

Министерство образования и науки Российской Федерации
Амурский государственный университет
(ГОУВПО «АмГУ»)

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
для студентов специальности 01.04.00 – физика

Благовещенск
2005

Радиоэлектроника. Лабораторный практикум для студ. спец.
010400 Физика /Сост.Копылова И.Б.- Благовещенск: Изд-во
Амурского гос.ун-та. 2005. - 80с.

Содержит описание 7 лабораторных работ по дисциплине
«Основы радиоэлектроники».

Для студентов специальности 01.04.00 – физика.

Рецензент: док. физ.-мат. наук, профессор
Барышников С.В.

Амурский государственный университет, 2005

СОДЕРЖАНИЕ

Введение. Основы теории и работа полупроводниковых приборов.	4-11
Работа 1. Изучение работы полупроводникового диода и выпрямителя.	12-21
Работа 2. Изучение работы биполярного транзистора	22-34
Работа 3 Изучение работы полевых транзисторов.	35-44
Работа 4. Изучение работы операционного усилителя.	45-54
Работа 5. Изучение работы базовых логических элементов.	55-62
Работа 6.Изучение работы триггеров.	63-69
Работа 7. Изучение принципов построения и работы АЦП и ЦАП.	70-79
Список литературы	80

Основы теории и работа полупроводниковых приборов.

С точки зрения способности проводить электрический ток все вещества можно разделить на проводники (вещества, которые хорошо проводят электрический ток), диэлектрики (изоляторы, вещества, в которых электрический ток невозможен), полупроводники (занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками).

Отличительной особенностью полупроводников является увеличение проводимости при увеличении температуры и при наличии примеси, в то время как у проводников проводимость падает. Объяснение этого факта с точки зрения электронной теории проводимости невозможно.

Для объяснения свойства проводимости была создана зонная теория, которая основана на современной теории строения вещества.

В каждом атоме электроны могут вращаться только по строго заданным орбитам, имеющим определенные значения энергий.

Состояние электрона в атоме описывается определенным набором четырех квантовых чисел (n -главное квантовое число, определяет энергию орбиты; l -орбитальное квантовое число, определяет ориентацию орбиты, m -магнитное квантовое число – определяет ориентацию собственного магнитного момента атома). Одинаковое значение всех трех чисел может иметь только два электрона согласно принципу Паули. Четвертое квантовое число (спин) для электрона может принимать только два значения $\pm 1/2$.

В кристалле энергия валентных электронов (электронов на внешнем энергетическом уровне, которые ответственны за реакционную способность атома, а также определяют вид химической связи атомов в веществе) изменяется квазинепрерывно. Это означает, что спектр энергий валентных электронов представляет собой множество дискретных близкорасположенных уровней. Если предположить, что валентные электроны могут свободно перемещаться по решетке, то они будут двигаться в периодическом поле решетки. Это приводит к тому, что спектр возможных значений энергий электронов распадается на ряд запрещенных и разрешенных зон.

При соединении N атомов в кристалле каждый энергетический уровень распадается на зону, состоящую из N близкорасположенных подуровней, настолько близких, что их энергия отличается на величину порядка 10^{-23} эВ.

Наиболее сложному расщеплению подвергаются электроны внешних энергетических уровней.

За проводимость отвечают электроны, способные оторваться от собственного атома, поэтому электрическая зона, в которой они находятся, называется свободной или зоной проводимости. Зона, в которой располагаются валентные электроны – валентной. Для того чтобы перейти из валентной зоны в свободную зону, электрон должен преодолеть запрещенную зону, т.е. такой переход требует некоторых энергетических затрат.

С точки зрения зонной теории все вещества подразделяются на три класса: проводники, полупроводники, диэлектрики. На рис.1 представлена схема расположения основных зон в веществе.

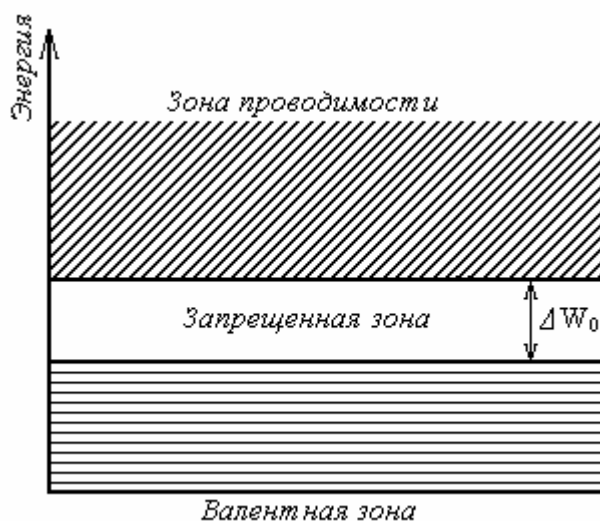


Рис.1.

У металлов ширина запрещенной ΔE зоны составляет доли электронвольта (эВ), либо зоны проводимости и валентная перекрываются. У полупроводников ΔE порядка 1-3 эВ, у диэлектриков свыше 3 эВ.

К полупроводникам относятся элементы IV группы таблицы Менделеева, наиболее распространенные – германий и кремний. В настоящее время создан значительный ряд полупроводников представляющих собой более сложные соединения нескольких элементов (например, арсенид галлия).

Рассмотрим возникновение собственной проводимости в полупроводниках. В германии и кремнии каждый атом связан с другими ковалентной (парноэлектронной) связью (рис.2).

В результате теплового движения один из электронов может покинуть свою связь. На его месте образуется условно положительный заряд, который называется дыркой. Чем выше температура, тем больше электронно-дырочных пар в полупроводнике.

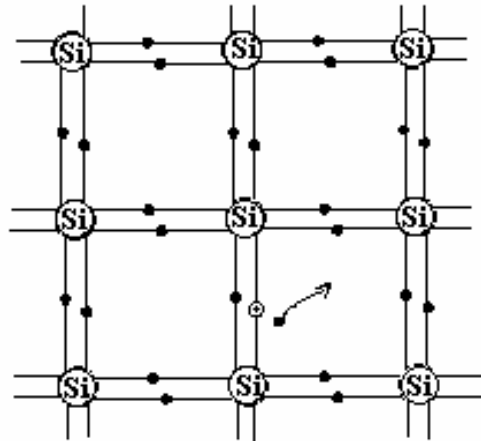


Рис.2

Электропроводность полупроводников определяется соотношением

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right) \quad (1)$$

ΔE – ширина запрещенной зоны;

kT – энергия теплового движения

σ_0 – величина, которая изменяется значительно медленнее, чем экспонента и ее можно считать константой.

Концентрация электронов (n) и дырок (p) в собственном полупроводнике одинакова $n_n = n_p$.

При перемещении электронов по кристаллу возможно и восстановление ковалентной связи. Этот процесс называется рекомбинацией, при этом носители зарядов «исчезают».

Рассмотрим процесс возникновения проводимости при наличии в полупроводниках примесей. Если в полупроводник ввести элементы V группы (например, в германий ввести фосфор), то 4 электрона фосфора образуют ковалентные связи с германием. Пятый электрон оказывается слабо связанным с атомом фосфора и может стать свободным при получении небольшой энергии порядка энергии теплового движения.

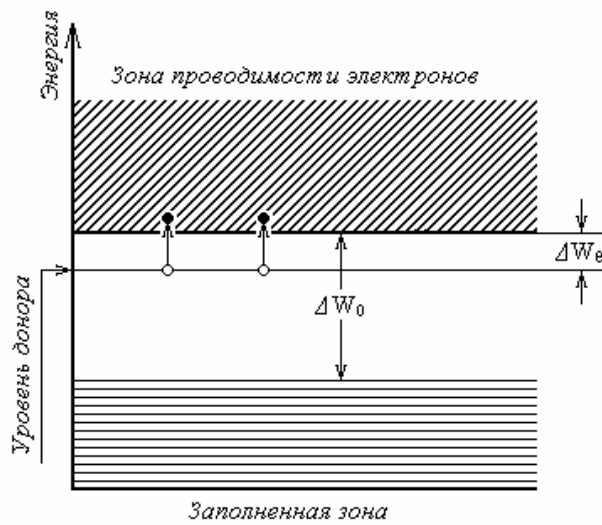


Рис.3

Такой вид проводимости называется электронным, а полупроводники называют полупроводниками n-типа (рис. 3,4).

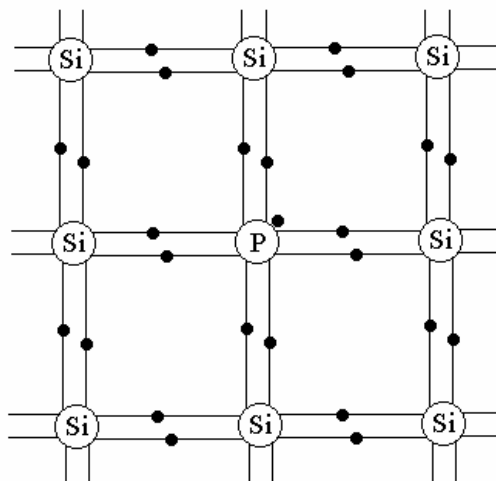


Рис.4

Если в полупроводник ввести элемент 3 группы таблицы Менделеева, то три электрона образуют ковалентные связи, а четвертая связь останется незаполненной, т.е. образуется дырка. Такой вид проводимости называется дырочным (p-типа).

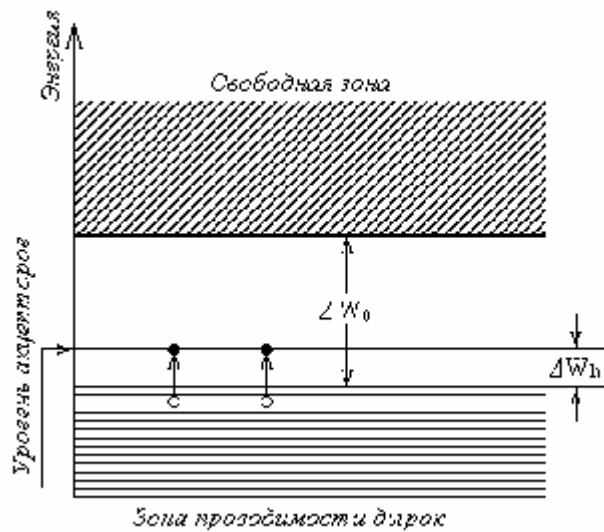


Рис. 5

С точки зрения зонной теории увеличение проводимости можно объяснить возникновением в зоне проводимости дополнительного примесного уровня. В случае проводимости n-типа дополнительный уровень возникает ближе к дну зоны проводимости (рис. 3). Поэтому небольшая энергия требуется для перевода электрона в зону проводимости. Такой уровень называется донорным, а примесь – донором (рис.4).

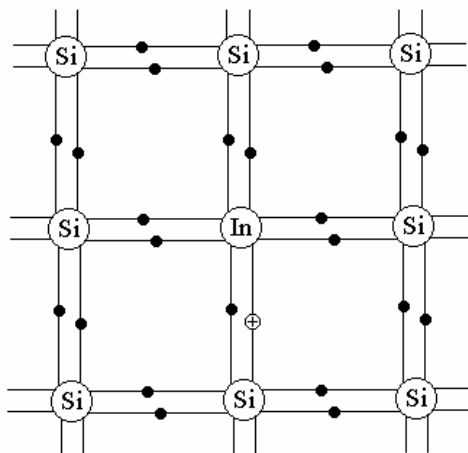


Рис.6.

Если возникает проводимость p-типа, то дополнительный уровень образуется вблизи потолка зоны валентной (рис.5).

Электроны из валентной зоны переходят на дополнительный уровень, образуя в валентной зоне дырку. Такой уровень называется акцепторным, а примесь акцептором.

Работа p-n – перехода.

В основе устройства любого полупроводникового прибора лежит p-n – переход.

Рассмотрим два полупроводника с различным типом проводимости, соединенные вместе в единую структуру (p-n – переход) рис.7.

В полупроводнике p-типа основными носителями являются дырки. В полупроводнике n-типа – электроны. Эти носители являются основными. В то же время в полупроводниках p-типа присутствует незначительное количество электронов, а в n-типа – дырок, которые являются не основными носителями. Различная концентрация носителей по обе стороны перехода приводит к

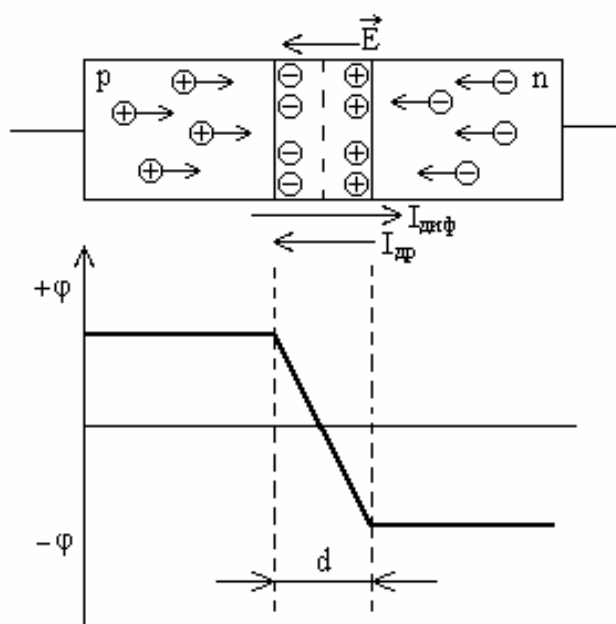


Рис.7.

диффузии основных носителей через переход: дырки движутся в n-область, электроны – в p-область.

Таким образом, через переход начинает течь ток диффузии $I_{диф}$. На границе перехода происходит и рекомбинация носителей. Вероятность этого процесса на границе наиболее высока. Рекомбинация приводит к уменьшению концентрации носителей на границе, что в свою очередь приводит к уменьшению скорости движения носителей. В результате по обе стороны перехода

выстраиваются заряды различного знака. Это приводит к замедлению процесса диффузии и образованию на границе р-п-перехода двойного электрического слоя и внутреннего электрического поля $E_{вн}$, которое препятствует дальнейшей диффузии основных носителей. Наличие внутреннего поля способствует движению не основных носителей через переход: электроны из р-области, и дырки из п-области дрейфуют через переход, создавая ток дрейфов $I_{др}$. Дрейфовый ток значительно меньше, чем диффузионный, т.к. концентрация не основных носителей значительно меньше концентрации основных.

Суммарный ток, протекающий через переход равен сумме токов.

$$I = I_{дифф} - I_{др}$$

Образование двойного электрического слоя и внутреннего поля $E_{вн}$ приводит к выравниванию токов основных и не основных носителей $I_{дифф} = I_{др}$ и, таким образом, ток через переход будет равен нулю.

Весь процесс протекает в доли секунды. Поведение р-п-перехода теперь будет зависеть от внешних условий и, прежде всего, от наличия внешнего электрического поля.

Если к р-области подключить положительный полюс источника питания, а к п-области – отрицательный, то появляется внешнее поле, которое направлено навстречу внутреннему полю и уменьшает внутреннее поле. Ток основных носителей через переход возрастает. А двойной электрический слой уменьшается (рис.8).

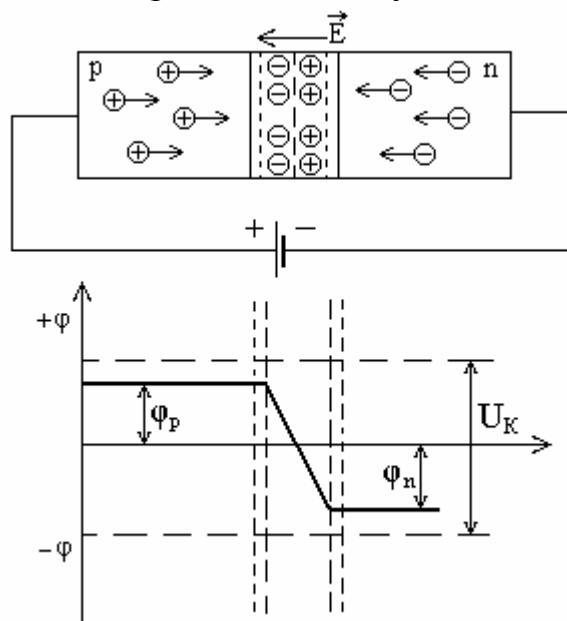


Рис.8.

Обратное включение приводит к уменьшению тока основных носителей и возрастанию дрейфового тока. Двойной электрический слой расширяется (рис.9).

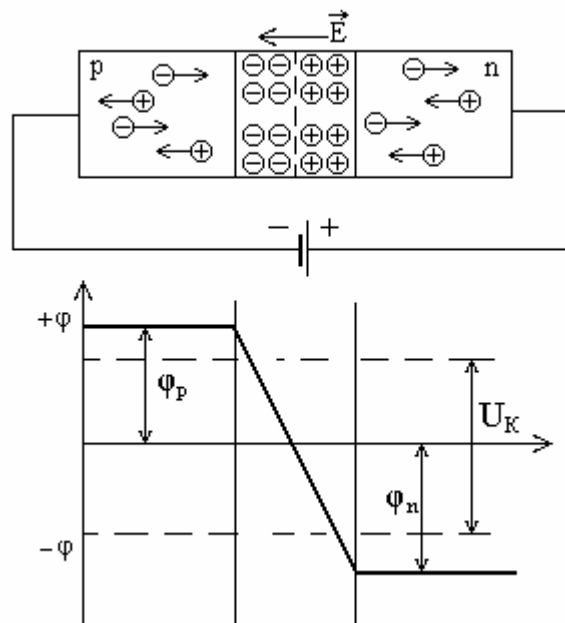


Рис.9.

Таким образом р-n-переход обладает односторонней проводимостью при наличии внешнего электрического поля. Именно это свойство перехода и используется при создании полупроводниковых приборов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИЗУЧЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА И ВЫПРЯМИТЕЛЯ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: 1. Изучить работу р-п-перехода.
2. Снять вольтамперную характеристику диода.
3. Изучить работу различных схем выпрямителя переменного тока.

ПРИБОРЫ: универсальный лабораторный стенд, осциллограф, вольтметр, сменная плата.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

В основе работы полупроводникового диода лежит работа р-п перехода. Свойство перехода проводить электрический ток только в одном направлении позволяет использовать их в качестве выпрямителей переменного тока.

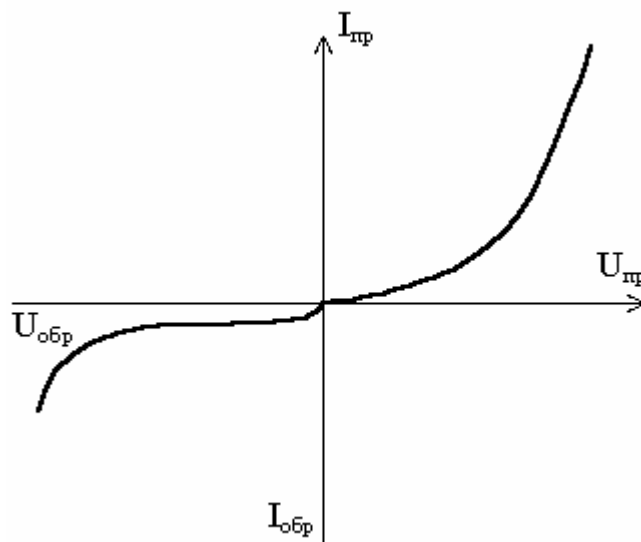


Рис. 1.

На рисунке 1 приведена вольтамперная характеристика диода. Прямая ветвь характеристики получена для напряжений $U_{пр}$ порядка десятков вольт, обратная ветвь получается при напряжении $U_{обр}$ порядка сотен вольт. Это означает, что диод хорошо проводит электрический ток в прямом направлении при достаточно низких значениях напряжения, пробой же диода происходит при достаточно высоком обратном (приложенном к закрытому

переходу) напряжении, для различных типов диодов это напряжение составляет сотни и даже тысячи вольт.

ВЫПРЯМИТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Способность диода проводить электрический ток только в одном направлении используется для создания выпрямителей переменного тока. Простейшая схема выпрямителя переменного тока показана на рисунке 2.

Данная схема предназначена для однополупериодного выпрямления переменного тока. Рассмотрим работу схемы. С вторичной обмотки трансформатора на вход схемы подается переменное напряжение U_2 (рис. 3). При подаче на вход диода переменного напряжения положительной

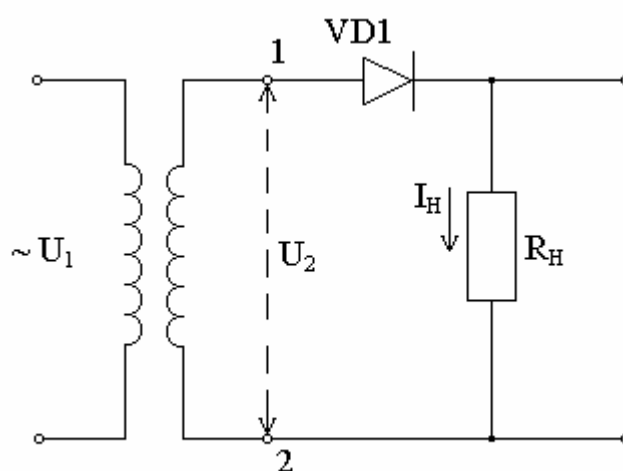


Рис. 2.

полярности, зажим T_1 (точка 1 на схеме) будет положителен по отношению к зажиму T_2 (точка 2 на схеме). Во время этого полупериода напряжение, подаваемое на диод, является прямым, и через диод проходит ток, создающий на нагрузочном резисторе падение напряжения U_H . В течение следующего полупериода входное напряжение отрицательно, потенциал зажима T_1 отрицательный, а зажима T_2 - положительный. Такое напряжение для диода является обратным, тока через диод почти нет, и напряжение на нагрузочном резисторе будет равно нулю $U_H = 0$.

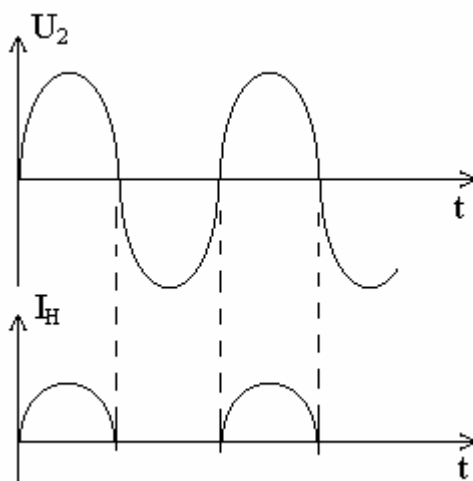


Рис. 3.

Таким образом, через диод и нагрузочный резистор проходит пульсирующий ток в виде импульсов, длительность которых равна половине периода переменного входного напряжения, пауза между импульсами также равна половине периода.

Рассмотрим работу двухполупериодного выпрямителя, схема которого показана на рис. 4. В отличие от предыдущей схемы в схему включены два диода $VD1$ и $VD2$, на которые от вторичной обмотки трансформатора подается переменное напряжение.

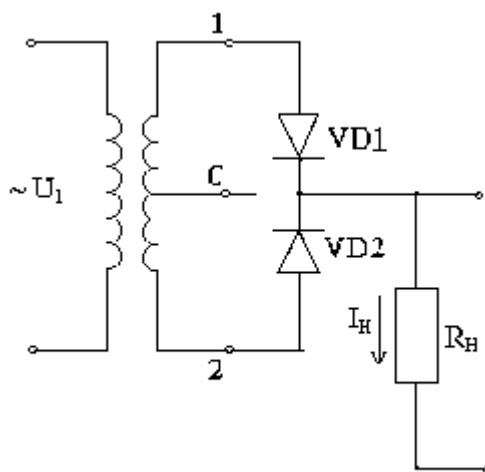


Рис. 4.

Два выпрямляющих диода имеют общую точку, с которой снимается выпрямленное напряжение. Когда между верхним выводом $T1$ вторичной обмотки и средней точкой Tc действует положительная полуволна переменного напряжения (см. рис. 4), то ток будет протекать через диод $VD1$, в то время как диод $VD2$ будет заперт. Когда же между нижним выводом обмотки $T2$ и средней точкой Tc действует положительная полуволна напряжения, диод

$VD1$ закрыт, а диод $VD2$ проводит ток, протекающий в направлении от нижнего вывода $T2$ вторичной обмотки через цепь нагрузки и замыкает, через общий провод. В отличие от схемы на рисунке 2 на выходе схемы с двумя диодами сигнал присутствует и в первый и во второй полупериод (рисунок 5), что делает эту схему более экономичной.

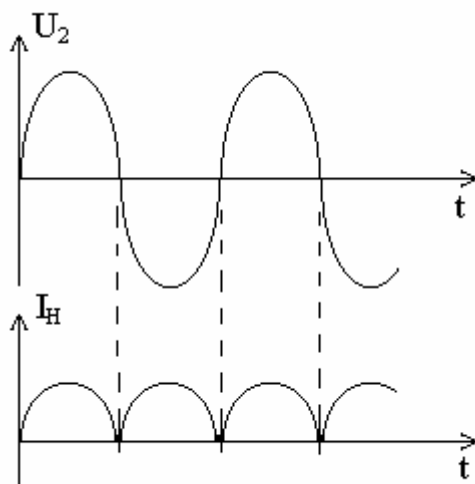


Рис.5.

Наиболее распространенной для создания выпрямителей переменного тока является мостовая схема. Мостовая схема применяется для двухполупериодного выпрямления переменного тока (рисунок 6).

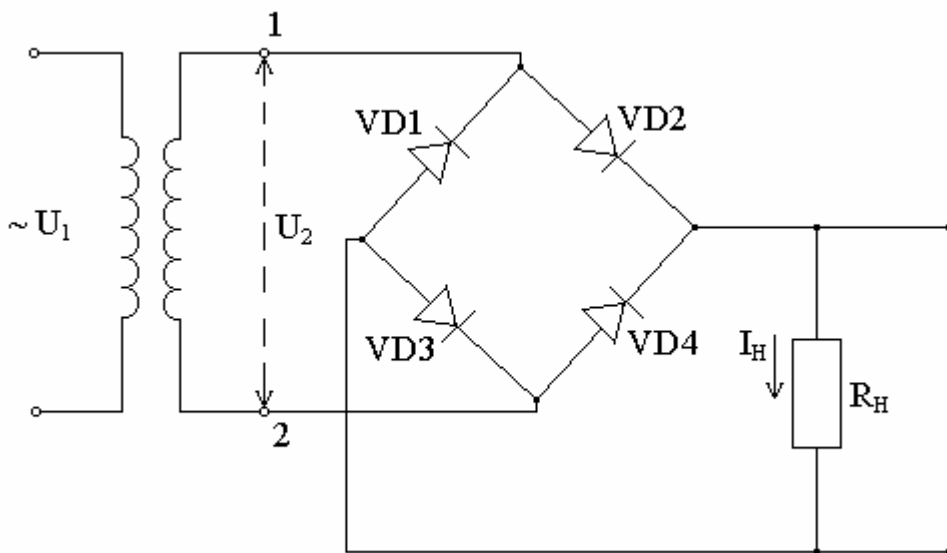


Рис.6.

В этой схеме переменное напряжение подается на противоположные узлы диодного моста и преобразуется в

пульсирующее выпрямленное напряжение, которое снимается с двух других узлов. При действии на входе схемы полуволны переменного напряжения (рис.5) положительной полярности зажим T_1 будет положителен по отношению к зажиму T_2 . В этом случае ток будет протекать через диод $VD2$, нагрузку R_n и диод $VD3$, затем к точке T_2 .

Полярность напряжения, приложенного к диодам $VD1$ и $VD4$, является запирающей, поэтому через эти диоды ток не проходит.

В течение следующего полупериода изменения входного напряжения потенциал точки T_1 отрицательный, а точки T_2 - положительный.

Поэтому ток будет течь от точки T_1 к узлу с диодами $VD1$ и $VD3$, и, поскольку лишь диод $VD1$ открыт для прохождения тока такого направления, далее ток проходит через этот диод, резистор R_n , создавая на нем падение напряжения той же полярности, что и в первом случае, а затем через диод $VD4$ к зажиму T_2 . Таким образом, мостовой выпрямитель обеспечивает двухполупериодное выпрямление переменного тока, попеременно включая две пары диодов: $VD2$ и $VD3$ при прохождении через цепь положительной полуволны, $VD1$ и $VD4$ при отрицательной полуволне входного напряжения.

СГЛАЖИВАНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ ВЫПРЯМЛЕННОГО ТОКА

Для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения в выпрямителях применяют специальные сглаживающие фильтры. Простейший сглаживающий фильтр представляет собой конденсатор большой емкости. Иногда в фильтрах используются дроссели, т.е. катушки с большой индуктивностью. Чем выше частота пульсаций, тем меньше сопротивление конденсатора и больше сопротивление дросселей, а, следовательно, тем эффективнее работает сглаживающий фильтр. Простейшая схема для сглаживания пульсаций с применением фильтра в виде конденсатора C , шунтирующего резистор нагрузки R_H может быть собрана на основе схемы 2. Для этого параллельно резистору нагрузки включается конденсатор большой емкости.

Во время положительного полупериода, когда напряжение на диоде прямое, через диод проходит ток, заряжающий конденсатор. Когда ток через диод не проходит, конденсатор разряжается через нагрузку R_H и создает на ней напряжение, которое постепенно снижается. В каждый следующий положительный полупериод конденсатор подзаряжается, и его напряжение снова возрастает.

Разрядка конденсатора через сравнительно большое сопротивление нагрузки совершается гораздо медленнее (рис. 7).

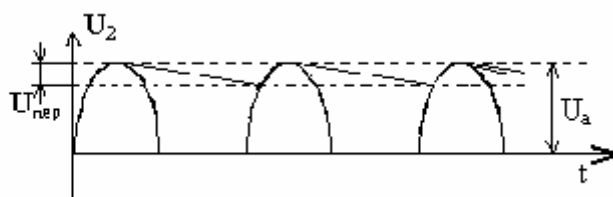


Рис. 7

Вследствие этого, напряжение на конденсаторе и включенной параллельно ему нагрузке пульсирует незначительно. На выходе схемы будет практически постоянное напряжение с небольшой по амплитуде переменной составляющей. Для устранения переменной составляющей можно поставить еще один конденсатор.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В лабораторной работе для изучения полупроводниковых приборов используется универсальный лабораторный стенд, который содержит источник переменного напряжения и сменную плату, на которой смонтированы диоды, резисторы и конденсаторы, необходимые для выполнения эксперимента.

Принципиальная электрическая схема сменной платы приведена на рисунке 8. На сменной плате расположены полупроводниковые кремниевые диоды VD , $VD1$, $VD2$, $VD3$, $VD4$, необходимые для изучения различных схем выпрямления переменного тока. Постоянные резисторы $R1$ и $R2$ являются нагрузочными сопротивлениями в исследуемых схемах. Наблюдение осциллограмм при изучении различных схем выпрямителей переменного тока осуществляется при помощи осциллографа.

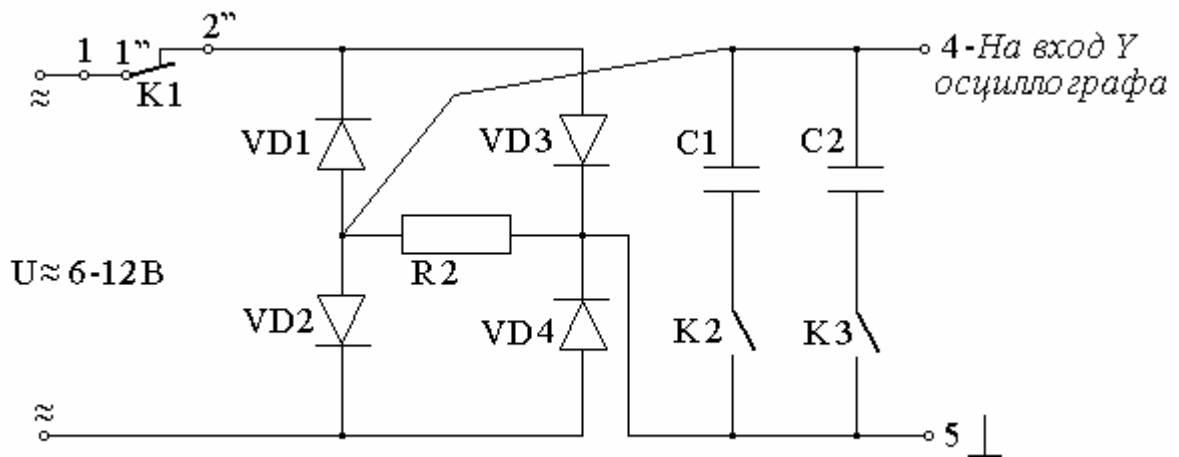


Рис. 8.

Конденсаторы $C1$ и $C2$ необходимы для сглаживания выпрямленного напряжения. Переключатели $K2$ и $K3$ предназначены для поочередного подключения конденсаторов в исследуемую цепь. При помощи переключателя $K1$ осуществляется подключение к источнику переменного напряжения одной из двух возможных электрических схем. В верхнем положении переключателя $K1$ (положение 1'- 2') реализуется схема для изучения двухполупериодного мостового выпрямителя, в нижнем положении $K1$ (положение 1'- 3') реализуется схема для снятия вольтамперной характеристики диода и изучения однополупериодного выпрямителя. На сменной плате имеется ряд дополнительных гнезд "1 - 5" для монтажа схем.

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

УПРАЖНЕНИЕ 1. *Наблюдение вольтамперной характеристики диода на экране осциллографа.*

Наблюдение вольтамперной характеристики диода на экране осциллографа осуществляется при помощи электрической схемы (рис. 9).

1. Данная электрическая схема собрана на сменной плате. Для наблюдения вольтамперной характеристики установите сменную плату в лабораторный стенд, отключите генератор развертки осциллографа от горизонтально отключающихся пластин осциллографа, при помощи соединительных проводов используя соответствующие гнезда "1 - 3", подсоедините осциллограф к схеме.

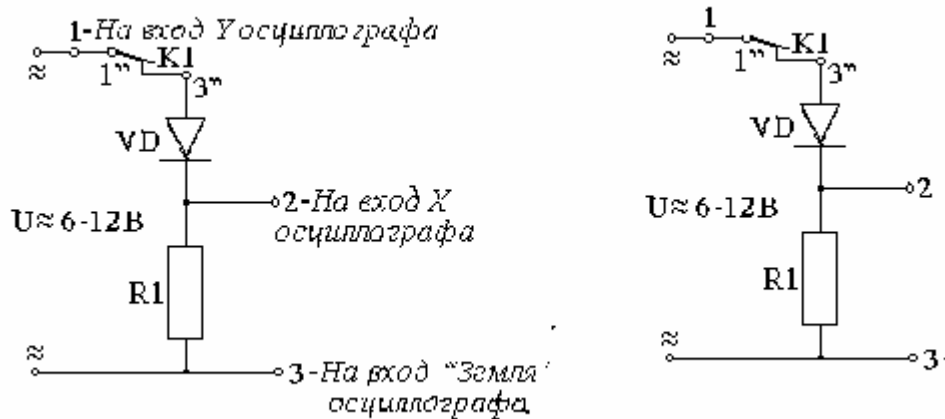


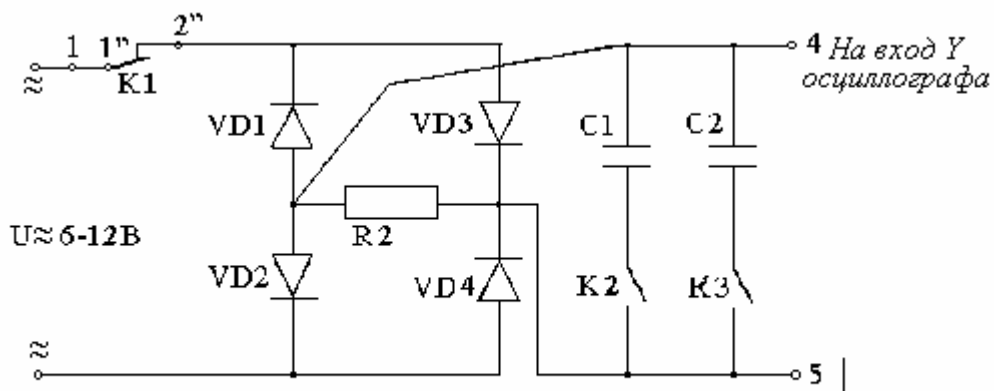
Рис. 9

2. Ключ $K1$ поставьте в нижнее положение.

3. Включите приборы в сеть, дайте им прогреться 10-15 минут. Схему подсоедините к осциллографу. На экране осциллографа будет видно изображение вольтамперной характеристики диода, которую необходимо зарисовать в тетрадь, сохраняя масштаб.

УПРАЖНЕНИЕ 2. Однополупериодный выпрямитель.

Для изучения однополупериодного выпрямителя на сменной плате собрана электронная схема, которая приведена на рис.2.



1. Для изучения работы однополупериодного выпрямителя осциллограф установите в режим внутренней развертки, т.е. подключите генератор развертки к горизонтально отклоняющим пластинам осциллографа.

2. При помощи соединительных проводов подайте переменное напряжение с гнезд "1-3" на выход "Y" осциллографа.

3. Ключ $K1$ поставьте в нижнее положение.

4. Установите на экране осциллографа изображение двух-трех периодов сигнала, зарисуйте осциллограмму переменного напряжения на миллиметровой бумаге.

5. Определите амплитудное значение U переменного напряжения и действующее значение напряжения при помощи осциллографа. В последующих упражнениях чувствительность осциллографа не меняйте.

6. Подайте на вход “Y” осциллографа выпрямленное напряжение с гнезд “1 - 2” или “1 - 3”.

7. Зарисуйте осциллограмму выпрямленного напряжения.

8. Определите амплитудное значение U_m выпрямленного (пульсирующего) напряжения при помощи осциллографа.

УПРАЖНЕНИЕ 3. Двухполупериодный мостовой выпрямитель.

Изучение двухполупериодного мостового выпрямителя осуществляется при помощи электрической схемы, которая дана на рис. 6.

1. Для наблюдения осциллограммы двухполупериодного выпрямителя установите сменную плату в стенд. На сменной плате переключатель K1 установите в положение “1 - 2”.

2. Подайте на вход “Y” осциллографа выпрямленное напряжение с гнезд “4 - 5”.

3. Зарисуйте осциллограмму выпрямленного напряжения.

4. Определите амплитудное значение U_m выпрямленного (пульсирующего) напряжения при помощи осциллографа.

УПРАЖНЕНИЕ 4. Сглаживание выпрямленного напряжения.

Изучение явления сглаживания выпрямленного напряжения осуществляется при помощи той же электрической схемы. В этом случае конденсаторы C1 и C2 подключаются к выходу выпрямителя с помощью тумблеров K2 и K3.

1. Получите на экране осциллографа и зарисуйте осциллограммы напряжений при одном и двух конденсаторах, подключенных к резистору R2 в двухполупериодный мостовой выпрямитель для сглаживания выпрямленного напряжения.

2. Определите при помощи осциллографа величину постоянной составляющей $U_{пост}$ выпрямленного напряжения.

3. Увеличивая чувствительность осциллографа по выходу “Y”, определите амплитуду переменной составляющей $U_{пер}$ для каждого конденсатора и рассчитайте коэффициент пульсаций, т.е.

сколько процентов составляет переменная составляющая $U_{ПЕР}$ от постоянной $U_{ПОСТ}$ составляющей по формуле

$$\kappa = (U_{ПЕР} / U_{ПОСТ}) \cdot 100\%.$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Какова природа собственной проводимости полупроводников?
2. Каким образом создается примесная электронная или дырочная электропроводимость?
3. Какие процессы происходят при образовании запирающего слоя при соединении полупроводников р- и n-типов?
4. Что происходит в р-n -переходе при действии внешнего электрического поля?
5. Объясните ход вольтамперной характеристики диода.
6. В чем заключаются преимущества и недостатки изучаемых выпрямительных схем?
7. Как происходит сглаживание пульсирующего напряжения? Какова роль конденсаторов при сглаживании?

ЛИТЕРАТУРА

[3], §11, с. 10-48; [6], §24, с.69-71; [2], §6.1, с.114-213.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА N2

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: 1. Снять входную характеристику транзистора.

2. Снять выходную характеристику транзистора.

ПРИБОРЫ: Универсальный вольтметр, специальный лабораторный стенд, сменная плата для изучения работы транзисторов.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

1.1. ПРИНЦИП РАБОТЫ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА.

Транзистор-это электропреобразовательный полупроводниковый прибор, который может служить для усиления слабых переменных токов и напряжений.

Он имеет три вывода: один управляющий, два других присоединяют к управляющей цепи.

По принципу работы различают биполярные и полевые (униполярные) транзисторы. Биполярные транзисторы управляются электрическим током; полярные - напряжением.

Устройство биполярных транзисторов типа n-p-n показано на рис. 1. Транзистор состоит из двух p-n переходов. Оба перехода

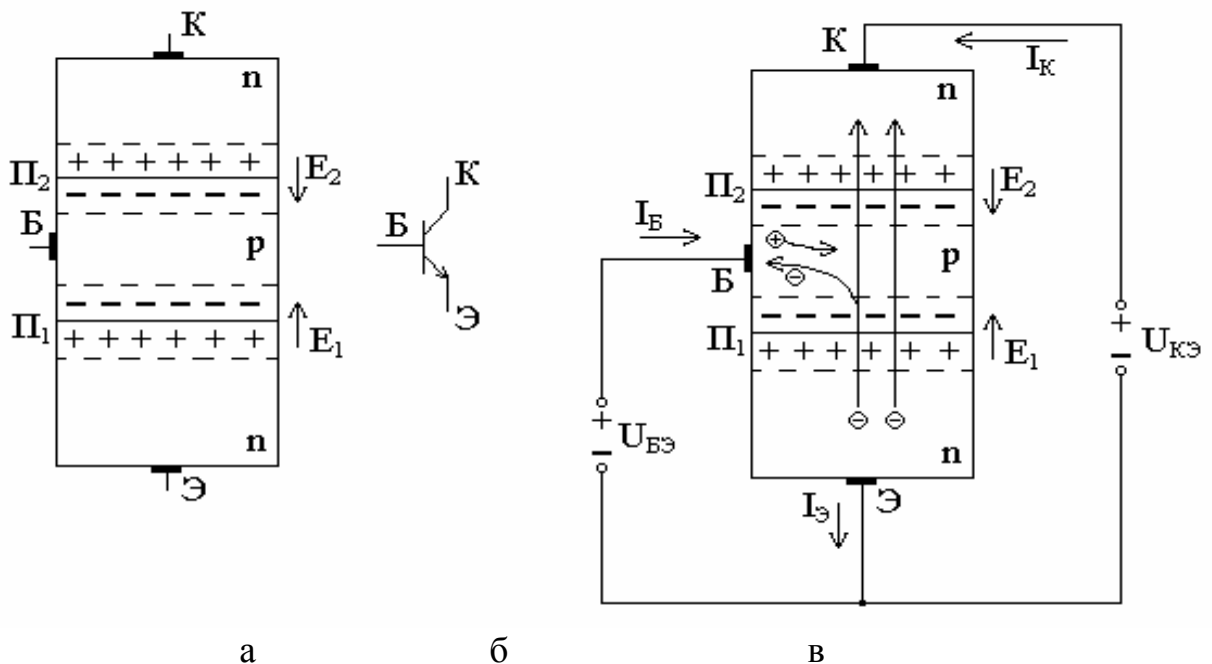


Рис.1

формируются на одном и том же кристалле полупроводника, при этом оба перехода имеют общую область, которую называют *базой* (B) с дырочной проводимостью (р - типа), а две крайние - с электронной проводимостью (п - типа), (транзистор р-п-р типа соответственно наоборот). К каждой области делают металлический контакт. Две крайние области транзистора называют *коллектором* (K) и *эмиттером* (\mathcal{E}). Эмиттер служит источником носителей заряда, коллектор собирает заряды, проходящие через оба перехода. Так же называют и контакты от соответствующих областей. Обозначение транзистора типа п-р-п в различных электронных схемах приведено на рисунке 1б (в обозначении транзистора п-р-п типа стрелка смотрит в другую сторону).

Схема включения транзистора п-р-п типа показана на рисунке 1в. Между базой и эмиттером подается напряжение $U_{B\mathcal{E}}$ таким образом, чтобы **эмиттерный** р-п-переход (Π_1 на рис 1в) был открыт. Между коллектором и эмиттером подается напряжение $U_{K\mathcal{E}}$ ($U_{K\mathcal{E}} > U_{B\mathcal{E}}$) так, чтобы **коллекторный** р-п-переход (Π_2 на рис. 1в) был заперт. Только такое включение обеспечивает работу транзистора в усилительном режиме.

Рассмотрим физические процессы, протекающие внутри транзистора. Через эмиттер идет поток основных носителей заряда электронов, т.к. эмиттерный переход Π_1 открыт. Они создают ток эмиттера ($I_{\mathcal{E}}$) и инжектируются (впускаются) из эмиттера в базу. Так как в базе основными носителями заряда являются дырки, то инжектированные электроны частично будут рекомбинировать (при соединении электрона и дырки восстанавливается ковалентная связь и два носителя заряда «исчезают»). Так как *толщина базы очень мала*, то количество дырок в ней мало, и лишь небольшая часть электронов рекомбинирует, в результате количество носителей заряда уменьшается незначительно. Большинство инжектированных электронов достигает коллекторного перехода.

Т.к. коллекторный переход Π_2 закрыт, то основные носители дырки из базы пройти в коллектор не могут. В закрытом переходе база-коллектор существуют объемные заряды, которые появляются из-за объединения области коллекторного р-п-перехода Π_2 основными носителями заряда (электронами со стороны п-области и дырками со стороны р-области). Эти заряды образуют двойной электрический слой, который имеет собственное электрическое поле E_2 . Это поле препятствует прохождению дырок через коллекторный переход, но является ускоряющим для не основных носителей базы – электронов, инжектированных в базу из эмиттера. Оно способствует движению электронов через коллекторный переход (втягивает их в коллектор). Эти электроны создают

коллекторный ток (I_K). Чтобы число дырок в базе оставалось прежним (а не уменьшалось за счет рекомбинации), в базе образуются новые дырки за счет уходящих во внешнюю цепь электронов, которые и создают ток базы I_B .

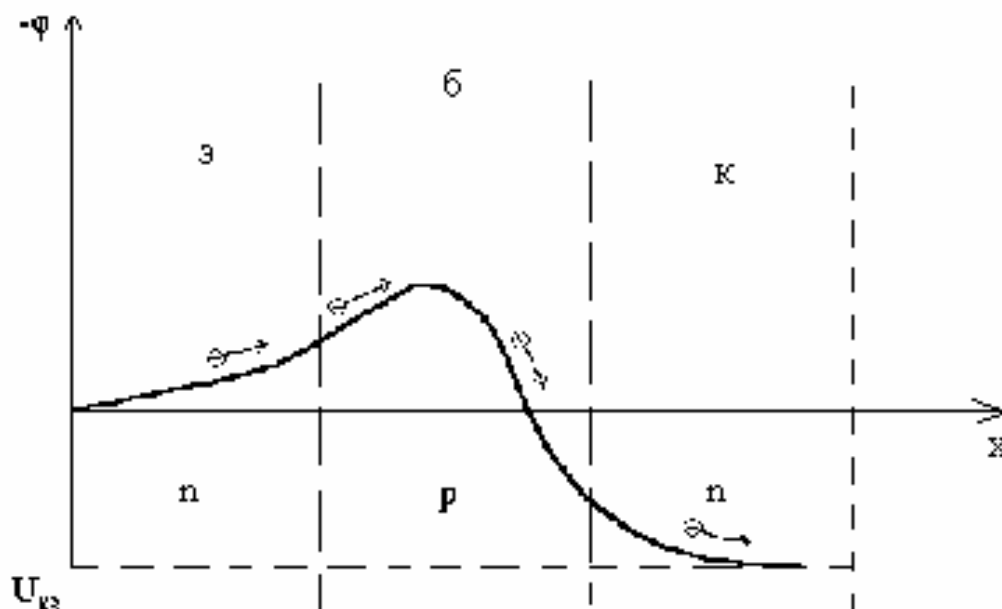


Рис. 2

ПРИМЕЧАНИЕ 1: на рис. 1 в направления токов противоположны направлению движения электронов и совпадают с направлением движения дырок. Это связано с положительностью заряда дырки и отрицательностью - электрона. Между рассмотренными токами, согласно правилу Кирхгофа, выполняется соотношение:

$$I_{\mathcal{E}} = I_B + I_K \quad (1)$$

Как было замечено ранее из-за малости числа дырок в базе по сравнению с числом инжектированных электронов:

$$I_K \gg I_B \quad (2)$$

$$\text{Из формулы (1) и (2) следует } I_{\mathcal{E}} \approx I_K \quad (3)$$

Работу биполярного транзистора можно наглядно представить с помощью потенциальной диаграммы (рис. 2).

На диаграмме приведено распределение потенциала между эмиттером и коллектором. Потенциал эмиттера принято считать равным нулю. В эмиттерном переходе для электронов имеется небольшой потенциальный барьер, высотой которого можно

управлять с помощью напряжения между эмиттером и базой $U_{БЭ}$. При увеличении $U_{БЭ}$ барьер уменьшается и наоборот.

На коллекторном переходе имеется значительная разность потенциалов за счет сильного электрического поля в области объемных зарядов (рис. 1в). Электроны, двигаясь из эмиттера в базу, поднимаются на горку, а затем ускоренно с нее спускаются через коллекторный переход: Чем выше горка, тем меньше количество электронов способно подниматься на нее (лишь самые быстрые) и наоборот.

ПРИМЕЧАНИЕ 2: Мы рассмотрели физические явления в транзисторе типа n-p-n. Подобные же процессы происходят в транзисторе p-n-p-типа, но в нем меняются ролями электроны и “дырки”, а также изменяются полярности напряжений и направления токов.

1.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

Зависимость между токами и напряжениями имеет очень сложный характер. Закон Ома при этом не выполняется. Все зависимости имеют существенную нелинейность. Наиболее часто рассматриваются входные и выходные характеристики биполярного транзистора.

ВХОДНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА или характеристика управляющей цепи - это зависимость тока базы I_B от напряжения между эмиттером и базой $U_{БЭ}$ при постоянном напряжении на переходе база – коллектор (рис.3.).

$$I_B = f(U_{БЭ}) \text{ при } U_{КЭ} = \text{const} \quad (4)$$

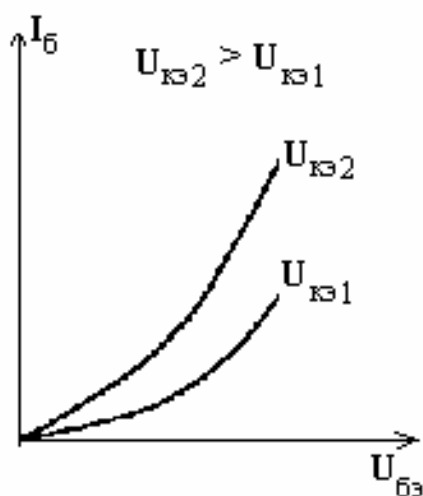


Рис.3

ВЫХОДНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА или характеристика управляемой цепи - это зависимость тока коллектора I_K от напряжения между коллектором и эмиттером $U_{КЭ}$ при постоянном токе базы I_B (рис.4).

$$I_K = f(U_{КЭ}) \text{ при } U_B = \text{const} \quad (5)$$

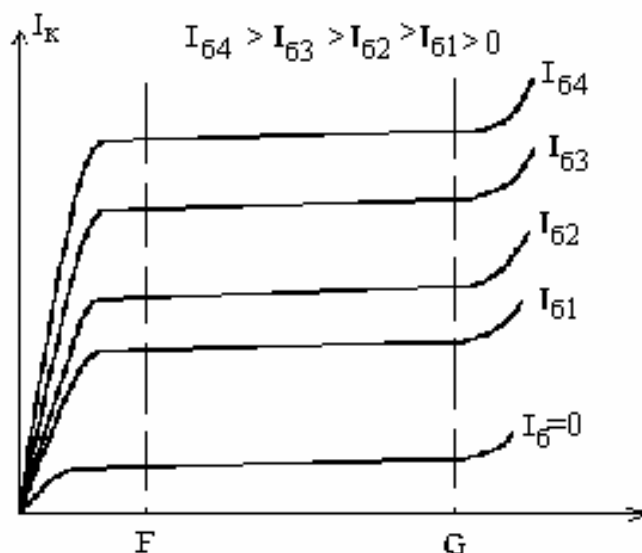


Рис.4

Входные характеристики относятся к эмиттерному переходу. Он открыт, и поэтому зависимость $I_B = f(U_{БЭ})$ похожа на вольтамперную характеристику диода, работающего при прямом включении.

Выходные характеристики относятся к коллекторному переходу, находящемуся в закрытом состоянии, поэтому зависимость $I_K = f(U_{КЭ})$ при $I_B = 0$ подобна характеристике диода при обратном включении. Если $I_B \gg 0$, то выходная характеристика расположена выше, чем $I_B = 0$. Увеличение тока базы означает, что увеличилось напряжение $U_{БЭ}$ (рис. 3). Это увеличение приводит к уменьшению высоты барьера для электронов в области базы (рис. 2). Но тогда большее количество электронов за счет своих тепловых скоростей сможет перейти через барьер. Вследствие этого увеличивается ток коллектора I_K .

$$I_{Б4} > I_{Б3} > I_{Б2} > I_{Б1} > 0$$

Благодаря линейной зависимости I_K и I_B (см. уравнение 1) пологие участки соседних выходных характеристик расположены приблизительно на одинаковых расстояниях друг от друга, если I_B пропорционально возрастает (рис 3).

Существование пологого участка на выходной характеристике (рис. 4), где ток коллектора не зависит от $U_{КЭ}$ при $I_K = \text{const}$, объясняется следующим образом: при увеличении $U_{КЭ}$ падение напряжения в области коллекторного перехода возрастает, и электроны быстрее скатываются с горки, но через базу их может пройти лишь фиксированное количество. Количество электронов определяется высотой барьера в области базы (а она остается постоянной из-за $I_B = \text{const}$). Т.к. I_K определяется количеством электронов, скатившихся с горки, то I_K не изменяется при повышении $U_{КЭ}$.

При очень большом значении $U_{КЭ}$ наступает пробой коллекторного перехода и транзистор утрачивает свои свойства.

Зависимость коллекторного тока I_K от тока базы I_B называется *управляющей характеристикой* транзистора.

$$I_K = f(I_B) \text{ при } U_{КЭ} = \text{const} \quad (6)$$

При токе базы $I_B = 0$ ток коллектора $I_{K0} > 0$, но очень мал, так как это ток не основных носителей заряда, движущихся через коллекторный переход.

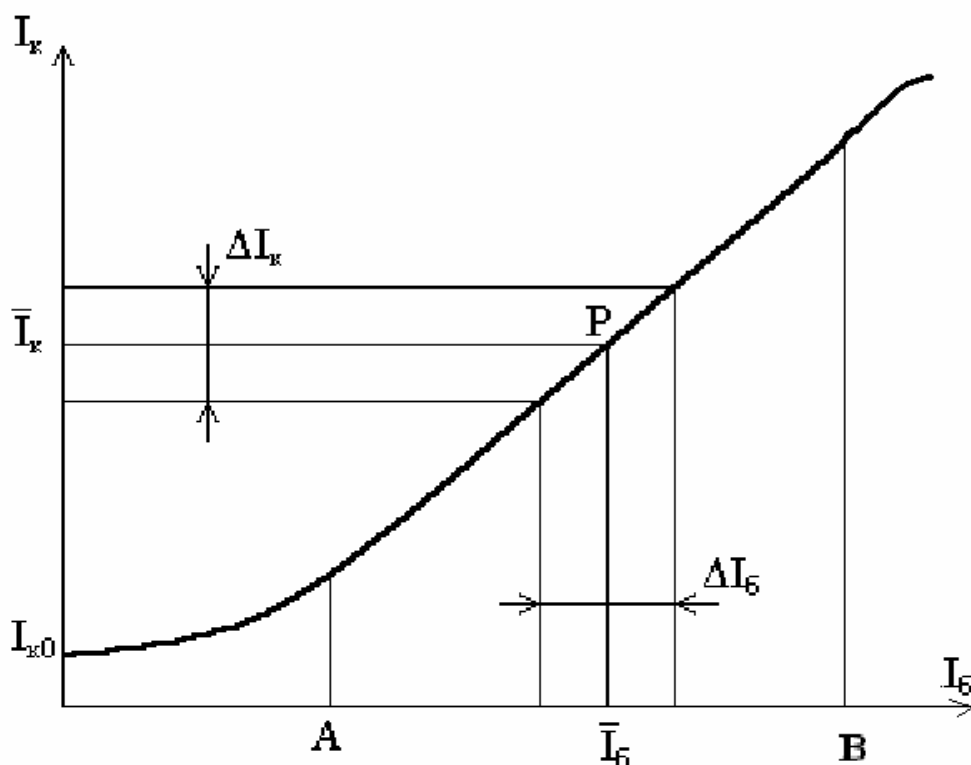


Рис. 5

Ранее уже было сказано, что ток коллектора I_K зависит от тока базы I_B (уравнение 1). Этот факт объясняет существование прямолинейного участка на кривой управления (рис.5). Кривые, снятые при других значениях $U_{KЭ}$ совпадают с приведенной кривой, в связи с независимостью коллекторного тока I_K от $U_{KЭ}$ в области FG.

Режим работы транзистора выбирают таким, что точка $P(I_K, I_B)$ находится на середине прямолинейного участка. При малом изменении базового тока ΔI_B вблизи точки P ток коллектора существенно изменяется:

$$\Delta I_K \gg \Delta I_B \quad (7)$$

Биполярный транзистор можно также использовать для усиления переменных напряжений. Для этого в цепь коллектора включают сопротивление R_K (рис. 6), которое является нагрузкой коллектора и задает режим работы транзистора, в цепь эмиттер-база включают базовый резистор R_B . Усиливаемый переменный сигнал подается на базу через конденсатор C_P , усиленное переменное напряжение снимается с коллектора транзистора VT_1 , через конденсатор C_n .

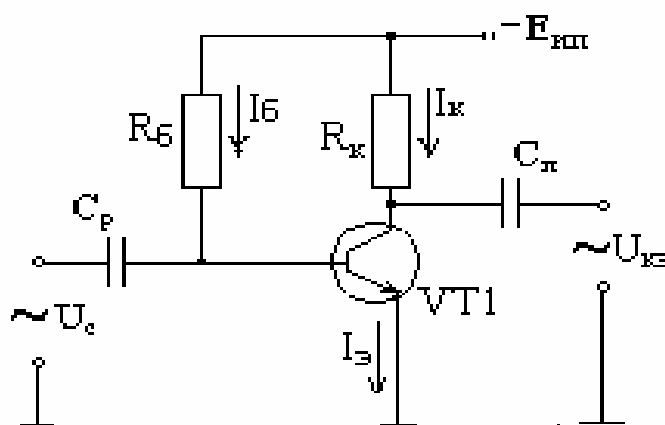


Рис.6

Величина

$$\beta = \Delta I_K / \Delta I_B \text{ при } U_{KЭ} = \text{const} \quad (8)$$

называется **СТАТИСТИЧЕСКИМ КОЭФФИЦИЕНТОМ УСИЛЕНИЯ ТРАНЗИСТОРА ПО ТОКУ**. Обычно $\beta = 10-300$, т.е. возможно усилить слабый переменный ток при помощи транзистора в 10-300. На базу подают дополнительное переменное напряжение,

которое вызывает изменение тока базы, а на коллекторе получают во много раз усиленный ток.

2. ОПИСАНИЕ СМЕННОЙ ПЛАТЫ И МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРОВ

На рисунке 7 приведена схема для изучения работы транзисторов. На транзисторе $VT3$ и переменном сопротивлении $R6$ собран управляемый источник напряжения. Напряжение источника может регулироваться с помощью резистора $R6$ и подаваться в управляемые цепи изучаемых транзисторов $VT1$ и $VT2$. Напряжение можно изменять в пределах 0-15 В.

Переменное сопротивление $R2$, подключенное последовательно с сопротивлениями $R1$ и $R3$ к источнику питания между зажимами +15В и -15В, представляет собой делитель напряжения, позволяющий регулировать с помощью $R2$ напряжение, которое подается в управляющую цепь биполярного транзистора $VT1$, тем самым изменяя базовый ток I_B . Значения сопротивлений подобраны так, что напряжение между базой и эмиттером $U_{БЭ}$ может быть как положительным, так и отрицательным.

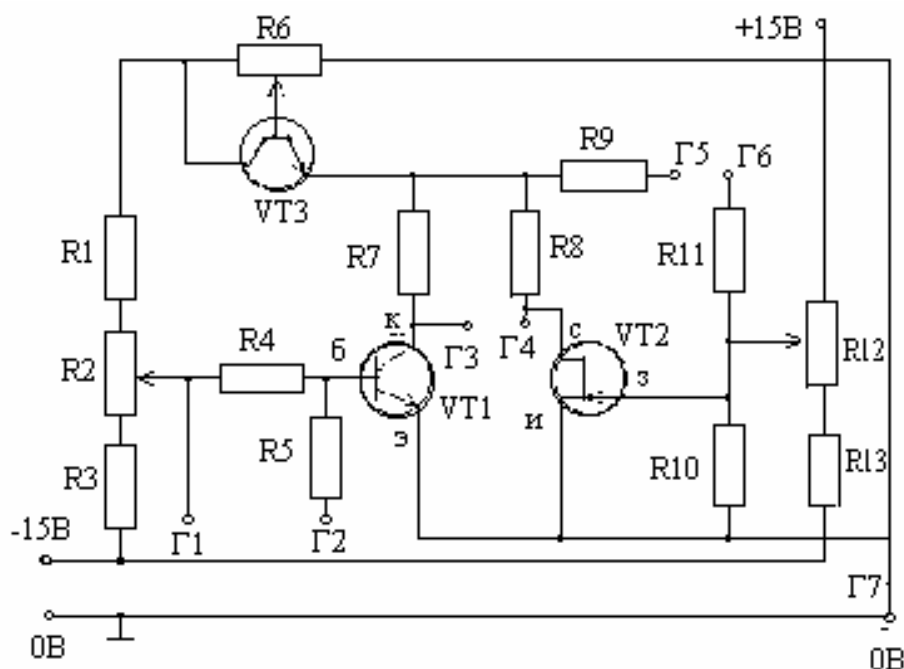


Рис.7

Аналогично переменное сопротивление $R12$ и сопротивление $R13$, подключенное к тому же источнику питания, образуют делитель напряжения, который подает в цепь затвора полевого транзистора $T2$ напряжение $U_{ЗИ}$. Напряжение $U_{ЗИ}$ может

регулироваться с помощью $R12$ и меняться от отрицательных до положительных значений.

В данной работе для определения напряжения используется вольтметр, поэтому для изменения токов в управляемых цепях транзисторов $VT1$ и $VT2$ включены сопротивления $R7$ и $R8$ соответственно. Измеряя разность потенциалов на концах сопротивления $R7$ (гнезда $\Gamma3, \Gamma5$) и зная величину сопротивления $R7$ можно по закону Ома найти коллекторный ток I_K :

$$I_K = \Delta\varphi/R7. \quad (9)$$

Между гнездами $\Gamma3$ и $\Gamma5$ кроме сопротивления $R7$ включено также сопротивление $R9$, но через него никакие токи не текут, поэтому на нем нет падения напряжения. Роль $R9$ состоит в том, что оно защищает транзистор $VT3$ от неправильного включения вольтметра, одна из клемм которого соединена с корпусом (0).

Аналогично, измеряя разность потенциалов на концах $R8$ (гнезда $\Gamma4, \Gamma5$), можно найти ток стока I_C транзистора $VT2$.

Напряжение $U_{БЭ}$ (на $VT1$) можно изменить, подключая вольтметр к гнезду $\Gamma2$; а напряжение $U_{ЗИ}$ (на $VT2$) - гнезду $\Gamma6$. Сопротивления $R5$ и $R11$ играют роль защиты (ту же, что и $R9$).

Для изменения $U_{КЭ}$ (на $VT1$) необходимо подключить вольтметр к $\Gamma3$, а для измерения $U_{СИ}$ (на $VT2$) - к $\Gamma4$. И, наконец, для нахождения тока базы I_B (для $VT1$) необходимо измерить разность потенциалов на концах сопротивления $R4$, включенного в цепь базы, (гнезда $\Gamma1$ и $\Gamma2$). Сопротивление $R5$ аналогично играет роль защиты.

ПРИМЕЧАНИЕ 3. Общий провод вольтметра подключается к гнезду $\Gamma7$ (0, корпус) и не отключается в процессе измерений!

Поэтому мы измеряем потенциалы гнезд относительно корпуса. Например, чтобы найти напряжение на $R2$, необходимо подключить другую клемму вольтметра (с белой изоляцией) к $\Gamma1$, снять значение потенциала φ_1 гнезда $\Gamma1$, а лишь подключить к гнезду $\Gamma2$ и снять значение его потенциала φ_2 . Тогда разность потенциалов на концах $R4$ равна $-\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$.

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

УПРАЖНЕНИЕ 1. Снятие входной характеристики биполярного транзистора ($I_B = f(U_{БЭ})$ при $U_{КЭ} = const$).

1) Включите УЛС (универсальный лабораторный стенд) и вольтметр в сеть и прогрейте в течение 10 мин.

2) Подсоедините общий провод вольтметра к гнезду Г7 и не отсоединяйте его во время измерений.

3) Подключите вольтметр к гнезду Г3 и установите с помощью потенциометра R_B потенциал коллектора $\varphi_3 = 5$ В) т.е. напряжение между коллектором и эмиттером $U_{КЭ} = 5$ В).

4) Подключите вольтметр к гнезду Г2 и установите с помощью потенциометра $R2$ потенциал базы $\varphi_2 = 0$ В (т.е. напряжение между базой и эмиттером $U_{БЭ} = 0$ В).

5) Проверьте снова величину $U_{КЭ}$ (т.е. потенциал φ_3 гнезда Г3) и, если нужно, установите расхождение с прежним значением. Затем снова проверьте величину $U_{БЭ}$ (т.е. потенциал φ_2 гнезда Г2) и т.д.

Всю эту процедуру назовем **МЕТОДОМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ПРИБЛИЖЕНИЙ**. Эта процедура необходима, т.к. изменение одного параметра приводит к изменению другого.

При помощи вольтметра измерьте потенциал φ_1 (гнездо Г1) и φ_2 (гнездо Г2) на концах сопротивления $R4$. По разности потенциалов $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ определите ток базы I_B , протекающий через сопротивление $R4$ по формуле

$$I_B = \Delta\varphi / R4 \quad (10)$$

7) Данные запишите в таблицу 1.

Таблица

1.

$\varphi_2(U_{БЭ}),$ В	φ_1	$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$	$I_B = \Delta\varphi / R4$

8) Измерьте напряжение $U_{БЭ}$ (т.е. потенциал φ_2 гнезда Г2) и, корректируя $U_{КЭ}$ на требуемом уровне ($\varphi_3 = 5$ В), найдите новое значение тока базы I_B .

9) Снимите зависимость тока базы I_B от напряжения $U_{БЭ}$, оставляя неизменным $U_{КЭ}$.

10) Снимите аналогичную зависимость при $U_{КЭ} = 10$ В, записывая данные в аналогичную таблицу 2.

11) По результатам измерений постройте графики на миллиметровой бумаге.

УПРАЖНЕНИЕ 2. Снятие выходной характеристики биполярного транзистора ($I_K = f(I_{KЭ})$ при постоянном токе базы $I_B = const$).

Так как величина $R4$ значительно превышает сопротивление эмиттерного перехода, то ток базы I_B определяется почти ею. Поэтому напряжение $U_{КЭ}$ будет слабо влиять на ток базы I_B , в связи с этим корректировка тока базы (при не изменном $U_{КЭ}$) не понадобится.

1) Присоедините общий провод вольтметра к гнезду $\Gamma7$ и не отсоединяйте его во время измерений.

2) Подключите вольтметр к гнезду $\Gamma3$ и установите с помощью потенциометра $R6$ потенциал коллектора $\varphi_3 = 0$ В) т.е. напряжение между коллектором и эмиттером $U_{КЭ} = 0$ В).

3) Подключите вольтметр к гнезду $\Gamma2$ и установите с помощью потенциометра $R2$ потенциал базы $\varphi_2 = 0$ В (т.е. напряжение между базой и эмиттером $U_{БЭ} = 0$ В). Следовательно, ток базы $I_B = 0$.

4) Измерьте потенциал φ_3 (гнездо $\Gamma3$) и, φ_5 (гнездо $\Gamma5$), запишите данные в таблицу 3. По разности потенциалов $\Delta\varphi = \varphi_5 - \varphi_3$ определите ток коллектора I_K по формуле (11):

$$I_K = \Delta\varphi/R7 \quad (10)$$

	$I_B =$	
$\varphi_3(U_{КЭ})$	φ_5	I_K

Повторите измерения, изменяя напряжения $U_{КЭ}$ (гнездо $\Gamma3$) от 0,5 В до 8 В и измеряя потенциал φ_5 . Ток базы I_B должен оставаться неизменным.

6) Рассчитайте ток коллектора I_K по формуле (11) и данные занесите в таблицу 3.

7) Заготовьте аналогичные таблицы 4 и 5.

8) Снимите аналогичные зависимости при других токах базы, подавая сначала на гнездо $\Gamma1$ потенциал $\varphi_1 = 1,31$ В, а затем устанавливая $\varphi_1 = 2,00 - 2,10$ В. Ток базы, определяемый по формуле (10), должен оставаться неизменным.

9) Постройте графики всех трех зависимостей на миллиметровой бумаге.

УПРАЖНЕНИЕ 3. Снятие характеристики управления биполярного транзистора ($I_K = f(I_B)$ при постоянном напряжении на коллекторе базы $U_{КЭ} = const$).

1) По результатам упр. 2 выберите значение $U_{КЭ}$ на пологом участке выходной характеристики ($U_{КЭ} = 7-6$ В). Заготовьте табл. 6 для занесения результатов измерений.

Таблица 6

$\varphi_1(U_{БЭ})$	φ_2	I_B	φ_3	φ_5	I_K

2) Подсоедините общий провод вольтметра к гнезду $\Gamma 7$ отсоединяйте его во время измерений.

3) Подключите вольтметр к гнезду $\Gamma 3$ и установите с помощью потенциометра $R6$ выбранный потенциал коллектора $\varphi_3 = 6-7$ В (т.е. напряжение между коллектором и эмиттером $U_{КЭ} = 6-7$ В).

4) Подключите вольтметр к гнезду $\Gamma 2$ и установите с помощью потенциометра $R2$ потенциал гнезда $\Gamma 1$ $\varphi_1 = 0,5$ В. Установку потенциалов произведите *методом последовательных приближений*.

5) Измерьте потенциалы $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_5$ (на гнездах $\Gamma 1, \Gamma 2, \Gamma 3, \Gamma 5$), рассчитайте токи базы I_B и коллектора I_K по формулам (10) и (11). Данные занесите в таблицу 6.

6) Повторите измерения, изменяя потенциал φ_1 и корректируя напряжение на коллекторе $U_{КЭ}$ (φ_3 на гнезде $\Gamma 3$).

7) Данные занесите в таблицу 6 и постройте график зависимости тока коллектора I_K от тока базы I_B .

8) Найдите статический коэффициент усиления по току по формуле (8).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что представляет собой транзистор p-n-p- и n-p-n-типов?
2. Какую роль играют эмиттер, база и коллектор транзистора?
3. Почему базу транзистора делают тонкой?
4. Какие носители заряда являются основными и не основными в эмиттерной, базовой и коллекторной областях транзистора?
5. Для каких носителей заряда коллекторный переход включается в обратном направлении?
6. По какой схеме и как снимаются входные характеристики транзистора?

7. По какой схеме и как снимаются выходные характеристики транзистора?

8. Объяснить сходство между входными и выходными характеристиками транзистора, с одной стороны, и вольтамперной характеристикой диода, с другой?

9. Что такое коэффициент усиления транзистора по току и как он определяется?

ЛИТЕРАТУРА

[1], §5.4-5.8, с. 91-118; [3], §1.2, с.53-86; [2], §6.2, с.123-129; [6], §26, с.74-78.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: 1. Снять входную характеристику транзистора: зависимость $I_{зи} = f(U_{зи})$.
2. Снять выходную характеристику транзистора: зависимость $I_c = f(U_{си})$.

ПРИБОРЫ: Цифровой вольтметр, универсальный лабораторный стенд, сменная плата для изучения работы транзисторов.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

1.1. ПРИНЦИП РАБОТЫ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА.

Полевые или полярные транзисторы управляются напряжением. Чаще всего они используются для усиления слабых переменных напряжений.

Устройство полевого (униполярного) транзистора с каналом n-типа, его условное обозначение и схема включения приведены на рисунке 1.

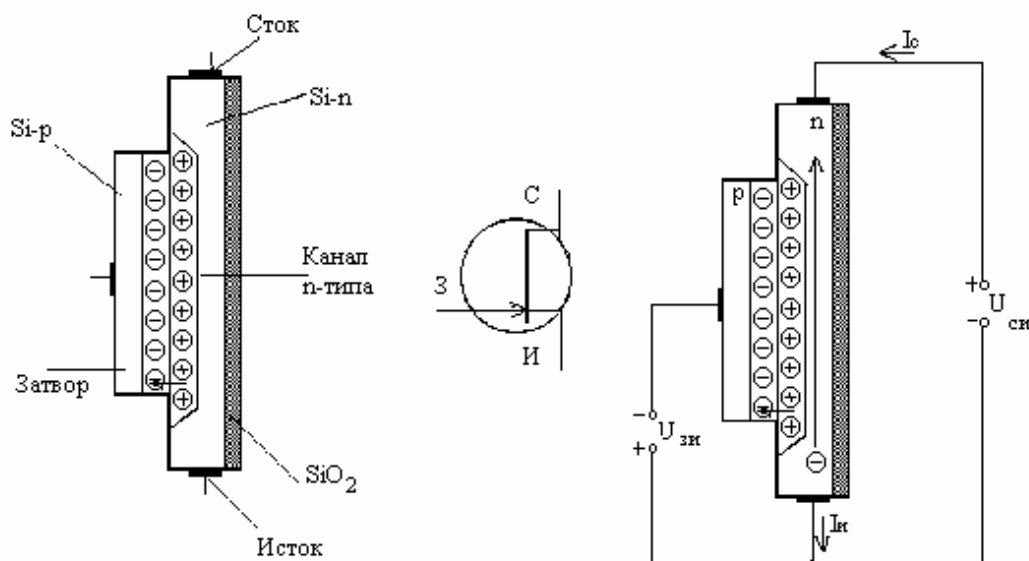


Рис.1

В отличие от биполярного транзистора полевой транзистор имеет один р-п переход. Электроды полевого транзистора включаются таким образом, чтобы ток протекал не через переход, а вдоль перехода. Для этого на противоположные концы пластинки из полупроводника n-типа наносят металлические контакты с выводами, которые называются соответственно истоком (I) и стоком (C) (подобны эмиттеру и коллектору).

Управляющий вывод отведен от области с проводимостью р-типа, он играет роль, аналогичную базе биполярного транзистора, и называется затвором (Z).

Между затвором и истоком подается напряжение такой полярности, чтобы единственный р-п-переход оказался закрытым. Напряжение другой полярности на затвор *не подают никогда*, потому что в этом случае через переход будет течь прямой ток, который приведет к перегреву и нарушению работы транзистора и, в конечном итоге, к разрушению перехода. В этом состоит существенное отличие устройства полевого транзистора от устройства биполярного транзистора.

Между стоком и истоком подают положительное напряжение $U_{СИ}$.

Физические процессы в полевом транзисторе происходят следующим образом: вдоль области n-типа течет ток основных носителей заряда - электронов (рис. 1в). При этом в цепи истока течет ток истока I_I . При запирающем входном напряжении $U_{ЗИ}$ в области р-п-перехода образуется обедненный основными носителями заряда слой (переход закрыт, через него невозможно прохождение основных носителей). Поэтому тока в цепи затвора практически нет.

$$I_Z = 0 \quad (1)$$

Ток затвора I_Z на практике не равен 0, т.к. в цепи присутствует очень слабый ток не основных носителей заряда, и им можно пренебречь. Площадь поперечного сечения области, через которую проходит поток основных носителей, зависит от напряжения между затвором и истоком. Эта область называется каналом n-типа. Электроны, прошедшие через канал транзистора, образуют ток в цепи стока I_C , причем, учитывая соотношение (1) можно записать:

$$I_C = I_I \quad (2)$$

Управляя напряжением $U_{зп}$, можно менять ширину канала и регулировать количество проходящих электронов, а, значит, и ток стока I_c . При некотором значении напряжения $U_{зп0}$ граница обеденного слоя может достигнуть правой границы канала. Канал исчезает, ток через транзистор прекращается (транзистор запирается). Напряжение $U_{зп0}$ называют напряжением запираения транзистора.

Полевой транзистор с каналом р-типа работает аналогично. При рассмотрении работы полевого транзистора с каналом р-типа необходимо поменять ролями электроны и дырки, а также сменить полярности напряжений и направления токов. Стрелка в условных обозначениях направлена в обратную сторону.

1.2 ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА.

Так как полевой транзистор управляется не током, а напряжением, его входные и выходные характеристики отличаются от характеристик биполярного транзистора.

ВХОДНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА: это зависимость тока стока от напряжения затвор-исток $I_c = f(U_{зп})$ при постоянном напряжении сток-исток $U_{си} = const$.

Входные характеристики, снятые при различных напряжениях $U_{си}$ практически совпадают. Это означает, что выходная цепь не влияет на входную (в этом заключается преимущество полевого транзистора над биполярным транзистором, у которого взаимное влияние входной и выходной цепи значительное). Общий вид зависимости показан на рис 2.

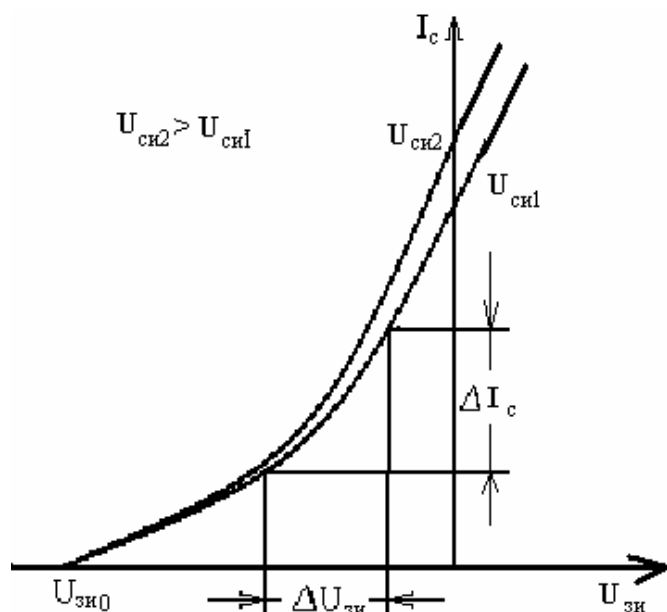


Рис. 2

ВЫХОДНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА: это зависимость тока стока от напряжения сток-исток $I_C = f(U_{СИ})$ при постоянном напряжении затвор-исток $U_{ЗИ} = const$. Выходная характеристика представлена на рис 4.

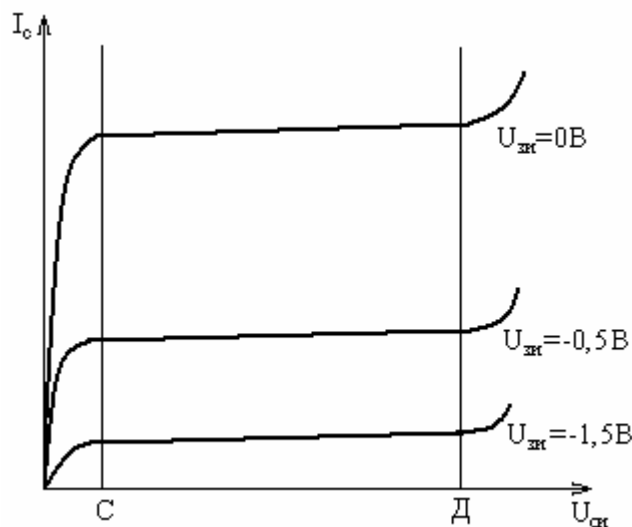
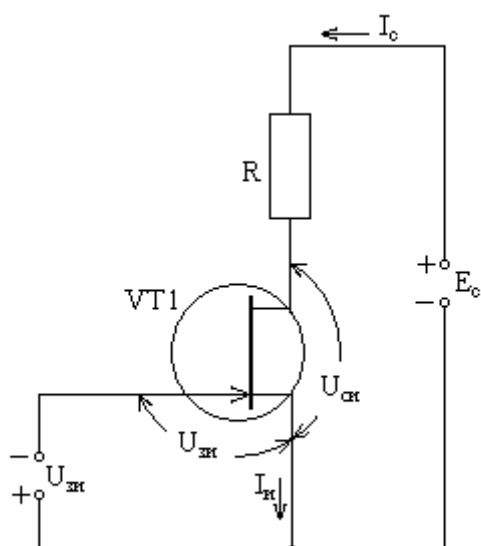


Рис.3

Выходные характеристики полевого транзистора несколько отличается от характеристик биполярного транзистора. У полевого транзистора область CD значений $U_{СИ}$, где ток стока I_C не зависит от напряжения сток-исток $U_{СИ}$ при фиксированном напряжении $U_{ЗИ}$, имеет значительную протяженность, но область возрастания I_C достаточно крутая.

Существование пологого участка выходной характеристики можно объяснить следующим образом: при увеличении напряжения между стоком и истоком $U_{СИ}$ (при $U_{ЗИ} = const$) увеличивается напряжение на закрытом p-n-переходе со стороны стока. Это приводит к росту обедненной основными носителями области и к уменьшению толщины канала. Получается, что ток стока I_C растет за счет увеличения напряжения между стоком и истоком $U_{СИ}$, но одновременно ток стока I_C уменьшается за счет уменьшения толщины канала, в результате I_C не зависит от напряжения между стоком и истоком $U_{СИ}$ на участке CD выходной характеристики (рис. 3). При еще большем увеличении напряжения между стоком и истоком между стоком и истоком $U_{СИ}$ ток стока I_C начинает лавинообразно возрастать и наступает пробой транзистора.

Полевой транзистор может служить для усиления слабых переменных напряжений. Для этого в управляемую цепь включают резистор R (рис.4). Включение резистора приводит к изменению



напряжения сток-исток между стоком и истоком $U_{СИ}$, которое можно определить по правилу Кирхгофа:

Рис. 4

$$U_{СИ} = E_C - I_C \cdot R \quad (5)$$

Режим работы полевого транзистора выбирают таким, чтобы I_C и $U_{СИ}$ попадали в среднюю часть области CD . Малое изменение $U_{ЗИ}$ приводит к изменению I_C , которое в свою очередь изменяет $U_{СИ}$ согласно уравнению:

$$\Delta U_{СИ} = \Delta I_C \cdot R \quad (6)$$

Уравнение (6) является следствием (5), если взять от (5) первый дифференциал. Разделив (6) на $\Delta U_{ЗИ}$, получим **КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ** по напряжению:

$$k = \Delta U_{СИ} / \Delta U_{ЗИ} = SR \quad (7)$$

$$\text{где } S = \Delta I_C / \Delta U_{ЗИ} \text{ в области } CD \quad (8)$$

Величина S называется крутизной характеристики транзистора и достигает порядка 3 мА/В. Если взять $R = 10-100$ кОм, то коэффициент усиления достигает значения: $k = 30-300$.

2. ОПИСАНИЕ СМЕННОЙ ПЛАТЫ И МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРОВ

На рисунке 5 представлены схемы для изучения работы транзисторов. На транзисторе $VT3$ и переменном сопротивлении $R6$ создан управляемый источник напряжения, который может

регулироваться с помощью $R6$ и подавать в управляемые цепи изучаемых транзисторов $VT1$ и $VT2$ напряжение в пределах 0-15 В.

Переменное сопротивление $R2$, подключенное последовательно с сопротивлением $R1$ и $R2$ к источнику питания между зажимами +15 В и -15 В, представляет собой делитель напряжения, позволяющий регулировать с помощью $R2$ напряжение, которое подается в управляющую цепь биполярного транзистора $VT1$, тем самым меняя базовый ток I_B . Значения сопротивлений подобраны так, что напряжение $U_{БЭ}$ может быть как положительным, так и отрицательным.

Аналогично переменное сопротивление $R12$ и сопротивление $R13$, подключенное к тому же источнику питания, образуют делитель напряжения, который подает в цепь затвора полевого транзистора $VT2$ напряжение $U_{ЗИ}$; оно может регулироваться с помощью $R12$ и иметь положительный и отрицательный потенциал. В данной работе используется лишь вольтметр, поэтому для измерения тока в управляемых цепях транзисторов $VT1$ и $VT2$ включены сопротивления $R7$ и $R8$ соответственно. Измеряя разность потенциалов на концах сопротивления $R7$ (гнезда $\Gamma3$, $\Gamma5$) и зная величину сопротивления $R7$ можно по закону Ома найти коллекторный ток I_K :

$$I_K = \Delta\phi/R7 \quad (9)$$

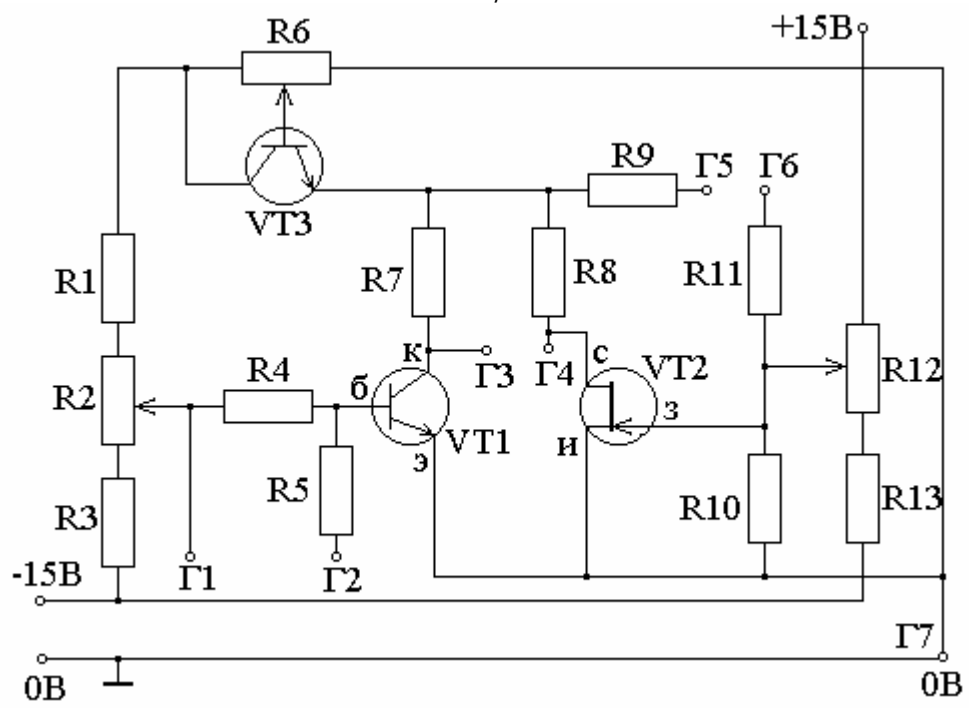


Рис. 5

Правда, между гнездами $\Gamma3$ и $\Gamma5$ кроме сопротивления $R7$ включено также сопротивление $R9$, но через него никакие токи не

текут, поэтому на нем нет падения напряжения. Роль $R9$ состоит в том, что оно защищает транзистор $VT3$ от неправильного включения вольтметра, одна из клемм которого соединена с корпусом (0).

Аналогично, измеряя разность потенциалов на концах $R8$ (гнезда $\Gamma4, \Gamma5$), можно найти ток стока I_C транзистора $VT2$.

Напряжение $U_{БЭ}$ (на $VT1$) можно измерить, подключая вольтметр к гнезду $\Gamma2$; а напряжение $U_{ЗИ}$ (на $VT2$) - к гнезду $\Gamma6$. Сопротивления $R5$ и $R11$ играют роль защиты (ту же, что и $R9$).

Для измерения $U_{КЭ}$ (на $VT1$) необходимо подключить вольтметр к $\Gamma3$, а для измерения $U_{СИ}$ (на $VT2$) - к $\Gamma4$. И, наконец, для нахождения тока базы I_B (для $VT1$) необходимо измерить разность потенциалов на концах сопротивления $R4$, включенного в цепь базы, (гнезда $\Gamma1, \Gamma2$). Сопротивление $R5$ аналогично играет роль защиты.

ПРИМЕЧАНИЕ 3. Общий провод вольтметра подключается к гнезду $\Gamma7$ (0, корпус) и не отключается в процессе измерений!

Поэтому мы измеряем потенциалы остальных гнезд относительно корпуса. Например, чтобы найти напряжение на $R2$, необходимо подключить другую клемму вольтметра (с белой изоляцией) к $\Gamma1$. Снять значение потенциала φ_1 гнезда $\Gamma1$, а лишь потом подключить к гнезду $\Gamma2$ и снять значение его потенциала φ_2 . Тогда разность потенциалов на концах $R4$ равна $-\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$.

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

УПРАЖНЕНИЕ 1. Снятие входных характеристик полевого транзистора $I_C = f(U_{ЗИ})$ при $U_{СИ} = const$.

1) Данные запишите в таблицу 1.

Таблица 1.

$\varphi_6 (U_{ЗИ}), В$	$\varphi_4 (U_{СИ}), В$	φ_5	$\Delta\varphi = \varphi_5 - \varphi_4$	$I_C = \Delta\varphi/R8$
-2,5				
-2,2				
-2,0				
-1,7				
-1,5				
-1,3				
-1,1				
-1,0				
-0,9				
-0,5				
-0,3				

0,0				
-----	--	--	--	--

2) Включите УЛС (универсальный лабораторный стенд) и вольтметр в сеть и прогрейте в течение 10 мин.

3) Подсоедините общий провод вольтметра к гнезду Г7 и не отсоединяйте его во время измерений.

4) Подключите вольтметр к гнезду Г6 и установите с помощью потенциометра R12 минимальное напряжение между затвором и источником $U_{ЗИ} = -2-3$ В. (т.е. потенциал затвора φ_6 , измеряемый на гнезде Г6).

5) Подключите вольтметр к гнезду Г4 и установите с помощью потенциометра R6 потенциал стока $\varphi_4 = 5$ В (т.е. напряжение между стоком и истоком $U_{СИ} = 5$ В).

6) Проверьте снова величину $U_{ЗИ}$ (т.е. потенциал φ_6 гнезда Г6) и, если нужно, установите расхождение с прежним значением. Затем снова проверьте величину $U_{СИ}$ (т.е. потенциал φ_4 гнезда Г4) и т.д.

Всю эту процедуру назовем **МЕТОДОМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ПРИБЛИЖЕНИЙ**. Эта процедура необходима, т.к. изменение одного параметра приводит к изменению другого.

7) При помощи вольтметра измерьте потенциал φ_4 (гнездо Г4) и φ_5 (гнездо Г5) на концах сопротивления R8. По разности потенциалов $\Delta\varphi = \varphi_5 - \varphi_4$ определите ток стока I_C протекающий через сопротивление R8 по формуле

$$I_C = \Delta\varphi/R8 \quad (10)$$

где $R8 = 200$ Ом.

8) Измените напряжение $U_{ЗИ}$ (т.е. потенциал φ_6 гнезда Г6) и, корректируя $U_{СИ}$ на требуемом уровне ($\varphi_4 = 5$ В), найти новое значение тока стока I_C .

9) Снимите зависимость тока стока I_C от напряжения $U_{ЗИ}$, оставляя неизменным $U_{СИ}$.

10) Снимите аналогичную зависимость при $U_{СИ} = 10$ В, записывая данные в аналогичную таблицу 2.

11) По результатам измерений постройте графики на миллиметровой бумаге.

12) Найти крутизну характеристики транзистора S по формуле

$$S = \Delta I_C / \Delta U_{ЗИ} \quad (11)$$

13) Найти коэффициент усиления транзистора по напряжению.

УПРАЖНЕНИЕ 2. Снятие выходной характеристики полевого транзистора ($I_c = f(U_{си})$ при постоянном напряжении затвора $U_{зи} = const$).

1) Данные занесите в следующую таблицу 3.

$U_{зи} = 0В,$	$\varphi_4(U_{си})$	φ_5	I_c
0			
0,4			
0,8			
1,0			
1,5			
2,0			
4,0			
6,0			
8,0			

Входная цепь (напряжение $U_{си}$) будет слабо влиять на выходную (напряжение $U_{зи}$), в связи с этим корректировка не понадобится.

2) Присоедините общий провод вольтметра к гнезду Г7 и не отсоединяйте его во время измерений.

3) Подключите вольтметр к гнезду Г6 и установите с помощью потенциометра R12 потенциал затвора $\varphi_6 = 0В$ (т.е. напряжение между затвором и истоком $U_{зи} = 0В$).

4) Подключите вольтметр к гнезду Г4 и установите с помощью потенциометра R6 потенциал стока $\varphi_4 = 0В$ (т.е. напряжение между стоком и истоком $U_{зи} = 0В$).

5) Измерьте потенциалы φ_4 (гнездо Г4) и φ_5 (гнездо Г5), запишите данные в таблицу 3. По разности потенциалов $\Delta\varphi = \varphi_5 - \varphi_4$ определите ток стока I_c по формуле (10).

6) Повторите измерения, изменяя напряжения $U_{си}$ (гнездо Г4) от 0,5 до 8 В и измеряя потенциал φ_5 . Напряжение $U_{зи}$ должно оставаться неизменным.

7) Рассчитайте ток силы I_c по формуле (10) и данные занесите в таблицу 3.

8) Постройте аналогичные таблицы 4 и 5.

9) Снимите аналогичные зависимости при напряжениях $U_{ЗИ} = 0,5 \text{ В}$ и $U_{ЗИ} = 0,5 \text{ В}$, подавая сначала на гнездо Гб потенциал $\varphi_6 = 0,5 \text{ В}$, а затем устанавливая $\varphi_6 = -0,5 \text{ В}$.

10) Постройте график всех трех зависимостей на миллиметровой бумаге.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что представляют собой полевые транзисторы? Какие существуют типы полевых транзисторов?

2. Какую роль играют сток, исток и канал полевого транзистора?

3. Какие носители заряда являются основными и не основными в каналах транзисторов р- и n-типа?

4. Какие физические процессы происходят при работе полевого транзистора?

5. В чем отличие полевого транзистора от биполярного транзистора?

6. По какой схеме и как снимаются входные характеристики полевого транзистора?

7. По какой схеме и как снимаются выходные характеристики полевого транзистора?

8. Что такое коэффициент усиления транзистора по напряжению и как он определяется?

9. Что такое крутизна характеристики полевого транзистора и как она определяется?

ЛИТЕРАТУРА

[3], §1.3, с. 89-109; [6], §25, с.71-74; [2], §6.3, с.129-136 [1], §7.1-7.5, с.168-178.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ ОУ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: 1. Познакомиться с принципом устройства операционных усилителей.

2. Изучить работу операционного усилителя в различных режимах.

ОБОРУДОВАНИЕ: Лабораторный стенд. Набор соединительных проводов, генератор напряжений (синусоидальных, прямоугольных, треугольных).

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Операционный усилитель - это специальный усилитель постоянного тока с высоким коэффициентом усиления. Результирующие характеристики ОУ зависят от глубины внешней отрицательной обратной связи. (ООС). ОУ имеет достаточно пологую частотную характеристику, что обеспечивается непосредственной связью между каскадами. Полоса пропускания занимает область от нуля до очень высоких частот. Наличие ООС ослабляет шумы и частотные искажения сигнала.

Рассмотрим основные характеристики идеального ОУ.

1. Входное сопротивление ОУ равно бесконечности, входные токи равны нулю.

$$R_{ВХ} = \infty, i_+ = 0, i_- = 0.$$

2. Выходное сопротивление равно нулю. Это означает, что со стороны выхода ОУ является источником напряжения.

$$R_{ВЫХ} = 0.$$

3. Коэффициент усиления по напряжению равен бесконечности.

$$K_U = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = \infty.$$

Если выводы ОУ не закорочены, то в режиме усиления дифференциальный сигнал равен нулю.

4. В режиме насыщения напряжение на выходе равно напряжению питания. Знак определяется полярностью входного напряжения. В режиме насыщения дифференциальный сигнал не равен нулю.

5. Синфазный сигнал не действует на ОУ.

6. Напряжение смещения нуля равно нулю.

Свойства идеального усилителя соответствуют принципу виртуального замыкания входных зажимов усилителя. Это означает,

что напряжение между зажимами равно нулю, как это происходит и при обычном замыкании. Однако при обычном замыкании по цепи течет ток, этого не происходит при виртуальном замыкании. Поэтому для тока виртуальное замыкание эквивалентно разрыву цепи.

Для реального усилителя входное сопротивление составляет десятки мегаом, а выходное единицы и десятки Ом.

Рассмотрим теперь устройство ОУ, блок-схема которого приведена на рис. 1.

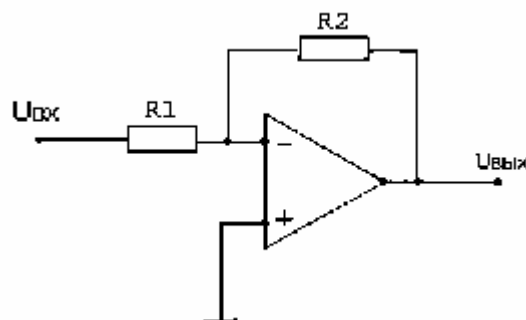


Рис.1

Как уже упоминалось выше ОУ - это многокаскадный усилитель постоянного тока. Принципиальная схема ОУ достаточно сложна. Как минимум оно включает три каскада: входной каскад представляет собой дифференциальный усилитель, обеспечивающий основные характеристики ОУ; далее следует промежуточный усилитель и затем выходной каскад.

Особенностью дифференциального усилителя является то, что сигнал подается одновременно на два входа, при этом выходной сигнал всегда пропорционален разности потенциалов на входах (дифференциальному сигналу). Поэтому синфазные сигналы взаимно ослабляются. В случае возникновения шумового сигнала в цепи он передается на выход в той же фазе, поэтому на входе усилителя этот сигнал практически полностью гасится, что оказывает влияния на полезный входной сигнал. Входное сопротивление дифференциального усилителя достаточно высокое.

Для обеспечения устойчивой работы ОУ и передачи сигнала с выхода на вход в ОУ используется ООС (отрицательная обратная связь). R_2 - является сопротивлением ООС. Сигнал ОС поступает на вход ОУ, усиливается и переходит на выход в противофазе. Если коэффициент усиления усилителя без ООС K_0 , то

$$U_{ВЫХ} = K_0 U_{ВХ}$$

При наличии ООС, коэффициент передачи с выхода на вход с учетом глубины ООС β равен:

$$K = \frac{K_0}{1 - K_0\beta},$$

$K_0\beta$ - называют фактором ОС.

Если β много больше единицы, то выходное напряжение определяется только значением токов, протекающих по сопротивлениям R_1 и R_2 и входного напряжения:

$$U_{ВЫХ} = \frac{R_2}{R_1} U_{ВХ}.$$

Свое название операционные усилители получили в связи с тем, что схемы на их основе способны выполнять преобразование входного сигнала по математическим алгоритмам (интегрирование, суммирование, дифференцирование и т.д.).

1.ИНВЕРТИРУЮЩИЙ УСИЛИТЕЛЬ

Схема усилителя представлена на рис. 2. Коэффициент передачи такого усилителя можно определить, используя принцип виртуального замыкания.

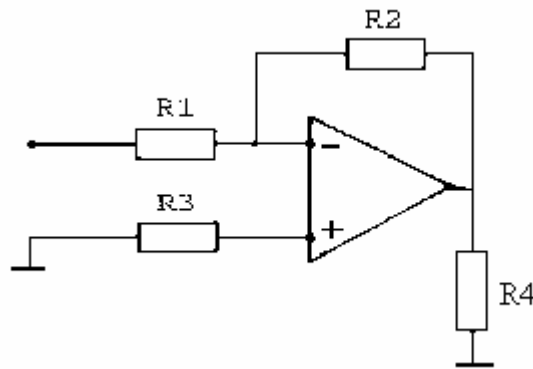


Рис.2.

Входной ток с учетом ООС

$$I'_{ВХ} = \frac{U'_{ВХ}}{R_1}$$

выходное напряжение $U_{ВЫХ} = -I'_{ВХ} Z_{oc} - U_{oc}$. Отсюда коэффициент передачи

$$K' = \frac{U_{ВЫХ}}{U'_{ВХ}} = -\frac{R_2}{R_1}.$$

В реальном усилителе входной ток является суммой токов, протекающих через входное сопротивление и сопротивление в цепи обратной связи. Кроме того, ток, протекающий через входное сопротивление, определяется сопротивлением

$$I_{BX} = \frac{U_{BX}}{R_1 + R_2 / 1 + K},$$

K - коэффициент передачи ОУ без ООС.

С учетом вышесказанного относительная погрешность определения коэффициента передачи может быть определена

$$\frac{\Delta K'}{R'} \approx -\frac{R_2}{(1-K)} \left(\frac{1}{R_{BX}} + \frac{1}{R_1} \right).$$

Входное сопротивление схемы $Z_{ВЫХ} = R_1$, выходное $Z_{ВЫХ} = \frac{R_{ВЫХ}}{1 + \beta K'}$, β - глубина ООС.

2. НЕ ИНВЕРТИРУЮЩИЙ УСИЛИТЕЛЬ

Не инвертирующий усилитель можно получить, если подать входное напряжение на не инвертирующий вход (+), а цепь ООС подключить к инвертирующему входу (-) (рис. 3).

Напряжение ОС снимается с делителя

$$U_{BX} = \frac{U_{ВЫХ} R_1}{R_1 + R_2}.$$

Входное сопротивление схемы равно сопротивлению ОС

$$K_{BX} = \frac{R_{BX} K R_1}{R_1 + R_2}.$$

3. ПОВТОРИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ

В повторителе напряжения сопротивление ООС равно нулю. Тогда $R_{OC} = 0$ и коэффициент передачи

$$K' \approx 1,$$

а относительная погрешность

$$\frac{\Delta K}{K'} = \frac{1}{K}.$$

Напряжение с входа на выход передается без изменения фазы.

4. ИНТЕГРАТОР

Схема интегратора представлена на рис.4.

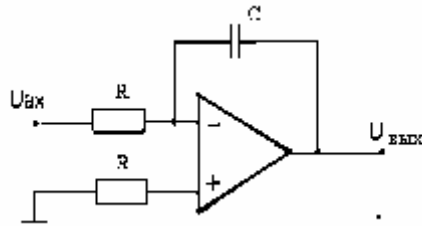


Рис.4.

В силу виртуального заземления, если напряжение на входе $U_{ВХ}$, то ток, текущий через резистор R будет равен

$$I = \frac{U'_{ВХ}}{R}.$$

Этот ток заряжает конденсатор, напряжение на котором является одновременно и выходным напряжением схемы.

$$U_{ВЫХ} = -\frac{1}{R} \int U'_{ВХ} dt.$$

5. ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩАЯ СХЕМА

Дифференцирующая схема представлена на рис.5.

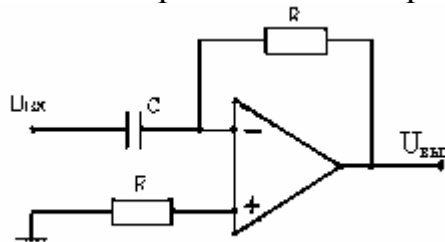


Рис.5.

Входным является напряжение на конденсаторе. Ток, заряжающий конденсатор

$$i = C \frac{dU'_{ВХ}}{dt}.$$

Этот ток полностью течет через сопротивление R и создает выходное напряжение.

$$U_{ВЫХ} = -RC \frac{dU'_{ВХ}}{dt}.$$

6. ЛОГАРИФМИРОВАНИЕ СИГНАЛА

Логарифмирующая и потенцирующая схемы показаны на рис.6 и рис.7 соответственно. Для получения логарифмической зависимости в схему усилителя вводят нелинейный элемент - диод или биполярный транзистор.

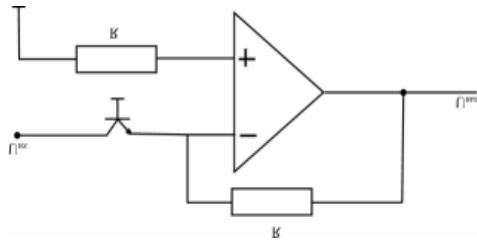


Рис.6.

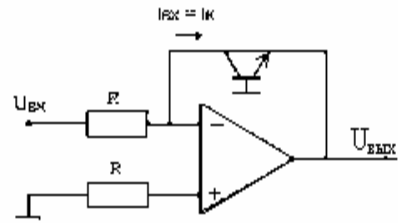


Рис.7.

Если ток в цепи ОС равен нулю, то входной ток будет определяться током коллектора транзистора.

$$I_{BX} = \frac{U_{BX}}{R} = I_k = I_{ko} \left[\exp\left(\frac{qU_{БЭ}}{\eta kT}\right) - 1 \right],$$

где I_{KO} - тепловой ток коллектора;

$U_{БЭ}$ - напряжение база-эмиттер;

kT - энергия теплового движения;

q - заряд электрона;

η - коэффициент рекомбинации.

Выходное напряжение при этом определится:

$$U_{ВЫХ} = U_{ЭБ} = \eta \frac{kT}{q} \left[\ln(I_k) - \ln(I_{ko}) \right],$$

$\eta \frac{kT}{q} = \varphi_T$ - температурный потенциал.

Тогда окончательно имеем

$$U_{ВЫХ} = \varphi_T \left[\ln\left(\frac{U_{BX}}{R}\right) - \ln(I_{ko}) \right].$$

В потенцирующем усилителе расчеты аналогичны.

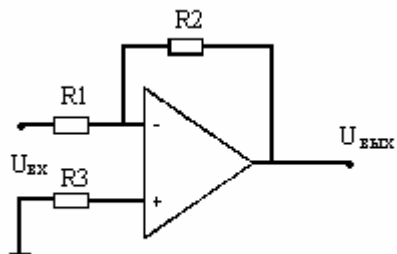
ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

ИЗМЕРЕНИЕ (U_{CM}), (f_1), (I_{BX}), (ΔI_{BX})

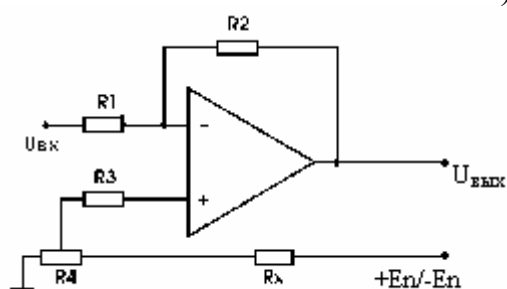
а) Соберите схему по рис.8,а с биполярным ОУ (140УД7, 140УД708) при значениях резисторов $R_1=R_3=100$ Ом, $R_2=10$ кОм. Напряжение питания $\pm 6 \div 12$ В.

Заземлите вход. Напряжение U_{CM} определяется как разность напряжений на входах, при котором напряжение на выходе равно нулю. По измеренному ($U_{ВЫХ}$), найдите (U_{CM}) и сравните его со

справочными данными. По справочным данным оцените влияние входных токов смещения. Так как измеряется U_{CM} , то напряжение сдвига, вызванное разностью входных токов, должно быть много меньше U_{CM} .



а)



б)

Рис.8. Инвертирующий усилитель (а), балансировка ОУ по входу (б)

б) Для компенсации смещения нуля по измеренному U_{CM} рассчитайте величину резистора R_x , а по знаку U_{CM} - полярность напряжения питания, к которому его следует подключить (рис. 8,б). Сбалансируйте ОУ.

в) Разомкните цепь ООС, т.е. уберите R_2 и попытайтесь установить на выходе напряжение, близкое к нулю. Объясните результат.

г) Не меняя положения движка R_4 отсоедините его от схемы и измерьте сопротивление между средним и нижним выводами (R_Y). Вычислите падение напряжения на R_Y (компенсирующее напряжение) и сравните с предыдущим (пункт а).

д) Для сбалансированного ОУ, когда на среднем вводе переменного резистора R_4 установлено напряжение, равное $(-U_{CM})$; замените резистор R_3 на номинал 100 кОм. Измерив $U_{ВЫХ}$, вычислите (I_{BX+}) и сравните результат со справочными данными.

е) Замените резистор R_1 тоже на 100 кОм, а R_2 - на 1 МОм. По Измеренному $U_{ВЫХ}$ оцените разность входных токов (ΔI_{BX}).

По результатам выполнения практических заданий составьте итоговую таблицу для измеренных параметров ОУ (U_{CM}), (I_{BX}),

(ΔI_{BX}) , (f_1) , $(\Delta U_{CM} / \Delta T)$, (dU_{CM}/dt) в сравнении со справочными данными.

НАБЛЮДЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ДРЕЙФА НИЗКОЧАСТОТНОГО ШУМА.

Соберите схему по рис. 9 при значениях $R_1=R_3=100$ Ом, $R_2=100$ кОм, $C=0,1$ мкф. Заземлите вход и тщательно сбалансируйте ОУ. На выходе ОУ должны наблюдаться плавные уходы напряжения в ту или другую сторону (так называемый “шум 1/F”). Подержите минуту-другую палец на корпусе ОУ, не касаясь выводов и деталей. Для уменьшения наводок (ваше тело в данном случае работает как антенна) палец другой руки удерживайте “земле”. Вы увидите систематический уход $U_{ВЫХ}$, если случайно вам не попался ОУ с нулевым температурным дрейфом. Оцените грубо $(\Delta U_{CM} / \Delta T)$.

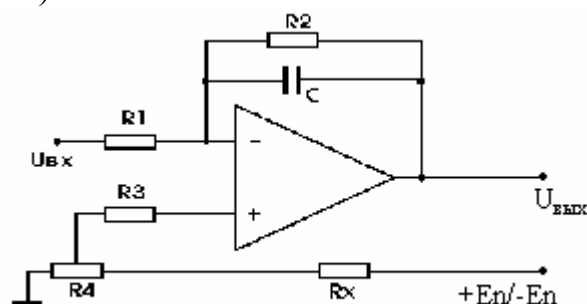


Рис.9

Примечание. Конденсатор C служит для уменьшения шумов и наводок.

ИНТЕГРАТОР.

В схему по рис. 9 установите резисторы $R_1=R_3=10$ КОм, $R_2=1$ МОм оставив $C = 0,1$ мкф и цепь балансировки без изменений. Заземлите вход и тщательно сбалансируйте ОУ.

Подайте на вход прямоугольный сигнал со скважностью 2 (меандр) амплитудой 1 В, частотой 1 кГц. Сигнал на выходе должен иметь треугольную форму с хорошей линейностью. Рассчитайте по формуле (3) амплитуду треугольного сигнала на выходе и сравните с измеренным значением.

КОМПАРАТОР С ГИСТЕРЕЗИСОМ.

Соберите схему на рис. 10. Подайте на вход синусоидальный или треугольный сигнал амплитудой 100 мВ, частотой 100÷200 Гц. Вращая резистор R_4 , получите на выходы сигналы различной скважности.

В режиме большого входного сигнала ($U_{BX} \sim 1 \div 3$ В) определите скорость нарастания выходного напряжения (dU_{CM}/dt) .

Подобная схема используется в качестве устройства для подсчета импульсов с амплитудой больше заданного уровня. Положительная ОС предотвращает срабатывание схемы от шумов и наводок, уменьшает фронты импульсов на выходе.

Вопрос. Какова минимальная амплитуда входного сигнала при данных номиналах и E_{II} ? Как зависит длительность импульсов на выходе от глубины положительной ОС?

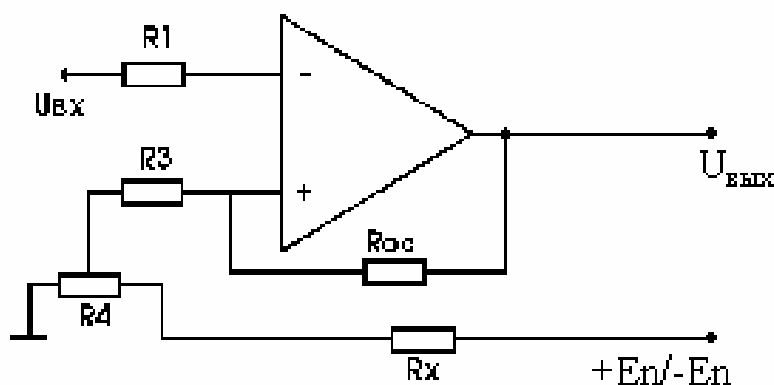


Рис. 10. Компаратор с гистерезисом

ПРЕЦИЗИОННЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ.

Соберите схему по рис. 10.а, добавив в нее цепь балансировки. Величину резисторов можно выбрать в диапазоне $3 \div 100$ кОм. Подавая на вход синусоидальный сигнал различной амплитуды и частоты, наблюдайте сигнала обоих выходах. Определите минимальную амплитуду сигнала на частоте 1 кГц и верхнюю частоту сигнала с амплитудой 1 В, при которых форма сигнала на выходе визуально не отличается от рис. 11.

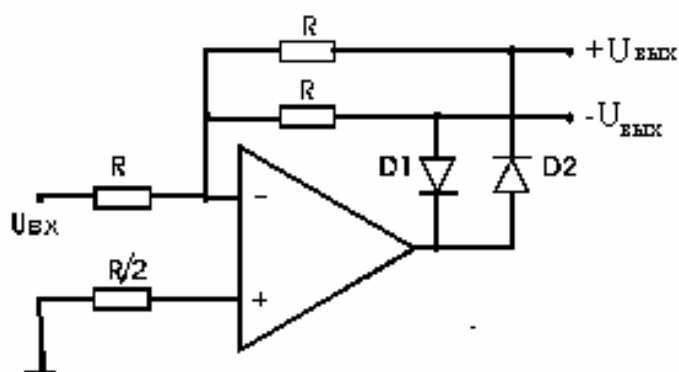


Рис.11.

АНАЛОГОВЫЙ СУММАТОР

Схема аналогового сумматора представлена на рис.12.

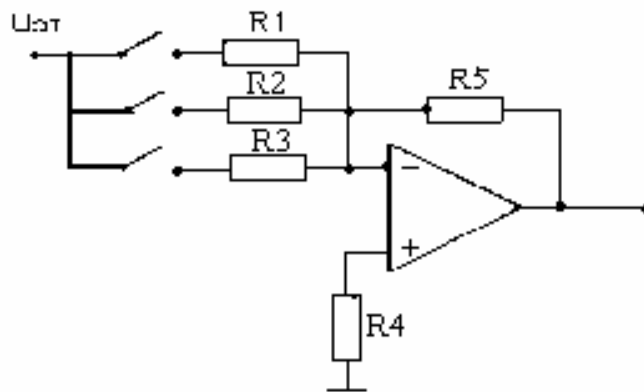


Рис.12.

Согласно закону Кирхгофа:

$$I_1 + I_2 + I_3 = I_{oc}$$

$$U_{ВЫХ} = R_{oc} \left(\frac{U_1}{I_1} + \frac{U_2}{I_2} + \frac{U_3}{I_3} \right)$$

Если величины сопротивлений R_i выбрать равными, то на выходе получим сумму напряжений. Если взять сопротивления кратными: $R_i = R \cdot 2^{i-1}$, а на входы через ключи, управляемые цифровым кодом, подать эталонное напряжение, то получим простейший цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП).

Построить схему сумматора так, чтобы выполнялось простое суммирование сигнала и цифро-аналоговое преобразование. Для работы такой схемы необходимо подвести питание усилителя через балансную цепь, как это осуществлялось в предыдущих экспериментах. Результаты записать в отчет.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое операционный усилитель?
2. В чем состоит принцип виртуального заземления?
3. Свойства отрицательной обратной связи (ООС).
4. Основные свойства ОУ.
5. Почему усилитель получил название операционного?
6. Каким образом строятся усилители для проведения операций суммирования, интегрирования, дифференцирования, логарифмирования, потенцирования?
7. Перечислить основные характеристики ОУ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1], §11.4-14.6; [2], §7.4; [3], §2.5; [4], §3.6; [5], §2.2.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ БАЗОВЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: 1. Изучить принцип работы элементов одноступенчатой логики: “И”, “ИЛИ”, “НЕ”.

2. Изучить принцип работы элементов двухступенчатой логики: И-НЕ, ИЛИ-НЕ, ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Любые цифровые узлы состоят из логических элементов, выполняющих логические операции: сложение, умножение, отрицание.

Операция логического сложения называется дизъюнкцией (элемент ИЛИ - схема объединения). Эта операция записывается выражением

$$Y = X1 + X2 \quad (1)$$

Схема элемента ИЛИ представлена на рис. 1а, обозначение на схеме представлено на рис. 1б.

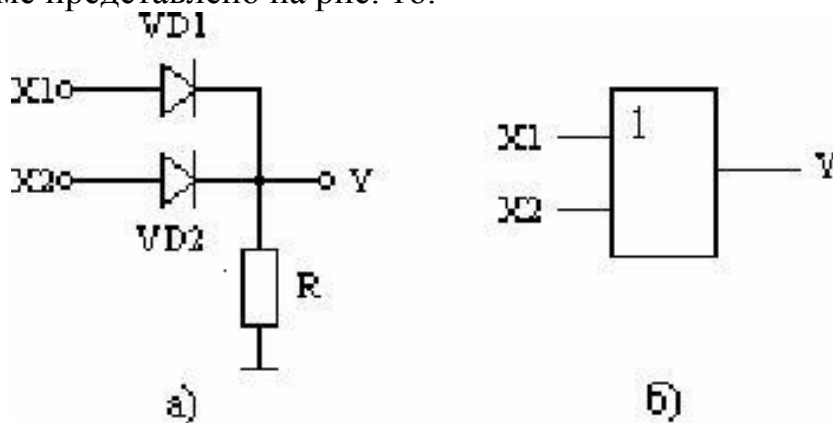


Рис. 1

Таблица истинности

X1	X2	Y
0	0	0

0	1	1
1	0	1
1	1	1

На выходе элемента “ИЛИ” появляется логическая единица, когда на одном из входов будет логическая единица. Рассмотрим работу схемы. Пусть на вход $X1$ подана логическая единица, на вход $X2$ логический ноль, тогда через диод $VD1$ будет протекать ток, а диод $VD2$ будет закрыт. Через резистор R течет ток, и потенциал выходной точки повышается. На выходе Y будет логическая единица.

Операция логического умножения (схема И-конъюнктор) записывается в виде выражения

$$Y = X1 \cdot X2 \quad (2)$$

Схема элемента и его условное обозначение на схемах изображена на рис. 2.

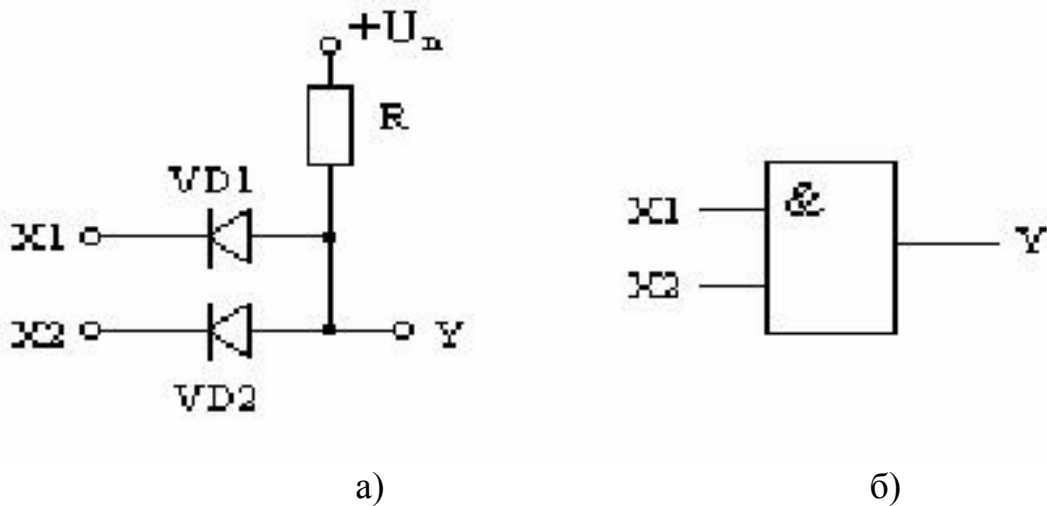


Рис.2

Таблица истинности:

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

На выходе элемента “И” будет логическая единица, если на вход $X1$ подать логическую единицу, а на вход $X2$ логический ноль, то диод $VD1$ закроется, а диод $VD2$ откроется и в цепи резистора R

потечет ток, в результате потенциал точки Y понижается и на выходе будет логический ноль. Только, если на оба входа подать логическую единицу, тока в цепи не будет и напряжение питания $U_{П}$ полностью подается на выход схемы.

Операция логического отрицания НЕ выполняется с помощью схемы, называемой инвертором.

$$Y = \bar{X} \quad (3)$$

Простейшей схемой, реализующей эту операцию, является транзисторный ключ рис. 3а, б.

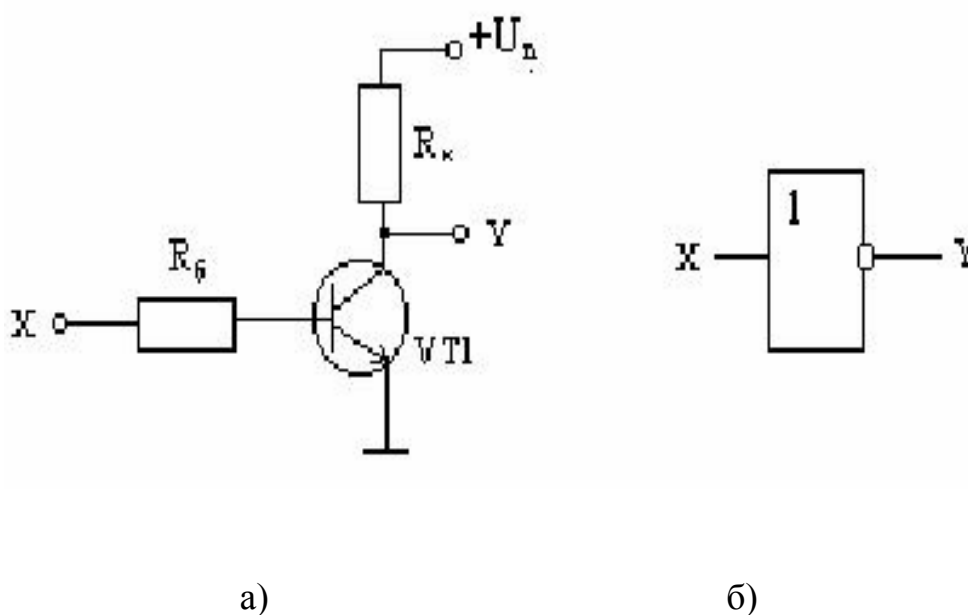


Рис.3

X	Y
0	1
1	0

Временные диаграммы элементов приведены на рис. 4.

Элементы, сочетающие в себе две или более логических операций, называются элементами двух- или многоступенчатой логики. К ним относятся элементы И-НЕ, ИЛИ-НЕ и более сложные схемы, одной из которых является схема ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ, другое название этой схемы – схема проверки на четкость, или полусумматор по модулю два. Реализация таких операций осуществляется построением более сложных схем.

Операция ИЛИ-НЕ (элемент Шеффера) - это получение результата логического суммирования с дальнейшей инверсией результата.

$$Y = \overline{X1 + X2} \quad (4)$$

Таблица истинности:

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

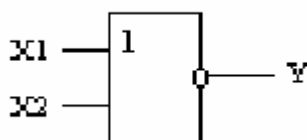


Рис. 5

Элемент И-НЕ (Элемент Пирса) выполняет операцию логического умножения с инверсией.

$$Y = \overline{X1 \cdot X2} \quad (5)$$

Таблица истинности

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

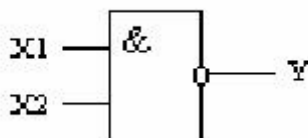


Рис. 6

Элемент ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ является полусумматором по модулю два, т.е. выполняет операцию сложения двух логически чисел. Схема выполняется соединением простейших базовых

элементов рис. 7а, условное обозначение на схемах представлено на рис. 7б.

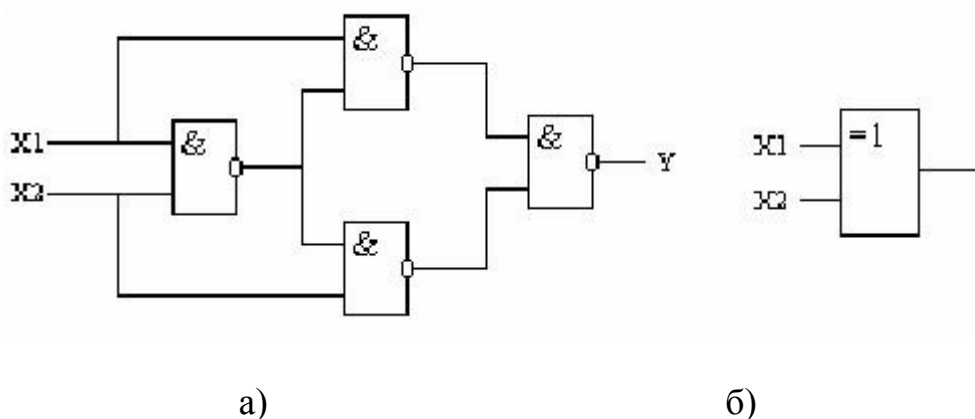


Рис. 7

Схема ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ называется еще схемой проверки на четность, что хорошо видно из таблицы истинности.

Таблица истинности

$X1$	$X2$	S	P
0	0	0	0
0	1	1	1
1	0	1	1
1	1	0	1

Логическая единица на выходе схемы появится, только если на входах будет подана хотя бы одна единица.

Схема ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ является основным элементом при построении схем сумматоров.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная работа выполняется на лабораторном стенде. Основные логические схемы имеют несколько входов и выходов для выполнения различных соединений.

На входы схем от источника напряжения через потенциометры подаются входные сигналы.

Во входные и выходные цепи включены светодиоды, чтобы регистрировать появление логической единицы. Уровень сигнала на входе и выходе можно регистрировать с помощью цифрового вольтметра. Сборка схем для изучения их работы осуществляется с помощью соединительных проводов.

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

УПРАЖНЕНИЕ 1.

Изучение работы элементов И, И-НЕ

1. От источника питания на входы схемы через резисторы R и R подавать различные комбинации сигналов и проверить таблицу истинности. При подаче логической единицы, светодиод на входе загорается.

2. С помощью вольтметра измерить уровни напряжений логической единицы и логического нуля. Проводить одновременно с проверкой таблицы истинности.

3. Записать в отчет уровни логического нуля и единицы.

4. Присоединить к схеме И схему НЕ и проверить таблицу истинности полученной схемы.

5. Выполнить п.п. 2 и 3 для схемы И-НЕ.

УПРАЖНЕНИЕ 2.

Изучить работу схем ИЛИ и ИЛИ-НЕ.

Выполнить пункты 1-5 для предыдущего упражнения: сигналы на входы схемы ИЛИ подаются через резисторы R и R .

УПРАЖНЕНИЕ 3.

Изучение работы схемы НЕ.

1. На вход схемы через резистор R подать логический ноль, а затем логическую единицу и зафиксировать сигнал на выходе.

2. Аналогично п. 2 упражнений 1 и 2 измерить уровень логических нуля и единицы.

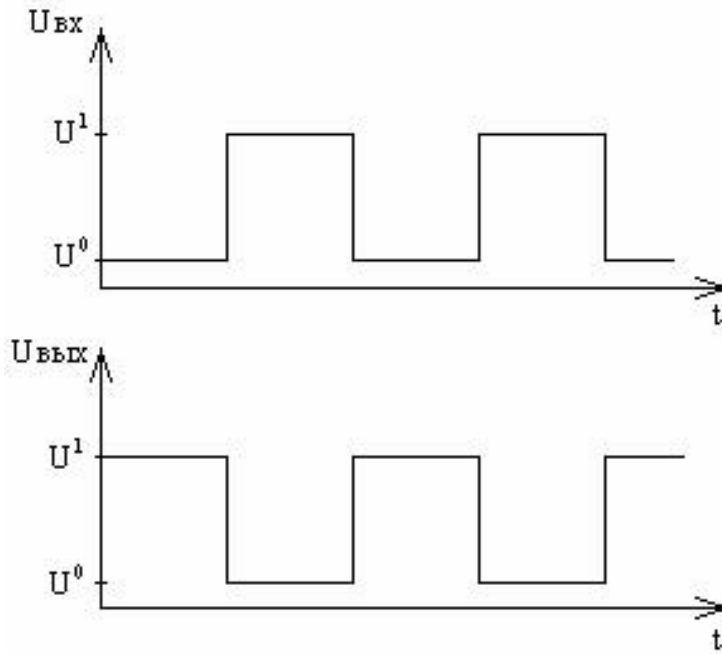
3. Записать результаты в отчет.

УПРАЖНЕНИЕ 4.

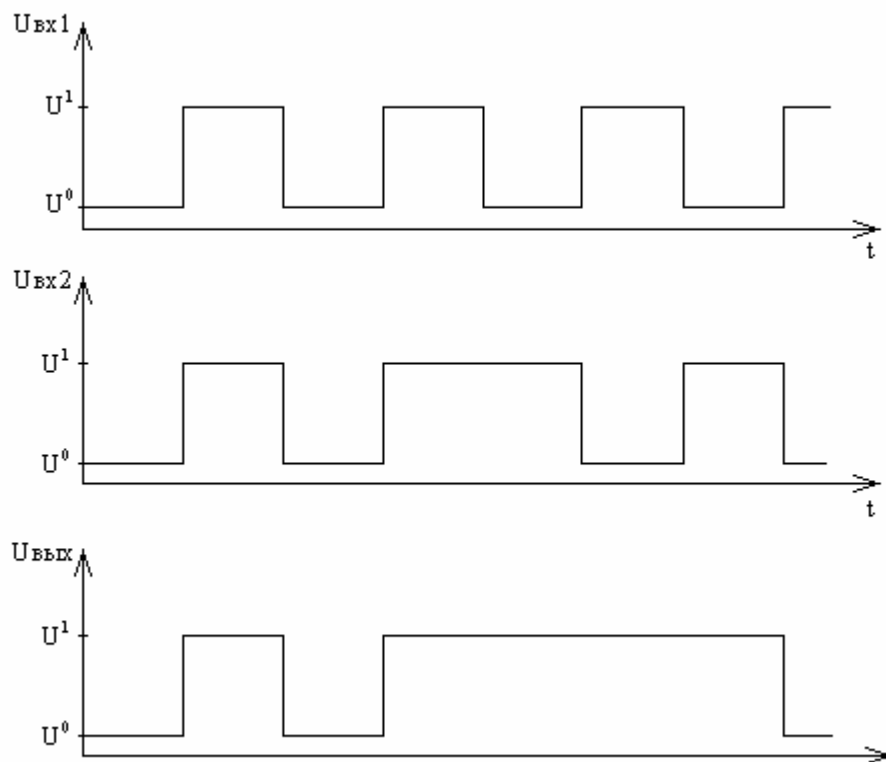
Изучение работы схемы ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ.

1. Из элементов И-НЕ собрать схему ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ-ИЛИ по рис.

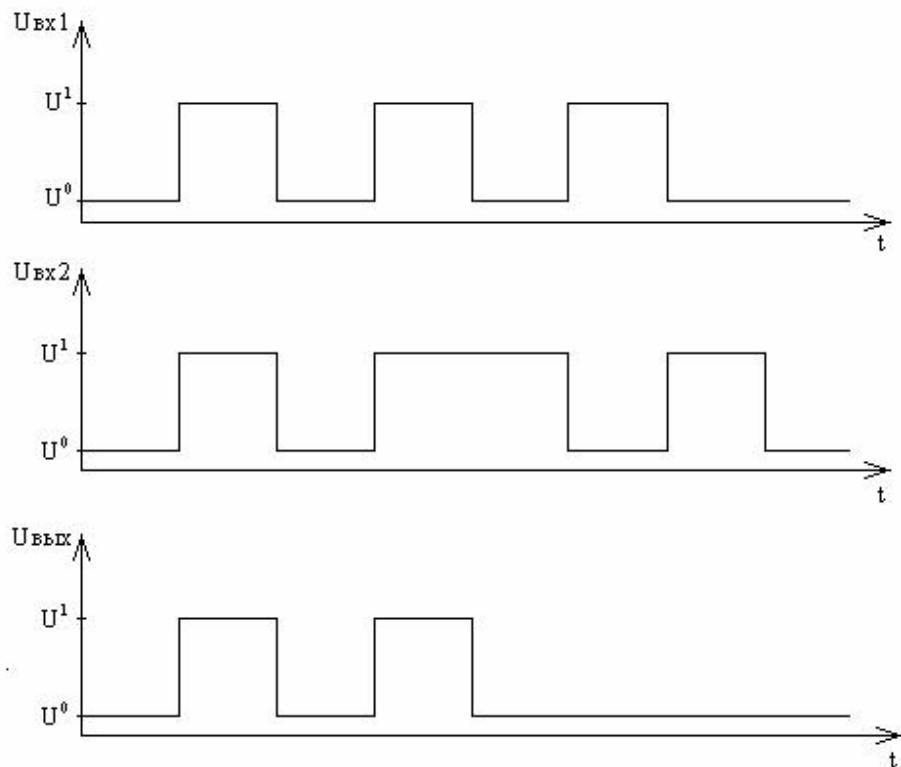
2. Проверить таблицу истинности. На входы схемы через резисторы R и R подавать указанные в таблице истинности комбинации сигналов. Комбинировать появление соответствующих сигналов на входе.



а) элемент НЕ



б) элемент ИЛИ



в) элемент И

Рис. 4

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Схема и принцип работы схемы И.
2. Схема и принцип работы схемы ИЛИ.
3. Схема и принцип работы схемы НЕ
4. Элементы двухступенчатой логики схемы И-НЕ, ИЛИ-НЕ.
5. Схема проверки на четность ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ.

ЛИТЕРАТУРА

[3], §3.3, с.324-326; [4], §6.2, с.262-266; [5], §8.3, 8.4, 8.8, с.174-179, 183-186.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ТРИГГЕРОВ

- ЦЕЛЬ РАБОТЫ:**
1. Изучить работу триггерных схем: триггера с базовыми связями, асинхронного и синхронного RS - триггера.
 2. Изучить работу T -триггера, D - триггера и JK - триггера, выполненных в виде цифровых микросхем.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Триггеры относятся к цифровым схемам последовательностного типа, т.е. к схемам с элементами памяти. Результат на выходе схемы зависит не только от состояния входов, но и от их предыдущего состояния.

Триггер является бистабильной ячейкой, имеющей несколько входов и два выхода. Состояние выходов не изменяется сколько угодно долго, пока комбинация сигналов на входах не изменит это состояние. Таким образом, триггер является простейшим элементом памяти.

Простейший триггер можно собрать на дискретных элементах, например, на основе схемы дифференциального усилителя. Такой триггер представлен на рис. 1.

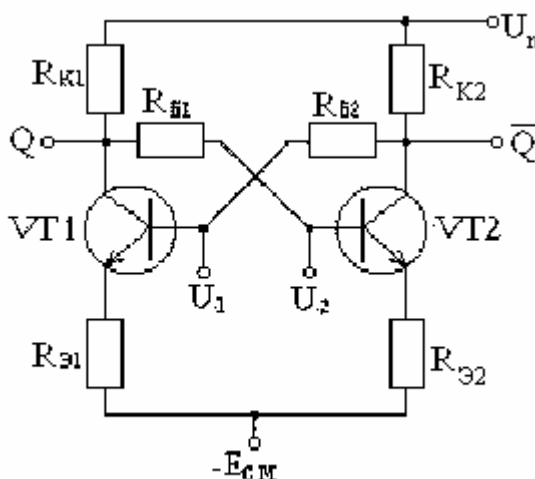


Рис. 1

Работа триггера происходит следующим образом: если на вход транзистора $VT1$ подать сигнал логической единицы, то транзистор откроется и через резистор R_{K1} потечет ток, при этом потенциал выхода Q будет падать. Падение потенциала через

резистор R_{B1} передается на вход транзистора $VT2$, и транзистор $VT2$ закрывается, потенциал точки \bar{Q} повышается до уровня напряжения питания.

Таким образом, на прямом выходе Q устанавливается логический ноль, а на выходе \bar{Q} - логическая единица.

Случайное изменение потенциала одного из выходов не может изменить общее состояние выхода, т.к. это изменение по цепи обратной связи через базовый резистор передается на второй выход и изменяет состояние другого выхода. Предположим, что триггер находится в нулевом состоянии. Если потенциал выхода Q увеличивается, то это приведет к увеличению потенциала на входе транзистора $VT2$, транзистор начнет открываться, в цепи коллектора потечет ток, и потенциал выхода \bar{Q} будет уменьшаться. Это уменьшение, в свою очередь, передается обратно на вход транзистора $VT1$, что приводит к закрытию транзистора и уменьшению тока в цепи коллектора, компенсируя случайное увеличение потенциала выхода Q . Весь процесс протекает очень быстро и состояние триггера не успевает измениться.

В настоящее время триггеры исполняются в виде интегральных микросхем, которые широко применяются для создания различных технических устройств, например регистров, счетчиков, элементов памяти и т.д.

Рассмотрим работу простейших триггерных схем.

RS - триггер.

RS триггер является простейшим триггером с отдельной установкой логической единицы и логического нуля (рис. 2). Триггер может быть построен с использованием схем ИЛИ-НЕ (рис. 2б) или И-НЕ (рис 2а).

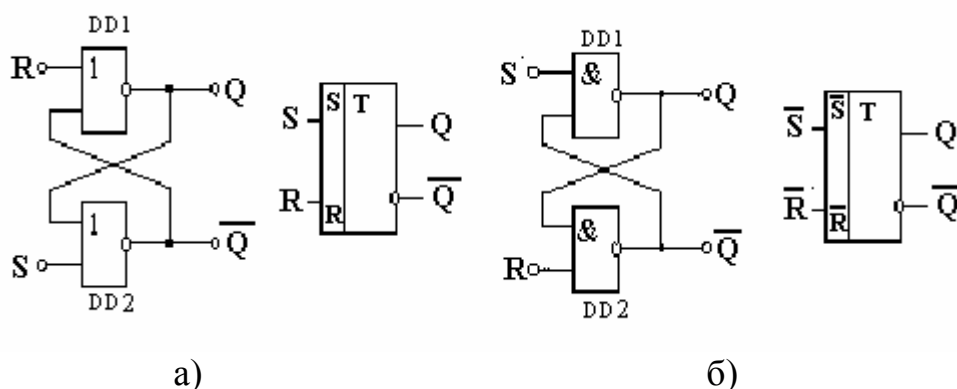


Рис. 2

Вход S является входом, устанавливающим триггер в единичное состояние. Назван буквой S от английского “Set” – устанавливать. Вход R - устанавливает триггер в нулевое состояние. Название происходит от английского “Reset” - сбрасывать. Если на вход S подать логическую единицу, то на прямом выходе Q появится логическая единица, на инверсном выходе \bar{Q} - логический ноль.

Работа триггера поясняется таблицей истинности. Таблица истинности приведена для триггера на элементах ИЛИ - НЕ. Неопределенное состояние триггера помечено крестом X . Состояние триггера не определено, если не оба входа подается логическая единица.

Таблица истинности

Время t				$t + 1$	
Предыдущее состояние		Запись информации		Результат	
Выходы		Входы		Выходы	
Q	\bar{Q}	R	S	Q	\bar{Q}
0	1	0	0	0	1
0	1	0	1	1	0
0	1	1	0	0	1
0	1	1	1	x	x
1	0	0	0	1	0
1	0	0	1	1	0
1	0	1	0	0	1
1	0	1	1	x	x

Таблицу истинности для триггера на элементах И-НЕ составить самостоятельно.

Если добавить еще один вход синхронизирующий, то получим схему синхронного RS - триггера рис. 3.

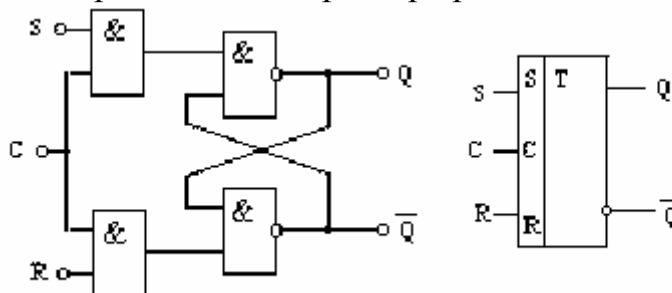


Рис. 3

Таблица истинности

t			$t + 1$	
R	S	C	Q	\bar{Q}
0	0	0	$Q(t)$	$\bar{Q}(t)$
0	1	1	1	0
1	0	1	0	1
1	1	1	x	x

В основе создания триггеров других типов лежит простейших RS триггер. Рассмотрим работу некоторых из них.

1. D -триггер. Это триггер задержки (от английского “Delay”). На рис. 4 показано условное обозначение триггера и его таблица истинности.

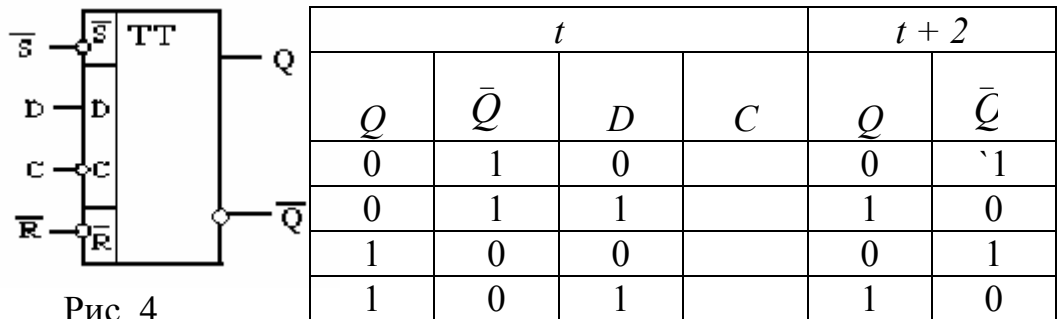
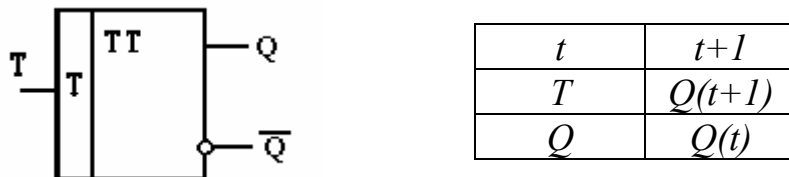


Рис. 4

Срабатывание триггера происходит только при появлении синхронизирующего импульса. Если триггер находится в единичном состоянии, а на входе D логический ноль, то при подаче импульса на вход синхронизации C , триггер установится в нулевое состояние. Если на входе D логическая единица, то при подаче синхроимпульса состояние триггера не изменится.

2. Триггер, состояние которого изменяется при подаче импульса на единственный вход, называется счетным или T -триггером рис.5.



Разновидностью T -триггера является TV триггер (рис.5). Это T -триггер с дополнительным управляющим V - входом. Если на V входе логическая единица, то такой триггер работает как счетный. Получить счетный триггер можно из D -триггера, если соединить вход D с инверсным выходом \bar{Q} рис. 6.

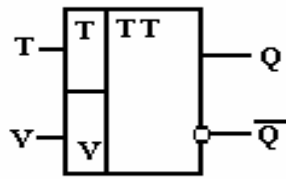


Рис. 5

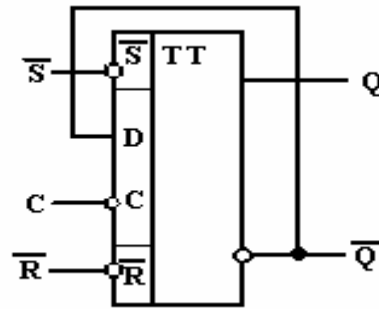
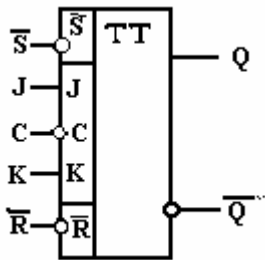


Рис.6

3. Наиболее универсальным является *JK*-триггер. С его помощью можно построить схему любого из триггеров. *JK*-триггер содержит два дополнительных входа, которые обеспечивают разнообразие режимов работы (рис.7).



		t		$t + 1$	
		Выходы		Выходы	
		Q	\bar{Q}	Q	\bar{Q}
Входы	R	0	1	0	1
	S	0	1	0	1
Входы	R	0	1	1	0
	S	0	1	1	0
Входы	R	1	0	0	0
	S	1	0	0	1
Входы	R	1	0	1	0
	S	1	0	1	1

Для данного триггера возможны три режима работы:

1) Если на вход R подать кратковременно логический "0", то триггер принудительно установится в нулевое состояние $Q=0$. При подаче на вход S логического "0" триггер принудительно установится в единичное состояние ($Q = 1$), независимо от состояния входов C, J, K . Одновременная подача на входы R и S логического нуля недопустима. Установка единичного или нулевого состояния обеспечивает нормальную работу -триггера. *JK*

2) Если на J и K входах подана логическая 1, то при подаче перепада напряжения на вход C триггер будет работать как счетный T -триггер, т.е. в режиме деления на два. Если на входах J и K логический ноль, состояние триггера не изменится.

3) Если на входы J и K подан парафазный сигнал, то есть $J = 1, K = 0$, то триггер переключается из нулевого состояния в единичное при подаче отрицательного перепада напряжения на вход C . Если триггер в единичном состоянии, сигналы $J = 0, K = 1$,

то при подаче отрицательного перепада напряжения на вход C он переключится в нулевое состояние.

На основе JK -триггера можно построить TV -триггер (рис.8) и D -триггер (рис.9)

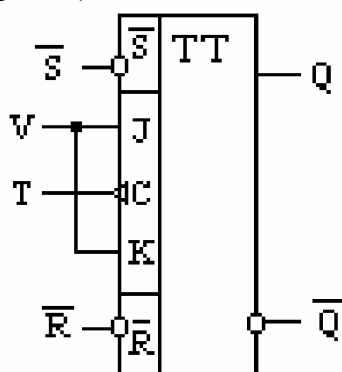


Рис. 8

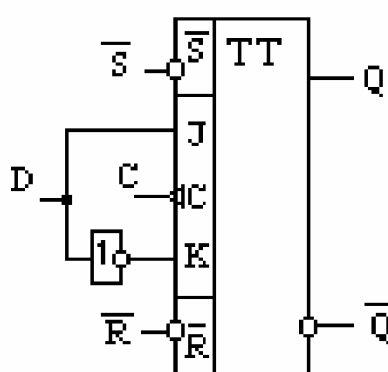


Рис.9

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

На лицевой панели лабораторной установки расположен набор элементов двухступенчатой логики И-НЕ и ИЛИ-НЕ, из которых можно построить более сложные схемы. Сигналы на выходы схем подаются через набор переменных резисторов R . На входах и выходах схем включены светодиоды $VD-VD$, которые загораются при подаче на них логической единицы.

Специальные триггера D , T и JK встроены в стенд и представляют собой микросхемы.

Входы и выходы схем также выведены на панель макета. Подача сигналов на входы осуществляется через набор резисторов $R-R$. Контроль уровня сигналов осуществляется с помощью светодиодов $D-D$.

На панели расположены также выходы тактового генератора, с помощью которого на триггеры подается синхронизирующий импульс.

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. Собрать схему простейшего RS -триггера на стенде. От источников сигналов подавать на входы R и S различные комбинации сигналов и проверить таблицу истинности. При подаче на вход логической единицы загорается светодиод. При появлении логической единицы на выходе также загорается светодиод.

2. Собрать схему синхронного RS -триггера и проверить его работу аналогично п.1.

3. Проверить таблицу истинности D -триггера. Для этого на входы D и C подавать различные комбинации сигналов. Предварительно триггер устанавливается в нулевое или единичное состояние, подавая логический 0 на вход \bar{R} или на выход \bar{S} соответственно.

4. Собрать на основе D -триггера T -триггер и проверить работу T -триггера. Подавать на вход T последовательно несколько логических единиц, после каждого сигнала контролировать состояние выходов.

5. Проверить работу JK -триггера.

Подачу на вход осуществлять в соответствии с таблицей истинности. Разделить режимы работы JK -триггера в соответствии с описанием режимов работы JK -триггера.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как работает RS -триггер. Зарисовать возможные схемы триггера и таблицы истинности.

2. Основные функции и таблицы истинности D -триггера.

3. Описать работу и пояснить таблицы истинности T -триггера.

4. Описать работу JK -триггера. В каком режиме может работать JK -триггер? Привести таблицу истинности.

5. Нарисовать схему и пояснить работу простейшего триггера, собранного на основе дифференциального усилителя с отрицательными обратными связями через базовые резисторы.

ЛИТЕРАТУРА

[3], §3.5.1, с. 355-364; [4], §6.3, с.266-273; [2], §9.4, с.208-213, [5], §8.2, с.172-174.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ И РАБОТЫ

АЦП И ЦАП

- ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** 1. Изучить работу АЦП.
2. Изучить работу ЦАП.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Большинство цифровых схем представляют собой сложную комбинацию простейших элементов, выполняющих логические операции. Работа таких схем осуществляется при подаче сигналов в цифровом коде. Однако большинство сигналов, которые поступают для обработки с устройств первичного сбора информации, являются аналоговыми (непрерывными), поэтому перед выполнением необходимых преобразований с помощью цифровой техники такой сигнал необходимо представить в цифровом виде. Именно эту операцию выполняет аналогово-цифровые преобразователи (АЦП). Обратную операцию преобразования цифрового сигнала в аналоговый осуществляют цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП).

В основе преобразования аналогового сигнала в цифровой лежит операция квантования (дискретизации).

Дискретизация может осуществляться двумя способами: квантованием по времени и квантованием по уровню. Квантование по времени осуществляется следующим образом: через равные промежутки времени определяется значение непрерывной функции на входе устройства дискретизации (рис. 1). Это значение затем переводится в двоичный код, с которым работает большинство цифровых устройств. Квантование по уровню: в момент достижения функцией некоторого определенного уровня фиксируется значение функции и момент времени достижения функцией данного уровня.

Таким образом, в первом случае аналоговый сигнал может быть представлен последовательностью импульсов одинаковой длительности, но разного уровня. При квантовании по уровню сигнал может быть представлен в виде импульсов различного уровня и различной длительности. Такие импульсы очень трудно представить в виде логического нуля и логической единицы. Поэтому чаще всего эти два вида квантования применяются одновременно, а полученный результат кодируется (рис. 1 а, б).

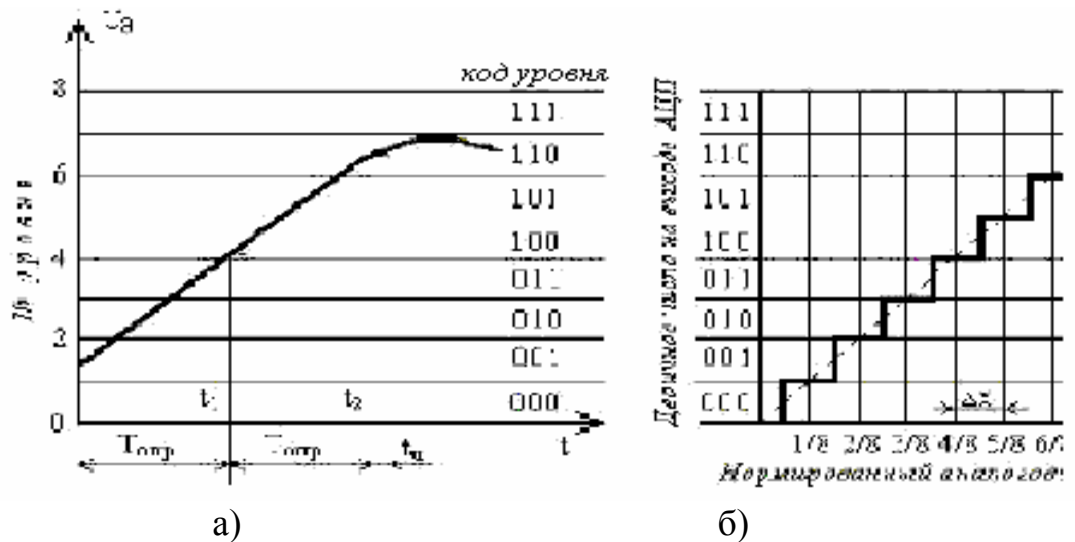


Рис.1

Диапазон значений входного сигнала разбивается на уровни, каждому из которых присваивается двоичный код. Уровни отстоят друг от друга на одинаковое расстояние (значение сигнала). С помощью специального устройства в определенный момент времени осуществляется опрос входного устройства и определяется уровень входного сигнала наиболее приближенный к ближайшему уровню. Чем больше уровней квантования и чем меньше шаг квантования, тем выше точность преобразования. Если в системе n уровней, то относительная погрешность преобразования $\varepsilon = \frac{1}{2^n}$.

Существует два широко распространенных способа цифро-аналогового преобразования с использованием: а) резистивной матрицы с весовым двоично-взвешенными сопротивлениями; б) матрицы с двумя номиналами сопротивлений, которую называют матрицей $R-2R$.

ЦАП с весовыми двоично-взвешенными сопротивлениями изображен на рисунке 2. Он состоит из следующих компонентов: n ключей, по одному на каждый разряд, управляемых преобразованным двоичным числом (кодом) N ; матрицы двоично-взвешенных резисторов; источника опорного напряжения $U_{оп}$; входного операционного усилителя, с помощью которого суммируются токи, протекающие через двоично-взвешенные сопротивления, для получения аналогового сигнала $U_{вых}$ пропорционально цифровому коду.

На вход $a_0 - a_{n-1}$ ЦАП поступает двоичный сигнал с регистра, являющегося внешним устройством по отношению к ЦАП. Двоичный сигнал состоит из n двоичных разрядов:

$$T = a_{n-1} \cdot 2^{n-1} + a_{n-2} \cdot 2^{n-2} + \dots + a_0 \cdot 2^0 = \sum_{i=0}^{n-1} a_i \cdot 2^i,$$

где a_i - коэффициент, принимающий значение 1 или 0.

Цифро-аналоговое преобразование состоит в суммировании эталонных значений токов, соответствующих разрядам входного кода, причем в суммировании участвуют только те эталоны, для которых в соответствующих разрядах стоит единица. Для этого каждый i -ый разряд управляет ключом K_{π_i} , который подключается к источнику опорного напряжения $U_{оп}$, когда $a_i = 1$, или к общей шине, когда $a_i = 0$. Сопротивление резисторов, соединенных с ключами, таковы, что обеспечивается пропорциональность протекающего в них тока двоичному весу соответствующего разряда входного кода.

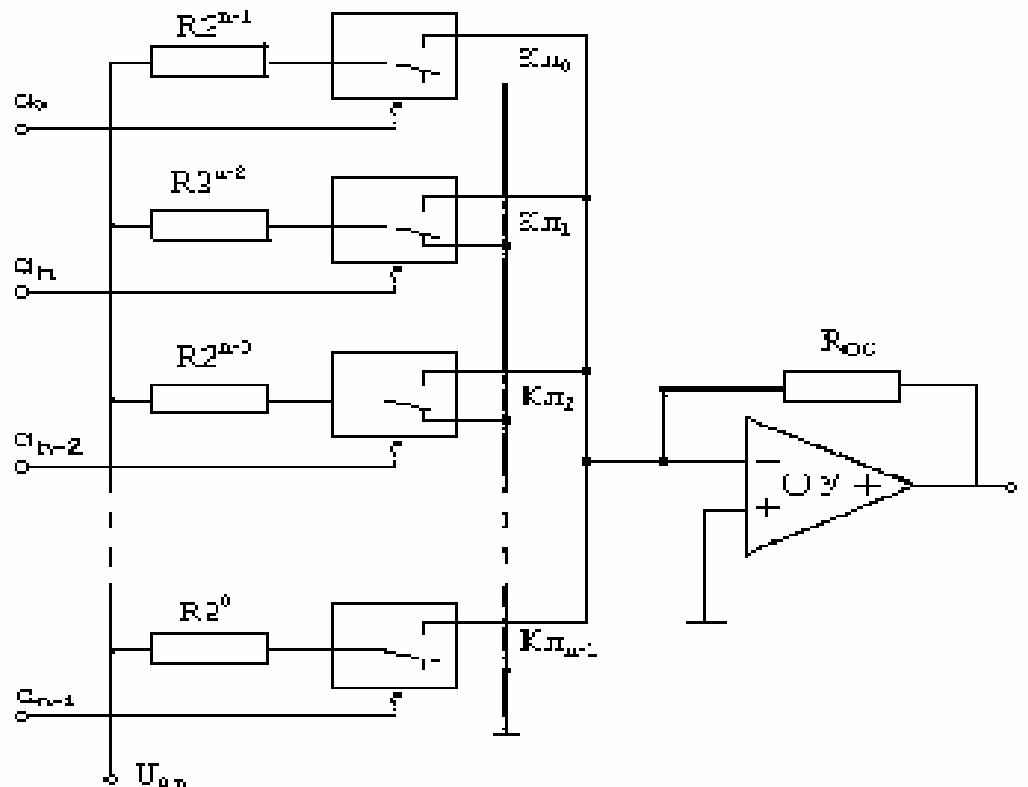


Рис. 2

Сопротивление резистора в старшем разряде имеет значение R , сопротивление следующего резистора $2R$ и т.д. до сопротивления резистора в младшем разряде, значение которого равно $R2^{n-1}$. Следовательно, ток I , протекающий на входе ОУ равен

$$I = \frac{a_{n-1} \cdot U_{оп}}{R} + \frac{a_{n-2} \cdot U_{оп}}{2R} + \dots + \frac{a_1 \cdot U_{оп}}{2^{n-2} \cdot R} + \frac{a_0 \cdot U_{оп}}{2^{n-1} \cdot R}.$$

Соответственно выходное напряжение ЦАП, т.е. напряжение, снимаемое с выхода ОУ равно

$$U = -IR_{ос} = \frac{U_{оп}R_{ос}}{2^{n-1} \cdot R} \sum_{l=1}^{n-1} a_l \cdot 2^l$$

и пропорционально взвешенному коду, в котором единичное значение принимают разряды, соответствующие ключам, связанным с источником $U_{оп}$. Максимальное выходное напряжение имеет место, когда все разряды примут значение 1:

$$U_{MAX} = \left| U_{он} \frac{(2^n - 1)R_{oc}}{2^{n-1}R} \right|$$

Номиналы сопротивлений в младшем и старшем разрядах отличаются в 2^{m-1} раз и должны быть выдержаны с высокой точностью. Например, для 12-разрядного ЦАП использование в старшем разряде сопротивления 10 кОм потребует включения в младший разряд преобразователя сопротивления 20 МОм. Это создает трудности при реализации ЦАП посредством интегральной технологии.

Если требуется преобразование с высокой точностью, то ЦАП с двоично-взвешенными резисторами должен содержать резисторы широкого ряда номиналов сопротивлений и подобранные для каждого разряда полупроводниковые ключи.

ЦАП с двумя номиналами сопротивлений (рис. 3) исключают эти сложности, благодаря наличию дополнительного резистора в каждом разряде.

Так как эта матрица резисторов является линейной цепью, ее работу можно проанализировать методом суперпозиции, т.е. вклад в выходное напряжение от каждого источника (разряда) рассчитать независимо друг от друга. Вклады от каждого разряда суммируются для получения напряжения на выходе ЦАП.

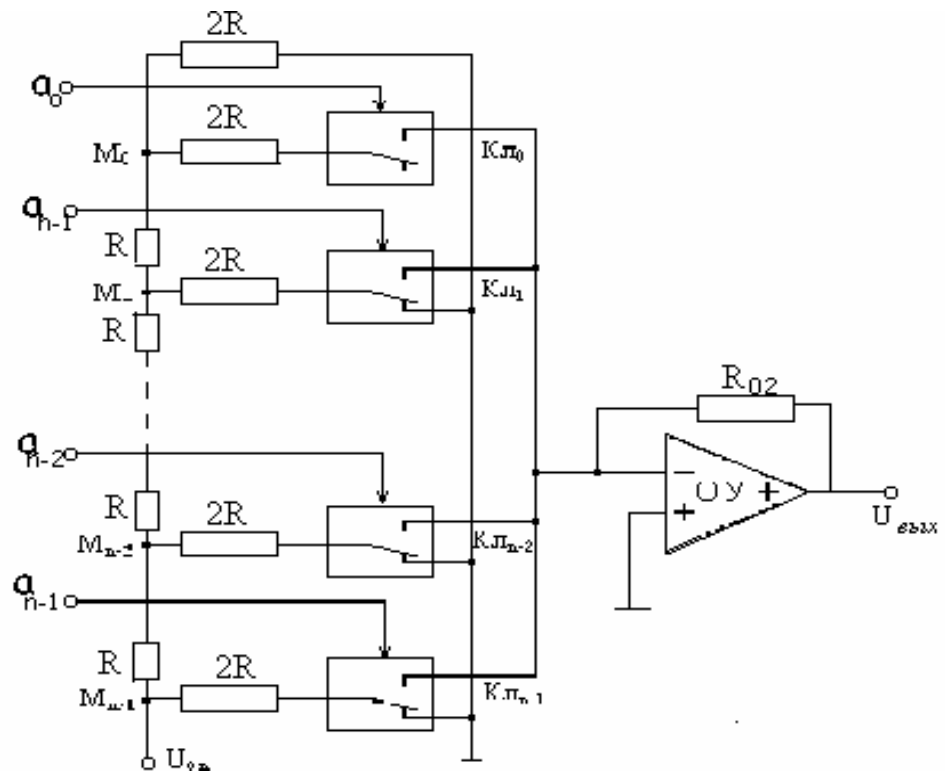


Рис. 3

Существует ЦАП, использующий режим работы суммирующего элемента, близкий к холостому ходу (суммирует напряжения) (рис. 4). По сравнению с рис. 3 здесь используется обратное включение входа и выхода матрицы $R - 2R$.

В таких ЦАП используют токовые ключи, потенциалы между контактами которых близки к нулю и, следовательно, переходные процессы протекают быстрее.

ЦАП с резистивными матрицами $R - 2R$ в отличие от ЦАП с двоично-взвешенными резисторами, не требует широкого диапазона номиналов резисторов и поэтому легко реализуются полупроводниковой интегральной технологией. Матрицы $R - 2R$ занимают меньшую площадь кристалла и позволяют снизить до минимума паразитарные и индуктивности резисторов и соединительных проводников.

Токовые ключи, предназначенные для коммутации элементов резистивной матрицы, должны иметь высокое быстродействие и не вносить заметных искажений в разрядные токи. Ключи для быстродействующих ЦАП строят обычно на биполярных транзисторах и диодах.

Большинство схем АЦП и ЦАП выполняются в виде интегральных микросхем.

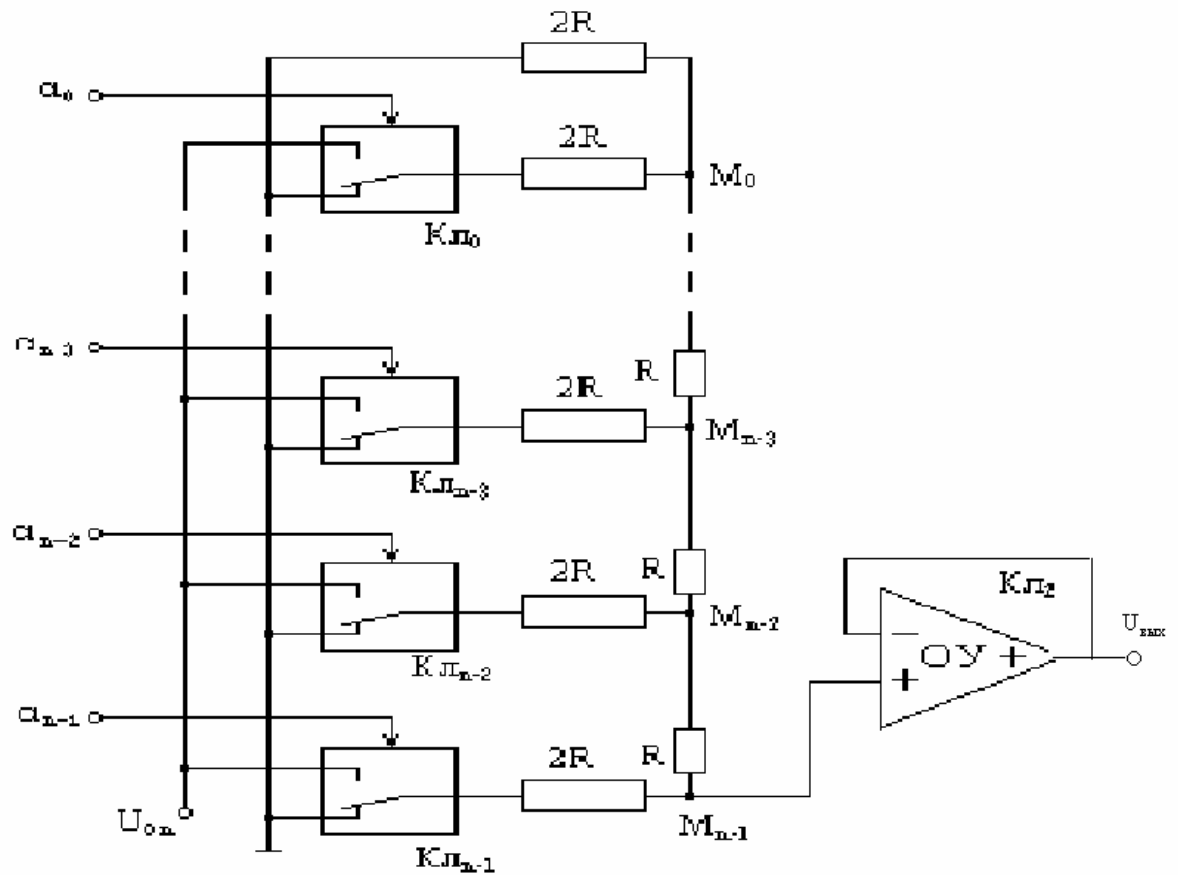


Рис. 4

Принцип действия ЦАП последовательного приближения (поразрядного кодирования) заключается в следующем. Имеется набор эталонов напряжения, пропорциональных по значениям степеням числа 2, которые сравниваются с аналоговой величиной. Сравнение начинается с эталона старшего разряда. В зависимости от результата этого сравнения формируется значение старшего разряда выходного кода. Если эталон больше входной величины, то в старшем разряде установится 0. Затем входная величина уравнивается следующим по значению эталоном. Если эталон равен или меньше входной величины, то в старшем разряде кода ставится 1 и в дальнейшем уравнивается между входной величиной и первым эталоном и т.д.

Схема, иллюстрирующая работу подобного преобразователя последовательного приближения, приведена на рис. 5. При подаче импульса запуска триггер старшего разряда T_N устанавливается в состояние 1, а остальные триггеры - в 0; одновременно записывается 1 в старший разряд регистра сдвига. В каждом такте на компаратор K подаются входное U_{BX} и эталонное напряжение $U_{ЭТ}$, снимаемое с выхода ЦАП и соответствующее 1 старшего разряда. Если $U_{BX} >$

$U_{ЭТ}$, на выходе компаратора сигнала не будет и в старшем разряде сохранится 1. Если $U_{ВХ} < U_{ЭТ}$, то компаратор выдает сигнал, который вернет триггер T_N в состояние 0. Сдвиг 1 в регистре в (n - 1) разряд позволит подать эталонное напряжение с ЦАП на компаратор. Далее процесс преобразования идет аналогично. В результате преобразование $U_{ВХ}$ уравнивается суммой эталонных напряжений, снимаемых с ЦАП:

$$U_{ex} = \sum_{i=1}^n a_i \cdot U_{iэт} ,$$

где a_i - коэффициенты 1 и 0 в разрядах выходного кода, снимаемого с триггеров $T_N - T_0$;

$U_{ЭТi}$ - эталонное напряжение ЦАП, соответствующее i -разряду.

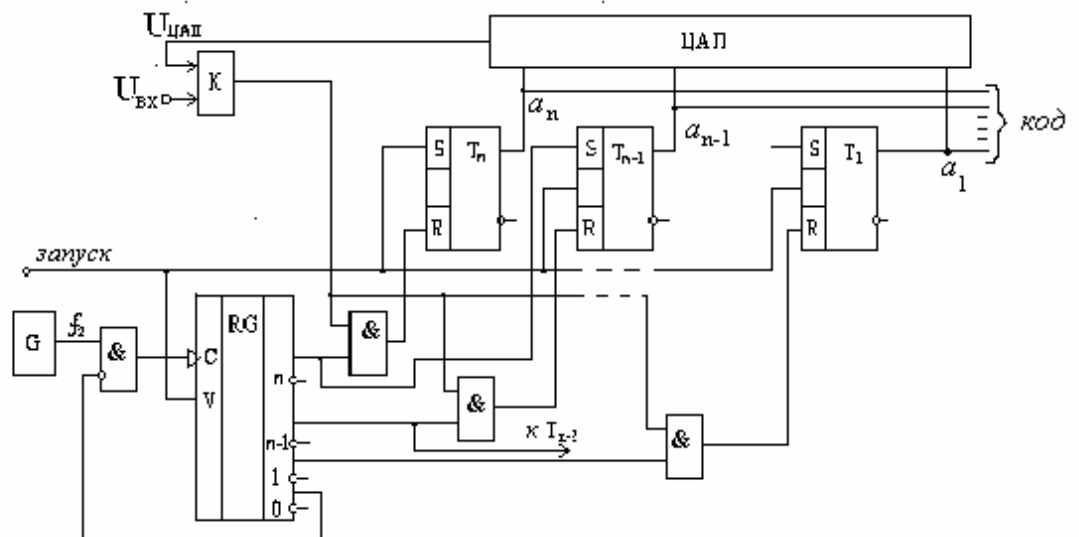


Рис. 5

В рассмотренном ЦАП время преобразования постоянно и определяется числом разрядов и тактовой частотой $f_{пр} = f_r / n$. Погрешность преобразования зависит от ошибок ЦАП и чувствительности компаратора.

Принцип работы ЦАП последовательного счета основан на уравнивании входной величины суммой одинаковых и минимальных по величине эталонов. Момент уравнивания определяется с помощью компаратора, а количество эталонов, уравнивающих входную величину, подсчитывается счетчиком.

Принцип работы преобразователей параллельного действия основан на одновременном сравнении входного сигнала с $2^n - 1$ эталонами, соответствующими n-разрядному двоичному коду, и кодировании результатов этого сравнения. Пример такого

преобразователя показан на рис. 6. В этом преобразователе 2^n-1 опорных напряжений формируются с помощью резистивного двигателя. Каждое из опорных напряжений подается вместе с U_{BX} на соответствующий компаратор. Срабатывают лишь те компараторы, у которых $U_{BX} > U_{оп}$. Результат сравнения через фиксирующие триггеры $T_N - T_0$ подается на кодопреобразователь, преобразующий его в код. Подобные преобразователи являются наиболее быстродействующими. Недостаток этих преобразователей в большом количестве компараторов, которое быстро возрастает с ростом числа разрядов.

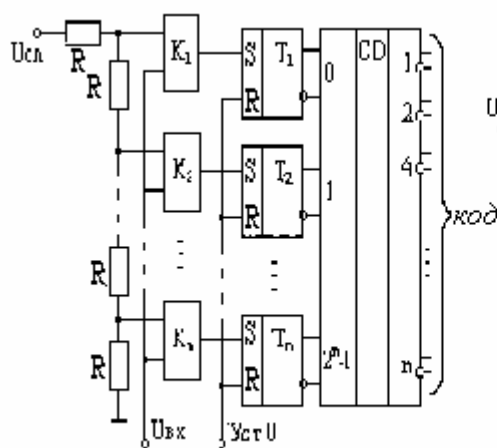


Рис. 6

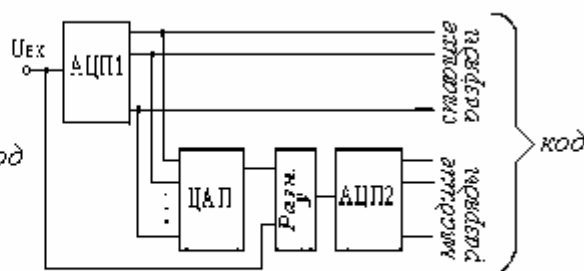


Рис. 7

Если нужно повысить разрядность, сохраняя высокое быстродействие при приемлемой сложности, применяют параллельно-последовательные (комбинированные) АЦП. В них несколько малоразрядных АЦП параллельного действия соединяют последовательно. Пример построения комбинированного АЦП показан на рис. 7. Входной аналоговый сигнал подается на первый АЦП, на выходе которого формируются старшие разряды выходного кода. Эти разряды подаются также на вход ЦАП. Выходной сигнал ЦАП сравнивается в усилителе разности $У$ с выходным сигналом. Разность этих сигналов подается на вход второго АЦП, который преобразует ее в выходной код младших разрядов.

В отличие от АЦП схемы ЦАП в основном выполняются с использованием операционных усилителей (ОУ).

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Схемы ЦАП и АЦП выполнены на одном лабораторном стенде.

Схемы ЦАП выполнены на основе матрицы $R-2R$ и операционного усилителя (ОУ). Сигналы на вход матрицы подаются от внутреннего источника с помощью ключей $D0-D9$. Сигнал с выхода ОУ регистрируется встроенным цифровым вольтметром.

Схема АЦП выполнена на основе микросхемы КР572ПВ1А.

Аналоговый сигнал подается на вход АЦП с помощью переменного резистора. Величина сигнала измеряется цифровым вольтметром.

Сигнал на входе АЦП записывается в виде двоичного входа в регистре. Регистрация сигнала происходит в момент подачи синхронизирующего импульса с тактового генератора, встроенного в установку. При появлении логической «1» на выходах регистра загораются соответствующие диоды $D0-D11$. Это значит, что выходной сигнал представляется в виде 10-ти разрядного двоичного числа.

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

УПРАЖНЕНИЕ 1.

1. Изучить работу ЦАП матричного типа.
2. С помощью ключей $D0-D9$ на вход ОУ подать произвольный двоичный код. Определить с помощью вольтметра величину напряжения на входе ОУ в аналоговом виде. Записать результат. Проверить соответствие сигнала вольтметра с двоичным кодом на входе.
3. Повторить 5-10 раз.
4. Результаты записать в виде таблицы.

УПРАЖНЕНИЕ 2.

1. Изучите работу АЦП.
2. С помощью переменного резистора на вход микросхемы подать сигнал. Затем подать синхроимпульс и снять показания с выходных диодов $D0-D11$ в виде двоичного кода. Записать код и значение напряжения по вольтметру. Проверить соответствие показаний.
3. Повторить опыт 5-10 раз.
4. Результат свести в таблицу.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что означает понятие квантование?
2. Как осуществляется квантование по уровню?

3. Как осуществляется квантование по времени?
4. В чем заключается основной принцип построения АЦП?
5. Каким образом строится схема ЦАП?

ЛИТЕРАТУРА

[3], §3.7.2, с. 391-396; [4], §7.8, с.334-340; [2], §10.2, с.224-228.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е.И. Манаев. Основы радиоэлектроники. М.: Советское радио. 1976. –480 с.
2. А.И. Кучумов. Электроника и схемотехника. М.: “Гелиос АРВ”. 2002. –304 с.
3. В.И. Лачин, Н.С. Савелов. Электроника. Ростов н/Д: изд-во “Феникс”. 2000. -448 с.
4. В.И. Нефедов. Основы радиоэлектроники. М.: Высшая школа, 2000. - 399 с.
5. М.М. Мэндл. 200 избранных схем электроники. М.: 1980. - 344 с.
6. Л.З. Бобровников. Радиотехника и электроника. М.: «Недра», 1974.-360с.