток возрастает. Если динистор не включается, то увеличьте напряжение и снова попробуйте несколько раз тумблером включить динистор. Повторяя этот опыт, подберите напряжение, при котором динистор будет стабильно включаться. Запишите значение $U_{\text{вкл}}$ в табл. 5.19.

- Приведите динистор во включенное состояние, уменьшая напряжение регулируемого источника, поочередно устанавливайте значения тока, указанные в табл. 5.19, и записывайте соответствующие напряжения на динисторе.

- Постройте кривую зависимости тока от напряжения (вольтамперную характеристику).

Т а б л и ц а 5.19

	$I, \text{мА}$	5	10	20	30	40	50
Динистор ($U_{\text{вкл}} = \dots \text{В}$)	$U, \text{В}$						
Тринистор ($I_{\text{уд}} = \text{мА}$, $I_{\text{откр. у}} = \text{мА}$)	$U, \text{В}$						
Симистор при $+U$ ($I_{\text{уд}} = \text{мА}$, $I_{\text{откр. у}} = + \text{мА}, - \text{мА}$)	$U, \text{В}$						
Симистор при $-U$ ($I_{\text{уд}} = \text{мА}$, $I_{\text{откр. у}} = + \text{мА}, - \text{мА}$)	$U, \text{В}$						

- Соберите цепь (рис. 5.31) для исследования характеристик управляемых тиристоров. Ручку потенциометра поверните вправо до упора (ток управления равен нулю).

- Включите питание и, вращая ручку регулятора постоянного напряжения влево и вправо до упора, убедитесь, что тиристор закрыт как при прямом, так и при обратном приложенном напряжении.

- Оставьте ручку регулятора постоянного напряжения в крайнем правом положении и потенциометром увеличивайте ток управления до тех пор, пока не включится лампочка, что свидетельствует о переходе тиристора в открытое состояние. Верните ручку потенциометра в правое крайнее положение и убедитесь, что и при отсутствии тока управления тиристор остаётся включённым.

- Выключите тиристор кратковременным разрыванием анодной цепи или снижением приложенного напряжения до любого отрицательного значения.

- Снова включите тиристор при максимальном приложенном напряжении, ток управления сделайте равным нулю и, уменьшая приложенное напряжение, снимите вольтамперную характеристику (табл. 5.19) и постройте её график.

- Снова включите тиристор. Плавно уменьшая напряжение регулируемого источника напряжения, определите ток удержания тиристора (определяйте его при токе управления равном нулю!). Запишите значение $I_{уд}$ также в табл. 5.19.

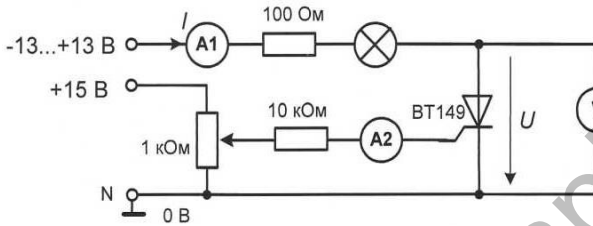


Рисунок 5.31

- Медленно увеличивая ток управления потенциометром (при максимальном анодном напряжении и непроводящем состоянии тиристора), зафиксируйте ток управления, при котором происходит включение тиристора. Прodelайте этот опыт несколько раз и запишите $I_{откр.у}$ в табл. 5.19.

- Замените тиристор симистором МАС97А6, сопротивление в цепи управления 10 кОм на 1 кОм и проделайте аналогичные опыты по определению $I_{откр.у}$ при двух напряжениях питания: +13 В (ручка регулятора в правом крайнем положении) и -13 В (ручка регулятора в левом крайнем положении). В каждом из этих случаев симистор может открываться как положительным током управления, так и отрицательным. Для получения отрицательного тока управления переключите питание потенциометра с гнезда +15 В на гнездо -15 В.

- Снимите вольтамперные характеристики при положительном и отрицательном анодном напряжениях, определите токи удержания. Результаты запишите в табл. 20 и постройте графики.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Упрощенные схемы исследований.
3. Таблицы с результатами измерений.
4. Вольтамперные характеристики.
5. Результаты графоаналитических анализов.
6. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Чем объясняется способность тиристора выдерживать довольно большое обратное напряжение?
2. Можно ли утверждать, что участок ОА прямой ветви вольтамперной характеристики тиристора представляет собой обратную ветвь вольтамперной характеристики р-п-перехода n_2 ?
3. На каких физических явлениях основано отпирание тиристора?
4. Перечислите основные параметры тиристора.
5. Где на практике используются тиристоры?

5.11 Лабораторная работа «Сравнительное исследование одиночных усилительных каскадов на биполярных транзисторах»

Цель работы: экспериментальное исследование усилительных каскадов на биполярном транзисторе, собранных по схемам с общим эмиттером, общим коллектором и общей базой, и их сравнение по величинам входного и выходного сопротивлений, коэффициента усиления по напряжению, верхней рабочей частоте.

Примечание. Не используйте предел измерения 200 mV для измерения переменных напряжений, содержащих постоянную составляющую! Другие пределы использовать можно.

- Включите блок генераторов напряжений и установите частоту синусоидального напряжения 1 кГц, а амплитуду сначала равной нулю.

- Изменяя напряжение смещения на базе поворотом ручки потенциометра вправо и влево, установите напряжение покоя $U_{кз}$ примерно в середине диапазона его изменения. Подайте на вход усилителя синусоидальное напряжение и, регулируя его амплитуду, установите на входе максимальный сигнал, соответствующий неискажённому напряжению на выходе. При необходимости уточните положение точки покоя.

- Запишите в табл. 5.20 входное и выходное напряжения.

Т а б л и ц а 5.20

	Схема с ОЭ	Схема с ОК	Схема с ОБ
$U_{ВХ}, В$			
$U_{ВЫХ}, В$			
$U_{RГ}, В$			
$U_{RН}, В(*)$			
$U_{ВЫХ1}, В$	(при $R_{н} = 1 кОм$)	(при $R_{н} = 0,47 кОм$)	(при $R_{н} = 1 кОм$)
$U_{ВЫХ2}, В$	(при $R_{доб} = 1 кОм$)	(при $R_{доб} = 4,7 кОм$)	(при $R_{доб} = 10 Ом$)
$I_{ВХ}, МА$			
$I_{ВЫХ}, МА$			
k_U			
k_i			
k_P			
$R_{ВЫХ}, кОм$			
$R_{ВХ}, кОм$			

(*) В схеме с ОЭ измеряется на сопротивлении, включённом в цепь эмиттера.

- Для определения тока базы и тока коллектора измерьте также напряжения на резисторе 1 кОм (U_{RBX}) во входной цепи и на резисторе 330 Ом в цепи коллектора (U_{RH}).

- Вычислите ток базы (входной ток) и ток коллектора (выходной ток), разделив напряжения на соответствующие сопротивления, и также запишите их в табл. 5.20.

- Определите коэффициенты усиления по напряжению, току и мощности ($k_P = k_U k_I$).

- Для определения выходного сопротивления подключите к выходу (параллельно вольтметру V2) нагрузочное сопротивление, указанное в таблице. При этом напряжение на выходе уменьшится от $U_{ВЫХ}$, которое уже записано в табл. 5.20, до $U_{ВЫХ1}$. Запишите это значение в табл. и вычислите выходное сопротивление по формуле:

$$R_{ВЫХ} = R_H \left(\frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВЫХ1}} - 1 \right).$$

- Уберите нагрузочное сопротивление, а для определения входного сопротивления включите добавочное сопротивление $R_{доб}$ во входную цепь (последовательно с генератором переменного напряжения). При этом напряжение на выходе уменьшится от $U_{ВЫХ}$ до $U_{ВЫХ2}$. Запишите это значение в табл. 5.20 и вычислите входное сопротивление по формуле:

$$R_{ВХ} = \frac{R_{ДОБ}}{\left(\frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВЫХ2}} - 1 \right)}.$$

- Теперь соберите цепь усилительного каскада с ОК (рис. 5.33).

- Снова подайте на вход синусоидальное напряжение, соответствующее максимальному неискажённому напряжению на выходе, отрегулировав предварительно точку покоя потенциометром 10 кОм.

- Прделайте все те же опыты, что и в схеме с общим эмиттером, и заполните второй столбец табл. 5.20.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Упрощенные схемы исследований.
3. Таблицы с результатами измерений.
4. Вольтамперные характеристики.
5. Результаты графоаналитических анализов.
6. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Расскажите о назначении каждого элемента усилителя.
2. Какие характеристики усилителя существуют?
3. Для чего служит отрицательная обратная связь в усилителях?
4. Как определить коэффициент усиления многокаскадного усилителя?
5. Как осуществляется связь каскадов в многокаскадном усилителе?
6. В каком из усилителей происходит инвертирование сигнала и в чём оно выражается?
7. Какой из усилителей имеет наибольший коэффициент усиления по мощности?
8. В каких случаях свойства усилителей с общим коллектором имеют особое применение?
9. Каковы особые свойства усилителей с общей базой и где они могут быть использованы?

5.12 Лабораторная работа «Исследование двухтактного усилителя мощности на биполярных транзисторах»

Цель работы: экспериментальное исследование бестрансформаторных выходных каскадов усилителей низких частот: с питанием от однополярного и двухполярного источника, в режимах классов В и АВ, с различными цепями обратной связи (отрицательной и положительной), с квазидополнительной симметрией. Оценка КПД каскада производится при максимально достижимой неискаженной амплитуде синусоидального выходного сигнала.

Задание

Экспериментально определить основные параметры двухтактного усилителя.

Порядок выполнения экспериментов

- Соберите цепь двухтактного усилителя (монтажная схема – рис. 5.35). Конденсатор 0,47 мкФ, показанный на схеме пунктиром, не обязателен. Он подключается к источнику +15 В или -15 В в случае появления возбуждений.
- Включите генератор, установите частоту 1 кГц, убедитесь, что усилитель работает, и установите максимальную амплитуду сигнала.
- Исключите из схемы диоды, соединив проводом базы транзисторов и подав входной сигнал непосредственно на базы. Убедитесь, что в выходном сигнале появились специфические искажения. Проверьте, как видоизменяются эти искажения при подключении активно-ёмкостной нагрузки и активно-

индуктивной, включая последовательно с нагрузкой 220 Ом ёмкость 1 мкФ, затем индуктивность 33 мГн.

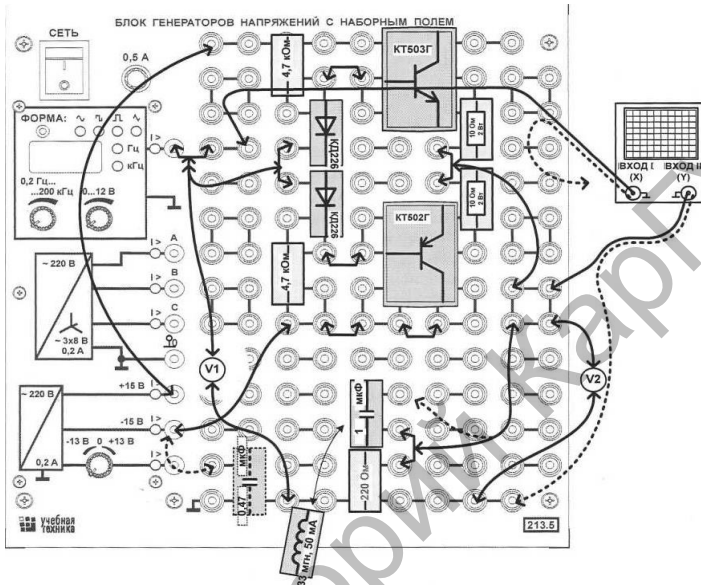


Рисунок 5.35

- Перерисуйте осциллограммы входного и выходного сигналов при активной нагрузке, указав масштабы.
- Переключите осциллограф в режим X-Y и перерисуйте передаточную характеристику.
- Восстановите схему усилителя с начальным смещением точек покоя и при активной нагрузке и максимальном сигнале проделайте измерения всех величин, указанных в табл. 5.21. Рассчитайте основные характеристики усилителя. Измерения токов и напряжений производите мультиметрами, хотя при частоте 1000 Гц погрешность будет выше нормируемой производителем.

Т а б л и ц а 5.21

Измеренная или рассчитанная величина	Обознач.	Формула	Результат
Входное напряжение	$U_{ВХ}, В$		
Вых. напр. при $R_n = 220$ Ом (норм. режим)	$U_n, В$		
Вых. напр. при ХХ ($R_n \rightarrow \infty$)	$U_{ХХ}, В$		
Вых. напр. при $R_n = 220$ Ом и $R_{доб} = 1кОм$ (*)	$U_{n1}, В$		
Входной ток (норм. режим)	$I_{ВХ}, мА$		
Ток источника питания +15 В или -15 В	$I_{ист}, мА$		
Ток нагрузки (норм. режим)	$I_n, мА$		
Коэффициент усиления напряжения	k_U	$U_n/U_{ВХ}$	
Коэффициент усиления тока	k_I	$I_n/I_{ВХ}$	
Коэффициент усиления мощности	k_P	$k_U \cdot k_I$	
Мощность нагрузки	$P_n, мВт$	$U_n \cdot I_n$	
Мощность источников питания $\pm 15 В$	$P_{ист}, мВт$	$30 \cdot I_{ист}$	
Коэффициент полезного действия	КПД	$P_n/P_{ист}$	
Выходное сопротивление	$R_{вых}$	$(U_{ХХ}/U_n - 1)/R_n$	
Входное сопротивление	$R_{вх}$	$R_{доб}/(U_n/U_{n1} - 1)$	

(*) Добавочное сопротивление $R_{доб}$ включается в цепь входного сигнала вместо перемычки от генератора.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Упрощенные схемы исследований.
3. Таблицы с результатами измерений.
4. Вольтамперные характеристики.
5. Результаты графоаналитических анализов.
6. Выводы.

Контрольные вопросы

1. В чём заключаются преимущества двухтактного усилительного каскада?
2. Как действует обратная связь в цепи эмиттера?
3. Что такое комплиментарные транзисторы?
4. Какие есть ещё двухтактные схемы?

5.13 Лабораторная работа «Исследование основных схем включения операционного усилителя»

Цель работы: изучение работы операционных инвертирующего, неинвертирующего и дифференциального усилителей.

Задание

Для инвертирующего, неинвертирующего и дифференциального усилителей построить кривые зависимости выходного напряжения от входного напряжения при различных

сопротивлениях отрицательной обратной связи. Изучить ослабление синфазного сигнала в дифференциальном усилителе.

Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь инвертирующего усилителя, как показано на электрической схеме (рис. 5.36) и монтажной схеме (рис. 5.37). С помощью мультиметра измерьте величины выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$ при различных сопротивлениях отрицательной обратной связи $R_{\text{ОС}}$ и входных напряжениях $U_{\text{ВХ}}$ согласно табл. 5.22. Занесите эти значения в верхние строки табл. 5.22, а нижние оставьте для неинвертирующего усилителя.

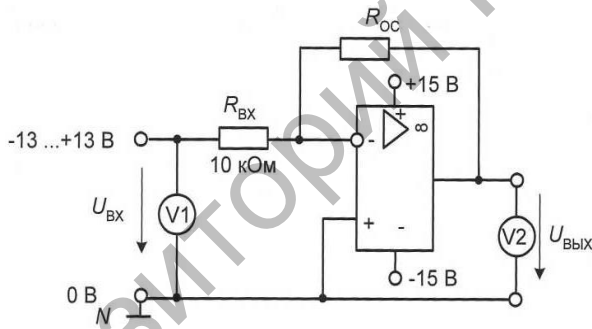


Рисунок 5.36

- Постройте кривые зависимостей $U_{\text{ВЫХ}}(U_{\text{ВХ}})$ при различных сопротивлениях отрицательной обратной связи $R_{\text{ОС}}$.

- Соберите цепь неинвертирующего усилителя (рис. 5.38 и 5.39) и снова измерьте выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ при тех же значениях сопротивления отрицательной обратной связи $R_{\text{ОС}}$ и входного напряжения $U_{\text{ВХ}}$ согласно табл. 5.23. Постройте графики.

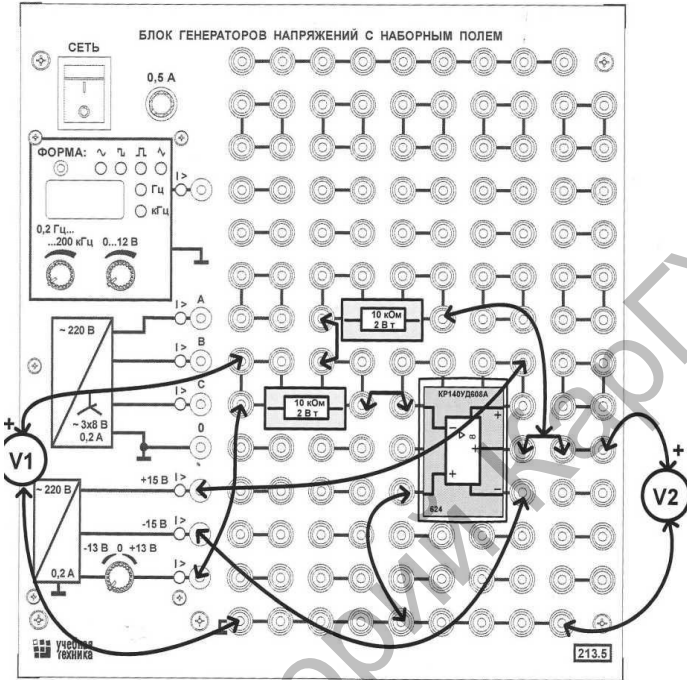


Рисунок 5.37

Т а б л и ц а 5.22

$U_{ВХ}, В$	-10	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	10
$U_{ВЫХ}, В$ при $R_{ОС} = 10$											
$U_{ВЫХ}, В$ при $R_{ОС} = 22$											
$U_{ВЫХ}, В$ при $R_{ОС} = 47$											

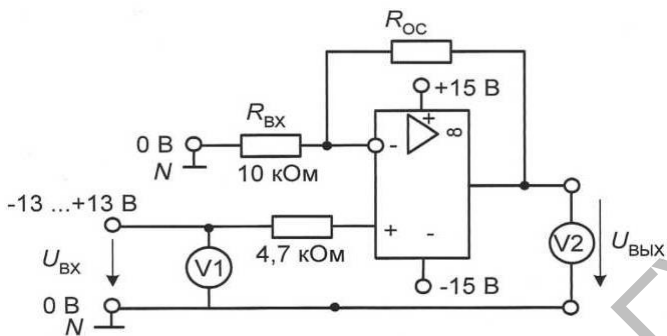


Рисунок 5.38

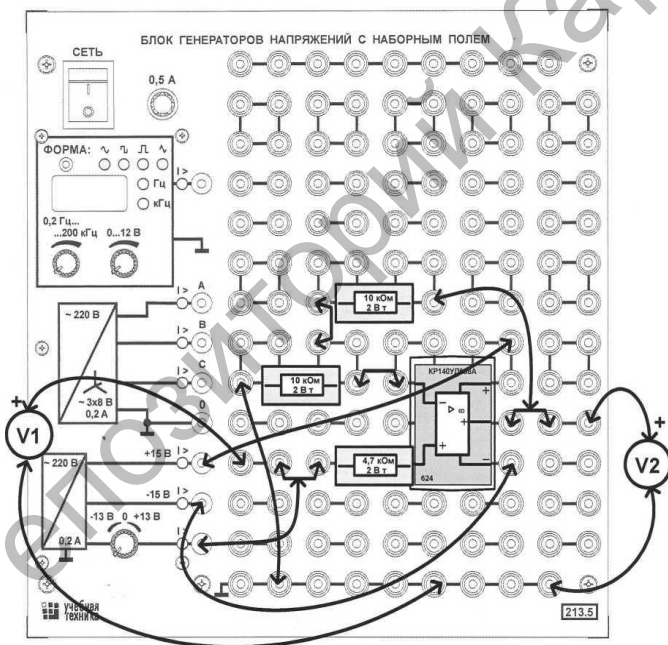


Рисунок 5.39

Т а б л и ц а 5.23

$U_{\text{вх1}}$ = $U_{\text{вх2}}$, В	-13	-10	-7	-4	-2	0	2	4	7	10	13
$U_{\text{вых}}$, В											

- Соберите цепь дифференциального усилителя (рис. 5.40 и 5.41). Подайте сначала на оба входа одно и то же напряжение, например, от регулируемого источника постоянного напряжения -13...+13 В. Потенциометр при этом не используется.

- Регулируя синфазное входное напряжение согласно табл. 5.24, измерьте значения и постройте график выходного напряжения в функции от входного.

- Замените в схеме два сопротивления 100 кОм сопротивлениями 10 кОм и подайте на один вход напряжение с потенциометра, а на другой – от регулируемого источника, как показано на рис. 5.40 и 5.41.

- Измерьте значения выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ при различных входных напряжениях $U_{\text{вх1}}$ и $U_{\text{вх2}}$, указанных в табл. 5.24. Постройте графики $U_{\text{вых}}(U_{\text{вх1}})$ при разных значениях $U_{\text{вх2}}$.

Т а б л и ц а 5.24

$U_{\text{вх1}}$	-6	-4	-2	0	+2	+4	+6
$U_{\text{вых}}$, В при $U_{\text{вх2}}=-4$ В							
$U_{\text{вых}}$, В при $U_{\text{вх2}}=0$ В							
$U_{\text{вых}}$, В при $U_{\text{вх2}}=+4$ В							

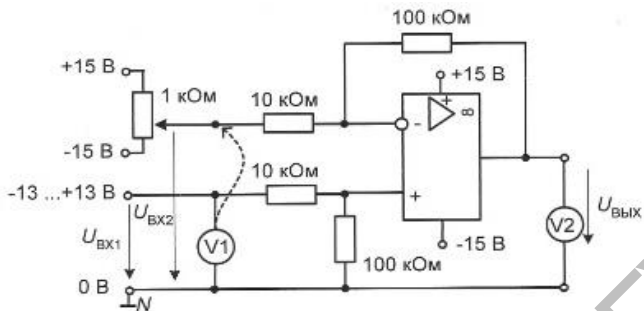


Рисунок 5.40

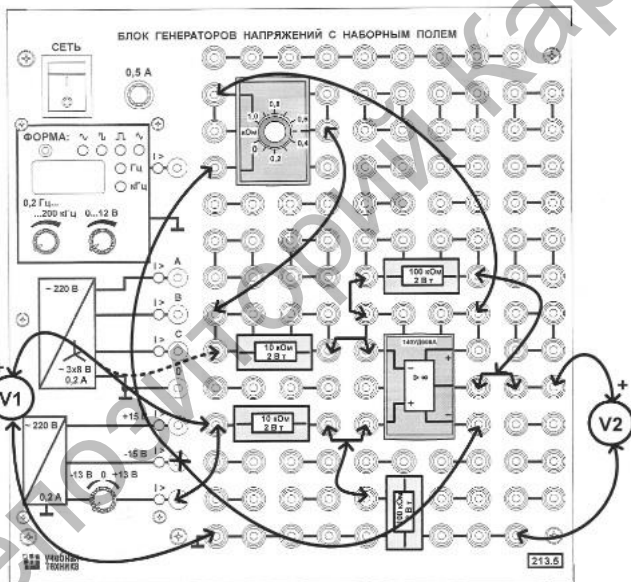


Рисунок 5.41

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Упрощенные схемы исследований.

3. Таблицы с результатами измерений.
4. Вольтамперные характеристики.
5. Результаты графоаналитических анализов.
6. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Каким путем можно уменьшить ошибку сдвига и дрейфа нулевого уровня УПТ за счет влияния входных токов реального ОУ?
2. Как оценить верхнюю рабочую частоту на уровне $M_v = 3$ дБ усилителя постоянного тока, собранного на ОУ?
3. Назовите достоинства и недостатки неинвертирующего УПТ по сравнению с инвертирующим.
4. Какие требования предъявляются к резисторам измерительных усилителей, выполненных на ОУ?
5. Каким путем устраняется ошибка сдвига напряжения на выходе ОУ?
6. Какова полярность входного напряжения $U_{вх}$ инвертирующего усилителя по сравнению с выходным напряжением $U_{вых}$?
7. Какие компоненты определяют коэффициент усиления ν инвертирующего усилителя?
8. Какова величина коэффициента усиления при $R_{ос} = 100$ кОм и $R_{вх} = 10$ кОм?

5.14 Лабораторная работа «Исследование базовых логических элементов»

Цель работы: а) ознакомление с универсальным лабораторным стендом и приобретение навыков работы на стенде;

б) исследование функционирования основных логических элементов.

Лабораторное задание

1. Исследование одноходового элемента НЕ.
2. Исследование двухходовых логических элементов.
3. Исследование четырехходовых логических элементов.

Соберите схему для тестирования «монтажного» логического элемента, изображенную на рис. 5.42.

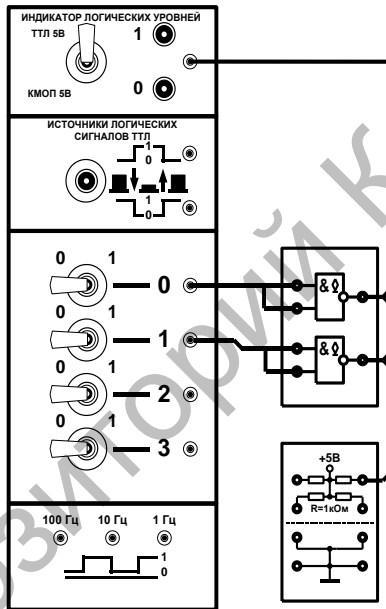


Рисунок 5.42

Входные сигналы логического элемента задают тумблерами 0 (x_0) и 1 (x_1).

Состояние выхода логического элемента $y = f(x_0, x_1)$ определяют по индикатору логических уровней.

Переключатель индикатора логических уровней устанавливают либо в положение «ТТЛ 5 В», либо в положение «КМОП 12 В».

Методические указания по выполнению работы

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

- Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электропитания.

1. Исследование одноходового элемента НЕ.

- 1.1. Соберите исследуемую логическую цепь для тестирования элемента с одним входом (элемент НЕ), изображенную на рис. 5.43.

Входы трех неиспользуемых элементов мини-блока подключают к одной из шин питания (на рисунке +5 В).

Входной сигнал логического элемента (х) задают тумблером 0.

Состояние выхода логического элемента определяют по индикатору логических уровней.

Переключатель индикатора логических уровней устанавливают в положение «ТТЛ 5 В».

- 1.2. Включите устройство защитного отключения и автоматический выключатель в однофазном источнике питания G1.

- 1.3. Включите выключатель «СЕТЬ» блока испытания цифровых устройств А1.

- 1.4. Протестируйте работу логической схемы. При необходимости изменения исследуемой схемы отключите выключатель «СЕТЬ» блока испытания цифровых устройств А1, измените схему, включите выключатель «СЕТЬ».

- 1.5. По результатам тестирования заполните таблицу истинности для исследованного элемента.

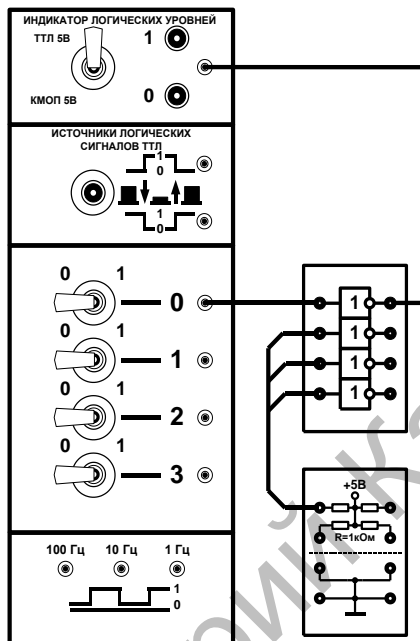


Рисунок 5.43

Т а б л и ц а 5.25

Для элемента НЕ

x	0	1
$y = x$		

2. Исследование двухвходовых логических элементов.

2.1 Соберите исследуемую логическую цепь, изображенную на рис. 5.44.

Входы второго неиспользуемого элемента подключают к одной из шин питания (на рис. 5.44 к общему проводу).

Входной сигнал логического элемента (x) задают тумблерами 0 (x_0) и 1 (x_1).

Состояние выхода логического элемента $y = f(x_0, x_1)$ определяют по индикатору логических уровней.

Переключатель индикатора логических уровней устанавливают в положение «ТТЛ 5 В».

2.2 Прodelайте п. 1.2-1.4. для данного логического элемента.

2.3 По результатам тестирования заполните таблицу истинности для исследованного элемента.

Таблица 5.26

Для элементов, реализующих логические функции двух переменных

x_0	0	1	0	1
x_1	0	0	1	1
$y = f(x_0, x_1)$				

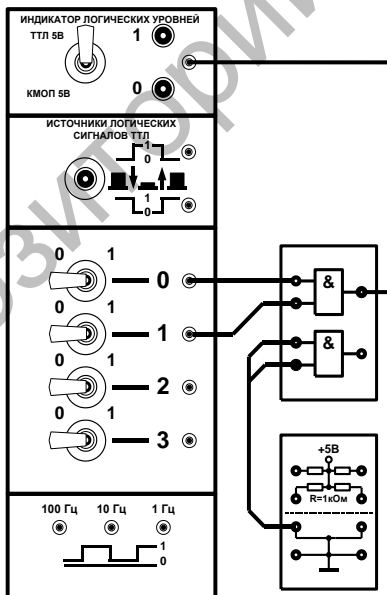


Рисунок 5.44

3. Исследование четырехвходовых логических элементов.

3.1 Соберите исследуемую логическую цепь, изображенную на рис. 5.45.

Входные сигналы логического элемента x_0, x_1, x_2, x_3 задают тумблерами 0, 1, 2 и 3 с номерами, соответствующим индексам переменных.

Состояние выхода логического элемента $y = f(x_0, x_1, x_2, x_3) = x_0 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$ определяют по индикатору логических уровней.

Переключатель индикатора логических уровней устанавливают в положение «ТТЛ 5 В».

Проделайте п. 1.2-1.4. для данного логического элемента.

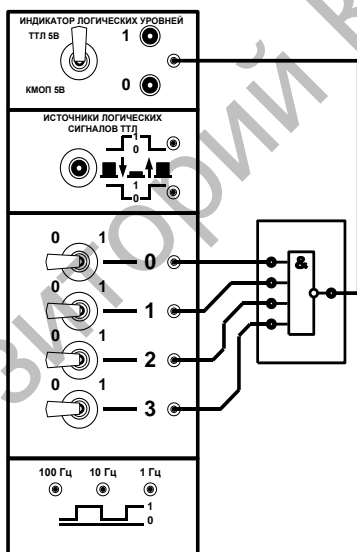


Рисунок 5.45

3.2 По результатам тестирования заполните таблицу истинности для исследованного элемента.

4. По завершении работы отключите выключатель «СЕТЬ» блока испытания цифровых устройств А1 и автоматический выключатель в однофазном источнике питания G1.

Для элемента И-НЕ с четырьмя входами

x_0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
x_1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
x_2	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
x_3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
$y = \overline{x_0 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3}$																

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Условные графические обозначения и схемы исследуемых элементов и устройств.
3. Таблицы истинности исследуемых устройств.
4. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Что такое таблица истинности ЛЭ или устройства, осуществляющего некоторое логическое преобразование?
2. Укажите размерность таблицы истинности (число строк и число столбцов) ЛЭ: 4 И и 2 ИЛИ.
3. Объясните, почему неиспользуемые входы ЛЭ «ИЛИ», «ИЛИ-НЕ» соединяют с корпусом (уровнем логического «0»), а на неиспользуемые входы ЛЭ «И», «И-НЕ» подается напряжение уровня логической «1»?
4. Используя ЛЭ наборного поля, получите три различных варианта схем, реализующих логическую функцию «5И-НЕ». Который из них является наиболее оптимальным (рациональным)?

5. Какую логическую функцию реализует цепочка из K последовательно соединенных инверторов, если K – нечетное число, K – четное число? Чему эквивалентны такие цепочки?

6. Изобразите временные диаграммы, характеризующие функционирование ЛЭ: НЕ, ЗИ, ЗИЛИ, ЗИ-НЕ, ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ.

Репозиторий КарГУ

Литература

1. *Степаненко И.П.* Основы теории транзисторов и транзисторных схем: науч. изд. / И.П. Степаненко. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1977. – 671 с.
2. *Беглецов Н.Н.* Основы аналоговой электроники. Руководство по выполнению базовых экспериментов. ОАЭ.002 РБЭ (941). – Челябинск: ИПЦ «Учебная техника», 2008. – 166 с.
3. *Джонс М.Х.* Электроника – практический курс: учеб. пособие / М.Х. Джонс. – М.: Постмаркет, 1999. – 527 с.
4. *Берикашвили В.Ш.* Электронная техника: учеб. пособие для сред. проф. образования / В.Ш. Берикашвили, А.К. Черепанов. – 5-е изд., перераб. – М.: Академия, 2009. – 332 с.: ил.
5. *Воронков Э.Н.* Твердотельная электроника: практикум: учеб. пособие / Э.Н. Воронков. – М.: Академия, 2010. – 128 с.
6. *Гуртов В.А.* Твердотельная электроника: учеб. пособие для вузов / В.А. Гуртов. – 3-е изд., доп. – М.: Техносфера, 2008. – 511 с.: ил.
7. Информационно-измерительная техника и электроника: учебник для вузов / под ред. Г.Г. Раннева. – М.: Академия, 2006. – 511 с.: ил.
8. *Прянишников В.А.* Электроника: полный курс лекций / В.А. Прянишников. – 5-е изд. – СПб.: Корона принт; М.: Бином-Пресс, 2006. – 415 с.
9. *Гусев В.Г.* Электроника и микропроцессорная техника: учеб. для вузов / В.Г. Гусев. – 4-е изд., доп. – М.: Высш. шк., 2006. – 799 с., ил.
10. Электротехника и электроника: в 3-х книгах: учебник для вузов / Г.П. Гаев, В.Г. Герасимов, В.Г. Князев и др.; под ред. В.Г. Герасимова. Кн. 3: Электрические измерения и основы электроники. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 432 с.
11. *Браммер Ю.А.* Импульсные и цифровые устройства: учеб. для студентов электрорадиоприборостроительных сред. спец. учеб. заведений / Ю.А. Браммер, И.Н. Пащук. – М.: Высш. шк., 1999. – 351 с.

12. Основы промышленной электроники / В.Г. Герасимов, О.М. Князьков, А.Е. Краснопольский, В.В. Сухоруков; под ред. В.Г. Герасимова. – М.: Высш. шк., 1986. – 336 с.
13. *Горбачев Г.Н.* Промышленная электроника: учебник для вузов / Г.Н. Горбачев, Е.Е. Чаплыгин; под ред. В.А. Лабунцова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 320 с.

Репозиторий КарГУ

Содержание

<i>Введение</i>	3
<i>Глава 1. Принципы работы полупроводниковых диодов</i>	5
1.1 Носители заряда в полупроводниках. Электронно-дырочный переход.....	5
1.2 Статические и динамические характеристики полупроводниковых диодов	9
1.3 Полупроводниковый стабилитрон	12
1.4 Емкостные свойства полупроводникового диода. Варикап.....	14
1.5 Выпрямительные свойства полупроводниковых диодов	15
1.6 Трёхфазное мостовое выпрямление электрического тока.....	17
<i>Глава 2. Полупроводниковые элементы с двумя и более p-n-переходами</i>	19
2.1 Статические характеристики биполярного транзистора.....	19
2.2 Статические характеристики полевого транзистора ...	24
2.3 Полевой транзистор с изолированным затвором и индуцированным каналом	26
2.4 Тиристоры	28
<i>Глава 3. Усилители электрических сигналов</i>	30
3.1 Усилительный каскад по схеме с общим эмиттером ..	30
3.2 Двухтактный усилитель мощности на биполярных транзисторах.....	31
3.3 Операционный усилитель	33

<i>Глава 4. Элементы цифровой электроники</i>	35
4.1 Основы булевой алгебры	35
4.2 Базовые элементы цифровой электроники.....	36
<i>Глава 5. Экспериментальное исследование элементов прикладной электроники</i>	41
5.1 Экспериментальное оборудование и правила работы с ним	41
5.2 Лабораторная работа «Исследование характеристик полупроводниковых диодов на постоянном и переменном токах»	59
5.3 Лабораторная работа «Определение основных характеристик стабилитрона и исследование параметрического стабилизатора напряжения»	64
5.4 Лабораторная работа «Исследование диода с переменной ёмкостью (варикапа)»	69
5.5 Лабораторная работа «Исследование однополупериодной и мостовой схем выпрямления»	74
5.6 Лабораторная работа «Исследование трёхфазной мостовой схемы выпрямления и сглаживающих фильтров»	79
5.7 Лабораторная работа «Испытание р-п-переходов биполярного транзистора и снятие его статических характеристик на постоянном токе»	82
5.8 Лабораторная работа «Снятие статических характеристик полевого транзистора с р-п-переходом»	87
5.9 Лабораторная работа «Измерение статических характеристик полевого транзистора с изолированным затвором и индуцированным каналом»	92
5.10 Лабораторная работа «Экспериментальное определение основных характеристик тиристор»	95
5.11 Лабораторная работа «Сравнительное исследование одиночных усилительных каскадов на биполярных транзисторах»	99

5.12 Лабораторная работа «Исследование двухтактного усилителя мощности на биполярных транзисторах».....	105
5.13 Лабораторная работа «Исследование основных схем включения операционного усилителя»	108
5.14 Лабораторная работа «Исследование базовых логических элементов».....	114
<i>Литература</i>	122

Учебное издание

**Амочасва Галина Павловна,
Афанасьев Дмитрий Анатольевич**

ПРИКЛАДНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Учебное пособие

Отпечатано с авторского оригинала

Подписано в печать 00.04.2018 г. Формат 60×84 1/16. Бумага
офсетная. Объем 7,5 п.л. Тираж 30 экз. Заказ № 49.

Отпечатано в типографии издательства КарГУ им. Е.А.Букетова
100012, г. Караганда, ул. Гоголя, 38, Тел. 51-38-20

Репозиторий КарГУ