

**Белорусский национальный технический университет**

**Энергетический факультет**

**Кафедра «Электротехника и электроника»**

**СОГЛАСОВАНО**

Заведующий кафедрой

Жуковская Т.Е.

..... 27.05.2024 г .

**СОГЛАСОВАНО**

Декан факультета

Пономаренко Е.Г.

..... 27.05.2024 г .

**ЭЛЕКТРОННЫЙ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС  
ПО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ**

**Э Л Е К Т Р О Н И К А**

**И И Н Ф О Р М А Ц И О Н Н О - И З М Е Р И Т Е Л Ь Н А Я Т Е Х Н И К А**

для специальности

7-07-0712-01 «Электроэнергетика и электротехника»

Составители: Жуковская Т.Е., Бондаренок Е.В.

Рассмотрено и утверждено

на заседании совета энергетического факультета 25.04.2024 г.

протокол № 8

## Перечень материалов

### Теоретический раздел

- тематический конспект лекций

### Практический раздел

- материалы лабораторных занятий

### Контроль знаний

- вопросы к зачету;
- экзаменационные вопросы;
- задания для самостоятельной работы

### Вспомогательный раздел

- учебная программа;
- методическая карта дисциплины;
- рекомендуемая литература;
- словарь терминов

## Пояснительная записка

Цели данного ЭУМК – повышение эффективности организации учебного процесса с использованием дистанционных технологий; представление возможности студентам заниматься самообразованием, пользуясь комплектом учебно-методических материалов по курсу «Электроника и информационно-измерительная техника».

ЭУМК содержит четыре раздела: теоретический, практический, контроля знаний и вспомогательный раздел. В теоретическом разделе представлен лекционный материал в соответствии с основными разделами и темами учебной программы. Практический раздел включает лабораторный практикум. Раздел контроля знаний включает контрольные вопросы, а также задания и тесты для организации самостоятельной работы студента. Вспомогательный раздел содержит основные разделы учебной программы дисциплины, методическую карту дисциплины, список рекомендуемой литературы, словарь терминов и определений.

Материалы учебно-методического комплекса представлены в формате PDF. Учебные материалы структурированы по разделам. ЭУМК содержит перекрестные и гиперссылки, позволяющие оперативно найти необходимый материал, перейти к нужной теме. Предусматривается так же навигация по разделам через закладки PDF формата, что обеспечивающая возможность быстрого поиска требуемой информации и быстрый возврат к предыдущей информации

Открытие ЭУМК производится посредством запуска файла *Electronika\_It.pdf*

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

## Раздел 1 Полупроводниковые приборы

- [Введение. Свойство полупроводников](#)
- [Полупроводниковые диоды](#)
- [Тиристоры](#)
- [Биполярные транзисторы](#)
- [Полевые транзисторы](#)
- [Элементы электроники](#)

## Раздел 2 Аналоговые устройства электроники

- [Выпрямители переменного тока](#)
- [Усилители аналогового сигнала](#)
- [Усилители постоянного тока](#)

## Раздел 3 Импульсные устройства электроники

- [Генераторы импульсного сигнала](#)
- [Логические функции и элементы](#)
- [Последовательностные логические устройства](#)
- [Комбинационные логические устройства](#)

## Раздел 4 Информационно-измерительная техника

- [Классификация измерений.](#)
- [Электромеханические приборы](#)
- [Измерение параметров пассивных элементов](#)
- [Электронные аналоговые приборы](#)
- [Цифровые измерительные приборы](#)
- [Регистрирующие измерительные приборы](#)
- [Измерительные трансформаторы тока и напряжения.](#)
- [Измерения параметров однофазных и трехфазных цепей переменного тока](#)
- [Измерения временных параметров, сдвига фаз и коэффициента мощности](#)
- [Измерения магнитных величин](#)
- [Методы и средства измерений неэлектрических величин](#)
- [Автоматизация измерений](#)

## **ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ**

Список лабораторных работ

Семестр 4

[Л.Р. №1.1 «ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ И ТИРИСТОРОВ»](#)

[Л.Р. №1.2 «ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕВОГО И БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА»](#)

[Л.Р. №1.3 ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ С ФИЛЬТРАМИ](#)

[Л.Р. №1.4 ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛИЗАТОРОВ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА](#)

[Л.Р. №1.5 ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ](#)

[Л.Р. №1.6 ЛОГИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ И МИКРОСХЕМЫ](#)

[Л.Р. №1.7 КОМБИНАЦИОННЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ](#)

[Л.Р. №1.8 ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИГГЕРНЫХ СХЕМ](#)

Семестр 5

[Л.Р. №1.9 СЧЕТЧИКИ ИМПУЛЬСОВ И РЕГИСТРЫ](#)

[Л.Р. №1.10 ИССЛЕДОВАНИЕ НА ПЭВМ КАСКАДА УСИЛЕНИЯ НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ ПО СХЕМЕ ОЭ](#)

[Л.Р. №1.11 ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ](#)

[Л.Р. №1.12 УПРАВЛЯЕМЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ](#)

[Л.Р. №1.13 ФОТО- И ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ](#)

[Л.Р. №1.14 ИССЛЕДОВАНИЕ АРИФМЕТИКО-ЛОГИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА](#)

[Л.Р. №1.15 ИССЛЕДОВАНИЕ ЦАП И АЦП](#)

[Л.Р. №1.16 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И АВТОМАТИКИ](#)

Семестр 6

[Л.Р. №2.1 ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЩИХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ВОЛЬТМЕТРОВ](#)

[Л.Р. №2.2 ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ИНДУКЦИОННОГО СЧЕТЧИКА АКТИВНОЙ ЭНЕРГИИ](#)

[Л.Р. №2.3 ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ](#)

[Л.Р. №2.4 ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ОСЦИЛЛОГРАФА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН](#)

[Л.Р. №2.5 АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ И ЭНЕРГИИ В ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЯХ](#)

[Л.Р. №2.6 ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ И ИНТЕРВАЛОВ ВРЕМЕНИ](#)

[Л.Р. №2.7 ИНДУКЦИОННЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ](#)

## **КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ**

[Вопросы к зачету \(семестр 4\)](#)

[Экзамнационные вопросы](#)

[Вопросы к зачету \(семестр 6\)](#)

[Вопросы самостоятельной работы](#)

## **ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ**

[Содержание учебного материала](#)

[Учебно-методическая карта дисциплины](#)

[Список литературы](#)

[Словарь терминов](#)

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

## Раздел 1 Элементная база электроники

### Введение

Электроника область науки, техники и производства изучающая принципы функционирования, разработку и применение устройств работа которых основана на протекании тока в твердом теле, вакууме и газе. Приборы электроники подразделяют на: *аналоговые*, обеспечивающие обработку непрерывного сигнала; и *импульсные*, в которых обрабатываемый сигнал представляет дискретную функцию.

По области применения различают энергетические и информационные устройства электроники. Энергетическая электроника включает устройства, обеспечивающие преобразование одного вида электрической энергии в другой и изменение параметров электрического сигнала. Информационная электроника занимается устройствами для приема, передачи, обработки, хранения и отображения информации.

Сфера применения электроники постоянно расширяется. В основе современной электроники лежит применение полупроводниковых приборов, что позволяет снижать потребление электрической мощности, уменьшать габариты, массу, современных устройств электроники. В информационной электронике применение полупроводниковых структур позволяет увеличивать объём обрабатываемой информации в единицу времени, не снижая качества обработки информации.

### ТЕМА 1.1. СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

#### Основы теории электропроводности

В теории электропроводности твердых тел указывается, что энергия каждого электрона может принимать лишь определенные значения, которые называются *энергетическими уровнями*. Электроны, расположенные ближе к ядру атома, обладают меньшими энергиями, т.е. находятся на более низких энергетических уровнях, а удаленные от ядра электроны находятся на более высоких энергетических уровнях, т.е. обладают большей энергией.

Когда электрон переходит с более высокого энергетического уровня на более низкий, выделяется количество энергии (квант энергии или фотон), которую теряет атом. Если атом поглощает квант энергии, то электрон переходит с более низкого энергетического уровня на более высокий. Такие электроны начинают свободно перемещаться в объеме и называются *свободными носителями зарядов*.

Свободная зона, на уровнях которой при возбуждении могут находиться электроны, называется *зоной проводимости*. Зона, ближайшая к зоне проводимости, называется *валентной*. При изменении температуры происходит обмен носителями зарядов между валентной зоной и зоной проводимости (рис. 1.1).

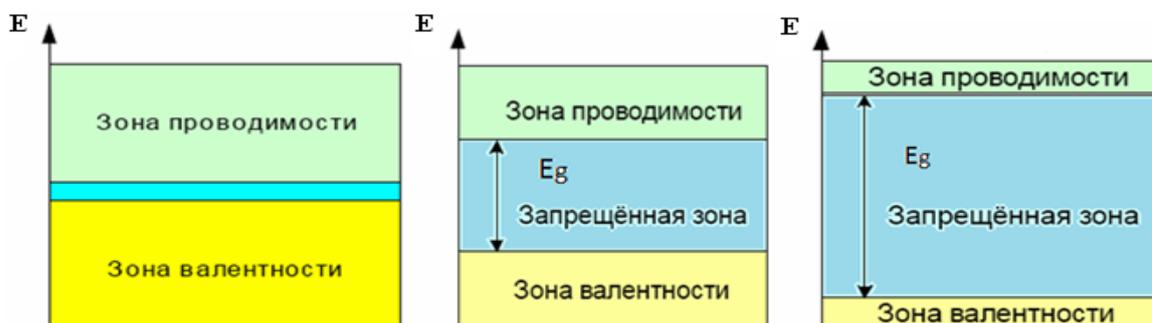


Рисунок 1.1 Зонная диаграмма металла, полупроводника и диэлектрика

С возрастанием температуры электроны, получившие дополнительную тепловую энергию, разрывают такие ковалентные связи и становятся свободными носителями заряда. Таким образом, для перевода электронов в свободное состояние необходимо сообщить ему дополнительное количество энергии, которое обозначается  $E_g$ .

В диэлектриках величина дополнительной энергии  $E_g$ , необходимой для перевода электрона из валентной зоны в зону проводимости, значительно больше, чем у полупроводников.

Уход электрона из валентной зоны приводит к образованию в ней незаполненного энергетического уровня. Такое вакантное энергетическое место носит название «дырка» и оно равносильно наличию в данном месте положительного заряда. В технической литературе дырки обозначают буквой  $p$ , а электроны буквой  $n$ .

### ***Электропроводность полупроводников***

Появление электронов в зоне проводимости означает, что полупроводник становится электропроводящим. Эта электропроводность является следствием нарушения валентных связей и называется *собственной электропроводностью*.

На электропроводность полупроводника существенное влияние оказывает наличие в нем атомов примесей. Электропроводность, обусловленную движением свободных электронов, называют электронной, а электропроводность, обусловленную движением дырок – дырочной.

### ***Примесная электропроводность полупроводников***

В зависимости от рода введенной примеси в полупроводниках преобладает либо электронная электропроводность ( $n$ -типа, от латинского negative – отрицательный) либо дырочная электропроводность ( $p$ -типа, от латинского positive – положительный). Примеси могут быть донорного и акцепторного типа.

Примесный атом, отдающий электрон, называют донорным. Донорные примеси образуются при введении в кристаллическую решётку полупроводника (обычно кремния Si или германия Ge, которые являются четырехвалентными) атомов фосфора P, мышьяка As или других веществ, которые имеют на внешней электронной оболочке пять валентных электронов. Он замещает один из атомов Ge (Si) в кристаллической решетке, образуя двухвалентные связи с четырьмя атомами (рис. 1.2, б).

Пятый валентный электрон атома фосфора, оказывающийся «лишним», образует электрон проводимости. При увеличении содержания атомов примеси возрастает число электронов в зоне проводимости, а число дырок не меняется. Ток переносится в основном электронами. В этом случае электроны являются основными носителями заряда, а дырки – неосновными. Полупроводник называется в этом случае полупроводником *n*-типа.

Акцепторные примеси образуются введением в кристаллическую решетку полупроводника атомов бора В, индия In, галлия Ga или других трехвалентных элементов. Атом акцептора также занимает место в кристаллической решётке, но обменивается с соседними четырьмя атомами только тремя электронами (рис. 1.2, в).

На образование связи с одним из соседних атомов Ge (Si) у атомов индия не хватает одного электрона, т.е. между этими двумя атомами возникает незаполненная валентная связь, или дырка. При увеличении акцепторной примеси возрастает концентрация дырок и они становятся основными носителями, а электроны – неосновными. Полупроводник называется в этом случае полупроводником *p*-типа.

Кристаллические структуры таких полупроводников показаны на рис. 1.2.

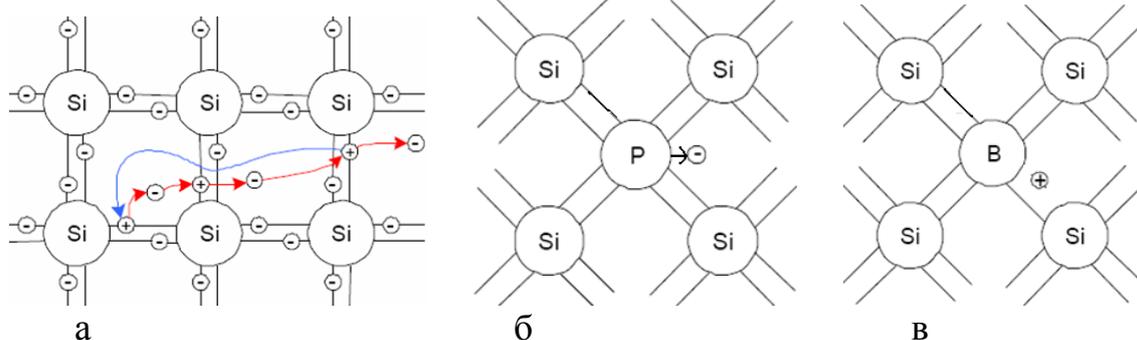


Рисунок 1.2 Кристаллические структуры чистого полупроводника (а), полупроводника с донорной (б) и акцепторной (в) примесью

Процесс перехода электронов из валентной зоны в зону проводимости является обратимым, то есть электрон из зоны проводимости может перейти в валентную зону, теряя при этом энергию. При таком переходе электрон заполняет свободный уровень в валентной зоне. Этот процесс, обратный генерации, называется рекомбинацией.

#### *Полупроводниковые материалы*

К полупроводникам относятся кремний, германий, селен, теллур, большинство оксидов металлов и всё разнообразие руд и минералов, встречающихся в природе. Полупроводники по величине электропроводности занимают промежуточное место между проводниками и диэлектриками.

Основными материалами для изготовления полупроводниковых приборов являются кремний (Si) и германий (Ge). Большая механическая прочность и химическая устойчивость этих материалов обеспечивают надёжность работы изготавливаемых полупроводниковых приборов, а также достаточно большой срок их службы.

## ТЕМА 2. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

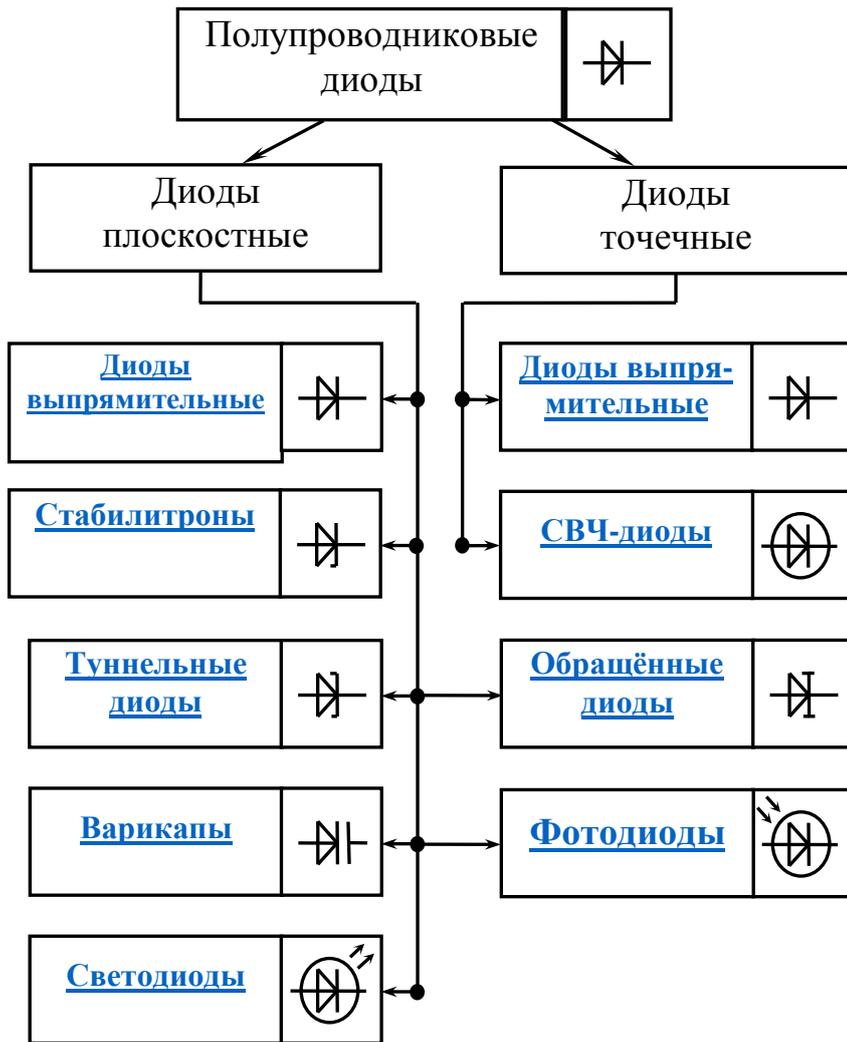


Рисунок 2.1 Классификация и условные графические обозначения полупроводниковых

графические обозначения полупроводниковых диодов.

**Диод** – полупроводниковый прибор с одним  $n$ - $p$ -переходом и двумя внешними выводами **анод** и **катод**. По назначению диоды делят на выпрямительные, высокочастотные, импульсные, стабилитроны и т.д. Их изготавливают на основе германия или кремния. По технологии исполнения различают точечные, плоскостные (сплавные) и диффузионные диоды. Точечный диод получают при впавлении металлической проволоки в пластину полупроводника. Плоскостные диоды получают при сплавлении пластин либо внесении примеси посредством диффузии. На рис. 2.1 представлена классификация и условные

**Выпрямительные диоды** предназначены для преобразования переменного тока низкой частоты в постоянный ток. Вольтамперная характеристика (ВАХ) выпрямительного диода, его условное графическое изображение и буквенное обозначение приведены на рис. 2.2. Основные параметры выпрямительного диода: предельно допустимый постоянный ток диода  $I_{пр.мах}$  и максимально допустимое обратное напряжение  $U_{обр.мах}$ .

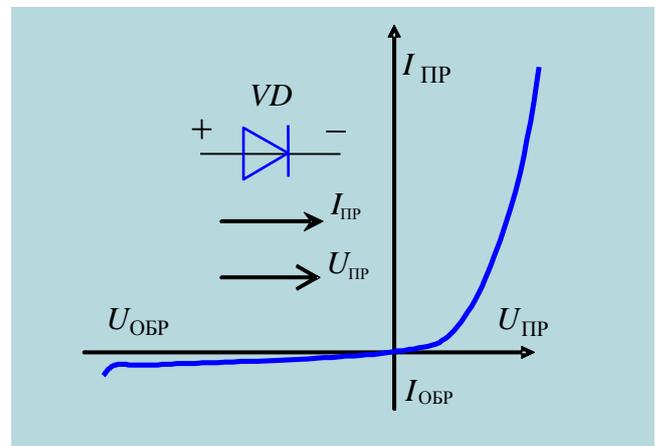


Рисунок 2.2 ВАХ диода

## Стабилитрон

представляет собой кремниевый полупроводниковый диод, который нормально работает при электрическом пробое  $n-p$ -перехода. При этом напряжение на диоде незначительно зависит от протекающего тока. Электрический пробой не вызывает разрушения перехода, если ограничить ток до допустимой величины. Стабилитроны применяют для стабилизации постоянного напряжения. ВАХ стабилитрона и его условное графическое обозначение приведены на рис. 2.3.

Основные параметры ВАХ стабилитрона: напряжение стабилизации  $U_{ст.ном}$ , минимальный  $I_{ст.min}$  и максимальный  $I_{ст.max}$  токи стабилизации, максимальная мощность  $P_{ст.max}$ .

**Светодиод** – полупроводниковый прибор с одним или несколькими электрическими переходами, преобразующий электрическую энергию в энергию обычного светового излучения.

Явление свечения в светодиоде называется инжекционной электролюминесценцией.

Основой светодиода является  $p-n$ -переход, смещенный внешним источником напряжения в проводящем направлении.

При прямом смещении потенциальный барьер  $n-p$  перехода понижается и происходит инжекция электронов в  $p$ -область и дырок в  $n$ -область. В процессе рекомбинации носителей заряда в  $n-p$  переходе энергия выделяется в виде фотонов, то есть процесс рекомбинации сопровождается световым излучением, частота которого определяет спектр излучения. Основными материалами для изготовления светодиодов служат арсенид галлия ( $GaAs$ ), селенид цинка ( $ZnSe$ ) фосфит галлия ( $GaP$ ), нитрид галлия ( $GaN$ ), индия-галлия нитрид ( $InGaN$ ). Варьируя состав полупроводников, можно создавать светодиоды для всевозможных длин волн от ультрафиолета ( $GaN$ ) до среднего инфракрасного диапазона ( $PbS$ )

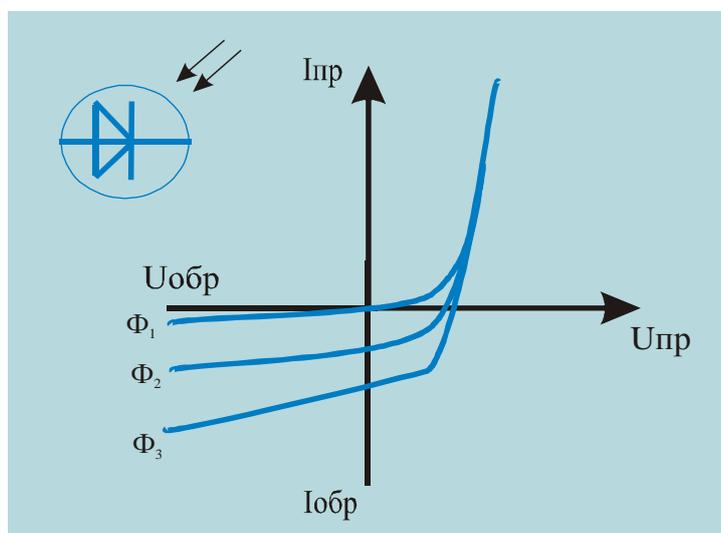
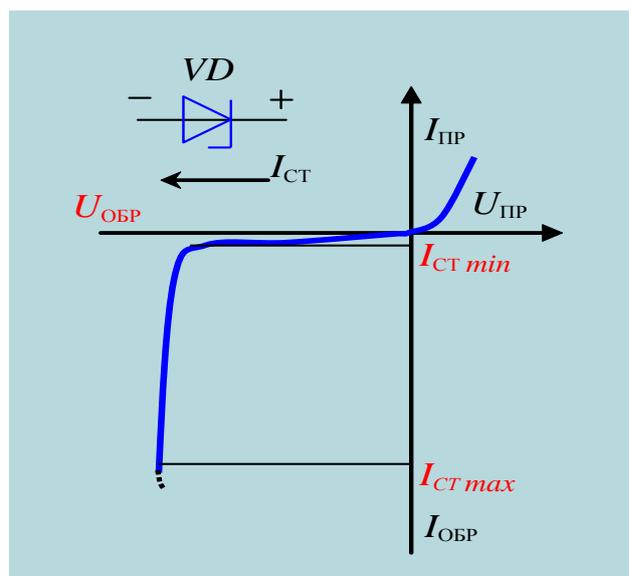


Рисунок 2.4 ВАХ фотодиода

Светодиоды нашли применение в световых индикаторах, табло, приборных панелях автомобилей и самолетов, рекламных экранах, различных системах визуализации информации. По светоотдаче, долговечности, надежности превосходят обычные лампы накаливания.

Основные параметры светодиодов:

1. Сила света  $I_v$  – световой поток, приходящийся на единицу телесного угла в заданном направлении (составляет десятые доли – единица мКд);
2. Яркость излучения равна отношению силы света к площади светящейся поверхности (составляет десятки-сотни Кд/см<sup>2</sup>);
3. Постоянное прямое напряжение (2...4 В);
4. Цвет свечения или длина волны, соответствующая максимальному световому потоку;
5. Максимально допустимый постоянный прямой ток (составляет десятки мА);
6. Максимально допустимое постоянное обратное напряжение (единицы В);
7. Быстродействие излучающего диода ( $\tau = 10^{-6} \dots 10^{-9}$  сек.), определяемое временем переключения  $t_{пер.}$ ;
8. Диапазон температур окружающей среды ( $T_0 = -60 \dots +70$  °С);
9. Срок службы – составляет 104...106 часов.

Недостатком светодиодов является зависимость их параметров от температуры. Выпускаются светодиоды в виде точечных приборов, в виде матричных панелей и в виде знаков синтезирующих индикаторов.

**Фотодиод** – это полупроводниковый прибор, принцип действия которого основан на использовании внутреннего фотоэффекта – генерации носителей заряда в полупроводнике под действием светового потока.

Работает в двух режимах: фотопреобразовательном и фотогенераторном.

В *фотопреобразовательном* режиме под воздействием светового потока  $\Phi$  увеличивается обратный ток фотодиода. Такие диоды используют в устройствах, реагирующих на свет.

В *фотогенераторном* режиме диод работает как источник электрической энергии, преобразующий энергию света в электрическую. ВАХ фотодиода представлена на рис. 2.4.

**Туннельный диод** – полупроводниковый диод на основе вырожденного полупроводника, в котором туннельный эффект приводит к появлению на вольт-амперных характеристиках (рис. 2.5) при прямом напряжении участка с отрицательной дифференциальной электрической проводимостью

Материалом для туннельных диодов служит сильнолегированный германий или арсенид галлия.

Основными параметрами туннельного диода являются ток пика  $I_{\text{п}}$  и отношение тока пика к току впадины  $I_{\text{п}}/I_{\text{в}}$

Для выпускаемых диодов  $I_{\text{п}} = 0,1 \dots 1000$  мА и  $I_{\text{п}}/I_{\text{в}} = 5 \dots 20$ .

Туннельные диоды относятся к быстродействующими полупроводниковыми приборами и применяются в генераторах высокочастотных колебаний и импульсных переключателях.

**Обращённый диод** – диод на основе полупроводника с критической концентрацией примесей, в котором электрическая проводимость при обратном напряжении вследствие туннельного эффекта значительно больше, чем при прямом напряжении. Обращённые диоды представляют собой разновидность туннельных диодов, у которых ток пика  $I_{\text{пр}} = 0$ . Если к обращённому диоду приложить прямое напряжение  $U_{\text{пр}} \leq 0,3$  В, то ток диода  $I_{\text{пр}} \approx 0$  А, в то же время даже при небольшом обратном напряжении (порядка десятков милливольт) обратный ток достигает нескольких миллиампер.

Таким образом, обращённые диоды обладают вентильными свойствами при малых напряжениях именно в той области, где выпрямительные диоды обычно вентильными свойствами не обладают. При этом направлением наибольшей проводимости является направление, соответствующее обратному току. (Рис. 2.6)

**Варикап** – полупроводниковый диод, в котором используется зависимость ёмкости  $p$ - $n$ -перехода от обратного напряжения и который

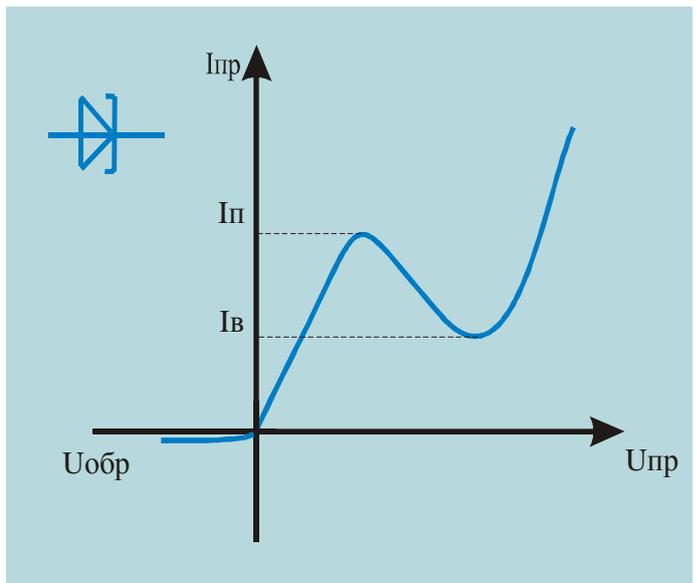


Рис 2.5 Туннельный диод

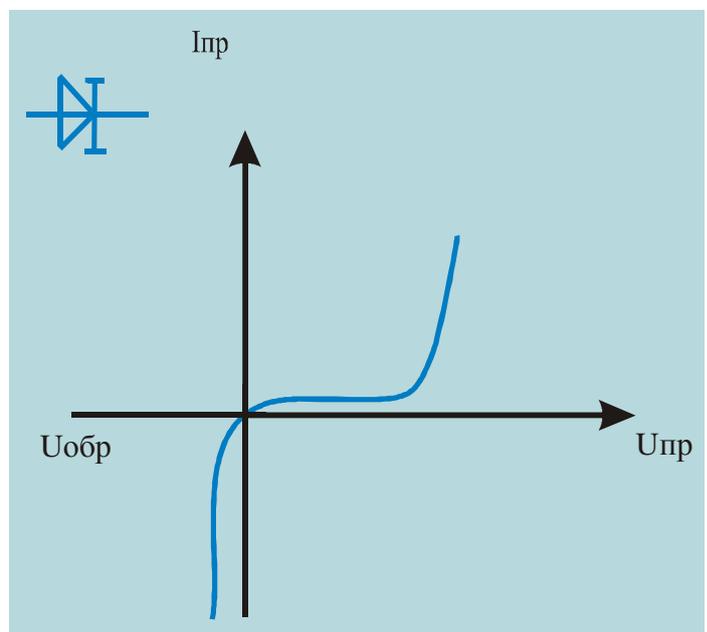


Рисунок 2.6 Обращенный диод

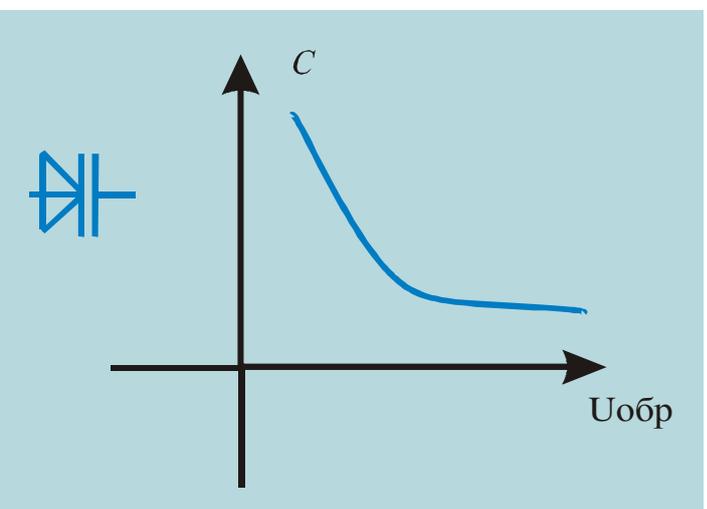


Рисунок 2.7 Варикап

предназначен для применения в качестве элемента с электрически управляемой ёмкостью.

Основными параметрами варикапа являются общая ёмкость  $C_v$ , которая фиксируется обычно при небольшом обратном напряжении  $U_{обр} = 2...5$  В, и коэффициент перекрытия по ёмкости  $K_C = C_{max} / C_{min}$ . Для большинства выпускаемых варикапов  $C = 10...500$  пФ и  $K_C = 5...20$ .

Варикапы применяют в системах дистанционного управления и автоматической подстройки частоты и в параметрических усилителях с малым уровнем собственных шумов. Варикап – это диод, принцип действия которого основан на емкостном свойстве р-п-перехода. Зависимость  $C = f(U)$  приведена на рис 2.7. Используется в устройствах автоматической подстройки частоты (АПЧ).

**СВЧ–диод** – предназначен для преобразования и обработки сверхвысокочастотного сигнала (до десятков и сотен гигагерц). СВЧ – диоды применяются в устройствах генерации и усиления электромагнитных колебаний СВЧ диапазона, умножения частоты, модуляции, генерирования сигналов и т.д.

**Диод Шотки** – получают, используя переход металл – полупроводник. В месте контакта возникает обедненный слой полупроводника, называемый запиорным. Ток через контакт металл – полупроводник, в отличие от тока через электронно-дырочный переход, обусловлен только основными носителями заряда.

Отличительные особенности диода Шотки по сравнению с диодами других типов: более низкое прямое падение напряжения; малая инерционность; высокое быстродействие; низкий уровень ВЧ шумов; простота изготовления. Вольт амперная характеристика диода с переходом металл – полупроводник из – за малого сопротивления, ближе к идеальной. Диод Шотки применяют как СВЧ-диод различного назначения (детекторного, лавинно-пролётного, параметрического, импульсного); кроме того, применяют в качестве приёмников излучения, детекторов ядерного излучения, тензодатчиков, модуляторов света; их используют также в низковольтных высокочастотных выпрямителях.

## ТЕМА 1.2. ТИРИСТОРЫ

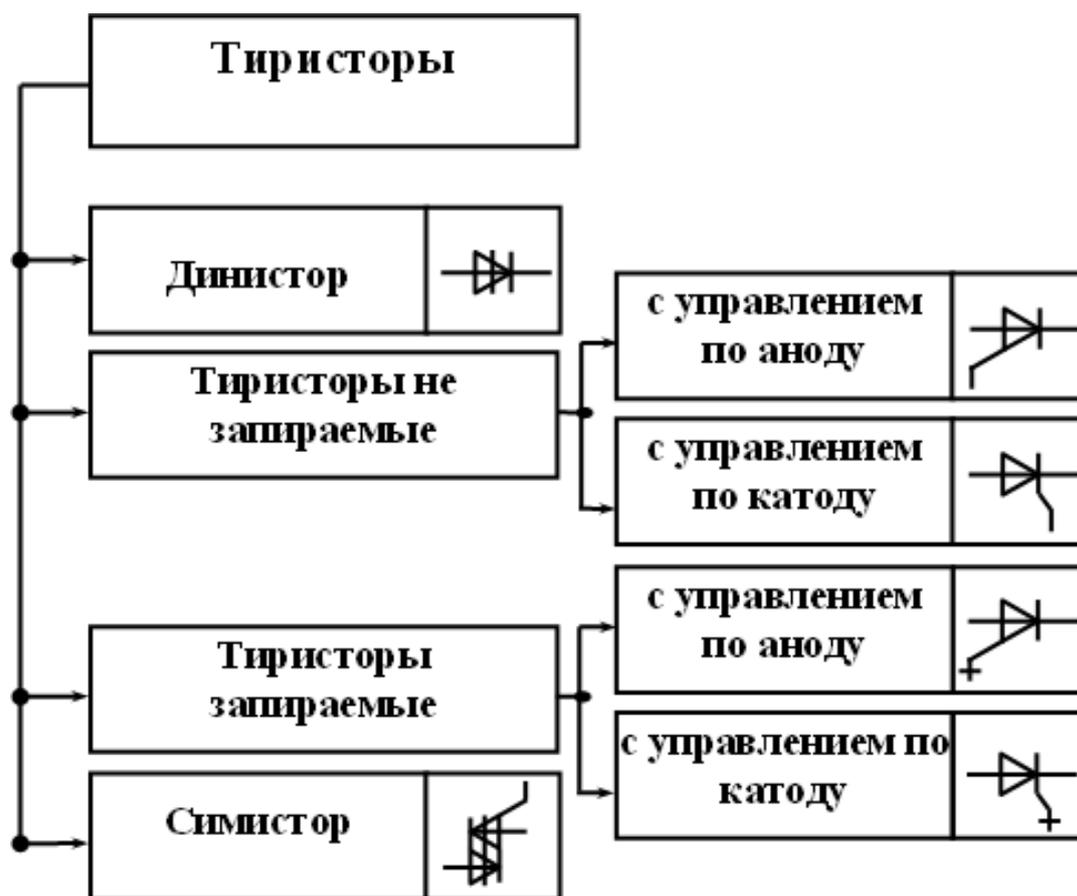


Рисунок 3.1 Классификация и система обозначений полупроводниковых тиристоров

**Т и р и с т о р о м** называют полупроводниковый прибор с тремя или более  $n$ - $p$ -переходами. Он может находиться в одном из двух устойчивых состояний: низкой проводимости (закрыт) или высокой проводимости (открыт). Различают диодные (неуправляемые) и триодные (управляемые) тиристоры. Диодный тиристор называют динистором, а триодный – тринистором. Структура, условное графическое и буквенное обозначения тиристора, его вольтамперная характеристика даны на рис. 3.2, а, б, в.

Основу прибора составляет кристалл кремния, в котором созданы четыре слоя с разными типами электропроводности. Внешний  $p$ -слой называют **анодом** (А), внешний  $n$ -слой – **катодом** (К), а два внутренних слоя – базами. Одна из баз имеет вывод – управляющий электрод (У).

При прямом включении (анод положителен по отношению к катоду) переходы П1 и П3 смещены в прямом направлении, а переход П2 – в обратном направлении. До тех пор, пока П2 закрыт, прямой ток практически равен нулю (участок  $oa$  характеристики рис 3.2, в). При некотором значении прямого напряжения, равном  $U_{вкл.мах}$ , за счет перераспределения зарядов в области баз переход П2 открывается (точка  $a$ ). Сопротивление его быстро уменьшается

(участок  $ab$ ), и тиристор работает на участке  $бв$  характеристики, которая подобна ВАХ диода.

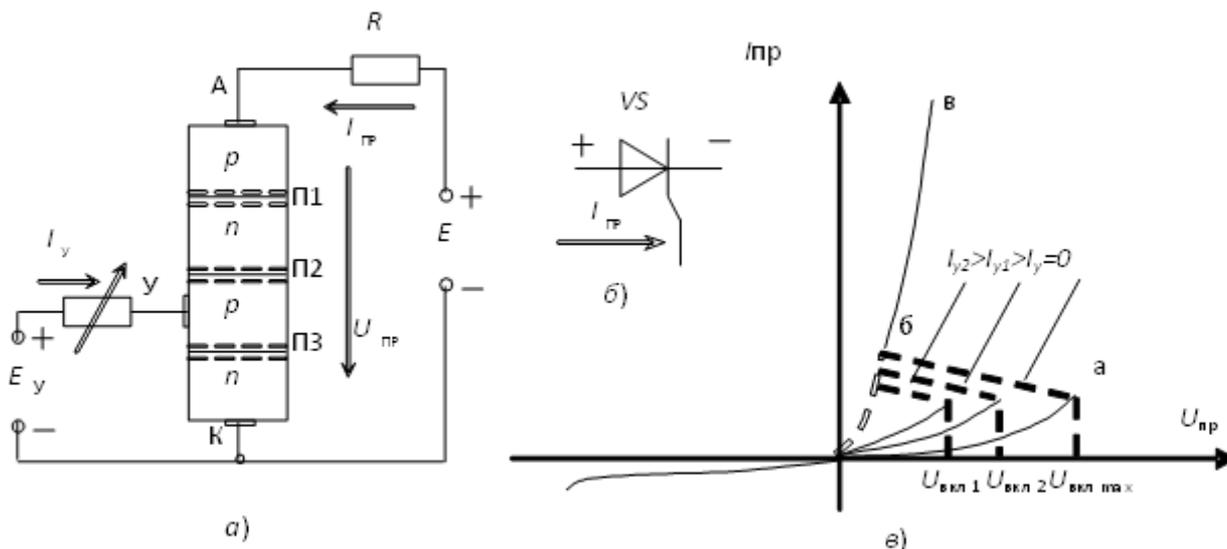


Рисунок 3.2 Тиристор

Напряжение включения  $U_{вкл.}$  можно уменьшить введением добавочных носителей заряда в любой из слоев, прилегающих к переходу П2. Добавочные носители заряда  $I_y$  на рис. 3.4, а вводятся в слой  $p$  от вспомогательной управляющей цепи с независимым источником  $E_y$ . При увеличении тока управления  $I_y$  характеристика включения (рис. 3.2, в) смещается влево (к естественной прямой ветви ВАХ диода). Тиристор остается во включенном состоянии, пока протекающий через него ток больше критического, называемого током удержания  $I_{уд.}$  Как только  $I_{пр}$  станет меньше  $I_{уд.}$  тиристор закрывается.

Следует отметить, что после включения тиристора объемные заряды в области перехода П2 будут компенсированы основным током, если он больше тока  $I_{уд.}$  и тогда ток управления  $I_y$  не нужен. Поэтому для снижения потерь в тиристоре он управляется короткими импульсами  $I_y$ .

При обратном включении тиристора (анод отрицателен по отношению к катоду) закрыты два перехода П1 и П3, и тиристор тока не проводит. Во избежание пробоя необходимо, чтобы обратное напряжение было меньше  $U_{обр.маx}$ .

Основные параметры, используемые при выборе тиристорov: предельно допустимый анодный ток в открытом состоянии тиристора  $I_{пр.маx}$ , предельно допустимое обратное напряжение  $U_{обр.маx}$ , предельно допустимое прямое напряжение в закрытом состоянии тиристора  $U_{пр.маx}$ , ток удержания  $I_{уд.}$ , прямое напряжение в точке включения диодного тиристора  $U_{вкл.}$ .

Маломощные тиристоры применяют в релейных схемах и маломощных коммутирующих устройствах. Мощные тиристоры используют в управляемых выпрямителях, инверторах и различных преобразователях.

**Запираемые тиристоры** – имеют четырехслойную  $p-n-p-n$  структуру, но в тоже время обладают рядом существенных конструктивных особенностей, придающих им принципиально отличное от традиционных тиристоров – свойство полной управляемости. Для выключения запираемого тиристора необходимо подать в цепь управляющего электрода мощный импульс отрицательного тока (примерно 1:5 по отношению к значению прямого выключаемого тока), но короткой длительности (10...100 мкс).

Запираемые тиристоры также имеют более низкие значения предельных напряжений и токов (примерно на 20...30 %) по сравнению с обычными тиристорами.

### Симистор

*Симистор* – тиристор, имеющий пятислойную структуру, что определяет симметричность его вольтамперной характеристики в I и III квадрантах (рис. 3.3, в). Это полупроводниковый прибор, который широко используется в системах, питающихся переменным напряжением. Упрощенно он может рассматриваться как управляемый выключатель.

Симистор можно представить двумя тиристорами, включенными встречно – параллельно. Он пропускает ток в обоих направлениях. Структура этого полупроводникового прибора показана на рис. 3.3, а. Симистор имеет три электрода: один управляющий и два основных для пропускания рабочего тока.

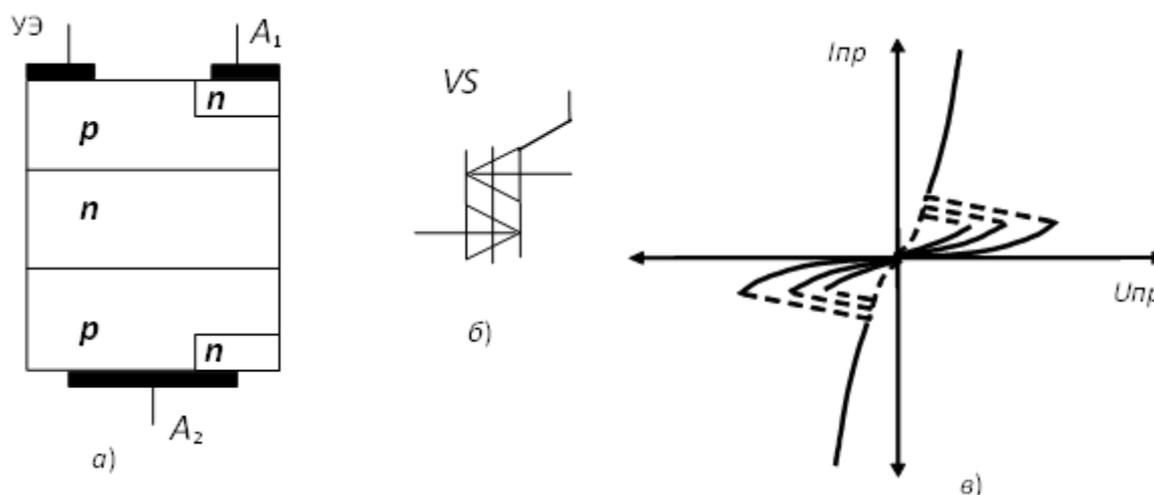


Рисунок 3.3 Симистор структура (а), обозначение (б), ВАХ (в)

Симистор открывается, если на управляющий электрод УЭ подается отпирающий ток или если напряжение между его электродами  $A_1$  и  $A_2$  превышает некоторую максимальную величину  $U_{вкл}$ . Отпирающий ток должен сохраняться до тех пор, пока рабочий ток  $I_H$  не превысит в два - три раза величину удерживающего тока  $I_U$ . Этот минимальный отпирающий ток и является током включения симистора.

Симистор переходит в закрытое состояние после изменения полярности между его выводами  $A_1$  и  $A_2$  если значение рабочего тока меньше тока удержания  $I_U$ .

## Фототиристоры

Фототиристоры имеют четырехслойную структуру (рис. 3.4, а) и управляются световым потоком, подобно тому, как триодные тиристоры управляются током, подаваемым в цепь управляющего электрода. При действии света на область базы  $p1$  в этой области генерируются электроны и дырки.

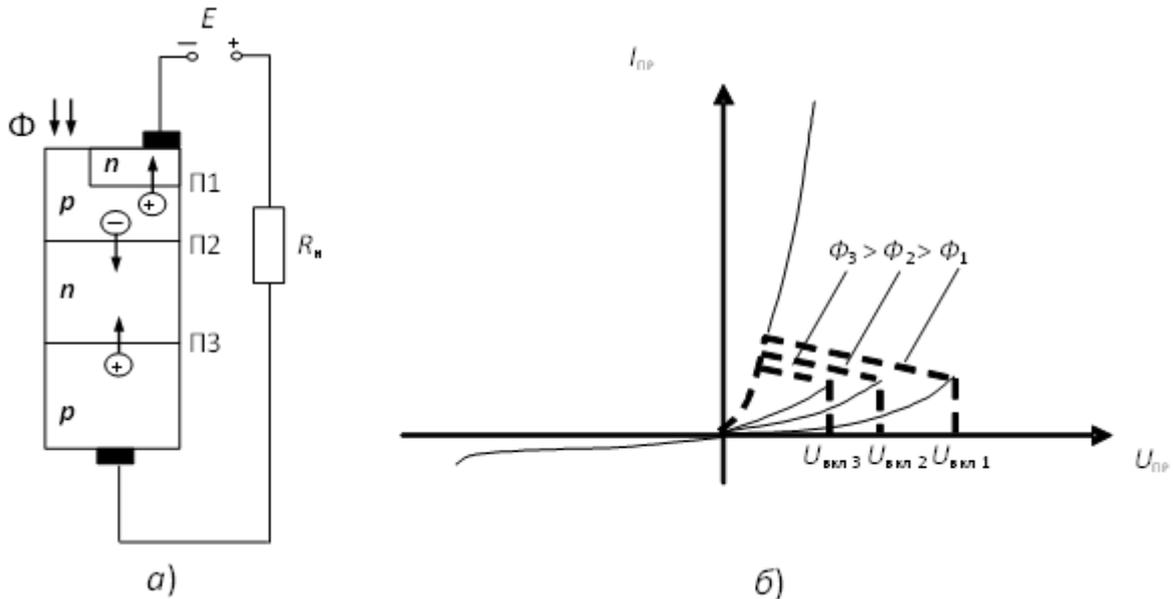


Рисунок 3.4 Фототиристор структура (а), ВАХ (б)

Электроны, попадая в область перехода П2, находящегося под обратным напряжением, уменьшают его сопротивление. В результате происходит увеличение инжекции носителей из переходов П1 и П3. Ток через структуру прибора лавинообразно нарастает, т.е. тиристор отпирается. Чем больше световой поток, действующий на тиристор, тем при меньшем напряжении включается тиристор (рис. 4.4, б).

Фототиристоры могут успешно применяться в различных автоматических устройствах в качестве бесконтактных ключей для включения значительных напряжений и мощностей. Важные достоинства тиристоров: малое потребление мощности во включенном состоянии, малые габариты, отсутствие искрения, малое время включения.

### Основные параметры тиристоров

1. Напряжение переключения: постоянное –  $U_{прк}$ , импульсное –  $U_{прк}$  и (десятки – сотни вольт).
2. Напряжение в открытом состоянии  $U_{ос}$  – падение напряжения на тиристоре в открытом состоянии ( $U_{ос} = 1...3$  В).
3. Обратное напряжение  $U_{обр}$  – напряжение, при котором тиристор может работать длительное время без нарушения его работоспособности (единицы – тысячи вольт).

4. Постоянное прямое напряжение в закрытом состоянии  $U_{зс}$  – максимальное значение прямого напряжения, при котором не происходит включение тиристора (единицы – сотни вольт).

5. Неотпирающее напряжение на управляющем электроде  $U_{у,нот}$  – наибольшее напряжение, не вызывающее отпирание тиристора (доли вольт).

6. Запирающее напряжение на управляющем электроде  $U_{уз}$  – напряжение, обеспечивающее требуемое значение запирающего тока управляющего электрода (единицы – десятки вольт).

7. Ток в открытом состоянии  $I_{откр\ max}$  – предельное значение тока открытого тиристора (сотни миллиампер – сотни ампер).

8. Обратный ток  $I_{обр}$  (доли миллиампер).

9. Отпирающий ток  $I_{у\ от}$  – наименьший ток управляющего электрода, необходимый для включения тиристора (десятки миллиампер).

10. Ток удержания  $I_{уд}$  – минимальный прямой ток, проходящий через тиристор при разомкнутой цепи управления, при котором тиристор еще находится в открытом состоянии.

11. Время включения  $t_{вкл}$  – это время от момента подачи управляющего импульса до момента снижения напряжения на тиристоре до 10 % от начального значения при работе на активную нагрузку (единицы – десятки микросекунд).

12. Время выключения  $t_{выкл}$ , называемое также временем восстановления управляющей способности тиристора. Это время от момента, когда прямой ток тиристора становится равным нулю, до момента, когда прибор снова будет способен выдерживать прямое напряжение между анодом и катодом. Это время в основном определяется временем рассасывания неосновных носителей в зонах полупроводника (десятки – сотни микросекунд).

## Полупроводниковые транзисторы

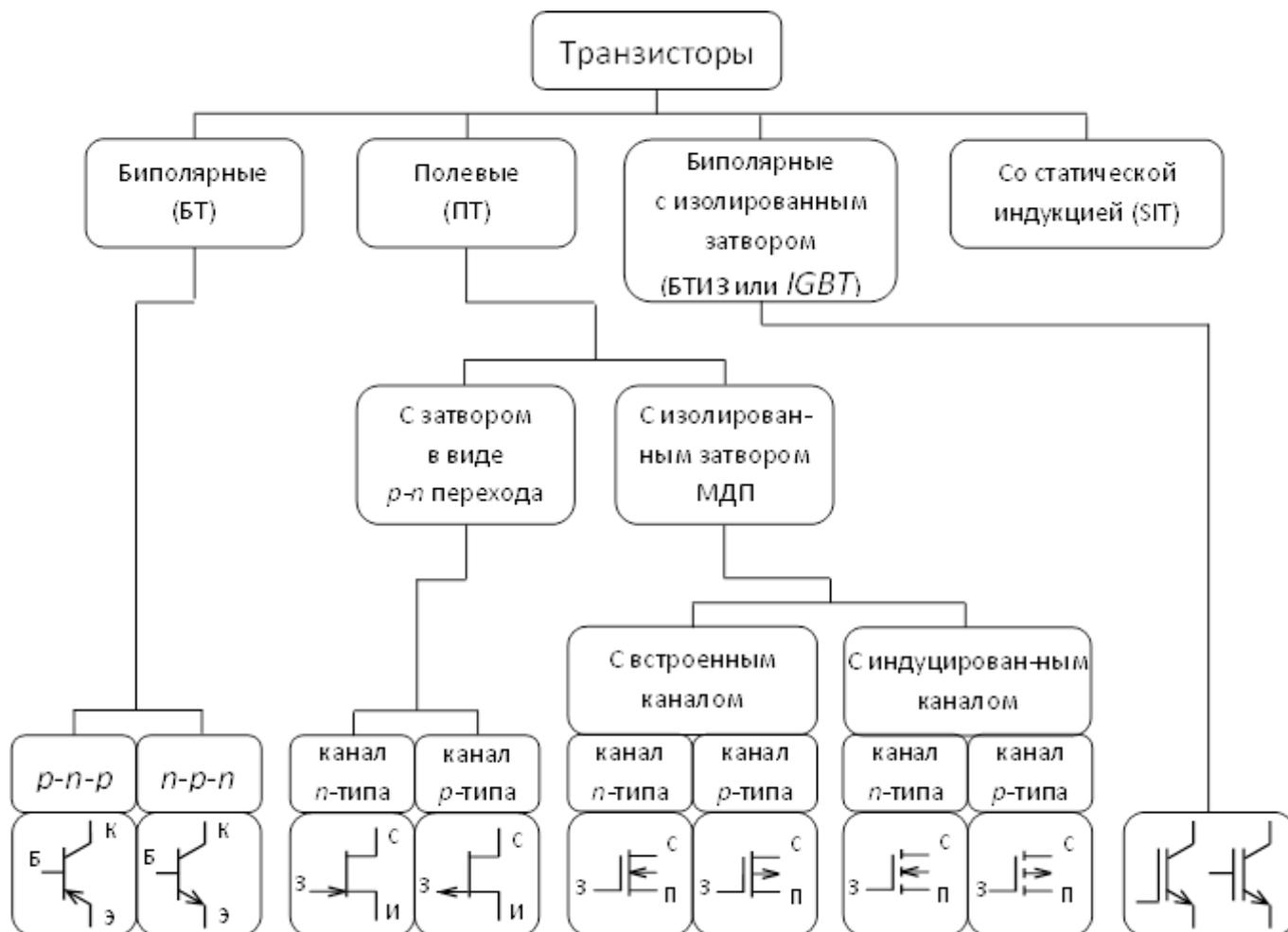


Рисунок. 3.1

### ТЕМА 1.3 Биполярные транзисторы

Биполярным транзистором называют полупроводниковый прибор с двумя  $n-p$ -переходами, образованными слоями полупроводникового материала  $n-p-n$  или  $p-n-p$ -типа. Он имеет три или более выводов, изготавливается на основе германия или кремния, обеспечивает усиление мощности электрических сигналов. На рис. 3.2 приведены структурные схемы, условные графические и буквенные обозначения транзисторов  $n-p-n$ -типа (рис. 3.2, а) и  $p-n-p$ -типа (рис. 3.2, б).

Средний слой кристалла называют базой (Б). Ее толщина мала, составляет несколько микрометров и концентрация примесей здесь значительно меньше, чем в соседних слоях. Крайние слои называют [эмиттером \(Э\)](#) и [коллектором \(К\)](#).

Для нормальной работы транзистора между его выводами должны быть включены источники питания. Если источники включены так, что оба перехода П1, П2 находятся под обратным напряжением, то токи транзистора практически равны нулю – этот режим называют *отсечкой*.

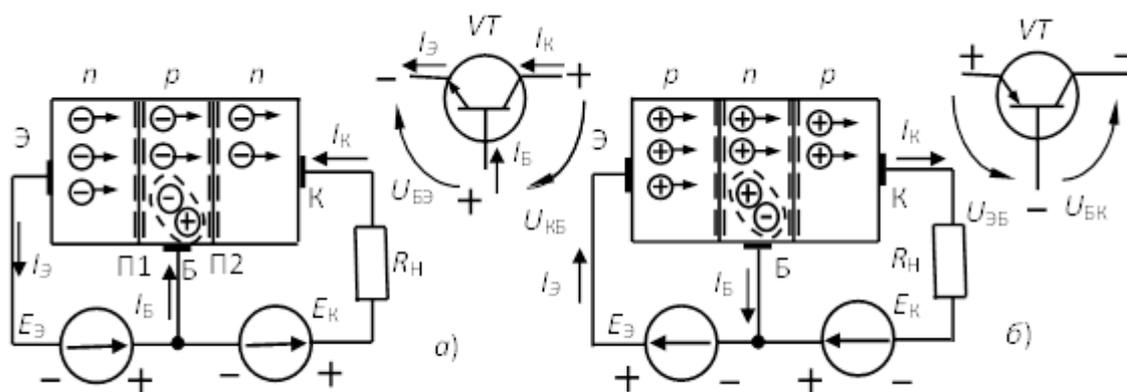


Рисунок. 3.2 Биполярные транзисторы

Если переходы транзистора имеют прямое смещение, то их сопротивление мало, и транзистор можно рассматривать как узел цепи. Такой режим работы называют *насыщением*. В усилительном каскаде транзистор работает в активном режиме, при этом эмиттерный переход смещен в прямом направлении, а коллекторный – в обратном (рис. 3.2). Прямосмещенный эмиттерный переход имеет небольшое сопротивление – несколько ом. Коллекторный переход, при отсутствии инжекции из эмиттера, имеет очень большое сопротивление – несколько мегаом, поэтому в цепь коллектора можно включать нагрузку с большим сопротивлением, практически не изменяя тока коллектора.

Под действием источника  $E_{Э}$  основные носители заряда из эмиттера преодолевают  $n$ - $p$ -переход и попадают в область базы, где частично рекомбинируют с основными носителями заряда базы, образуя ток базы  $I_{Б}$ . Так как концентрация основных носителей заряда в базе мала (дырок в  $n$ - $p$ - $n$ -типе и электронов в  $p$ - $n$ - $p$ -типе), то и число рекомбинаций в базе незначительно, ток базы мал. Большинство зарядов, инжектированных в область базы из эмиттера, под действием поля источника  $E_{К}$  и вследствие диффузии, преодолевают коллекторный переход и образуют ток коллектора.

Коэффициент передачи тока эмиттера

$$\alpha = \Delta I_{К} / \Delta I_{Э} \text{ при } U_{КБ} = \text{const.}$$

В современных транзисторах база очень тонкая и  $\alpha = 0.9 \dots 0.995$ .

Рассмотренная на рис. 3.2 схема включения транзистора называется схемой с общей базой (ОБ), так как база является общим электродом для входной и выходной цепей. Она обеспечивает усиление сигнала по напряжению и мощности, но ток в нагрузке будет меньше, чем входной ток источника сигнала.

Наиболее часто используется в электронных устройствах схема включения транзистора с общим эмиттером (ОЭ) – рис. 3.3, а. Входным здесь является ток базы  $I_{Б}$ , а выходным – ток коллектора  $I_{К}$ .

Коэффициент передачи тока базы схемы ОЭ

$$\beta = \Delta I_{К} / \Delta I_{Б} \text{ при } U_{КЭ} = \text{const}; \quad \beta = \alpha / (1 - \alpha); \quad \beta \gg 1.$$

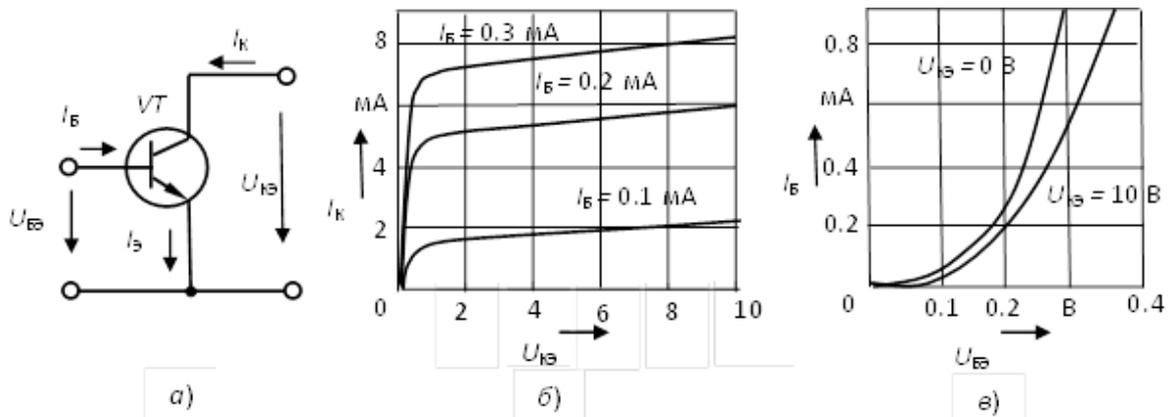


Рисунок. 3.3 Включение биполярного транзистора с общим эмиттером

Эта схема обеспечивает усиление сигнала по току, напряжению и максимальное усиление по мощности.

Работу транзисторов включенных по схеме с [ОЭ](#) описывают семейства входных и выходных характеристик:

- 1) выходные –  $I_K(U_{КЭ})$  при  $I_B = \text{const}$  (рис. 3.3, б),
- 2) входные –  $I_B(U_{БЭ})$  при  $U_{КЭ} = \text{const}$  (рис. 3.3, в).

Они определяют связь между постоянными составляющими токов и напряжений, дают возможность выбрать наилучший режим работы, оценить нелинейные искажения усиливаемого сигнала.

Для расчета цепей с биполярными транзисторами используют  $h$  - параметры: транзистор представляют четырехполюсником и записывают уравнения четырехполюсника в  $h$  - параметрах.

$$\begin{cases} \Delta U_{БЭ} = h_{11} \Delta I_B + h_{12} \Delta U_{КЭ} \\ \Delta I_K = h_{21} \Delta I_B + h_{22} \Delta U_{КЭ} \end{cases}$$

Коэффициенты четырехполюсника ( $h$  - параметры) выражаются следующим образом:

$$h_{11} = \Delta U_{БЭ} / \Delta I_B \text{ при } U_{КЭ} = \text{const} - \text{входное сопротивление } R_{вх}, \text{ Ом};$$

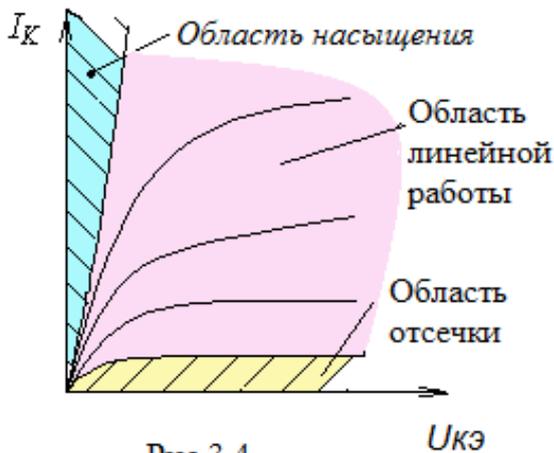
$h_{12} = \Delta U_{БЭ} / \Delta U_{КЭ}$  при  $I_B = \text{const}$  – безразмерный коэффициент обратной связи по напряжению;

$h_{21} = \Delta I_K / \Delta I_B$  при  $U_{КЭ} = \text{const}$  – безразмерный коэффициент передачи тока ( $\beta$ );

$$h_{22} = \Delta I_K / \Delta U_{КЭ} \text{ при } I_B = \text{const} - \text{выходная проводимость } (1 / R_{вых}), \text{ См.}$$

$h$  – параметры приводятся в справочниках, а также могут быть определены по семейству входных и выходных характеристик транзистора.

Области работы транзистора. На выходных характеристиках можно выделить три области работы транзистора (рис. 3.4): насыщения (I); линейной работы (II); отсечки (III).



В области отсечки и насыщения нет прямо пропорциональной зависимости между входным и выходным током, эта зависимость наблюдается только в области линейной работы, где  $\Delta I_K = \beta \Delta I_B$ . (таблица 1).

Таблица 3.1

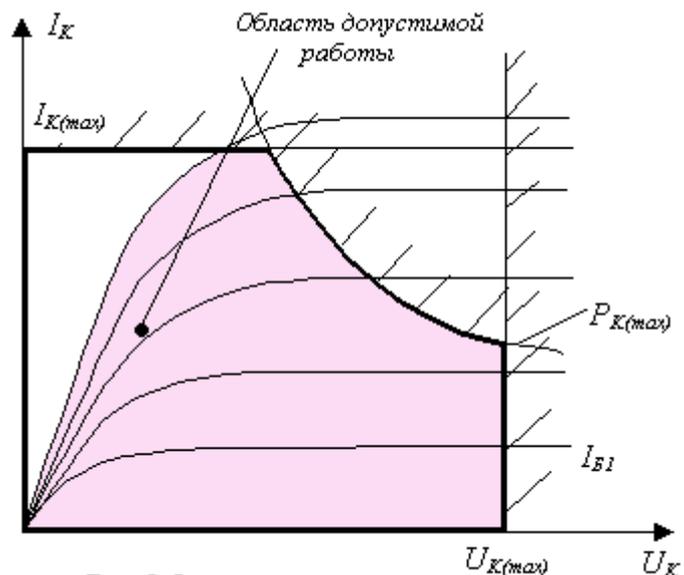
Область работы	Состояние <i>p-n</i> - переходов	
	эмиттер – база	база – коллектор
Насыщения	открыт	открыт
Отсечки	закрыт	закрыт
Линейная	открыт	закрыт

Предельно - допустимые параметры транзистора. Для нормальной работы транзистора необходимо укладываться в область, ограниченную предельно допустимыми параметрами :  $U_{КЭ\max}$ ;  $I_{К\max}$ ;  $P_{К\max}$ :

– если  $U_K > U_{К\max}$ , возможен пробой коллекторного *p-n* перехода;

– если  $I_K > I_{К\max}$ , возможен перегрев эмиттерного *p-n* перехода;

– если  $P_K > P_{К\max}$  работа транзистора невозможна из-за перегрева коллекторного *p-n* -перехода. Область работы транзистора ограничивают все три условия (рис. 3.5).



## Тема 1.4 Полевые транзисторы

Полевые транзисторы (ПТ) – это полупроводниковые приборы с каналом, ток в котором управляется электрическим полем. Принцип действия их основан на протекании носителей заряда только одного знака через проводящий канал.

Главным достоинством полевых транзисторов является высокое входное сопротивление, т.е. они практически не потребляют ток из входной цепи. Кроме того, они более технологичны и дешевле, чем биполярные, обладают высокой воспроизводимостью требуемых параметров.

Полевые транзисторы подразделяют на два основных типа:

- Полевые транзисторы с управляющим  $n - p$ -переходом;
- Полевые транзисторы МДП – типа
  - со встроенным каналом;
  - с индуцированным каналом

### Полевые транзисторы с управляющим $n - p$ -переходом

Это ПТ у которого затвор отделён от канала закрытым  $n - p$ -переходом. Канал – это центральный слой (может быть  $p$ -типа либо  $n$ -типа), заключенный между двумя  $n - p$ -переходами (рис. 3.6, а). Канал имеет два вывода во внешнюю цепь: исток (И), из которого заряды выходят в канал, сток (С), в который заряды входят из канала. Слои  $p$ -типа (внешние) соединены между собой и имеют вывод во внешнюю цепь, называемый затвором (З). Затвор служит для регулирования поперечного сечения канала. Особенность ПТ в том, что движение основных носителей заряда только одного знака происходит по каналу от истока к стоку, а не через переход, как в биполярном транзисторе.

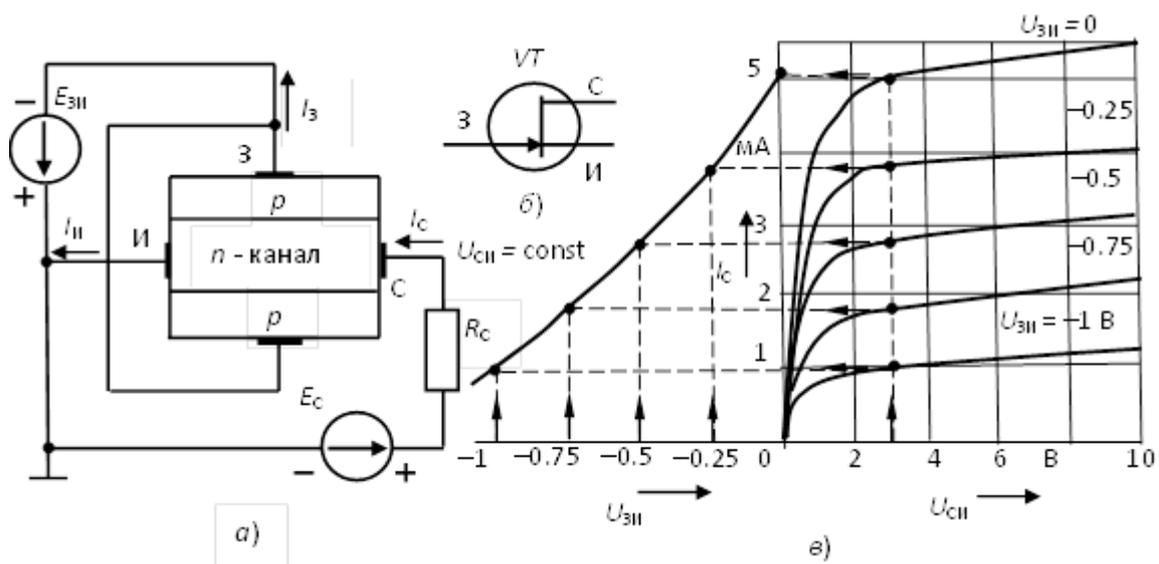


Рисунок 3.6 Полевой транзистор с управляющим  $p-n$  переходом

Управляющее напряжение между затвором и истоком является обратным для обоих  $n - p$ -переходов ( $U_{зи} < 0$ ). Оно создает вдоль канала равномерный слой, обедненный носителями заряда при  $U_{cн} = 0$ . Изменяя  $U_{зи}$ , изменяют ширину  $n - p$ -переходов, тем самым регулируют сечение токопроводящего канала и его

проводимость. Напряжение  $U_{\text{си}} > 0$  вызывает неравномерность обедненного зарядами слоя, наименьшее сечение канала вблизи стока.

Управляющее действие затвора иллюстрируют передаточной (стоко-затворной) характеристикой  $I_{\text{с}}(U_{\text{зи}})$  при  $U_{\text{си}} = \text{const}$ . На практике чаще используют выходные (стоковые) характеристики  $I_{\text{с}}(U_{\text{си}})$  при  $U_{\text{зи}} = \text{const}$ , по которым строят передаточные (рис. 3.6, в).

Полевые транзисторы с управляющим  $n-p$ -переходом работают в режиме обеднения канала, при увеличении управляющего напряжения  $U_{\text{зи}}$  поперечное сечение проводящего канала и его проводимость уменьшаются, что вызывает снижение тока канала  $I_{\text{с}}$ .

### Полевые транзисторы МДП – типа со встроенным каналом

МДП – транзисторы со встроенным каналом имеют структуру металл(М) – диэлектрик(Д) – полупроводник(П), их так же называют полевыми транзисторами с изолированным затвором, т. к. у них затвор отделен от канала диэлектриком. У поверхности кристалла полупроводника (подложки  $p$ -типа) созданы две области  $n$ -типа и тонкая перемычка между ними – канал (рис. 3.7, а). Области  $n$ -типа имеют выводы: И – исток и С – сток. Кристалл покрыт окисной пленкой диэлектрика  $\text{SiO}_2$ , на которой расположен металлический затвор (З), электрически изолированный от цепи исток – сток. Подложка соединяется с истоком внутри прибора, либо имеет вывод во внешнюю цепь (П).

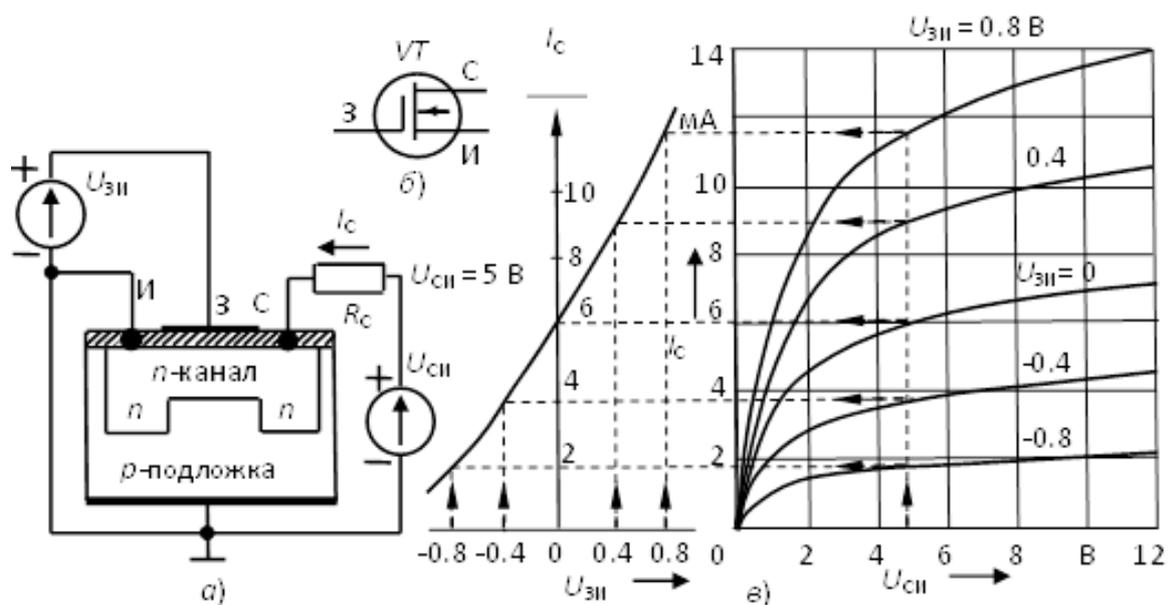


Рисунок 3.7 Полевой МДП транзистор со встроенным каналом

При отрицательном потенциале на затворе  $U_{\text{зи}} < 0$  поле затвора выталкивает электроны из канала в  $p$ -подложку, исток и сток. Канал обедняется электронами, его сопротивление увеличивается, и ток стока уменьшается. Такой режим называют режимом обеднения. Характеристики  $I_{\text{с}}(U_{\text{си}})$  располагаются ниже кривой при  $U_{\text{зи}} = 0$  (рис. 3.7, в). Если на затвор подано  $U_{\text{зи}} > 0$ , то под действием поля затвора канал насыщается электронами из  $p$ -подложки, истока и стока - это режим обогащения.

Таким образом, МДП-транзистор со встроенным каналом может работать как в режиме обеднения, так и в режиме обогащения, что наглядно показывают его характеристики. Структура, условное графическое изображение, передаточная  $I_C(U_{зи})$  при  $U_{си} = \text{const}$  и стоковые  $I_C(U_{си})$  при  $U_{зи} = \text{const}$  характеристики ПТ со встроенным каналом даны на рис. 3.7, а, б, в.

### Полевые транзисторы МДП – типа с индуцированным каналом

МДП-транзисторы с индуцированным каналом не имеют специально созданного канала между истоком и стоком, и при  $U_{зи} = 0$  выходной ток  $I_C = 0$ . Канал индуцируется при положительном потенциале на затворе  $U_{зи} > 0$  благодаря притоку электронов из  $p$ -подложки.

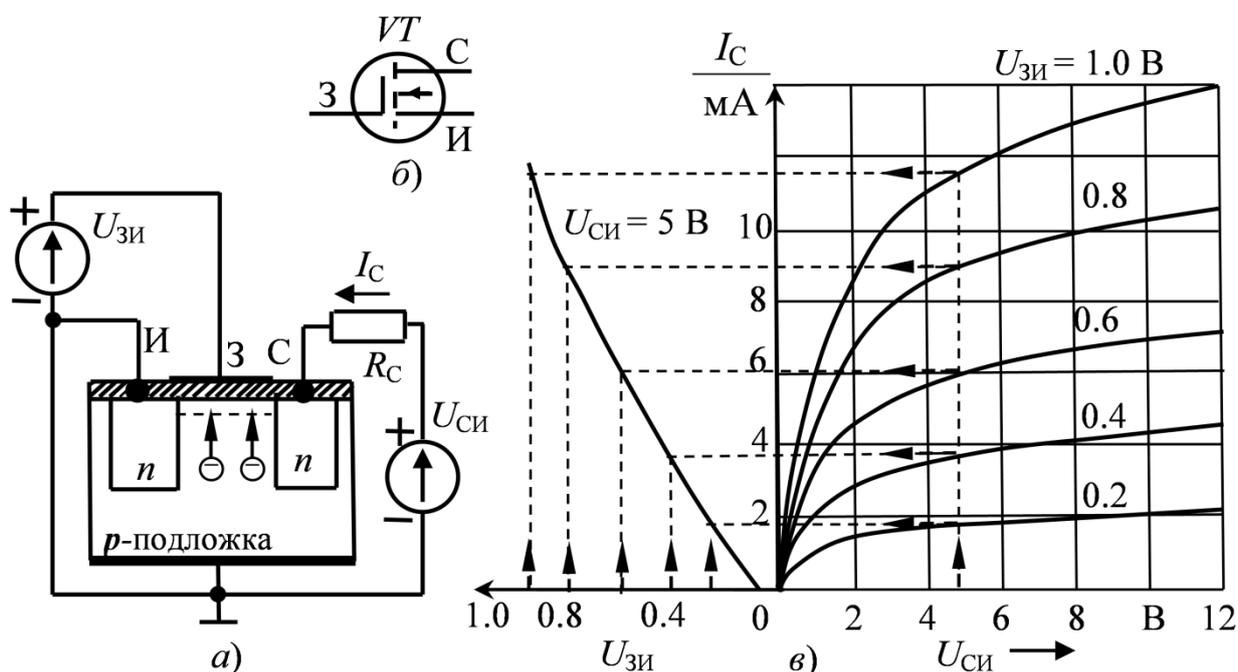


Рисунок 3.8 Полевой МДП транзистор с индуцированным каналом

Напряжение затвора, при котором создается канал, называют пороговым  $U_{пор}$ , при дальнейшем увеличении управляющего напряжения относительно порогового происходит увеличение поперечного сечения канала. Этот прибор работает только в режиме обогащения.

**Основными параметрами** полевых транзисторов являются:

Крутизна передаточной характеристики

$$S = \Delta I_C / \Delta U_{зи} \text{ при } U_{си} = \text{const}$$

$$S = 0,1 \dots 500 \text{ mA/V};$$

Внутреннее (выходное) сопротивление

$$R_i = \Delta U_{си} / \Delta I_C \text{ при } U_{зи} = \text{const}.$$

$$R_i = 0,1 \dots 1 \text{ МОм}$$

Коэффициентом усиления

$$\mu = \Delta U_{си} / \Delta U_{зи} \text{ при } I_C = \text{const};$$

$$\mu = S R_i.$$

Начальный ток стока  $I_{C \text{ нач}}$  при  $U_{зи} = 0$ :

у транзисторов с управляющим  $n - p$ - переходом  $I_{си \text{ нач}} = 0,2 \dots 600 \text{ мА}$ ;

со встроенным каналом  $I_{си \text{ нач}} = 0,1 \dots 100 \text{ мА}$ ;

с индуцированным каналом  $I_{C \text{ нач}} = 0,01 \dots 0,5 \text{ мкА}$ .

Напряжение отсечки  $U_{зиотс} = 0,2 \dots 10 \text{ В}$ .

Пороговое напряжение  $U_{зипор} = 1 \dots 6 \text{ В}$ .

Предельно допустимые параметры  $U_{зи\text{max}}$  В,  $P_{\text{max}}$  мВт

### 3.3 Биполярные транзисторы с изолированным затвором (БТИЗ)

БТИЗ являются новым типом активного прибора, который появился сравнительно недавно. Его входные характеристики подобны входным характеристикам полевого транзистора, а выходные – выходным характеристикам биполярного. В иностранной литературе этот прибор называют *IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)*. По быстродействию он значительно превосходит биполярные транзисторы. Чаще всего *IGBT*-транзисторы используют в качестве мощных ключей, у которых время включения  $0,2 \dots 0,4 \text{ мкс}$ , а время выключения  $0,2 \dots 1,5 \text{ мкс}$ , коммутируемые напряжения достигают  $3,5 \text{ кВ}$ , а токи  $1200 \text{ А}$ .

Схематичный разрез структуры *IGBT* показан на рис. 3.9 а. Биполярный транзистор образован слоями  $p^+$  (эмиттер),  $n$  (база),  $p$  (коллектор); полевой - слоями  $n$  (исток),  $n^+$  (сток) и металлической пластиной (затвор). Слои  $p^+$  и  $p$  имеют внешние выводы, включаемые в силовую цепь. Затвор имеет вывод, включаемый в цепь управления. На рис. 3.9, б изображена структура *IGBT IV* поколения, выполненного по технологии "утопленного" канала (*trench - gate technology*), позволяющей исключить сопротивление между  $p$ -базами и уменьшить размеры прибора в несколько раз.

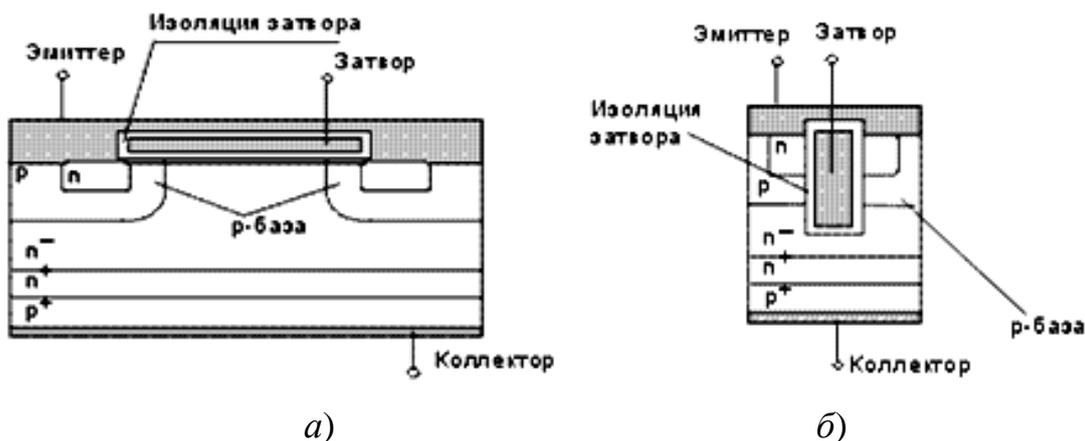


Рисунок 3.9 Биполярный транзистор с изолированным затвором

Процесс включения *IGBT* можно разделить на два этапа: при подаче положительного напряжения на затвор электрическое поле оттолкнёт дырки, находящиеся близко к поверхности затвора вглубь подложки, а электроны притянет, при достижении *порогового напряжения*, происходит открытие

полевого транзистора (формируется  $n$  - канал между истоком и стоком). Движение зарядов из области  $n$  в область  $p$  приводит к открытию биполярного транзистора и возникновению тока от эмиттера к коллектору. Таким образом, полевой транзистор управляет работой биполярного.

*IGBT* обладает следующими достоинствами по сравнению с БТ:

- *IGBT* управляется не током, а напряжением. Управление напряжением снижает мощность, необходимую для переключения транзистора из одного состояния в другое.

- Скорость выключения *IGBT* выше, чем у БТ.

- Параметры *IGBT* меньше зависят от температуры, чем параметры БТ.

- Благодаря использованию многоячеистых интегральных схем в *IGBT* удаётся значительно снизить пороговое напряжение для преодоления потенциального барьера  $p$ - $n$  перехода и переключения транзистора в рабочий режим.

### 3.4 Транзистор со статической индукцией (*SIT*)

*SIT* (*Static Induction Transistor*) – полевой транзистор с управляющим  $p$ - $n$ -переходом со статической индукцией. Является многоканальным и имеет вертикальную структуру. Схематическое изображение *SIT* и схема включения с общим истоком показаны на рис. 3.10.

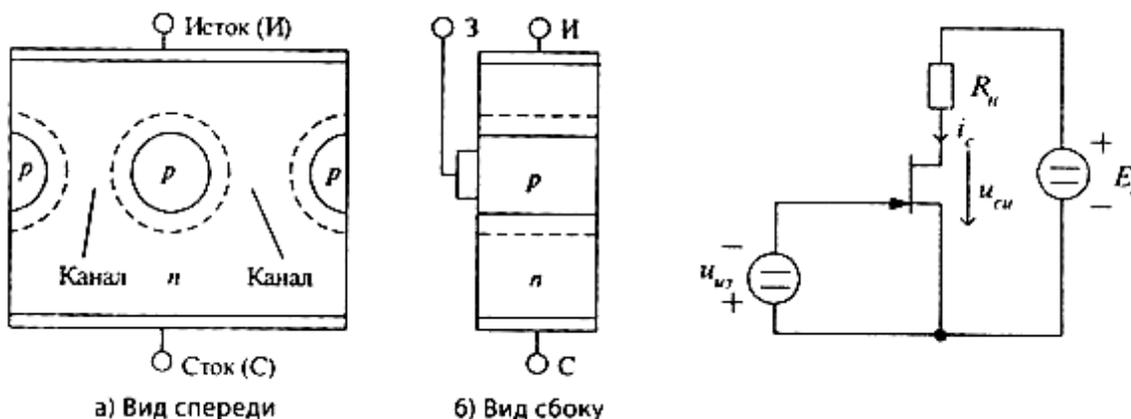


Рисунок 3.10 Транзистор со статической индукцией

Области полупроводника  $p$  - типа имеют форму цилиндров, диаметр которых составляет единицы микрометров и более. Эта система цилиндров играет роль затвора. Каждый цилиндр подсоединен к электроду затвора (на рис. 3.10, а электрод затвора не показан). Пунктиром обозначены области  $p$ - $n$ -переходов. Реальное число каналов может составлять тысячи.

Обычно *SIT* используется в схемах с общим истоком, производят с каналом  $n$  и  $p$  – типа. *SIT* – транзисторы широко применяют в усилителях мощности звуковых частот, а также в устройствах силовой электроники в ключевом режиме работы.

## ТЕМА 1.5. ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

### 5.1 Полупроводниковые резисторы

Полупроводниковыми резисторами называют полупроводниковые приборы, принцип действия которых основан на свойствах полупроводников изменять свое сопротивление под действием температуры, электромагнитного излучения, приложенного напряжения и других факторов.

**Терморезистор** – полупроводниковый прибор, сопротивление которого изменяется при изменении температуры (у **термистора** сопротивление уменьшается с ростом температуры, а у **позистора** - возрастает).

Температурная характеристика термистора показана на рисунке 5.3.

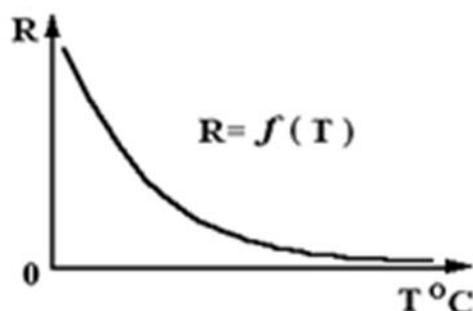


Рисунок 5.3. Температурная характеристика термистора

Параметры терморезистора:

- 1) холодное сопротивление (при  $t = 20^{\circ}\text{C}$ );
- 2) температурный коэффициент сопротивления (ТКР) %;
- 3) рабочая температура ( $t^{\circ}_{\text{max}}$ );
- 4) максимальная рассеиваемая мощность  $P_{\text{max}} \text{ расc}$ .

Применяют термисторы для измерения и регулирования температуры, а также термокомпенсации.

**Позисторы** – полупроводниковые терморезисторы с положительным температурным коэффициентом (титанат бария с примесями), у которых сопротивление увеличивается при увеличении  $t^{\circ}\text{C}$ . Основная характеристика – температурная (рисунок 5.4). Параметры аналогичны параметрам термистора.

Применяют позисторы для автоматического регулирования температуры, термокомпенсации, в схемах ограничителей и стабилизаторов тока, для предохранительных приборов и устройств защиты от перегрева, в качестве бесконтактных переключающих элементов.

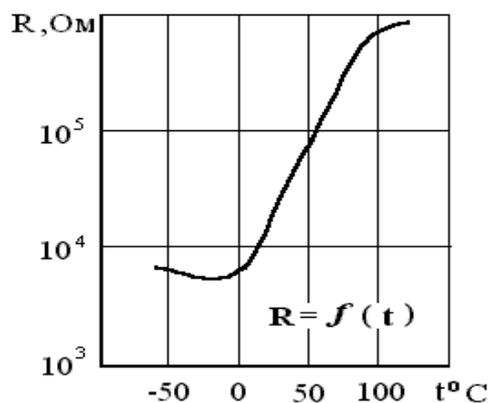


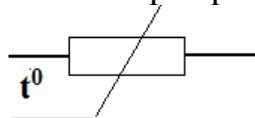
Рисунок 5.4 Температурная характеристика позистора

Маркировка терморезисторов состоит из трех элементов:

- первый элемент маркировки обозначает назначение (СТ – резисторы термочувствительные, Т и ТШ – резисторы измерительные, ТП – стабилизирующие, ТКП – регулируемые бесконтактные);
- второй элемент обозначает тип полупроводника (1 – кобальт-марганец, 2 – медно-марганцевые, 3 – медно-кобальт-марганцевые, 4 – кобальт-никель-марганец);
- третий элемент обозначает номер конструкции.

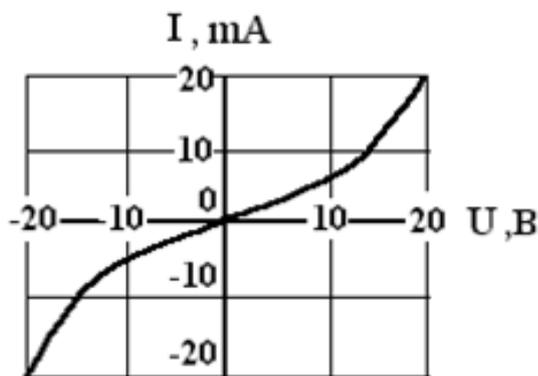
Примеры: СТ2 – 26, СТ4 – 5, ММТ – 6, ТШ – 2, ТКП – 450.

Условное графическое изображение терморезисторов:



**Варисторы** – полупроводниковые резисторы (на основе карбида Si) сопротивление которых зависит от приложенного напряжения.

Основная характеристика варистора – это вольтамперная характеристика (ВАХ)  $I = f(U)$  (рис. 5.5).



$$I = f(U)$$

Рисунок 5.5. ВАХ варистора

Параметры варистора:

- 1) статическое сопротивление при постоянных значениях тока и напряжения  $R_{ст} = U/I$ ;
- 2) динамическое сопротивление переменному току  $R_{д} = \Delta U / \Delta I$ ;
- 3) коэффициент нелинейности  $\beta = R_{ст} / R_{д}$  ;
- 4) максимальная рассеиваемая мощность  $P_{\max}$  расс.

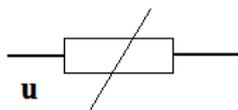
Применяют варисторы для регулирования электрических величин, стабилизации токов и напряжений, для защиты элементов от перенапряжений.

Маркировка прибора состоит из 4 элементов:

- первый элемент обозначает назначение (СН - сопротивление нелинейное);
- второй элемент обозначает тип полупроводника;
- третий элемент обозначает тип конструктивного выполнения;
- четвертый элемент обозначает длину токоведущего элемента.

Примеры: СН1 -1, СН -3.

Условное графическое изображение варистора:

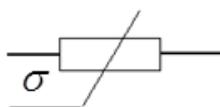


**Тензорезисторы** - полупроводниковые резисторы, сопротивление которых зависит от величины механической деформации.

Для характеристики изменения сопротивления при деформации используется коэффициент тензочувствительности **m**, который представляет собой отношение относительного изменения сопротивления к относительной деформации в данном направлении:

$$m = \frac{\Delta R / R}{\Delta l / l} = \frac{\Delta \rho / \rho}{\Delta l / l}$$

Условное графическое изображение тензорезистора:



**Фоторезисторы** – полупроводниковые приборы, электрическое сопротивление которых изменяется под действием светового потока.

Основой фоторезистора является светочувствительный элемент – прямоугольная или круглая таблетка, спрессованная из полупроводникового материала или тонкая пленка на стеклянной подложке с электродами с малым переходным сопротивлением (рис. 5.6).

Принцип действия фоторезистора основан на использовании явления внутреннего фотоэффекта: при увеличении светового потока часть электронов проводимости сталкивается с атомами, ионизирует их и создает дополнительный поток электронов (возникает фототок проводимости).

При отсутствии тока через фоторезистор течет темновой ток:

$$I_T = \frac{E}{R_T + R_H},$$

где  $R_T$  - темновое сопротивление фоторезистора.

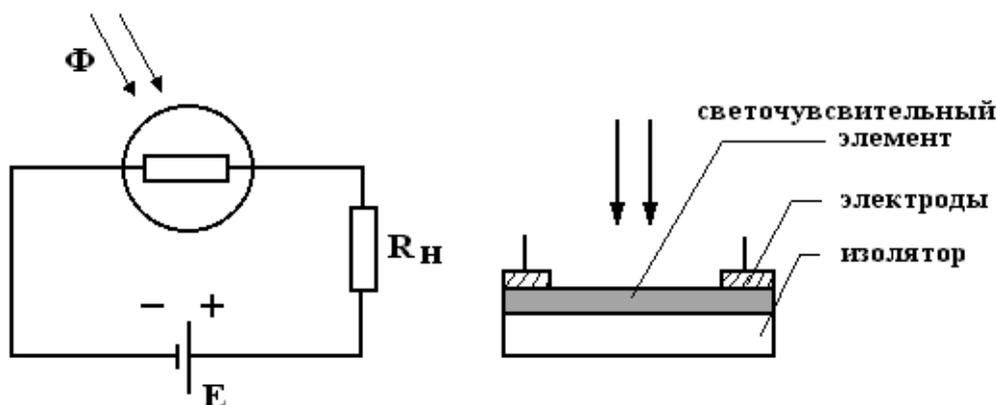


Рисунок 5.6. Конструкция фоторезистора

При освещении фоторезистора через него протекает световой ток:

$$I_C = \frac{E}{R_C + R_H}.$$

Основные характеристики фоторезистора (рис. 5.7):

1) вольт-амперная характеристика – зависимость фототока (или темнового тока) от приложенного напряжения при постоянном световом потоке:

$$I_\Phi = f(U_\Phi) \text{ при } \Phi = \text{const} \text{ (рис. 5.7, а);}$$

2) световая(энергетическая) – зависимость фототока от падающего светового потока постоянного спектрального состава  $I_\Phi = f(\Phi)$  при  $U = \text{const}$  (рисунок 5.7, б);

3) спектральная – зависимость чувствительности фоторезистора от длины волны светового излучения (рис. 5.7, в).

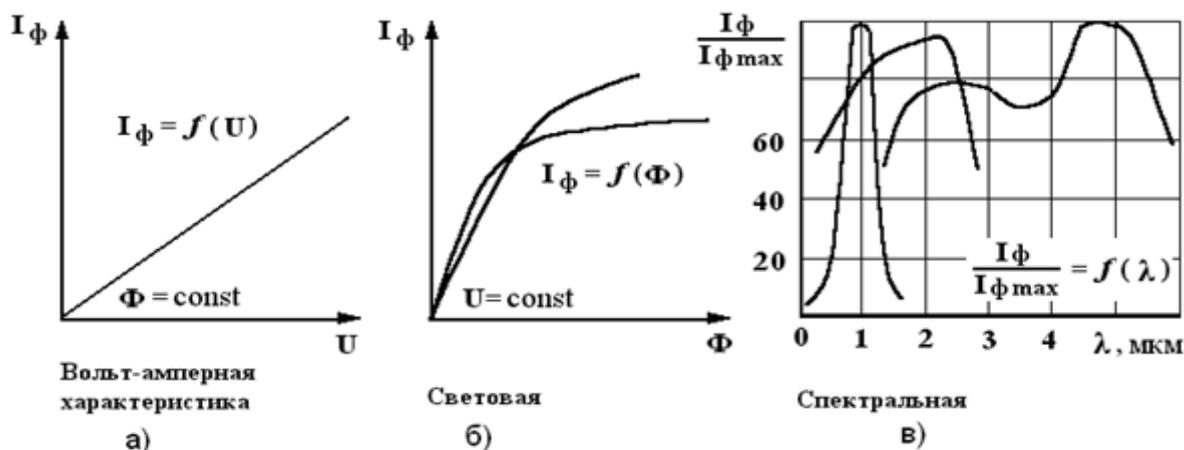


Рисунок 5.7 Характеристики фоторезистора

Основные параметры фоторезистора:

- 1) темновое сопротивление  $R_T$ ;
- 2) темновой и фото- токи ( $I_T, I_\Phi$ );
- 3) удельная чувствительность  $S = \frac{I_\Phi}{\Phi \cdot U}$ ;
- 4) рабочее напряжение;
- 5) максимальная рассеиваемая мощность  $P_{\max \text{ расс.}}$ .

Маркировка фоторезистора состоит из трех элементов:

- первый элемент обозначает назначение (ФС - фотосопротивление);
- второй элемент обозначает тип полупроводника (К-кремний);
- третий элемент обозначает тип конструктивного выполнения;

Примеры: ФСК -1, ФСК – 2, ФСА – 6.

Применение фоторезисторов: в промышленной электронике, телевидении, фототелеграфии, сигнализации и связи (в диапазоне инфракрасных волн), а также в схемах электронной автоматики.

### Электривакуумные приборы

Независимо от функционального назначения все электривакуумные приборы можно разделить на две группы: электронные и газоразрядные (ионные).

Принцип действия вакуумных электронных приборов (ламп) основан на движении электронов в вакууме под действием электрического поля. Эти прибор служат базой для изучения большинства видов радиоэлектронной аппаратуры. В современной аппаратуре электривакуумные приборы заменяются полупроводниковыми, однако имеются области, где электривакуумные приборы или превосходят полупроводниковые или являются незаменимыми.

С помощью электривакуумных приборов можно создать генераторы мегаваттной мощности ( $\sim 10^6$  Вт), а с помощью одного полупроводникового прибора удастся получить примерно в 1000 раз меньшую мощность колебаний.

Электривакуумными приборами являются телевизионные передающие и приемные электронно-лучевые трубки. Кроме того, вся электронная аппаратура высшего класса выполняется на электронных лампах. Такого высокого качества звучания, как у усилителя на электронных лампах, невозможно достичь в усилителе, выполненном на полупроводниковых приборах и интегральных микросхемах.

Электронные приборы отличаются от второй группы приборов этого класса – ионных приборов тем, что все процессы происходят в них при очень высоком вакууме  $1,33(10^{-4} \dots 10^{-5})$  Па и влияние газов на эти процессы ничтожно.

Существуют следующие группы электронных приборов:

1. **Электронные лампы** имеют накаленный катод и предназначены для преобразования электрического тока.

Их используют в генераторах переменного тока различной частоты, усилителях постоянного и переменного тока, усилителях мощности,

выпрямителях переменного тока, стабилизаторах напряжения, преобразователях частоты, формирователях импульсов специальной формы и других устройствах.

2. **Электронно-лучевые приборы.** В этих приборах используется энергия потока электронов, сконцентрированного в узкий луч или пучка лучей. Их используют в телевидении (кинескопы, суперортиконы), в измерительных приборах (осциллографы), дисплеях ЭВМ, радиолокаторах и индикаторах.

3. **Фотоэлектронные приборы** – преобразуют световые сигналы в электрические (фотоэлементы с [внешним фотоэффектом](#) и фотоэлектронные умножители).

Существуют и другие типы электронных приборов: электронно-оптические преобразователи, рентгеновские трубки.

Ионные (газоразрядные) приборы используют свойства электрического разряда в газах. Рабочий объем таких приборов после вакуумирования заполняются инертными газами, парами ртути, водородом до давления  $0,133 \dots 1330$  Па. Носителями зарядов в газоразрядных приборах являются электроны и ионы, образующиеся в результате ударной ионизации атомов газа.

### Электронные лампы

В лампе имеется несколько проводящих элементов, называемых электродами. Эмиссию электронов в лампе осуществляет катод. Эта эмиссия вызывается либо нагревом катода, в результате которого электроны «закипают» и испаряются с его поверхности, либо воздействием света на катод. Движением эмиттированных электронов управляют электрические поля, создаваемые другими электродами внутри лампы. В большинстве случаев электроды лампы изолированы друг от друга и посредством проволочных выводов соединены с внешними схемами. Электроды, которые служат для управления движением электронов, называются сетками; электроды, на которые электроны собираются, называются анодами.

В электронной лампе относительно просто управлять величиной, продолжительностью, частотой и другими характеристиками электронного потока. Эти простота и легкость управления делают ее ценным прибором в многочисленных приложениях.

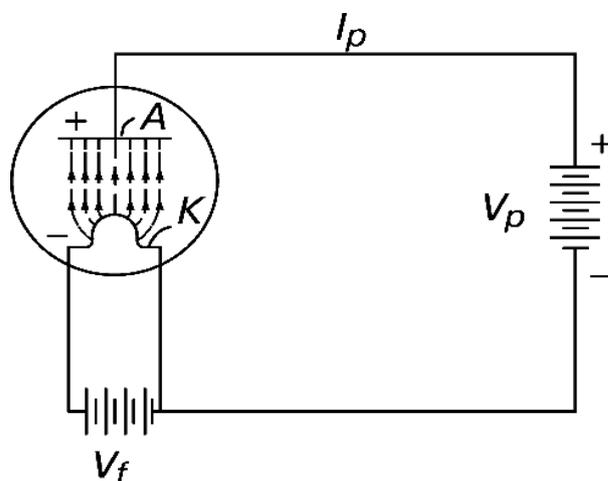


Рисунок 5.1 Диодная лампа

Диод – простейшая электронная лампа, в которой электроны, вышедшие из раскаленного катода, движутся в вакууме под действием положительного потенциала анода (рис. 5.1). Через лампу пройдет ток. При изменении полярности анода и катода электроны под действием электрического поля возвращаются назад на катод и ток через лампу протекать не будет. Свойство диода пропускать ток только в одном направлении называется односторонней проводимостью.

Величина анодного тока зависит от температуры разогрева катода и величины анодного напряжения  $U_A$ . при возрастании температуры катода возрастает количество электронов, достигших анода. При небольших значениях анодного напряжения  $U_A$  не все электроны попадут на анод. Температура разогрева катода зависит от величины напряжения накала.

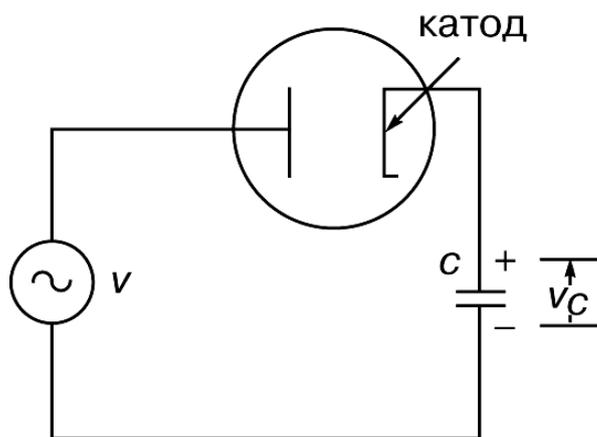


Рисунок 5.2  
Применение диода

Простой иллюстрацией применения диода может служить схема, приведенная на рис. 5.2, где диод используется для зарядки конденсатора напряжением от источника переменного тока. Когда потенциал катода ниже анодного потенциала, через диод течет ток, так что, в конце концов, конденсатор заряжается до пикового напряжения источника переменного тока. Варианты схемы рис. 5.2 используются для детектирования сигнала звуковой частоты из радиочастотной волны и для получения мощности постоянного тока от источников переменного тока.

**Триод** – это электронная лампа, в которой имеется третий (управляющий) электрод, установленный между катодом и анодом (рис. 5.3).

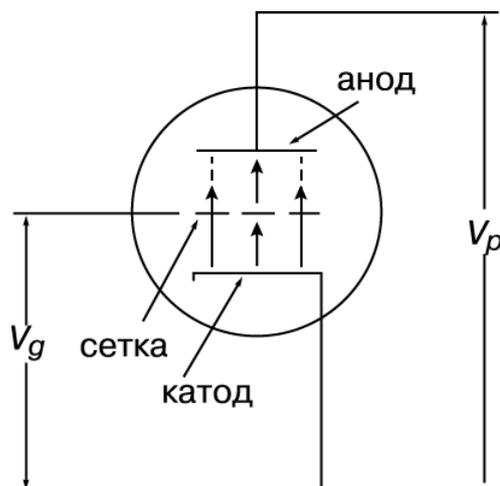


Рисунок 5.3 Триод

Этот электрод обычно представляет собой сетку из тонких проволок, установленную очень близко к катоду, чтобы при небольшой разности потенциалов между сеткой и катодом в области между этими двумя электродами действовало сравнительно высокое электрическое поле. При этом потенциал сетки будет оказывать сильное воздействие на электроны.

### **Многоэлектродные лампы**

Лампа с двумя сетками (четырьмя электродами) называется **тетродом**. Обычно вторая сетка, которая называется экранной и поддерживается под положительным потенциалом, находится между управляющей сеткой и анодом. Ее роль состоит в том, чтобы экранировать управляющую сетку от анода, уменьшая, таким образом, емкость между ними, которая в ряде случаев может привести к нежелательным эффектам обратной связи. Если между экранной сеткой и анодом добавляют еще одну сетку – антидинатронную, в результате получается пятиэлектродная лампа, или **пентод**. В тетроде электроны, достигающие поверхности анода, при ударе об нее выбивают вторичные электроны. Некоторые из них могут двигаться в обратном направлении и собираться экранной сеткой, обычно имеющей потенциал, близкий к потенциалу анода. Такой процесс вызывает потери в общем потоке электронов, проходящих через анод (в анодном токе). Антидинатронная сетка, находящаяся между экранной сеткой и анодом, поддерживается под отрицательным потенциалом по

отношению к обоим соседним электродам, так что возвращающиеся электроны отталкиваются ею обратно к аноду. На рис. 5.4 показана типичная схема включения пентода.

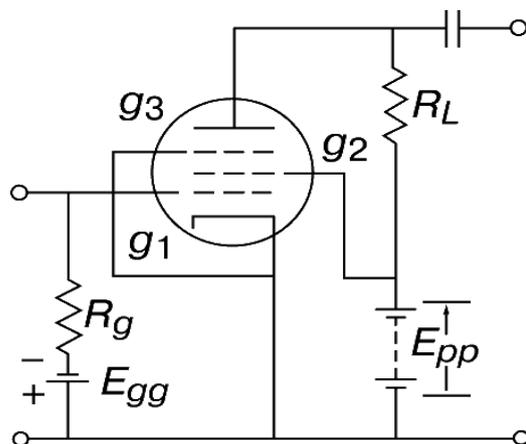


Рисунок 5.4 Пентод

В некоторых случаях для уменьшения габаритов две отдельные структуры электронных ламп объединяют в герметичном едином корпусе.

**К электронно-лучевым приборам** относятся ЭЛТ (электронно-лучевые трубки) индикаторных устройств радиолокаторов, осциллографов, кинескопы – это приемные телевизионные ЭЛТ, электронные микроскопы и некоторые другие приборы. ЭЛТ делятся на трубки с электростатическим и с магнитным управлением.

### Интегральные микросхемы

*Интегральная микросхема (ИС)* – микроэлектронное изделие, выполняющее определенную функцию обработки сигналов и имеющее высокую плотность размещения электрически соединенных элементов и компонентов.

*Элемент ИС* – часть ИС, выполняющая функцию транзистора, резистора или другого электрорадиоэлемента, изготовленного в едином технологическом цикле (при создании ИС) и не представляющая собой самостоятельного изделия.

*Компонент ИС* – представляет собой самостоятельное комплектующее изделие, которое устанавливается в ИС в процессе ее изготовления.

Все элементы ИС и их соединения выполнены в едином технологическом цикле на общей подложке.

#### Технологические процессы:

- а) наращивание полупроводникового материала на кремниевой подложке;
- б) термическое окисление кремния для получения слоя окисла  $\text{SiO}_2$ , защищающего поверхность кристалла от внешней среды;
- в) фотолитография, обеспечивающая требуемые конфигурации пленок ( $\text{SiO}_2$ , металл и т.п.) на поверхности подложки;
- г) локальная диффузия – перенос примесных атомов в ограниченные области полупроводника (в настоящее время – ионная имплантация)

легирующего вещества);

д) напыление тонких (до 1 мкм) пленок;

е) нанесение толстых (более 1 мкм) пленок путем использования специальных паст с их последующим вжиганием.

ИС изготавливаются методами интегральной технологии, имеющей следующие отличительные особенности:

1. Элементы, однотипные по способу изготовления, представляют собой или полупроводниковые *p-n* структуры с несколькими областями, различающиеся концентрацией примесей или пленочные структуры из проводящих, резистивных и диэлектрических пленок.

2. Одновременно в едином технологическом цикле изготавливается большое количество одинаковых функциональных узлов, каждый из которых, в свою очередь, может содержать до сотен тысяч и более элементов.

3. Сокращается количество технологических операций (сборка, монтаж элементов) на несколько порядков по сравнению с традиционными методами производства аппаратуры на дискретных элементах.

4. Размеры элементов и соединений между ними уменьшаются до технологически возможных пределов.

5. Низконадежные соединения элементов, выполненные с помощью пайки, исключаются и заменяются высоконадежными соединениями (путем металлизации).

По технологии построения интегральные микросхемы подразделяют на:

- полупроводниковые;
- пленочные;
- гибридные;
- совмещенные.

В полупроводниковых ИС все элементы (диоды, транзисторы, резисторы и т. д.) и межсоединения выполнены на основе одного кристалла полупроводникового материала

В плёночных ИС все элементы представляют собой пленки, выполненных на поверхности диэлектрической подложки. Различают тонкопленочные и толстопленочные ИС.

В гибридных ИС пассивные элементы выполнены в виде пленок, а активные (диоды, транзисторы и т.д.) являются навесными

Последовательность основных этапов построения полупроводниковой ИС:

1. Выращивание кристалла кремния.
2. Разрезка на пластины (200...300мкм, Ø 40 – 150мм).
3. Очистка поверхности пластин.
4. Получение элементов и их соединений на пластине методом фотолитографии.
5. Разрезка пластин на отдельные части (кристаллы).
6. Закрепление в корпусе.
7. Подсоединение выводов с контактными площадками.
8. Герметизация корпуса.

Особенности ИС (на примере полупроводниковой):

- ИС самостоятельно выполняет законченную, часто весьма сложную, функцию;
- ИС может рассматриваться не только как элемент с определенными параметрами, но и как устройство с определенной электрической схемой;
- снимаются принципиальные ограничения по усложнению функций аппаратуры, которые были свойственны традиционному построению радиоэлектронных устройств на дискретных элементах;
- на одном и том же кристалле можно реализовать узел различной сложности.

Элементы ИС отличаются от аналогичных дискретных элементов:

- большой разброс параметров относительно расчетных (из-за малых размеров, невозможностью подгонки и подстройки);
- ограничение номинальных значений – сопротивлений и емкостей (из-за малой площади). Индуктивность вовсе не реализуется;
- однотипные элементы одной ИС характеризуется высокой идентичностью параметров и характеристик;
- наличие ряда паразитных параметров (токи утечки в подложку, появление емкостных и индуктивных связей между близкорасположенными элементами, соединениями и подложкой).

В ИС при создании функционального узла предпочтение отдается активным элементам перед пассивными. При построении аналогичных узлов на дискретных элементах, наоборот, стремятся уменьшить количество дорогих активных элементов (транзисторов и т.п.).

В ИС реализуются некоторые типы элементов, которые не имеют дискретных аналогов (многоэмиттерные транзисторы, элементы с инжекционным питанием, структуры с распределенными параметрами и др.).

Основные достоинства ИС:

- Высокая надежность.
- Малые размеры и масса.
- Экономичность.
- Быстродействие.

## Раздел 2 Аналоговые устройства электроники

### Тема 2.1. ВЫПРЯМИТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Выпрямителями называют электронные устройства для преобразования энергии переменного тока в энергию постоянного тока.

#### Классификация выпрямителей

Выпрямители классифицируются по нескольким признакам:

- 1) по возможности управления: неуправляемые; управляемые;
- 2) по числу фаз первичного источника питания: однофазные (выпрямители малой и средней мощности); многофазные, обычно 3-х фазные (выпрямители большой мощности);
- 3) по форме выпрямленного напряжения: однополупериодные; двухполупериодные.

#### Параметры выпрямителей

- 1) средние значения выпрямленного тока и напряжения  $I_{н.ср.}$  и  $U_{н.ср.}$ ;
- 2) мощность нагрузочного устройства  $P_{н.ср} = U_{н.ср.} * I_{н.ср.}$ ;
- 3) амплитуда основной гармоники выпрямленного напряжения  $U_{осн.т.}$ ;
- 4) коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения  $p = U_{осн.т.} / U_{н.ср.}$ ;
- 5) КПД выпрямителя:

$$\eta = P_{н.ср.} / (P_{н.ср.} + P_{тр} + P_{д}),$$

где  $P_{тр}$  – потери в трансформаторе;

$P_{д}$  – потери в диодах.

Рассмотрим структурную схему однофазного выпрямителя (рис. 6.1).

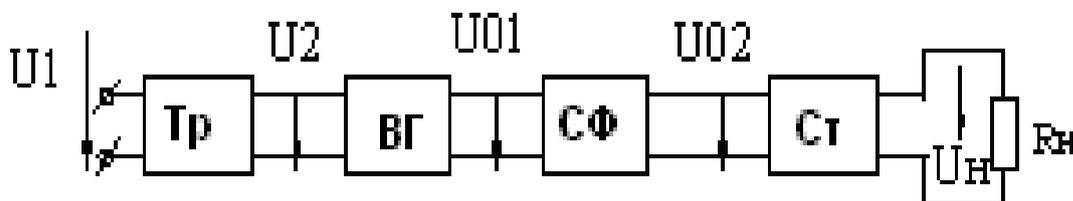


Рисунок 6.1. Структурная схема выпрямителя

В структурную схему входят следующие блоки: трансформатор Тр, вентильная группа ВГ, сглаживающий фильтр СФ, стабилизатор Ст. Трансформатор служит для согласования напряжения сети  $U_1$  с требуемым напряжением нагрузки  $U_n$  и устранения электрической связи между цепью переменного и постоянного тока. Вентильная группа обеспечивает преобразование переменного тока в однонаправленный выпрямленный, в качестве вентилей применяют диоды, а в управляемых выпрямителях тиристоры. Сглаживающий фильтр - для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения. Стабилизатор поддерживает напряжение в нагрузке постоянным при колебаниях напряжения сети, либо при изменении режима работы. В зависимости от назначения выпрямителя часть блоков (Тр, СФ, СТ) могут отсутствовать

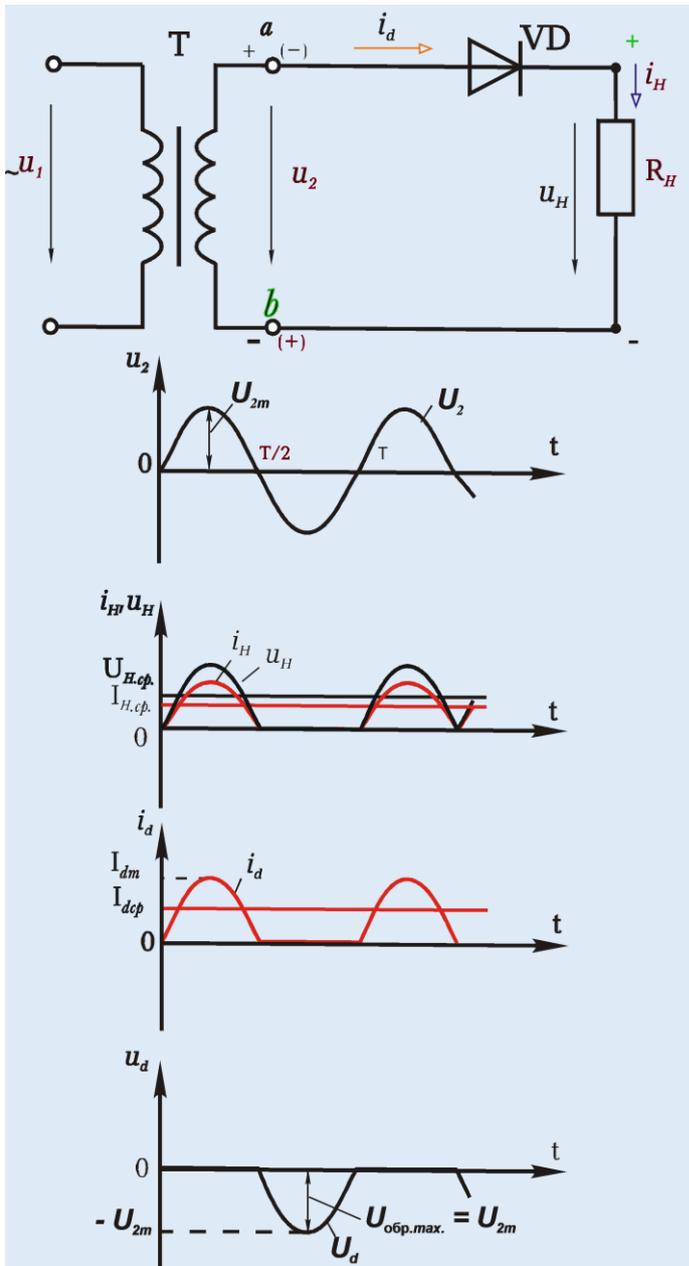
## Однофазные выпрямители

Для выпрямления однофазного переменного напряжения применяют:

- 1) однополупериодный;
- 2) двухполупериодный мостовой;
- 3) двухполупериодный с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора.

### Однополупериодный выпрямитель

Однополупериодный выпрямитель состоит из трансформатора  $T$ , к



вторичной обмотке которого последовательно подключены вентиль  $VD$  и нагрузочный резистор  $R_H$ . Работа выпрямителя показана с помощью временных диаграмм. В первый полупериод (интервал времени  $0 - T/2$ ) вентиль будет открыт, т.к. потенциал точки,  $a$  выше потенциала точки  $b$ , и в цепи нагрузки возникает ток  $I_H$ . В интервале времени  $T/2 - T$  вентиль закрыт, ток в нагрузке отсутствует, а к запертому вентилю прикладывается обратное напряжение. Нагрузка находится под напряжением только полпериода за каждый период, среднее напряжение  $U_{H.cр.}$  в 2.22 раза меньше  $U_2$ . Данная схема имеет существенные недостатки: сильная пульсация выпрямленного напряжения, плохое использование трансформатора ( $S_T = 3.5P_H$ ) и вентилях ( $K_u = U_{обр.мах}/U_{H.cр.} = \pi$ ). Применяется при малых токах и высоких напряжениях нагрузки.

Рисунок 6.1 Однофазный однополупериодный выпрямитель

$$U_{н.ср.} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} U_{2m} \sin \omega t dt = \frac{1}{\pi} U_{2m} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 = 0.45 U_2$$

$$U_2 = 2.22 U_{н.ср.}$$

$$U_{обр.маx} = U_{2m} = \pi U_{н.ср.}$$

$$I_d = I_{н.ср.}$$

### Двухполупериодный выпрямитель со средней точки трансформатора

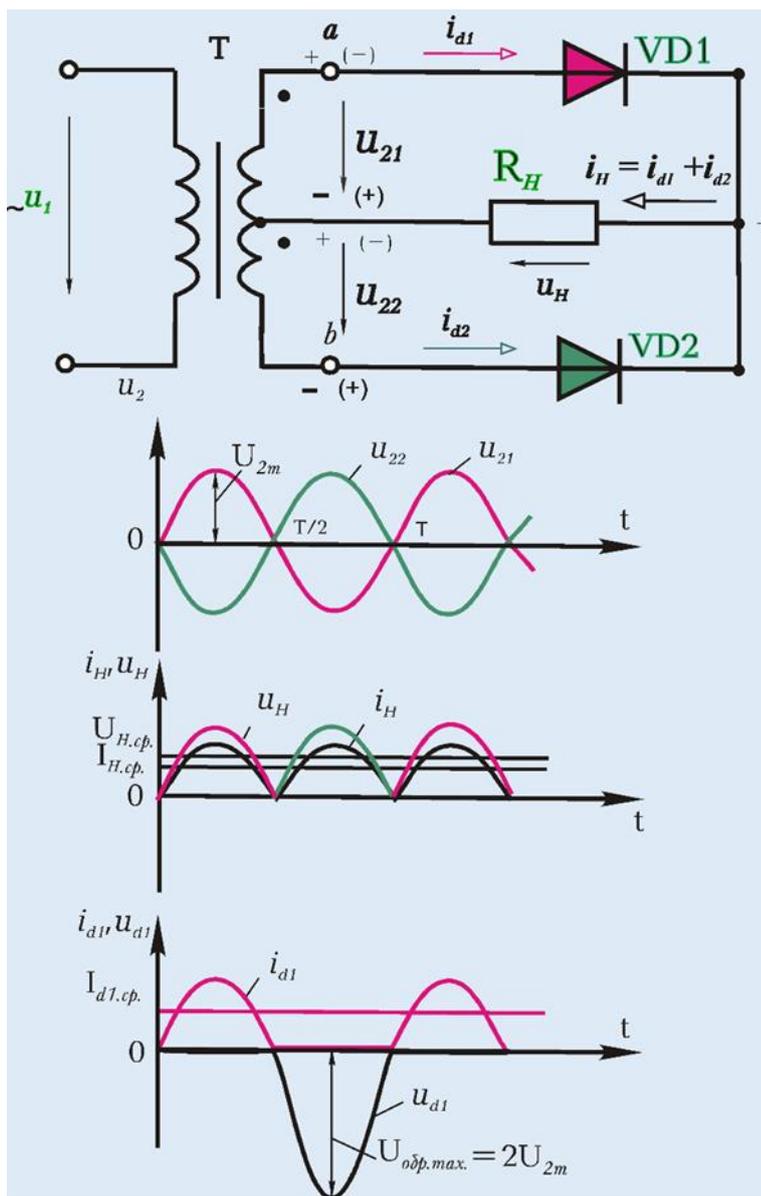


Рисунок 6.2 Однофазный выпрямитель со средней точкой трансформатора

Выпрямитель с выводом средней точки трансформатора. Напряжения вторичных полуобмоток  $u_{21}$ ,  $u_{22}$  сдвинуты по фазе относительно средней точки трансформатора на  $180^\circ$ . При указанной без скобок полярности напряжений  $u_{21}$ ,  $u_{22}$  к вентилю  $VD1$  прикладывается прямое напряжение (плюс на анод, минус на катод), и вентиль открыт. Ток вентиль  $i_{d1}$  замыкается через нагрузку  $R_H$  и верхнюю полуобмотку трансформатора. Вентиль  $VD2$  в это время находится под обратным напряжением ( $U_{обр.маx} = 2U_{2m}$ ) и ток не пропускает. Во второй полупериод ( $T/2-T$ ) из-за изменения полярности напряжения  $u_2$  открывается вентиль  $VD2$  и к нагрузке прикладывается напряжение нижней полуобмотки. Затем снова работает  $VD1$  и т.д.

Напряжение нагрузки представляет собой следующие друг за другом положительные полусинусоиды. Недосток:

плохо используется вторичная обмотка трансформатора (работает лишь одна половина,  $S_T = 1.48 P_H$ )

$$U_{н.ср.} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} U_{2m} \sin \omega t dt = \frac{2}{\pi} U_{2m} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 = 0.9U_2$$

$$U_2 = 1.11U_{н.ср.}$$

$$U_{обр. max} = 2U_{2m} = \pi U_{н.ср.}$$

$$I_d = \frac{1}{2} I_{н.ср.}$$

### Мостовой выпрямитель

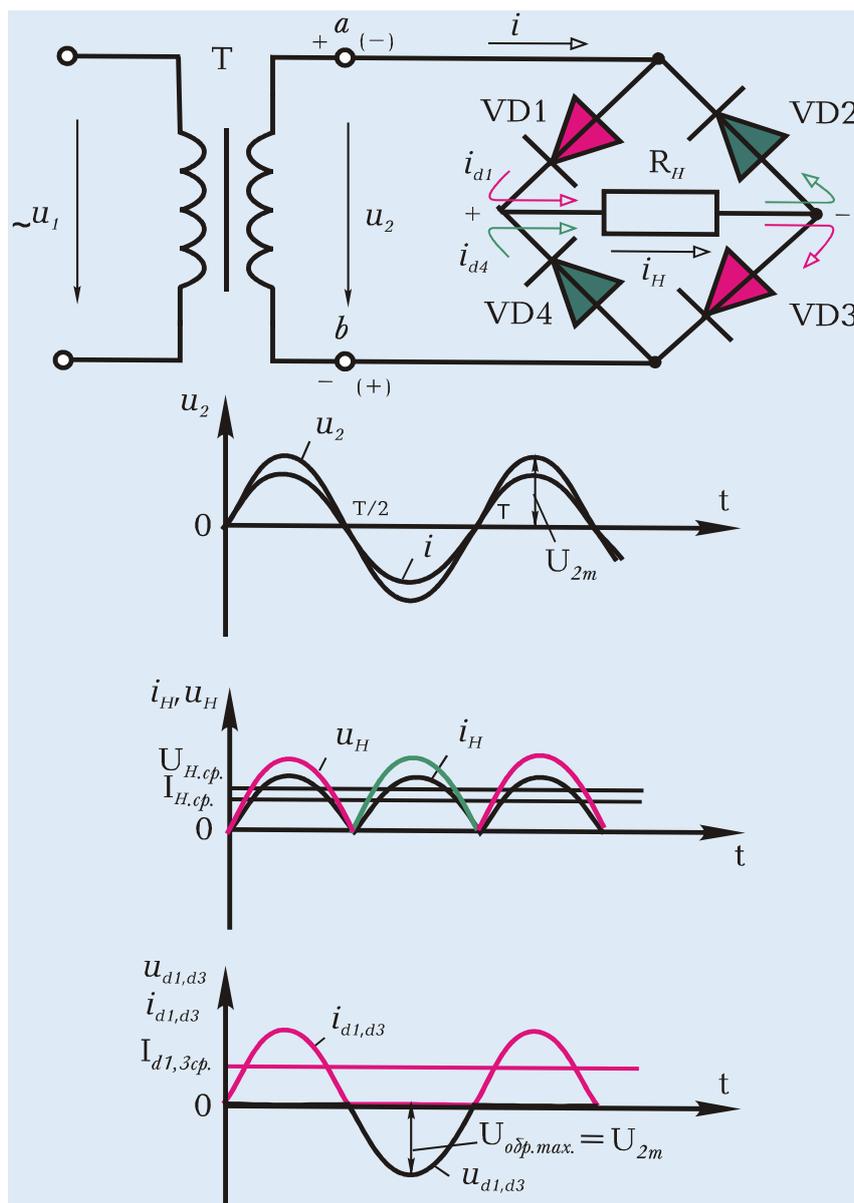


Рисунок 6.3 Однофазный мостовой выпрямитель

В мостовом выпрямителе четыре вентиля включены мостом, в одну диагональ которого подается питающее напряжение  $u_2$ , а в другую - нагрузка  $R_H$ . Каждая пара вентиля ( $VD1, VD3$  и  $VD2, VD4$ ) работает поочередно. В первый полупериод (интервал  $0 - T/2$ ) открыты вентили  $VD1$  и  $VD3$ , т.к. положителен потенциал на анодах. Ток проходит через  $VD1, R_H, VD3, T$ . В этом интервале вентили  $VD2$  и  $VD4$  закрыты. В следующий полупериод ( $T/2 - T$ ) потенциал точки  $b$  выше потенциала точки  $a$ , будут открыты вентили  $VD2$  и  $VD4$ , а  $VD1$  и  $VD3$ -закрыты. В оба полупериода ток и напряжение нагрузки имеют одинаковое направление. Эта схема применяется наиболее

широко для установок средней и малой мощности, т.к. лучше используются трансформатор ( $S_T = 1.23P_H$ ) и вентили ( $\kappa_u = \pi/2$ ).

$$U_{н.ср.} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} U_{2m} \sin \omega t dt = \frac{2}{\pi} U_{2m} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 = 0.9U_2$$

$$U_2 = 1.11U_{н.ср.}$$

$$U_{обр.маx} = U_{2m} = \frac{\pi}{2} U_{н.ср.}$$

$$I_d = \frac{1}{2} I_{н.ср.}$$

### ТРЕХФАЗНЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

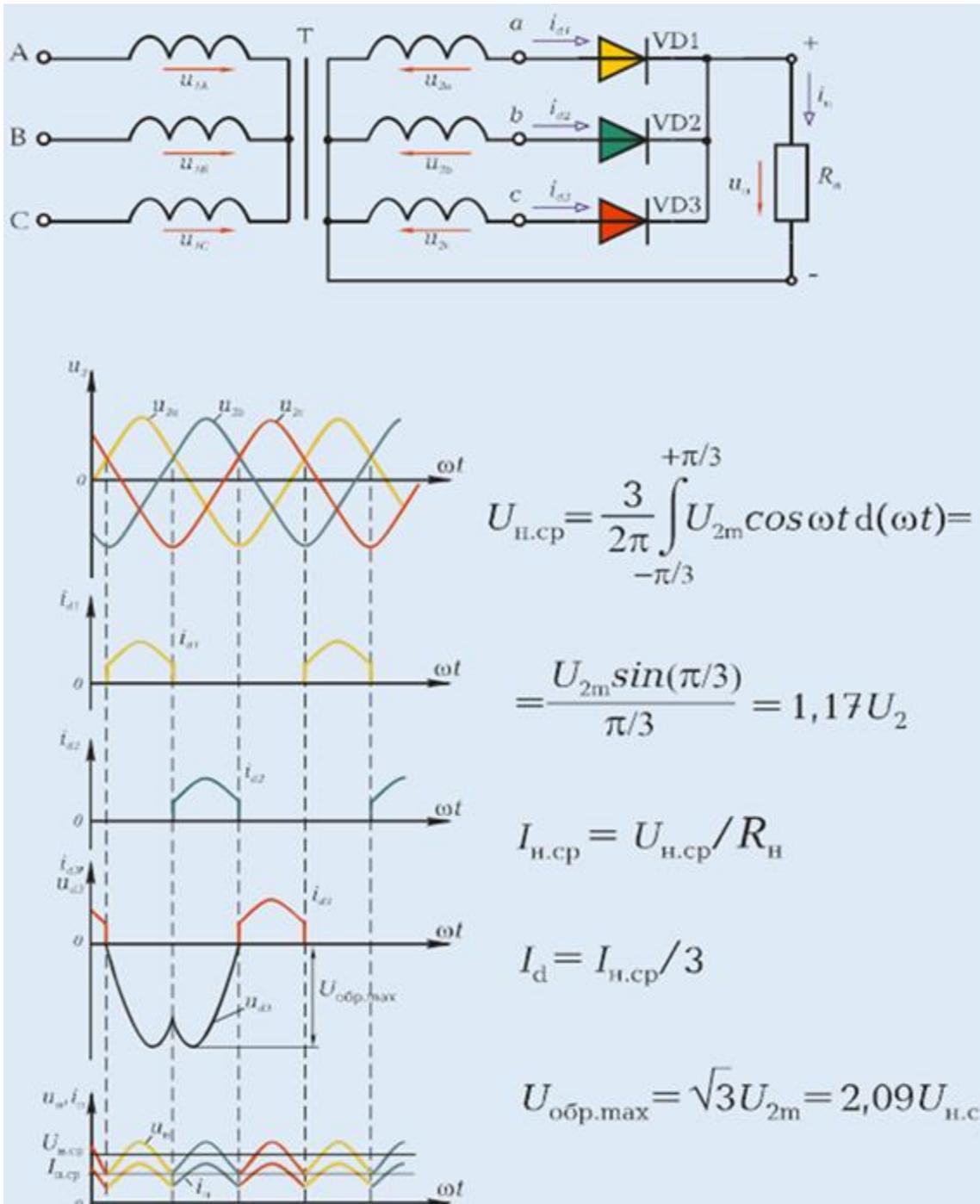


Рисунок 6.4 Трехфазный выпрямитель с нейтральным выводом трансформатора

Трехфазные выпрямители применяют для питания нагрузки средней и большой мощности. Их преимущества перед однофазными:

- 1) меньше пульсаций выпрямленного напряжения;
- 2) лучше используется мощность трансформатора

### **Трехфазный выпрямитель с нейтральным выводом трансформатора**

Трёхфазный выпрямитель с нейтральным выводом состоит из трехфазного трансформатора  $T$ , трех вентилей  $VD1 - VD3$ , аноды которых соединены с выводами вторичной обмотки трансформатора, а катоды объединены в один узел (рис 6.4). Нагрузка  $R_n$  включена между катодами и нейтралью трансформатора. Так как катоды вентилей имеют одинаковый потенциал, то проводящим (открытым) будет вентиль, у которого наиболее положительный потенциал на аноде, задаваемый фазными напряжениями трансформатора. На временной диаграмме видно, что вентили работают поочередно, каждый в течение трети периода. Выпрямленный ток в резисторе  $R_n$  имеет одинаковое направление и равен сумме выпрямленных токов каждой из фаз:  $i_n = i_{d1} + i_{d2} + i_{d3}$ . Коэффициент пульсаций  $p = 0,25$ . На закрытом вентиле (например, на  $VD3$  при открытом  $VD1$ ) потенциал анода  $\varphi_a = u_{2c}$ , потенциал катода  $\varphi_k = u_{2a}$ , напряжение на вентиле  $u_{d3} = \varphi_a - \varphi_k = u_{2c} - u_{2a}$ . Таким образом, к закрытому вентилю приложено линейное напряжение, и максимальное обратное напряжение на каждом вентиле равно амплитудному значению линейного напряжения. Недостатком данного выпрямителя является плохое использование трансформатора ( $S_T = 1.35P_n$ ). Кроме того, обратное напряжение на вентиле в 2,09 раза превышает напряжение на нагрузке, поэтому выпрямитель применяют для выпрямления низких напряжений.

### **Трехфазный мостовой выпрямитель**

Трехфазный мостовой выпрямитель имеет значительно лучшие показатели. Он содержит мост из шести вентилей (рис 6.5). Вентили  $VD1, VD3, VD5$  образуют катодную группу, общая точка которой определяет положительный полюс на нагрузке  $R_n$ . Вентили  $VD2, VD4, VD6$  образуют анодную группу с общей точкой, определяющей отрицательный полюс на нагрузке. В работе в открытом состоянии попарно находятся два вентиля (один из анодной, другой из катодной групп). Из группы  $VD1, VD3, VD5$  открыт тот, у которого наиболее высокий потенциал на аноде, а из группы  $VD2, VD4, VD6$  - у которого наиболее низкий потенциал на катоде. Например, в интервале  $\omega t = \pi/2 \dots \pi$  будут открыты вентили  $VD1$  и  $VD4$ , образуя замкнутую цепь для питания нагрузки  $R_n$  линейным напряжением  $u_{ab}$ . В момент  $\omega t = \pi/2$  произойдет переключение вентилей:  $VD4$  закроется, а  $VD6$  откроется. За период напряжения питания происходит шесть переключений вентилей (шесть тактов). Каждый вентиль открыт 1/3 периода. Напряжение нагрузки определяется разностью потенциалов объединенных катодов и анодов вентилей, т.е. линейным напряжением вторичной обмотки трансформатора. Коэффициент пульсаций  $p = 0,057$ .

Мостовой выпрямитель находит самое широкое применение для установок большой мощности, т.к. в нем хорошо используются трансформатор ( $S_T = 1.045P_n$ ) и вентили ( $k_v = U_{обр. max}/U_{н. ср} = 1,045$ ;  $k_i = I_{d. max}/I_{н. ср} = 1,045$ ).

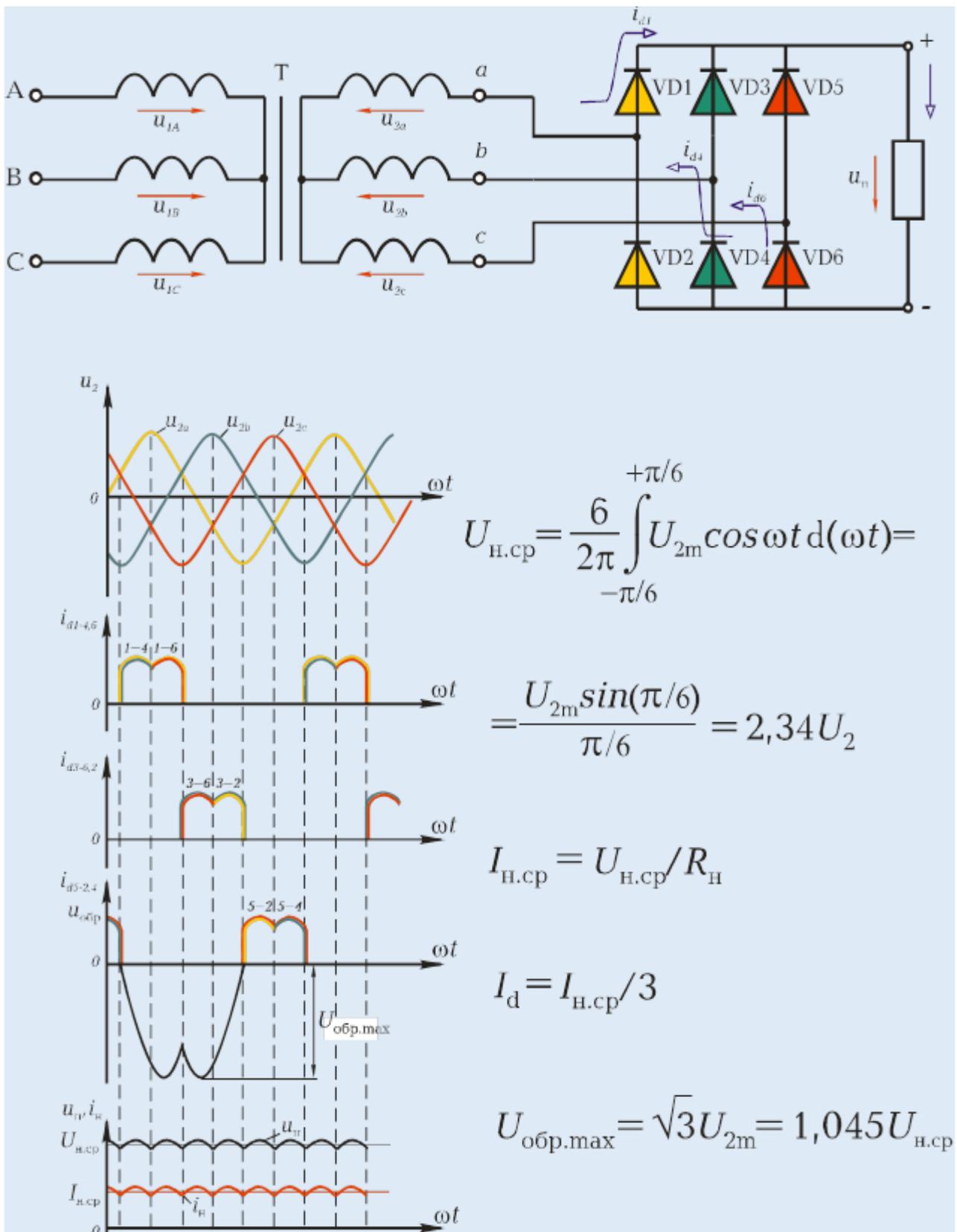


Рисунок 6.5 Трехфазный мостовой выпрямитель

## СГЛАЖИВАЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ

Сглаживающим фильтром называют устройство, предназначенное для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения.

Основным параметром, характеризующим эффективность сглаживающего фильтра (СФ), является коэффициент сглаживания  $q = p_{вх}/p_{вых}$ , где  $p_{вх}$  – коэффициент пульсаций на входе фильтра (т.е. для схемы выпрямителя без фильтра), а  $p_{вых}$  – коэффициент пульсаций на выходе фильтра (т.е. для схемы выпрямителя с фильтром).

Сглаживающие фильтры различаются по следующим признакам:

- 1) в зависимости от типа фильтрующего элемента:
  - а) емкостные;
  - б) индуктивные;
  - с) электронные фильтры.
- 2) по количеству фильтрующих звеньев:
  - а) однозвенные;
  - б) многозвенные.

### Емкостные фильтры

Емкостной фильтр представляет собой конденсатор, который включают параллельно нагрузочному резистору  $R_{н}$ . Схема однополупериодного выпрямителя с емкостным фильтром показана на рисунке 7.1.

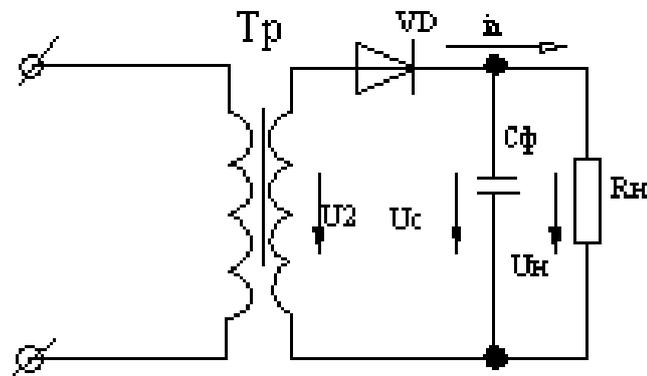


Рисунок 7.1. Схема однополупериодного выпрямителя с емкостным фильтром

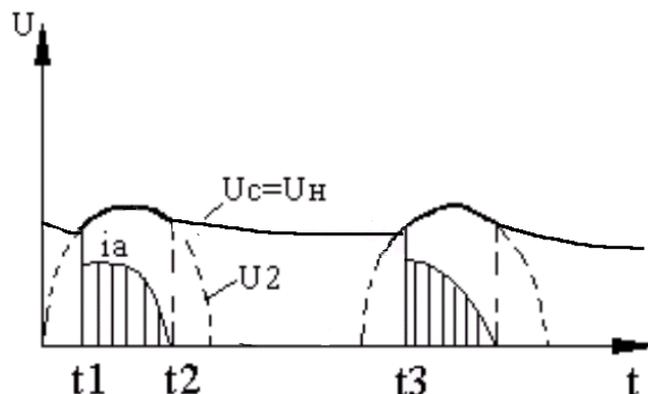


Рисунок 7.2. Временные диаграммы выпрямителя с емкостным фильтром

На временных диаграммах (рисунок 7.2) видно, что в интервале  $t_1-t_2$ , конденсатор через открытый диод заряжается до амплитудного значения  $U_2$ , так как в этот период  $U_2 > U_c$ . Когда  $U_2 < U_c$ , конденсатор разряжается на нагрузочный резистор  $R_n$ , заполняя разрядным током паузу в нагрузочном токе  $i_n$ , которая имеется в однополупериодном выпрямителе без фильтра.

После этого диод вновь открывается, СФ заряжается и процессы зарядки и разрядки СФ повторяются. Подобные СФ применяются с высокоомным сопротивлением  $R_n$ .

$$q_c = 2\pi f_1 m R_n C_\phi,$$

где  $m$  – число пульсаций выпрямленного напряжения

### **Индуктивные фильтры.**

Они состоят из дросселя  $L_\phi$ , который включают последовательно с нагрузкой  $R_n$  (рисунок 7.3). Так как ток в цепи с дросселем во время переходного процесса при положительной полуволне  $U_2$ , зависит от постоянной времени  $\tau = L_\phi / R_n$ , то длительность импульса увеличивается с ростом  $\tau$ , что видно на временных диаграммах (рисунок 7.4).

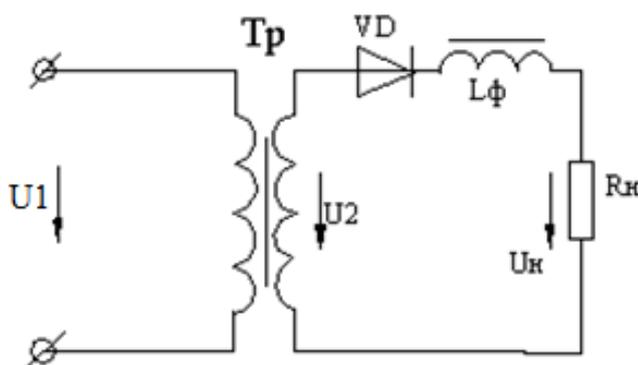


Рисунок 7.3. Схема включения индуктивного фильтра

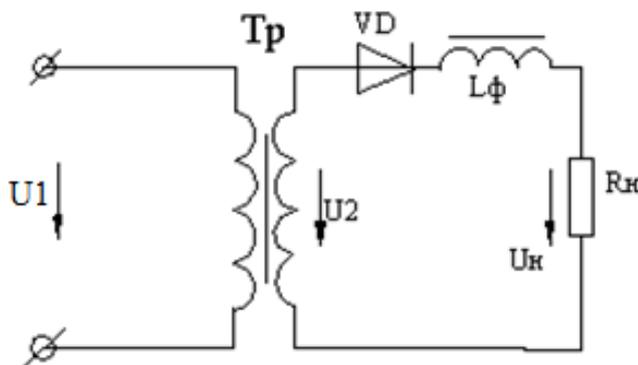


Рисунок 7.4. Временные диаграммы выпрямителя с индуктивным фильтром

Коэффициент сглаживания индуктивного фильтра  $q_L = \frac{2\pi f_1 m L_\phi}{R_n}$ ,

где  $m$  – число пульсаций выпрямленного напряжения

Емкостные и индуктивные фильтры являются однозвенными фильтрами.

К многозвенным фильтрам относятся  $LC$  или  $RC$  – фильтры, которые обеспечивают большой коэффициент сглаживания пульсаций  $p$  и включены Г-образно или П-образно (рисунок 7.5 и 7.6).

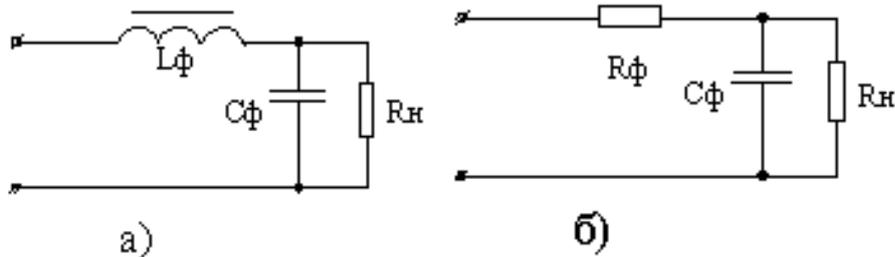


Рисунок 7.5 Г-образные а)  $LC$ - фильтр, б)  $RC$  – фильтр

Коэффициент сглаживания  $LC$ - фильтра:  $q_\Gamma = \omega_{осн}^2 L_\phi C_\phi$ .

В маломощных усилителях, где сопротивление  $R_n$  составляет единицы кОм, вместо катушки включают резистор  $R_\phi$ , что уменьшает массу, габариты и стоимость фильтра, однако при этом коэффициент сглаживания, определяемый как  $q = (0,5 \div 0,9)\omega_{осн} R_\phi C_\phi$ , будет меньше, чем у  $LC$ - фильтра.

В П – образных фильтрах коэффициент сглаживания равен произведению коэффициентов составных звеньев ( $q_\Pi = q_C q_\Gamma$ ).

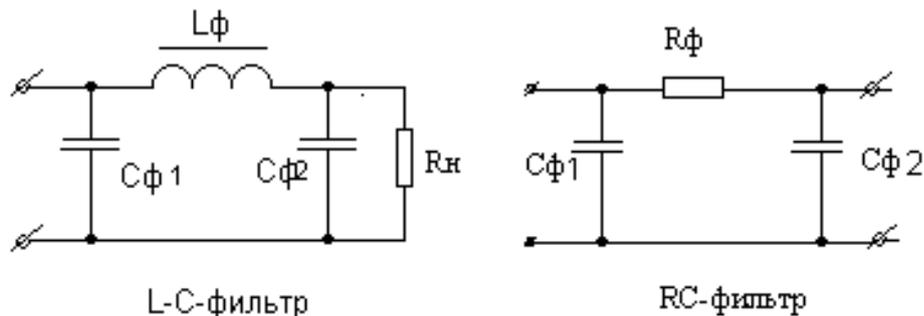


Рисунок 7.6. П-образные  $LC$ - фильтр и  $RC$  – фильтр

### Электронные фильтры.

Электронные фильтры (ЭФ) – это фильтры, в которых вместо индуктивных катушек включают транзисторы, что позволяет избавиться от переходных процессов и уменьшить габариты и массу выпрямителей.

Применение транзисторов в фильтрах основано на различии сопротивлений для постоянной и переменной составляющих коллекторного тока [3, 4].

Из выходной характеристики транзистора (рис. 7.7) видно, что сопротивление  $R_{кз}$  постоянному току (статическое сопротивление)  $R_{cm} = U_{кз} / I_{кз}$  на 2-3 порядка

меньше сопротивления переменному току (динамическое сопротивление)  $R_{дин} = \Delta U_k / \Delta I_k$ . Электронные фильтры снижают пульсации в 3-5 раз.

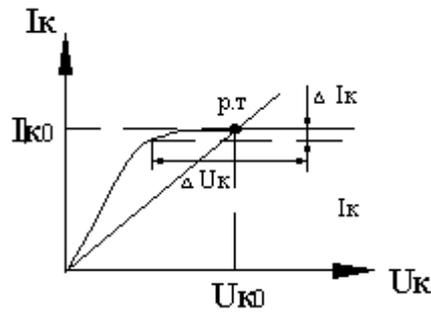


Рисунок 7.7 Выходная характеристика транзистора

Электронные фильтры могут быть подключены последовательно нагрузке (рис. 7.8, а) и параллельно нагрузке (рис. 7.8, б).

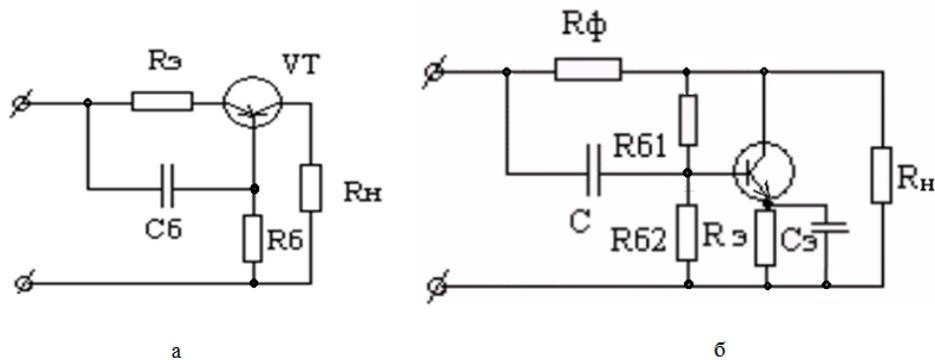


Рисунок 7.8. Электронные фильтры при последовательном подключении к нагрузке (а) и при параллельном подключении к нагрузке (б)

# СТАБИЛИЗАТОРЫ

## Классификация и основные параметры стабилизаторов

Стабилизатор напряжения (или тока) – это устройство, автоматически обеспечивающее поддержание напряжения (или тока) нагрузочного устройства с заданной степенью точности при изменении питающего напряжения или режима работы нагрузки.

### Классификация стабилизаторов

Стабилизаторы классифицируют по следующим признакам:

- 1) по стабилизируемой величине:
  - а) стабилизаторы напряжения;
  - б) стабилизаторы тока;
- 2) по способу стабилизации:
  - а) параметрические (ПС);
  - б) компенсационные (КС).

### Основные параметры стабилизаторов

1. Коэффициент стабилизации по напряжению для стабилизаторов напряжения:

$$K_{ст.U} = \frac{\Delta U_{вх} / U_{вх}}{\Delta U_{вых} / U_{вых}},$$

где  $\Delta U_{вх}$ ,  $\Delta U_{вых}$  – приращения напряжений,  $U_{вх}$ ,  $U_{вых}$  – номинальные значения.

2. Коэффициент стабилизации тока для стабилизаторов тока:

$$K_{ст.I} = \frac{\Delta U_{вх} / U_{вх}}{\Delta I_{н} / I_{н}},$$

где  $I_{н}$  – номинальный ток, а  $\Delta I_{н}$  – приращение тока;

3. Внутреннее сопротивление стабилизатора  $R_{ст}$ ;
4. Коэффициент полезного действия:

$$\eta_{ст} = P_{н} / (P_{н} + P_{п}),$$

где  $P_{н}$  – полезная мощность в нагрузочном устройстве;  $P_{п}$  – мощность потерь.

### Параметрические стабилизаторы

В параметрических стабилизаторах напряжения используется полупроводниковый стабилитрон  $VD$ , который включают параллельно  $R_{н}$ .

Последовательно со стабилитроном включают балластный резистор  $R_b$  для создания требуемого режима работы (рис. 8.1).

При изменении напряжения  $U_{вх}$  под действием колебания напряжения питающей сети или изменения сопротивления нагрузки  $R_n$ , напряжение  $U_n$  изменяется незначительно, т.к. оно определяется напряжением  $U_{ст}$  стабилитрона, которое мало изменяется при изменении протекающего через него тока, что видно на ВАХ стабилитрона (рис. 8.2).

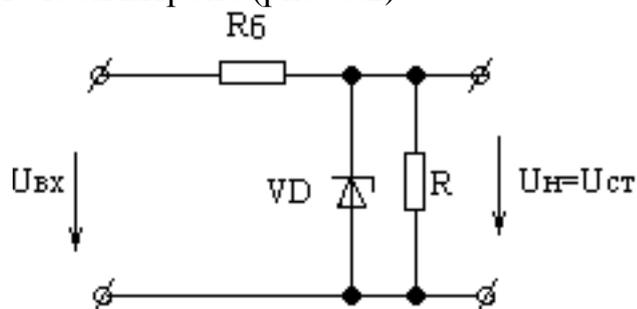


Рисунок 8.1 Параметрический стабилизатор напряжения

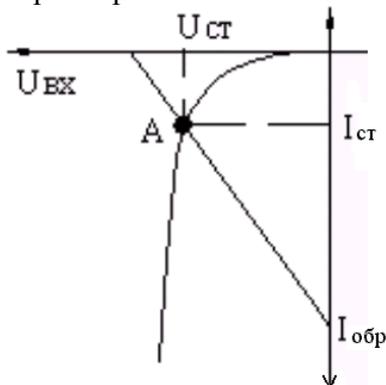


Рисунок 8.2 Обратная ветвь ВАХ стабилитрона

В параметрическом стабилизаторе тока используется нелинейный элемент (это может быть полевой или биполярный транзистор), который включают последовательно с нагрузочным устройством (рис. 8.3).

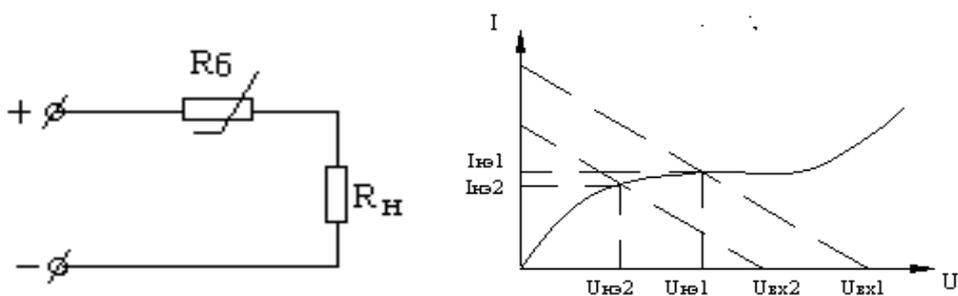


Рисунок 8.3 Обобщенная схема параметрического стабилизатора тока (а) и ВАХ нелинейного элемента (б)

ВАХ нелинейного элемента показывает, что при изменении напряжения от  $U_{вх1}$  до  $U_{вх2}$  напряжение на нагрузочном элементе изменяется от  $U_{нэ1}$  до  $U_{нэ2}$ , а нагрузочный ток  $I_n$  практически не меняется.

Пример схемы стабилизатора тока представлен на рисунке 8.4.

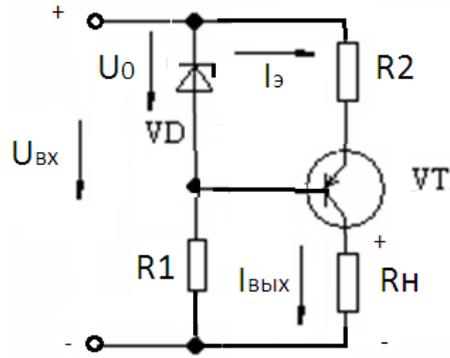


Рисунок 8.4. Схема стабилизатора тока

На базе VT (ОБ) потенциал  $= \text{const}$ , который задается VD ( $U_o = \text{const}$ ). Т.к.  $U_{обэ} = U_o - R_2 I$ , то  $I_э = (U_o - U_{обэ}) / R_2 = \text{const}$ , тогда  $I_{вых}$  не зависит от  $R_n$ , а определяется только  $U_o$  и  $R_2$ .

### Компенсационные стабилизаторы

Компенсационные стабилизаторы постоянных  $U$  и  $I$ , являются системами автоматического регулирования, в которых благодаря наличию отрицательной обратной связи обеспечивается постоянство напряжения  $U$  и тока  $I$  на нагрузочном устройстве с высокой степенью точности.

Компенсационные стабилизаторы подразделяются на стабилизаторы непрерывного действия и импульсные.

Структурная схема компенсационного стабилизатора напряжения непрерывного действия представлена на рис. 8.5.

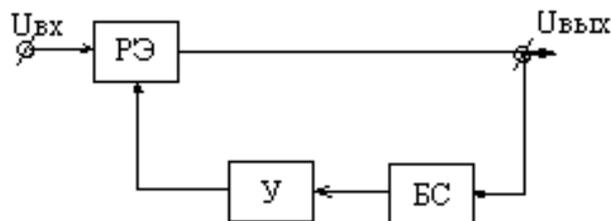


Рисунок 8.5. Структурная схема компенсационного стабилизатора напряжения непрерывного действия: БС – блок сравнения; У – усилитель постоянного тока; РЭ – регулирующий элемент

В блок сравнения (БС) входят источник опорного напряжения (параметрический стабилизатор, образованный элементами VD,  $R_\delta$ , рис. 8.6) и резистивный делитель ( $R_1, R_2, R_3$ ).

Усилитель постоянного тока (У) образован маломощным транзистором VT2 и  $R_k$ . Регулирующий элемент (РЭ) – мощный транзистор VT1.

В данном компенсационном стабилизаторе происходит непрерывное сравнение  $U_n$  с опорным напряжением  $U_{он}$ .

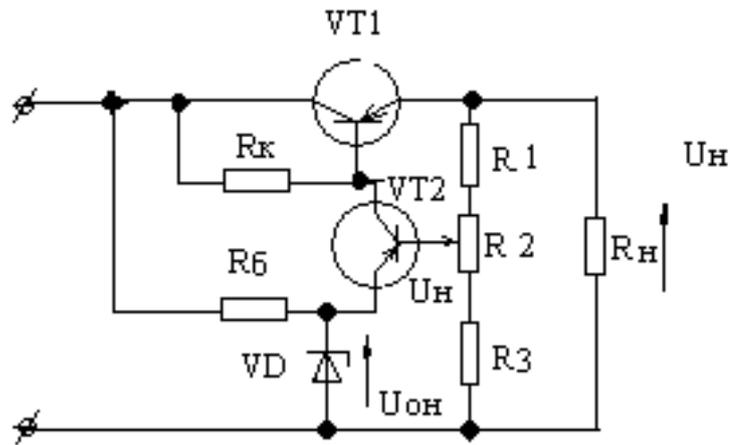


Рисунок 8.6. Принципиальная электрическая схема компенсационного стабилизатора напряжения непрерывного действия

Схема компенсационного стабилизатора тока почти аналогична схеме компенсационного стабилизатора напряжения, отличие заключается в том, что вместо резистивного делителя, включают переменный резистор  $R_{рег}$  последовательно с сопротивлением  $R_H$ . Сигнал обратной связи, снимаемый с  $R_{рег}$  и пропорциональный изменениям тока  $I_H$ , сравнивается с напряжением  $U_{он}$  и подается на вход усилителя.

Импульсные стабилизаторы постоянного напряжения (ИСПН) имеют высокий КПД (0,8...0,85), меньшие габариты и массу. Как и компенсационные стабилизаторы непрерывного действия, ИСПН является устройством, в котором применяется отрицательная обратная связь, ослабляющая изменение напряжения  $U_{вых}$  или тока  $I_H$ .

Отличием ИСПН от компенсационного стабилизатора является работа РЭ – транзистора, который работает в режиме ключа, что дает возможность получить с его выхода однополярные импульсы прямоугольной формы  $U_{кл}$  (рис. 8.7).

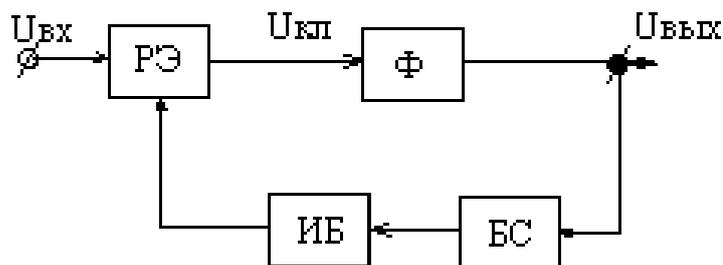


Рисунок 8.7 Структурная схема ИСПН:  
 Ф – сглаживающий фильтр; РЭ – регулирующий элемент;  
 БС – блок сравнения; ИБ – импульсный блок.

В БС напряжение  $U_{вых}$  сравнивается с опорным, получающееся при этом разностное напряжение воздействует на ИБ, который вырабатывает управляющие импульсы разной длительности и частоты следования, которые управляют работой РЭ.

## УПРАВЛЯЕМЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Управляемые выпрямители – это устройства, которые позволяют плавно изменять значения выпрямленного напряжения [5, 6, 10].

Схема простейшего однофазного однополупериодного выпрямителя на тиристоре показана на рисунке 9.1.

Управление напряжением на выходе такой схемы сводится к управлению во времени моментом отпирания тиристора. Этот процесс осуществляется за счет сдвига фаз между анодным напряжением и напряжением, подаваемым на управляющий электрод тиристора. Такой сдвиг называют углом управления и обозначают  $\alpha$ , а способ управления называют фазовым (рис. 9.2).

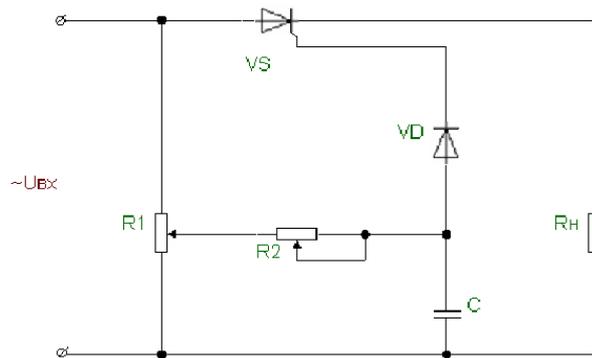


Рисунок 9.1 Схема однофазного однополупериодного выпрямителя на тиристоре

Управление величиной  $\alpha$  осуществляют с помощью фазовращающей  $R2C$ -цепи. Резистором  $R1$  изменяют напряжение, подаваемое на управляющий электрод тиристора. Диод  $VD1$  обеспечивает подачу на управляющий электрод положительных импульсов.

Оптимальной формой управляющих сигналов является короткий импульс с крутым фронтом, который обеспечивает четкое отпирание тиристора. Для формирования таких импульсов и их сдвига во времени используются импульсно-фазовые системы управления.

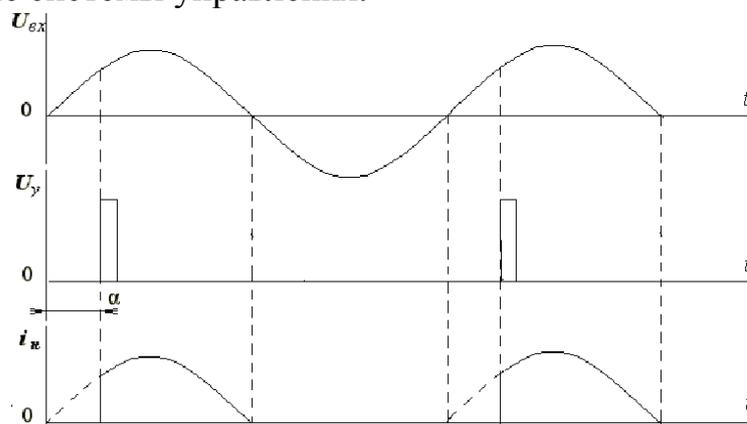


Рисунок 9.2 Временные диаграммы входного напряжения  $U_{вх}$ , напряжения управления  $U_y$  и тока на нагрузке  $i_n$  для однофазного однополупериодного управляемого выпрямителя

Однофазный двухполупериодный выпрямитель представлен на рис. 9.3. В такой схеме тиристоры работают поочередно, на управляющие электроды тиристоров сигналы управления подаются от импульсно-фазового блока управления (ИФБУ).

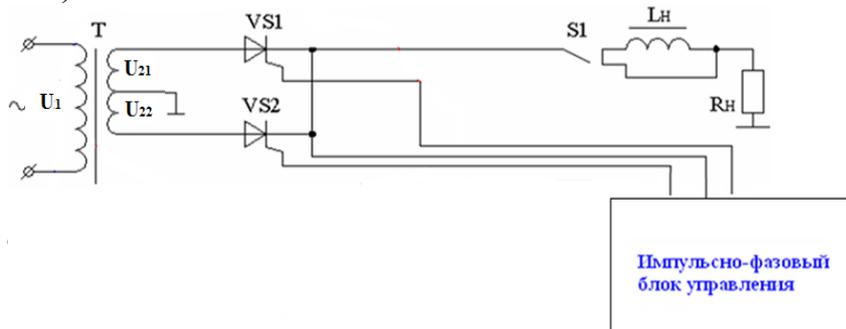


Рисунок 9.3 Схема однофазного двухполупериодного управляемого выпрямителя

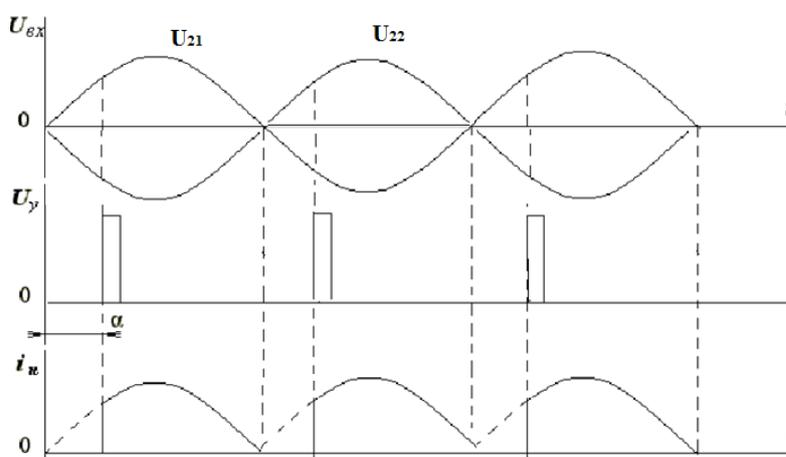


Рисунок 9.4 -Временные диаграммы входного напряжения  $U_{вх}$ , напряжения управления  $U_y$  и тока на нагрузке  $i_n$  для однофазного двухполупериодного управляемого выпрямителя

Если с помощью ИФБУ импульсы  $U_y$  сместить на угол  $\alpha$  относительно напряжения  $u_2$ , то проводящий тиристор откроется с запаздыванием, и будет пропускать ток только часть полупериода от  $\alpha$  до  $\pi$ . В этом случае напряжение на нагрузке определяют.

$$U_{н\text{ ср}} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_{2m} \sin \omega t \, d\omega t = U_{но} \frac{1 + \cos \alpha}{2},$$

где  $U_{но} = 0,9U_2$ , среднее напряжение на нагрузке при  $\alpha = 0$ .

Таким образом, изменяя  $\alpha$  от  $0$  до  $180^\circ$ , можно плавно регулировать  $U_{н\text{ ср}}$  от  $U_{но}$  до  $0$ . Ток нагрузки повторяет  $i_n$

$$I_{н\text{ ср}} = \frac{U_{н\text{ ср}}}{R_n} = I_{но} \frac{1 + \cos \alpha}{2}.$$

Основными характеристиками управляемого выпрямителя являются:

а) характеристика управления, которая выражает зависимость выпрямленного напряжения от угла управления  $U_n = f(\alpha)$  (рис. 9.5);

б) внешние характеристики, которые определяют зависимость выпрямленного напряжения от выпрямленного тока при фиксированных значениях угла  $\alpha$  (рис. 9.6).

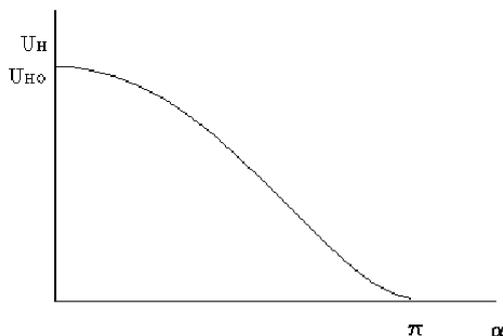


Рисунок 9.5 Характеристика управления

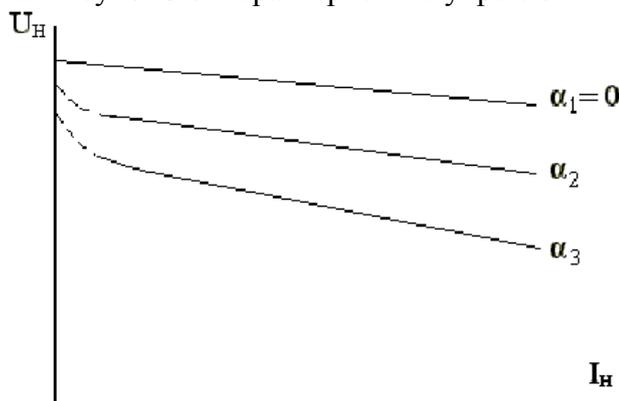


Рисунок 9.6 Внешние характеристики

Трёхфазные управляемые выпрямители [1, 12] являются выпрямителями средней и большой мощности. Различают схему трёхфазного выпрямителя с нулевым (или нейтральным) выводом и схему трёхфазного мостового выпрямителя.

Трёхфазный выпрямитель с нулевым (или нейтральным) выводом (рис. 9.7) обычно работает на активно-индуктивную нагрузку. Длительность работы тиристоров определяется углом управления  $\alpha$ , значение которого задается импульсно-фазовым блоком управления (ИФБУ). Изменение угла  $\alpha$  приводит к изменению средних значений выпрямленного напряжения  $U_{н\text{ср}}$  и  $I_{н\text{ср}}$  тока. Это видно на временных диаграммах при индуктивной нагрузке  $L_n = 0$  (рис. 9.8).

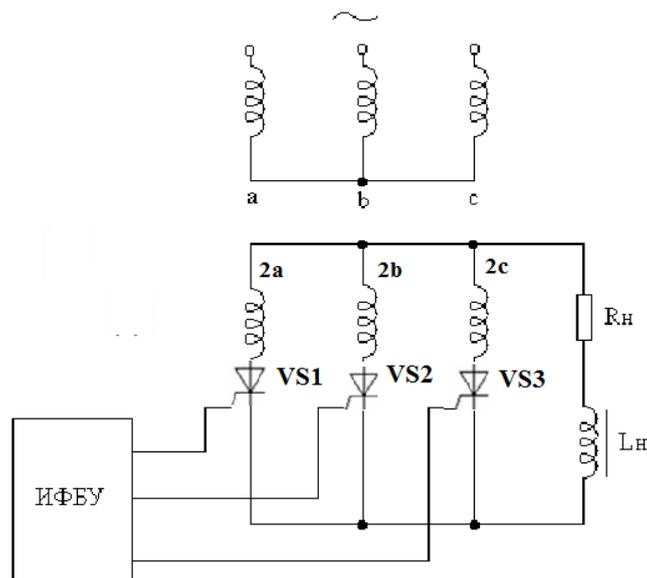


Рисунок 9.7 Схема трехфазного выпрямителя с нулевым (или нейтральным) выводом

При угле управления  $\alpha < \pi/6$  выпрямленный ток  $i_n$  имеет непрерывный характер и каждый тиристор открыт в течение времени, соответствующего углу  $2/3\pi$ . При угле управления  $\alpha > \pi/6$  в выпрямленном токе  $i_n$  появляются паузы.

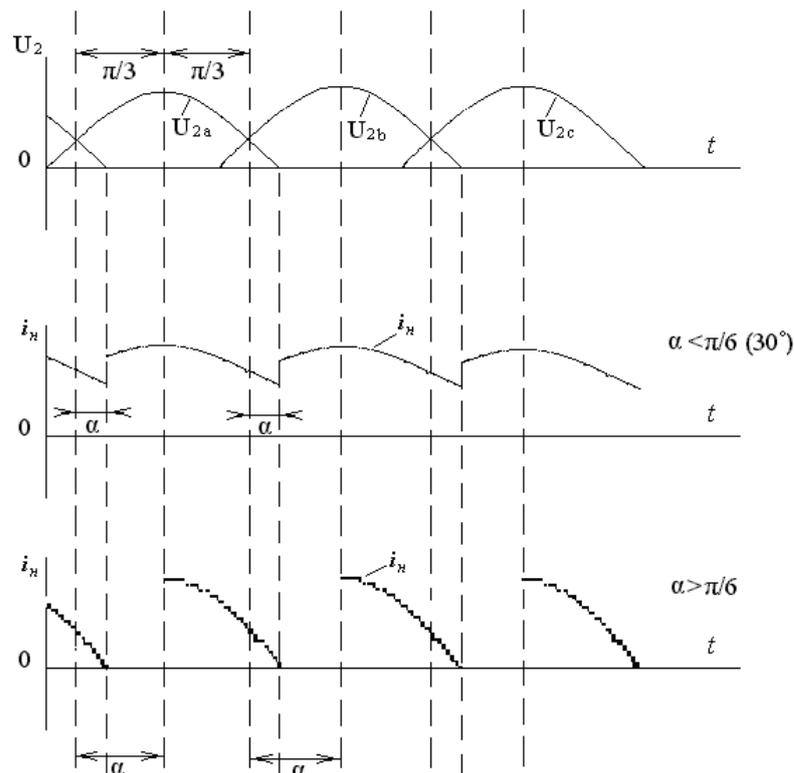


Рисунок 9.8 Временные диаграммы трехфазного выпрямителя с нулевым выводом

Характеристика управления трехфазного выпрямителя показана на рис. 9.9, откуда видно, что при  $L_n = 0$  напряжение  $U_{нсп}$  равно нулю при  $\alpha = 150^\circ$ . При  $L_n = \infty$ , напряжение на нагрузочном устройстве становится равным нулю при угле управления  $\alpha = 90^\circ$ . Характеристики управления при  $L_n \neq 0$  и  $L_n \neq \infty$  располагаются между этими двумя предельными характеристиками.

Нагрузочный ток  $i_n$  при  $L_n = \infty$  будет сглаживаться и иметь непрерывный характер при  $\alpha > \pi/6$ .

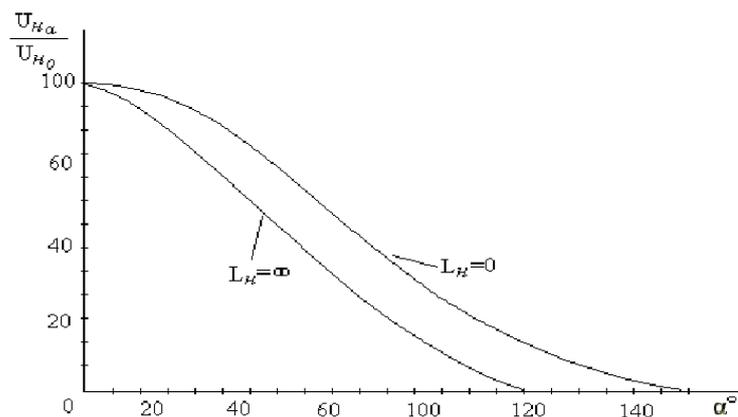


Рисунок 9.9 Характеристика управления трехфазного выпрямителя

В схему трехфазного мостового управляемого выпрямителя входят шесть тиристоров (рис. 9.10). Тиристоры  $VS1$ ,  $VS2$ ,  $VS3$  объединены в катодную группу, а тиристоры  $VS4$ ,  $VS5$ ,  $VS6$  – в анодную группу.

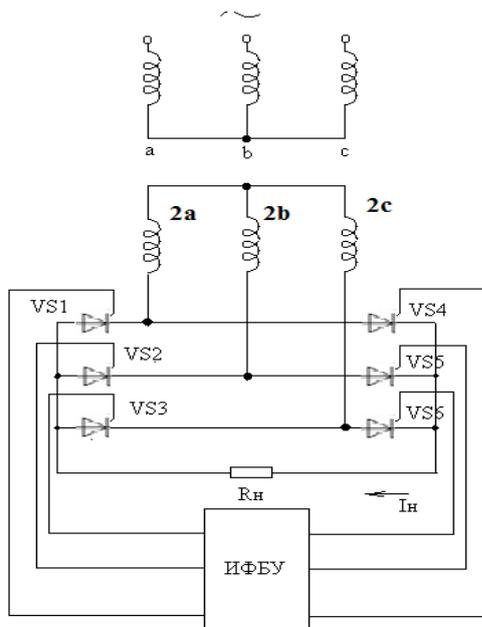


Рисунок 9.10 Схема трехфазного мостового выпрямителя

Также, как и в неуправляемом выпрямителе здесь одновременно работают два тиристора: один из анодной группы, другой – из катодной. При этом управляющий сигнал, подаваемый на тиристор катодной группы, опережает на  $180^\circ$  сигнал, поступающий на тиристор анодной группы.

Характеристики управления выглядят так же, как для выпрямителя с нулевым выводом. Отличие лишь в том, что предельным углом управления, при котором  $U_{нсп} = 0$ , является угол  $\alpha = 120^\circ$ . Внешние характеристики трехфазных управляемых выпрямителей имеют такой же вид, как внешние характеристики неуправляемых выпрямителей.

## ТЕМА 2.2 УСИЛИТЕЛИ АНАЛОГОВОГО СИГНАЛА

Электронным усилителем называют устройство, предназначенное для увеличения параметров входного электрического сигнала (напряжения, тока или мощности) за счет преобразования энергии источника питания в энергию выходного сигнала (рис. 10.1).

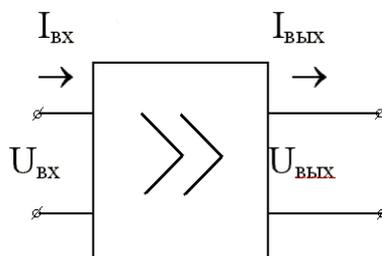


Рисунок 10.1 - К определению параметров усилителя

В зависимости от режима работы можно выделить два класса усилителей: с линейным режимом работы и нелинейным режимом работы.

Усилитель *с линейным режимом работы* обеспечивает на выходе сигнал, близкий по форме к входному. Многие усилители состоят из нескольких ступеней, которые осуществляют последовательное усиление сигнала и называются каскадами.

В усилителях *с нелинейным режимом работы* отсутствует пропорциональность между мгновенными значениями входного и выходного токов  $I$  и напряжения  $U$ . После достижения некоторой величины напряжения входного сигнала напряжение на выходе остается неизменным, т.е. ограничивается на некотором уровне. Такие усилители нашли применение в устройствах для преобразования синусоидального сигнала в импульсный.

Усилители *с линейным режимом работы* классифицируются:

- 1) в зависимости от параметра, который необходимо усилить:
  - усилители напряжения,
  - усилители тока,
  - усилители мощности;
- 2) по элементной базе:
  - ламповые усилители,
  - усилители на биполярных транзисторах,
  - усилители на полевых транзисторах.
- 3) по диапазону усиливаемых частот:
  - усилители постоянного тока (УПТ) ,
  - усилители низкой (звуковой) частоты (УНЧ, УЗЧ);
  - усилители высокой частоты (УВЧ);
  - широкополосные усилители (ШПУ);
  - избирательные усилители (ИУ).
- 4) по способу соединения каскадов между собой в многокаскадном усилителе:

- усилители с непосредственной (гальванической) или резистивной связью (используется в УПТ),
- усилители с резистивно-емкостной связью (используется в усилителях переменного напряжения: УНЧ, УВЧ, ШПУ),
- усилители с трансформаторной связью (используется в усилителях мощности).

Основные параметры усилителя:

коэффициент усиления по напряжению:  $K_U = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}}$ ;

коэффициент усиления по току:  $K_I = I_{\text{ВЫХ}} / I_{\text{ВХ}}$ ;

коэффициент усиления по мощности:  $K_P = P_{\text{ВЫХ}} / P_{\text{ВХ}} = K_U K_I$ ;

входное сопротивление  $R_{\text{ВХ}}$ ;

выходное сопротивление  $R_{\text{ВЫХ}}$ ;

полоса пропускания усилителя  $\Delta f = f_{\text{в}} - f_{\text{н}}$ , где  $f_{\text{в}}$  и  $f_{\text{н}}$  верхняя и нижняя граничные частоты, которые определяются на уровне 0,707 от  $K_{U\text{ср}}$  (т.е. коэффициент усиления на  $f_{\text{в}}$  и  $f_{\text{н}}$  уменьшается в  $\sqrt{2}$  раз).

Основные характеристики усилителя:

1) амплитудная характеристика (АХ), выражает зависимость выходного напряжения от входного  $U_{\text{ВЫХ.м}} = f(U_{\text{ВХ.м}})$  (рис. 10.2, а);

2) амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)  $K_U = f(f)$ , отражает зависимость амплитуды выходного сигнала от частоты (рис. 10.2, б);

3) фазо-частотная характеристика (ФЧХ)  $\varphi = f(f)$ , отражает зависимость угла сдвига фазы выходного сигнала по отношению к фазе входного сигнала (рис. 10.2, в).

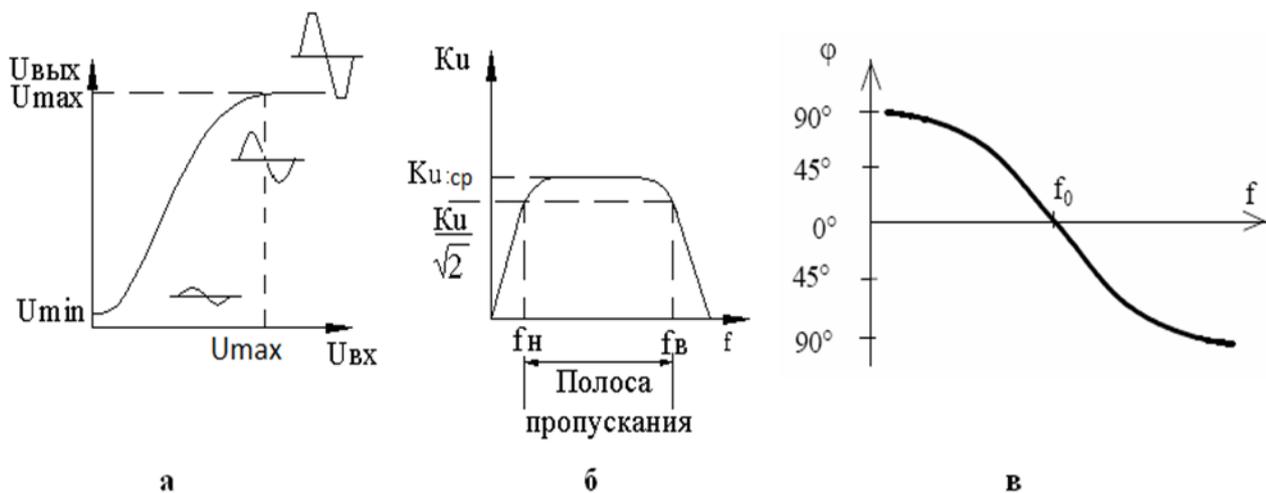


Рисунок 10.2 Характеристики усилителя: а – амплитудная; б – амплитудно-частотная; в – фазо-частотная

Амплитудная характеристика имеет линейный участок, где наблюдается пропорциональная зависимость между  $U_{\text{ВХ.м}}$  и  $U_{\text{ВЫХ.м}}$ . Шумы в усилителе и другие помехи приводят к тому, что при  $U_{\text{ВХ}} = 0$  на выходе усилителя имеется некоторое напряжение. При  $U_{\text{ВХ}} > U_{\text{ВХ.макс}}$  пропорциональность между входным и выходным напряжениями нарушается из-за нелинейности ВАХ транзистора, что приводит

к ограничению амплитуды выходного сигнала и искажению его формы. Такие искажения называются нелинейными.

Таким образом, АХ условно можно разделить на два участка:

- линейный, где наблюдается пропорциональная зависимость амплитуды выходного напряжения от амплитуды входного сигнала;
- нелинейный, где пропорциональная зависимость нарушается.

Такие искажения выходного сигнала, которые возникают ввиду нелинейности входных и выходных ВАХ транзисторов, называют нелинейными и оцениваются коэффициентом нелинейных искажений [6]:

$$k = \frac{\sqrt{P_2 + P_3 + P_4 + \dots}}{\sqrt{P_1}} \cdot 100\%$$

где  $P_1$  – мощность в нагрузке, обусловленная основной гармонической составляющей напряжения;  $P_2, P_3, P_4 \dots$  – мощности, выделяемые в нагрузке под воздействием 2-ой, 3-ей, 4-ой и т.д. гармонических составляющих напряжения.

Частотные искажения сигнала на АЧХ обусловлены наличием в схеме усилительного каскада частотно-зависимых элементов (емкостей). Уменьшение  $K_U$  в области нижних и верхних частот (на частотах меньше  $f_H$  и больше  $f_B$ ) определяется частотными искажениями сигнала. Количественно эти искажения оцениваются коэффициентом частотных искажений:

$$M_H = M_B = K_{U_{cp}} / K_{U_{H(B)}} \approx \sqrt{2},$$

где  $K_{U_{cp}}$  – коэффициент усиления в области средних частот.

Появление фазового сдвига на ФЧХ объясняется задержкой сигнала в усилителе. ФЧХ усилителя показывает, что в области нижних частот выходное напряжение опережает по фазе входное, а в области верхних частот отстает от него. В предельных случаях при  $f \rightarrow 0$  и  $f \rightarrow \infty$  угол сдвига фаз стремится к  $\pi/2$  и  $-\pi/2$  соответственно. Фазовые и частотные искажения сигнала, вносимые усилителем, называют линейными искажениями, так как обусловлены линейными элементами схемы и не приводят к искажению формы выходного сигнала.

### Принцип построения усилительных каскадов

Рассмотрим структурную схему [3, 5] (рис. 10.3).

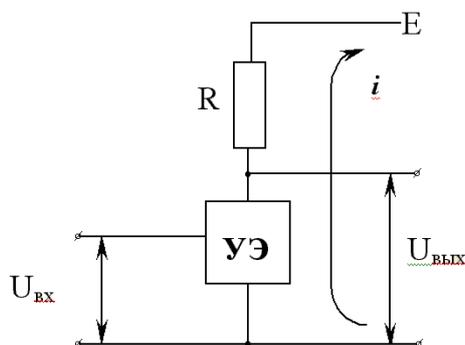


Рисунок 10.3 Структурная схема усилителя

Основными элементами каскада являются усилительный элемент УЭ, которым является биполярный или полевой транзистор, резистор  $R$  и источник питания  $E$  [2].

Процесс усиления основывается на преобразовании энергии источника постоянного напряжения  $E$  в энергию переменного напряжения в выходной цепи за счет изменения сопротивления УЭ по закону, который задается входным сигналом.

Одним из наиболее распространенных усилительных каскадов является каскад с общим эмиттером ОЭ (рис. 10.4).

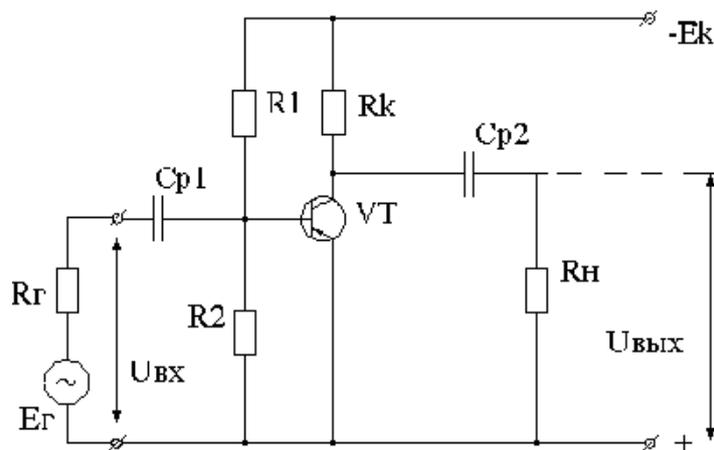


Рисунок 10.4 - Схема усилительного каскада с ОЭ

Основные элементы схемы:

- источник питания  $E_K$  («+»  $E_K$  для  $n-p-n$ , «-»  $E_K$  для  $p-n-p$ );
- биполярный транзистор  $n-p-n$ -типа ( $VT$ );
- сопротивление в цепи коллектора  $R_K$ , с помощью которого создается выходное напряжение.

К вспомогательным элементам каскада относятся:

- разделительный конденсатор  $C_{P1}$ , который не пропускает постоянную составляющую тока, т.е. исключает шунтирование входной цепи каскада цепью источника питания по постоянному току;
- разделительный конденсатор  $C_{P2}$ , не пропускает постоянной составляющей напряжения в нагрузку или в следующий каскад;
- делитель напряжения  $R1/R2$ , включенный в цепь базы. Обеспечивает требуемую работу транзистора в режиме покоя, т.е. в отсутствие входного сигнала.

### Особенности многокаскадных усилителей

В многокаскадных усилителях число каскадов зависит от требуемых значений коэффициентов усиления  $K_U$ ,  $K_I$ ,  $K_P$ . Чем больше необходимо получить коэффициент усиления, тем больше количество каскадов, последовательно соединенных между собой. Структурная схема многокаскадного усилителя приведена на рис. 10.5.

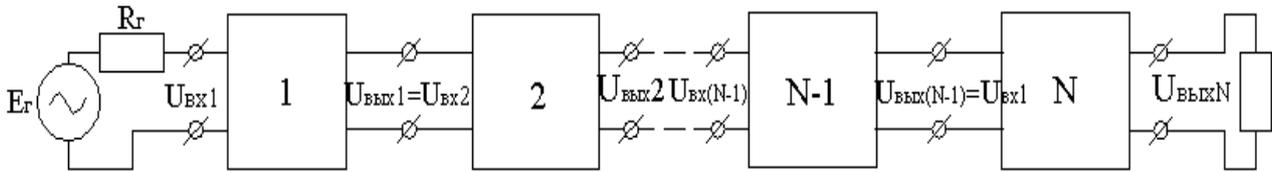


Рисунок 10.5 Структурная схема многокаскадного усилителя

Коэффициент усиления многокаскадного усилителя равен произведению коэффициентов усиления, входящих в него каскадов:

$$K_U = \frac{U_H}{E_\Gamma} = \frac{U_{\text{ВЫХ1}}}{E_\Gamma} \cdot \frac{U_{\text{ВЫХ2}}}{U_{\text{ВХ2}}} \dots \frac{U_{\text{ВЫХN}}}{U_{\text{ВХN}}} = K_{U1} \cdot K_{U2} \dots K_{UN}$$

Следует отметить, что с увеличением числа каскадов коэффициент частотных искажений увеличивается:  $M = M_1 M_2 M_3 \dots M_n$  и, как следствие,  $\Delta f$  усилителя уменьшается.

Угол фазового сдвига в многокаскадном усилителе равен сумме углов фазовых сдвигов, создаваемых всеми конденсаторами в схеме:  
 $\varphi_H = \varphi_{\text{нр1}} + \varphi_{\text{нр2}} + \dots + \varphi_{\text{нрn}}$

## УСИЛИТЕЛЬНЫЙ КАСКАД

### Принцип действия каскада на биполярном транзисторе с общим эмиттером

Основными элементами каскада являются управляемый элемент - биполярный транзистор  $VT$ , включение которого по схеме с общим эмиттером (ОЭ) обеспечивает наибольший коэффициент усиления по току, напряжению, мощности.

В выходную цепь каскада включается источник  $E_k$ , за счет которого происходит усиление мощности выходного сигнала. Разделительные конденсаторы  $C1$  и  $C2$  на рабочей частоте имеют сопротивления  $X_{C1}$  и  $X_{C2}$  близкие к нулю. Источник усиливаемого сигнала подключается к входной цепи каскада (между базой и эмиттером) через конденсатор  $C1$ , а нагрузочное устройство с сопротивлением  $R_n$  - к выходу каскада через конденсатор  $C2$ . Конденсаторы  $C1$  и  $C2$  разделяют эти цепи по постоянному току и связывают их по переменному. Резистор  $R_k$  оказывает влияние на коэффициент усиления каскада по напряжению, включается в коллекторную цепь транзистора. Звено  $R_э - C_э$  обеспечивает температурную стабилизацию работы каскада.

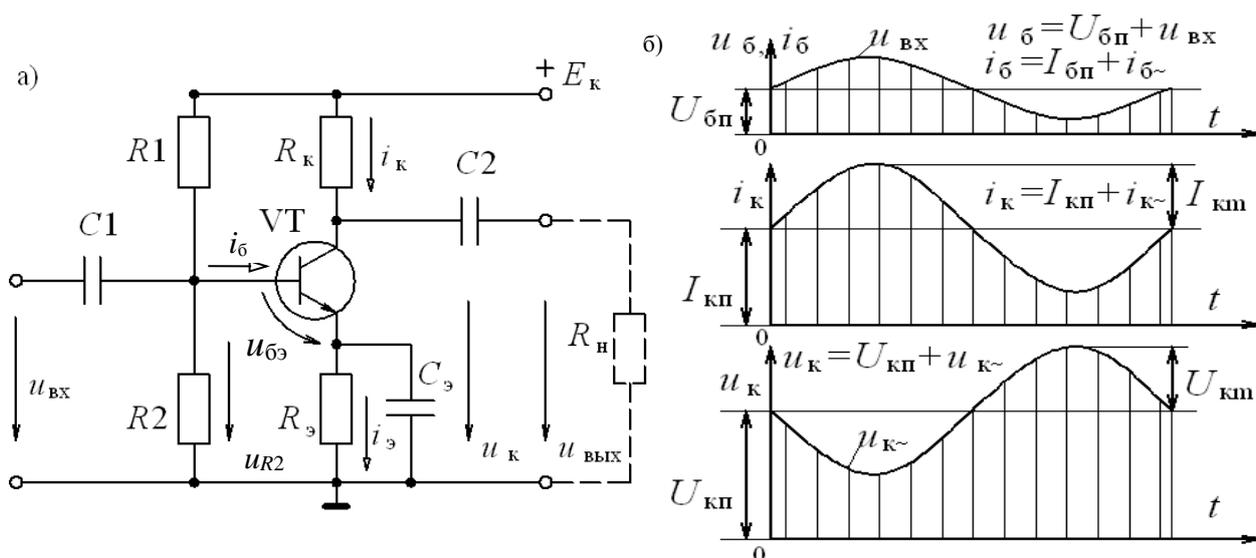


Рисунок 11.1 Усилительный каскад на биполярном транзисторе:  
 а) схема каскада, б) временные диаграммы

Напряжение покоя между базой и эмиттером  $U_{бп}$  определяется делителем напряжения  $R1 - R2$  и резистором  $R_э$ , в результате возникают токи базы  $I_{бп}$  и коллектора  $I_{кп}$ . Режим работы усилителя при  $u_{вх} = 0$  называют режимом покоя.

При подаче входного сигнала  $u_{вх}$  на постоянную составляющую тока  $I_{бп}$  накладывается переменная составляющая  $i_{бэ}$ , и ток базы становится пульсирующим  $i_б$  (рис. 11.1, б). Он вызывает пульсацию тока коллектора  $i_к = \beta i_б$  и коллекторного напряжения  $u_к$ . Переменная составляющая напряжения  $u_{к~}$  через конденсатор  $C2$  передается в нагрузку:  $u_n = u_{вых}$ .

По второму закону Кирхгофа для выходной цепи

$$E_K = u_K + R_K i_K = (U_{кп} + u_{к\sim}) + R_K (I_{кп} + i_{к\sim}).$$

Так как  $E_K = \text{const}$  и режим по постоянному току не меняется, то видно, что с увеличением тока  $i_{к\sim}$  напряжение  $u_{к\sim}$  уменьшается, оно сдвинуто по фазе относительно входного напряжения на  $180^\circ$  (рис. 11.1, б).

### Температурная стабилизация каскада

Недостатком полупроводниковых усилителей является зависимость их параметров от температуры. Для уменьшения влияния температуры в рассмотренном усилительном каскаде с ОЭ применена эмиттерная температурная стабилизация: в цепь эмиттера включен резистор  $R_3$ , шунтированный конденсатором  $C_3$ . С увеличением температуры возрастают токи транзистора  $I_{кп}$ ,  $I_{эп}$ , но возникающее падение напряжения на резисторе  $R_3$  уменьшает напряжение  $U_{бэп} = U_{R2} - R_3 I_{эп}$  (при  $U_{R2} = \text{const}$ ), что повлечет уменьшение токов  $I_{бп}$ ,  $I_{эп}$ ,  $I_{кп}$ . Стабилизация тем эффективнее, чем больше  $R_3$ , но падение напряжения на  $R_3$  уменьшает  $U_{бэ}$  и снижает коэффициент усиления, что нежелательно. Это явление называют отрицательной обратной связью (ООС). Для ослабления ООС по переменному напряжению резистор  $R_3$  шунтируют конденсатором  $C_3$ , сопротивление которого  $X_{C3} \ll R_3$  для всех частот  $u_{вх}$ . Тогда падение напряжения на участке  $R_3 - C_3$  от переменной составляющей  $i_3$  незначительно, и усиливаемое напряжение практически не меняется:  $u_{бэ} \approx u_{вх}$ .

### Расчет каскада

Коэффициент усиления и другие параметры усилителя (входное и выходное сопротивления) рассчитываются аналитически с помощью  $h$ - параметров транзистора. Для этого используется схема замещения усилительного каскада с ОЭ для переменных составляющих токов и напряжений (рис.11.2).

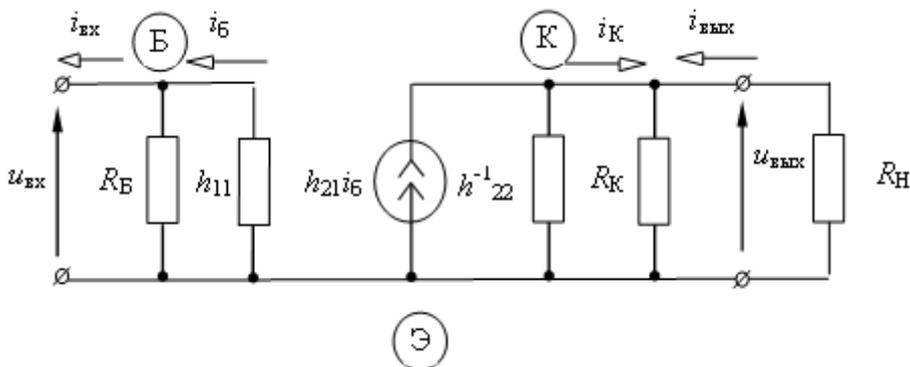


Рисунок 11.2 Схема замещения каскада в  $h$ - параметрах

В схеме замещения усилительного каскада не учтены конденсаторы и источник питания, так как переменные составляющие напряжения на них принимаются равными нулю, поэтому резистивный элемент  $R_Н$  включен между коллектором и эмиттером транзистора, т. е. между точками К и Э.

Делитель напряжения, резисторы  $R1 - R2$  относительно входного сигнала включены параллельно с транзистором, входное сопротивление которого

представляет величина  $h_{11}$

$$R_B = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2};$$

Определяем входное сопротивление каскада

$$R_{BX} = \frac{R_B \cdot h_{11}}{R_B + h_{11}}$$

Коэффициент усиления по напряжению находим с помощью уравнений для входной и выходной цепей (рис. 11.2), так как  $h_{22}^{-1} \gg R_K$ , то им можно пренебречь:

$$u_{BX} = i_{\bar{6}} \cdot h_{11};$$

$$u_{ВЫХ} = -h_{21} \cdot i_{\bar{6}} \cdot \frac{R_K \cdot R_H}{R_K + R_H};$$

$$K_u = \frac{u_{ВЫХ}}{u_{BX}} = -\frac{h_{21}}{h_{11}} \cdot \frac{R_K \cdot R_H}{R_K + R_H}$$

(минус показывает, что  $u_{ВЫХ}$  в противофазе с  $u_{BX}$ ).

Коэффициент усиления по току

$$i_{BX} = \frac{u_{BX}}{R_{BX}}; \quad i_{ВЫХ} = \frac{u_{ВЫХ}}{R_H};$$

$$K_I = \frac{i_{ВЫХ}}{i_{BX}} = \frac{u_{ВЫХ}}{u_{BX}} \cdot \frac{R_{BX}}{R_H} = K_U \cdot \frac{R_{BX}}{R_H}$$

Коэффициент усиления мощности

$$K_P = K_U \cdot K_I$$

Расчет усилительного каскада с ОЭ можно провести графически. Для этого на семействе коллекторных (выходных) характеристик (рис. 11.3) необходимо провести из точки  $E_K$  на оси абсцисс линию нагрузки, удовлетворяющую уравнению  $U_K = E_K - R_K I_K$ . По точкам пересечения ее с выходными характеристиками определяется коллекторный ток  $I_K$ , напряжения  $U_K$  и  $U_{R_K}$  для данного сопротивления  $R_K$  и различных значений тока базы  $I_{\bar{6}}$

Анализ работы усилительного каскада проводится с помощью передаточной (переходной) характеристики  $I_K(I_{\bar{6}})$ , которая строится по точкам пересечения линии нагрузки с выходными характеристиками транзистора. На рис 11.3 приведена входная характеристика  $U_{\bar{6}\bar{9}}(I_{\bar{6}})$ , повернутая на  $90^\circ$ , и дано построение переходной характеристики.

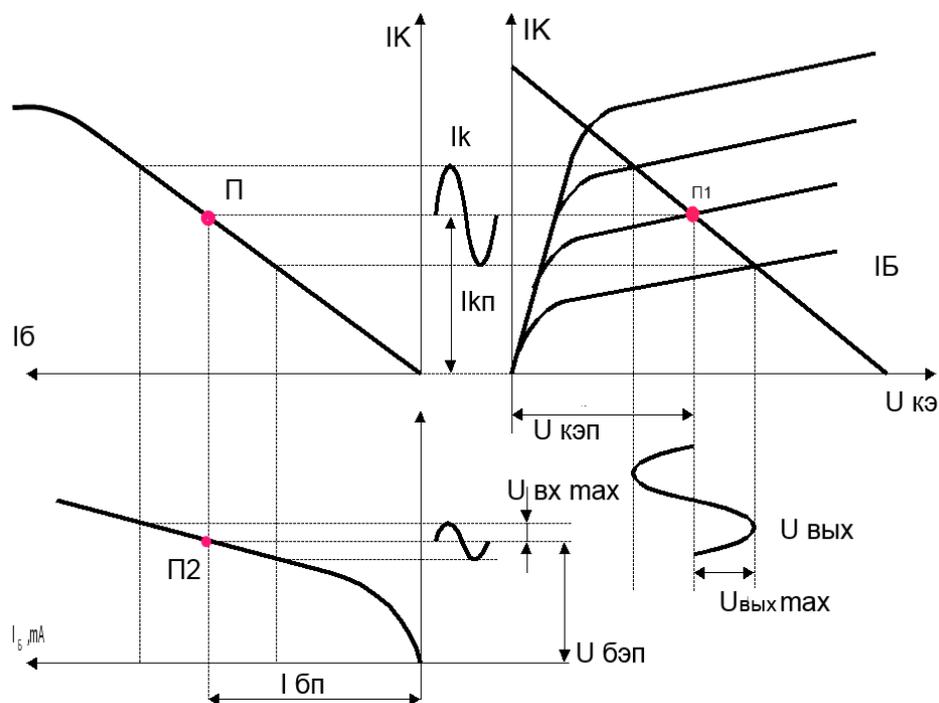


Рисунок 11.3 Графоаналитический расчет каскада

Видно, что переходная характеристика имеет практически линейный участок при изменении тока базы от нуля до некоторого значения, зависящего от типа транзистора и сопротивления  $R_k$ . Сопротивление резистора  $R_k$  выбирают, исходя из требуемого усиления входных сигналов

Точку **П** определяющую режим покоя транзистора выбирают в середине линейного участка передаточной характеристики, для усиления без искажения положительной и отрицательной полуволн входного напряжения. При проецировании точки **П** на семейство выходных характеристик транзистора находим положение **П1**, что позволяет определить  $I_{кп}$  и  $U_{кэп}$ . Проекция **П** на входную характеристику транзистора определяет положение **П2** и значение  $I_{бп}$  и  $U_{бэп}$ . Расчет делителя напряжения  $R1$  и  $R2$  производят задавшись значениями  $I_{бп}$  и  $U_{бэп}$ .

### Режимы работы усилительных каскадов

В зависимости от положения рабочей точки **П** в режиме покоя на характеристиках транзисторов и величины входного сигнала различают три основных режима работы усилительных каскадов (или класса усиления): А, В, С. Они отличаются нелинейными искажениями и КПД.

**Режим А** характеризуется тем, что рабочая точка **П** в режиме покоя находится на линейном участке входной и передаточной характеристик транзистора, а величина входного сигнала обеспечивает работу только на линейном участке. В этом случае нелинейные искажения усиленного напряжения будут минимальными, например, при подаче на вход усилительного каскада синусоидального напряжения форма выходного напряжения будет практически синусоидальной. Режим А широко применяется в усилителях

напряжения. Его недостаток - низкий КПД, который определяется отношением выходной мощности к мощности, потребляемой усилителем от источника питания  $P_{\text{п}} = U_{\text{кп}} I_{\text{кп}}$ . Теоретический КПД равен 0,5; реальный - редко превышает 0,35. Режим усиления класса А применяется в каскадах предварительного усиления.

**В режиме В** рабочую точку **П** выбирают в начале передаточной характеристики транзистора, при  $I_0 = 0$ . Эту точку называют точкой отсечки. Переменные составляющие тока и напряжения  $u_{\text{вых}}$  транзистора возникают лишь в положительные полупериоды входного напряжения. Выходное напряжение имеет форму полусинусоиды, т.е. нелинейные искажения очень большие. Режим В используется в двухтактных усилителях мощности, характеризуется более высоким КПД (0,6 ... 0,7).

Иногда используют режим работы, промежуточный между режимами А и В. Его называют режимом АВ. Рабочая точка покоя при этом находится между положениями рабочей точки в режимах А и В, КПД больше, чем в режиме А, а нелинейные искажения меньше, чем в режиме В.

**В режиме С** рабочая точка покоя находится за точкой отсечки при отрицательном смещении на базе транзистора, и ток в транзисторе возникает только в течение некоторой части положительного полупериода входного напряжения. Каскад имеет большие искажения усиливаемого напряжения, но высокий КПД, приближающийся к 1. Режим С используют в избирательных усилителях, автогенераторах, в выходных каскадах большой мощности (свыше 100 Вт), предназначенных для поддержания незатухающих колебаний в резонансных контурах.

## УСИЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ

Усилительные каскады, обеспечивающие получение максимальной мощности в нагрузочном устройстве, называются усилителями мощности

### Особенности и классификация усилителей мощности

Усилители мощности (УМ) классифицируются по следующим признакам:

По элементной базе:

- УМ на биполярных транзисторах, включенных по схеме ОЭ, ОК, ОБ;
- УМ на полевых транзисторах, включенных по схеме ОИ, ОС.

По используемому классу усиления:

- однотактные (используют режим А);
- двухтактные (используют режим В или АВ).

По способу подключения нагрузки:

- трансформаторные;
- бестрансформаторные: с двумя источниками питания и с одним источником питания.

Основные параметры УМ:

- 1) коэффициент усиления по мощности  $K_p$ ;
- 2) выходное сопротивление  $R_{\text{вых}}$ , для получения максимальной мощности в нагрузочном устройстве  $R_{\text{вых}} = R_{\text{н}}$ ;
- 3) КПД (зависит от класса усиления).

Расчет основных величин, характеризующих показатели работы УМ, проводят обычно графоаналитическим методом, с помощью характеристик транзистора. В УМ нашли применение три класса усиления А, АВ, В, отличающиеся положением точки покоя на линии нагрузки. На рисунке 12.1 приведен пример коллекторных характеристик транзистора с ОЭ, на которые нанесены рабочие точки в режимах А и В.

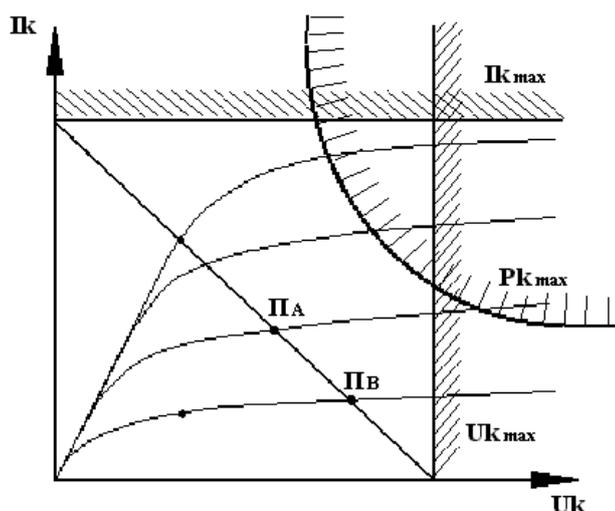


Рисунок 12.1 Для расчета параметров УМ

Т.к. чаще всего в УМ используют УК с общим эмиттером, то на семейство коллекторных характеристик можно нанести линии, соответствующие

пределными режимами работы, которые, в свою очередь, определяются предельными эксплуатационными величинами (рис. 12.1):

- максимальная мощность  $P_{\max} = P_{\kappa \max}$ ;
- максимальное напряжение  $U_{\kappa \max}$ ;
- максимальный ток коллектора  $I_{\kappa \max}$ .

Площадь треугольника MQN, образованного линией нагрузки и линиями, параллельными осям координат и проведенными из точек M и N, будет пропорциональна мощности  $P_{\max}$ , которую можно получить от транзистора в заданных условиях.

Коэффициент усиления по мощности находят по формуле:

$$K_p = P_{\kappa} / P_{\delta},$$

где  $P_{\delta} = 0,5U_{\delta m}I_{\delta m}$ , а  $P_{\kappa} = 0,5U_{\max}I_{\kappa \max}$ .

Если в результате расчета окажется, что получаемая в нагрузочном резисторе мощность меньше требуемой, то необходимо использовать более мощный транзистор.

### Однотактный трансформаторный усилитель мощности

Однотактный УМ используется для получения небольших мощностей (рис. 12.2).

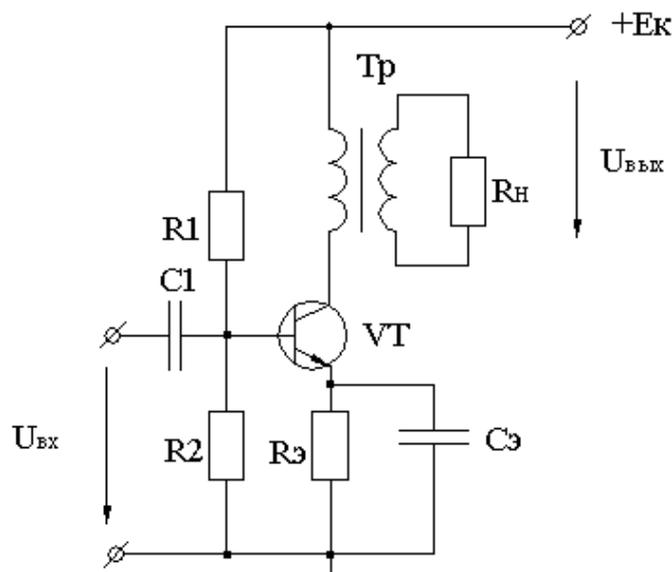


Рисунок 12.2 Однотактный трансформаторный УМ

#### Назначение элементов

1) понижающий трансформатор Tr ставят для согласования сопротивлений  $R_{\text{н}}$  и  $R_{\text{вых}}$  усилителя мощности с коэффициентом  $n = w_1/w_2 = \sqrt{R_{\text{вых}} / R_{\text{н}}}$ , где  $w_1$  и  $w_2$ -число витков первичной и вторичной обмоток. Это значит, что при определенном  $n$  можно добиться равенства  $R_{\text{вых}} = R_{\text{н}}$ , т.е. выполнить условие получения  $P_{\max}$  в нагрузочном устройстве;

2) делитель  $R1/R2$  фиксирует по постоянному току потенциал базы;

3) сопротивление  $R_3$  и конденсатор  $C_3$  обеспечивают эмиттерную температурную стабилизацию;

4) разделительный конденсатор  $C1$ , который не пропускает постоянную составляющую тока, т.е. исключает шунтирование входной цепи каскада цепью источника питания по постоянному току.

Однотактный УМ работает в режиме усиления класса А и усиление входного сигнала происходит за один такт работы транзистора.

### Двухтактный трансформаторный усилитель мощности

Двухтактный УМ состоит из двух симметричных «плеч» (рис. 12.3). Транзисторы  $VT1$  и  $VT2$ , которые подбирают с максимально близкими характеристиками, работают в одинаковом режиме. Единственным отличием в работе «плеч» УМ является противофазность токов и напряжений в цепях баз транзисторов.

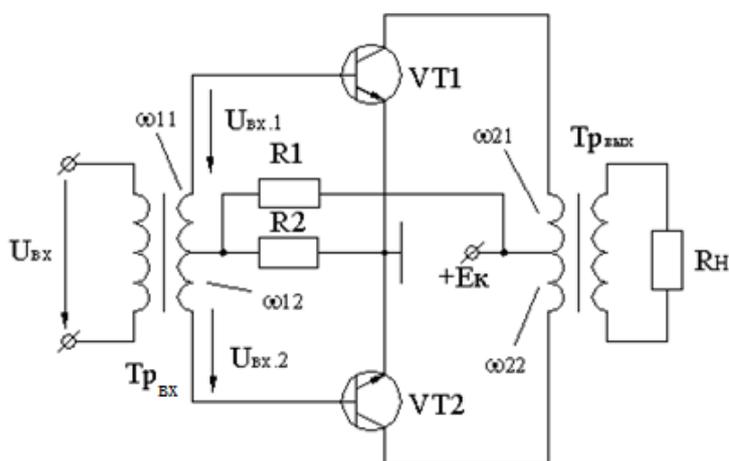


Рисунок 12.3 Двухтактный трансформаторный УМ

Назначение элементов двухтактного УМ аналогично назначению соответствующих элементов однократного УМ с учетом того, что они обслуживают два транзистора. Входной трансформатор  $Tr_{вх}$  обеспечивает получение двух одинаковых по модулю, но противофазных напряжений  $U_{вх1}$  и  $U_{вх2}$ . Выходной трансформатор  $Tr_{вых}$  суммирует переменные выходные токи и напряжения транзисторов. К вторичной обмотке  $Tr_{вых}$  подключен нагрузочный резистор. Преимущества двухтактных усилителей наиболее ощутимы при использовании режима В.

При подаче входного сигнала, начинающегося с положительной полуволны, на вторичной обмотке  $w_{11}$  за счет самоиндукции  $Tr_{вх}$  действует отрицательная полуволна относительно общей точки обмоток, а на вторичной обмотке  $w_{12}$  действует положительная полуволна. В результате  $VT2$  остается закрытым, а  $VT1$  открывается и через него течет коллекторный ток  $i_{к1}$ . В обмотке  $w_{21}$   $Tr_{вых}$  создается напряжение  $U_{21}$ , на нагрузке опять же за счет самоиндукции действует положительная полуволна.

При поступлении на вход каскада отрицательной полуволны напряжения, полярность напряжений на вторичных обмотках  $Tr_{вх}$  изменяется на обратную. Теперь

закрытым остается транзистор  $VT1$ , а в усилении сигнала будет участвовать  $VT2$ . На обмотке  $w_{22}$   $Tr_{\text{вых}}$  от протекания  $i_{k2}$  от  $VT2$  создается напряжение той же величины, которое будет трансформироваться в нагрузочную обмотку  $w_H$  с обратной полярностью. На нагрузке получим отрицательную полуволну напряжения.

Таким образом, процесс усиления входного сигнала осуществляется в два такта работы схемы. Первый такт сопровождается усилением одной полуволны с участием одного транзистора, а второй такт – усилением другой полуволны с участием другого транзистора [3, 14, 15].

### Бестрансформаторные усилители мощности

Двухтактные каскады усиления мощности выполняют и без использования трансформаторов, что обусловлено необходимостью уменьшения массы, габаритов и стоимости УМ.

Собирают такой УМ из транзисторов разных типов (рис. 12.4), где транзистор  $VT1$ -типа  $p-n-p$ , а транзистор  $VT2$ -типа  $n-p-n$ .

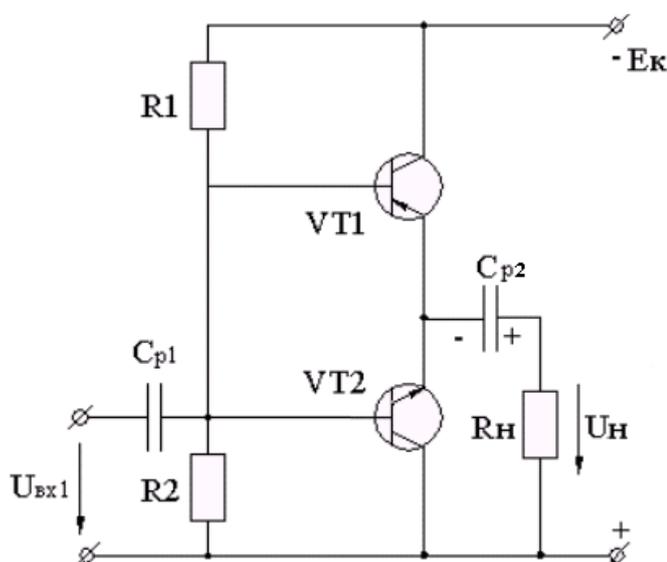


Рисунок 12.4 Бестрансформаторный УМ

Конденсатор  $C_{p1}$  разделяет по постоянному току источник сигнала и входную цепь усилителя мощности. Конденсатор  $C_{p2}$  разделяется по току нагрузочный резистор и эмиттерные цепи транзисторов. На базы транзисторов действует одно и то же переменное напряжение  $U_{вх}$ . Однако, в силу различной структуры транзисторов токи в цепях противофазные. Нагрузочный резистор подключен к общей точке транзисторов, поэтому переменные токи в нем имеют одинаковое направление, а результирующий ток в два раза превышает переменный ток одного транзистора.

Существуют схемы бестрансформаторных усилителей мощности, где на входе используются два противофазных сигнала, которые создаются с помощью предвыходного фазоинверсного каскада. Эти схемы различаются двумя способами подключения нагрузки к выходу каскада и, соответственно, двумя способами осуществления питания схемы [1].

При первом способе каскад питают от двух источников  $E_{к1}$  и  $E_{к2}$ , имеющих общую точку, а нагрузку подключают между точкой соединения эмиттера и коллектора транзисторов и общей точкой источников питания (рис. 12.5).

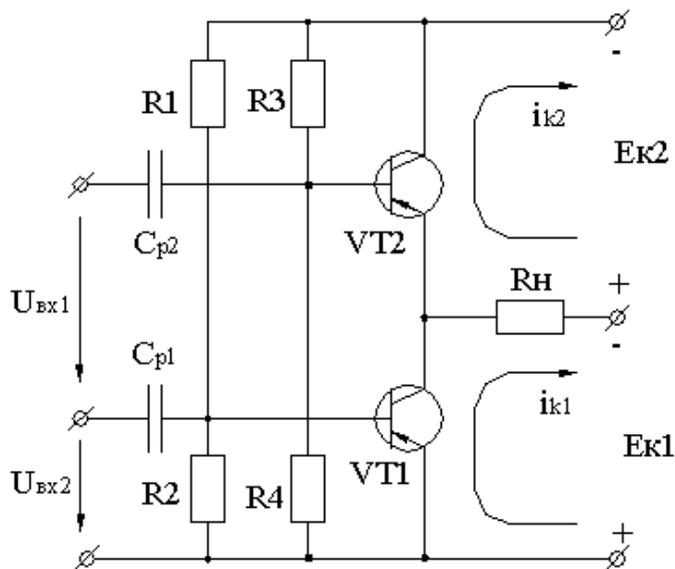


Рисунок 12.5 Бестрансформаторный УМ с двумя источниками питания

При втором способе питание каскада осуществляется от одного общего источника, а нагрузку подключают через конденсатор большой емкости (рис. 12.6) [2].

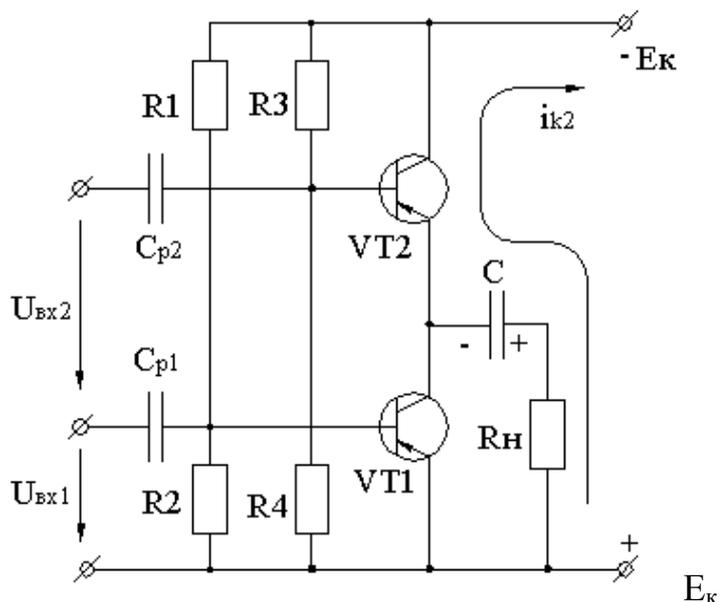


Рисунок 12.6 Бестрансформаторный УМ с одним источником питания

В отсутствии сигналов на входе  $U_{вх1}$  и  $U_{вх2}$  конденсатор  $C$  заряжен до напряжение  $0,5E_{к}$ . В такте работы транзистора  $VT1$ ,  $VT2$  закрыт и конденсатор выполняет функцию источника питания нагрузки. В такте работы  $VT2$  ток нагрузки протекает через источник питания  $E_{к}$ . При этом ток  $i_{к2}$ , протекающий

через конденсатор  $C$ , наполняет его энергией, компенсируя тем самым отданную в нагрузку энергию в предыдущем такте.  $VT1$  и  $VT2$  в схемах с двумя противофазными входными сигналами имеют различные способы включения:  $VT1$ -по схеме ОЭ,  $VT2$ - по схеме ОК, а это значит, что коэффициенты усиления по напряжению различны и должны быть приняты меры по выравниванию коэффициентов усиления для обеих полувольт входного сигнала. Эту задачу решают обеспечением соответствующих коэффициентов усиления по двум входам фазоинверсного каскада.

## ТЕМА 2.3. УСИЛИТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Операционным усилителем (ОУ) называют дифференциальный усилитель постоянного тока, обладающий большим коэффициентом усиления  $K_{U_{OY}} = 10^3 - 10^6$ . ОУ предназначен для выполнения различных операций над аналоговыми сигналами: усиление и ослабление, сложение и вычитание, интегрирование и дифференцирование, сравнение и т.д. Все эти операции ОУ выполняет с помощью цепей обратной связи, в состав которых могут входить сопротивления, емкости, индуктивности и др.

ОУ имеет дифференциальный вход, реализованный через два вывода инвертирующий (И) и неинвертирующий (Н), один общий выход, питание обеспечивается двухполярным источником  $E_{\Pi}$ . (рис. 13.1).

Идеальный ОУ обладает следующими свойствами:

- коэффициент передачи ОУ без обратной связи равен бесконечности;
- входной ток равен нулю;
- напряжение смещения и ток смещения нуля на входе ОУ равны нулю;
- входное сопротивление ОУ равно бесконечности;
- выходное сопротивление ОУ равно нулю

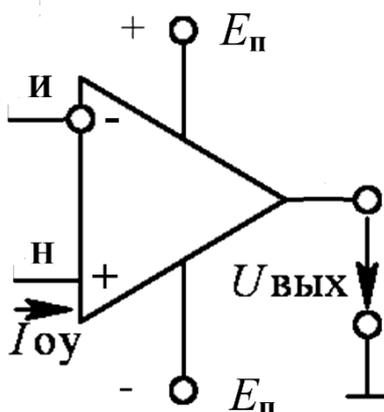


Рисунок 13.1 Условное изображение ОУ

Структурная схема ОУ представлена на рисунке 13.2.



Рисунок 13.2 Структурная схема ОУ

Основу ОУ составляет дифференциальный каскад [4], который используется в качестве входного каскада усилителя.

Выходным каскадом ОУ обычно является эмиттерный повторитель (ЭП), который обеспечивает нагрузочную способность всей схемы. Т.к.  $K_U$  (ЭП) = 1, то необходимое значение  $K_U$  ОУ обеспечивается подключением дополнительных каскадов между дифференциальным каскадом и ЭП. В зависимости от количества используемых каскадов, ОУ подразделяются на двух- и трехкаскадные. В трехкаскадных ОУ входной дифференциальный каскад обычно выполняют с резистивными нагрузками, а в 2-х каскадных - с динамическими нагрузками.

### Характеристики ОУ

Важнейшими характеристиками ОУ являются его амплитудные характеристики и амплитудно-частотные характеристики.

Амплитудная характеристика отражает две зависимости  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$  по инвертирующему и неинвертирующему входам. Эти характеристики снимаются при подаче сигнала на один из входов при нулевом сигнале на другом (рисунок 13.3). На характеристике горизонтальные участки кривых соответствуют нелинейному режиму работы ОУ. При изменении напряжения входного сигнала на этих участках  $U_{\text{вых}}$  остается без изменения и определяется  $U_{\text{вых.мах}}^+$  и  $U_{\text{вых.мах}}^-$ , которые близки к напряжению источников питания  $E_{\text{п}}$ .

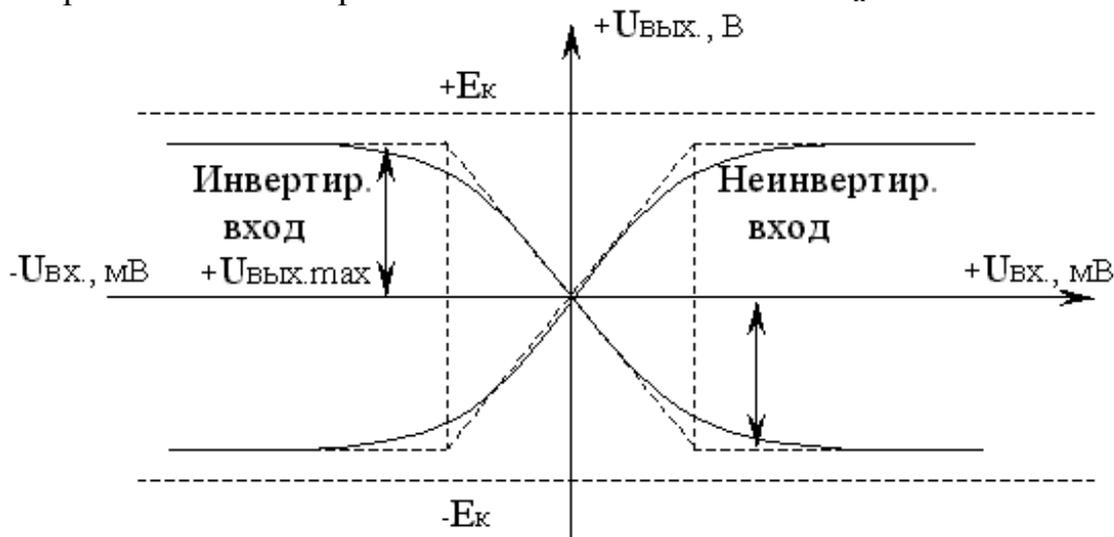


Рисунок 13.3 Амплитудные характеристики ОУ

Наклонному участку кривых соответствует пропорциональная зависимость напряжения  $U_{\text{вых.}}$  от напряжения  $U_{\text{вх}}$  (линейный режим). Угол наклона определяется коэффициентом усиления  $K_{UOУ} = \Delta U_{\text{вых.}} / \Delta U_{\text{вх.}}$ . Значение  $K_{UOУ}$  зависит от типа ОУ и величины отрицательной обратной связи усилителя, может принимать значение от нескольких сотен до сотен тысяч.

Когда кривые проходят через 0, это соответствует напряжениям  $U_{\text{вых.}} = 0$  и  $U_{\text{вх.}} = 0$ . Такое состояние называется балансом ОУ. Однако для реальных ОУ условие баланса обычно не выполняется (наблюдается разбаланс). При напряжении  $U_{\text{вх.}} = 0$ ,  $U_{\text{вых.}}$  может быть чуть больше или чуть меньше нуля.

Напряжение, при котором  $U_{\text{вых.}} = 0$ , называется входным напряжением смещения нуля  $U_{\text{см0}}$ . Оно определяет значение напряжения, которое необходимо подать на вход ОУ для создания баланса. Основной причиной разбаланса является разброс параметров дифференциального усилительного каскада (обычно транзисторов).

Другой важной характеристикой ОУ является амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) (рис. 13.4).

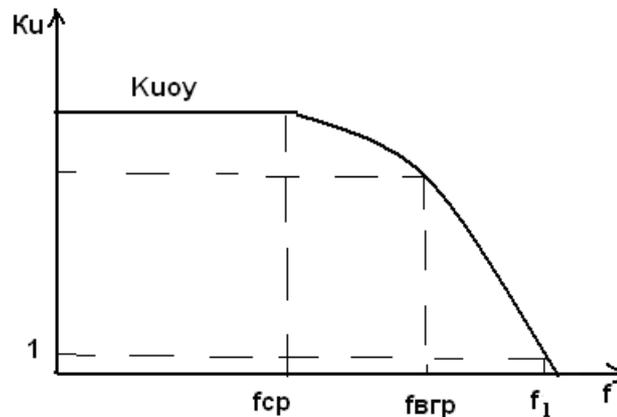


Рисунок 13.4 Амплитудно-частотная характеристика операционного усилителя

#### Параметры ОУ

Входные параметры:

- а) входное сопротивление  $R_{\text{вх}}$ ;
- б) входные токи смещения;
- в) разность и дрейф токов смещения.

Выходные параметры:

- а) выходное сопротивление  $R_{\text{вых}}$ ;
- б) максимальное выходное напряжение  $U_{\text{max вых}}$ ;
- в) выходной ток  $I_{\text{вых}}$ .

Энергетические параметры:

- а) максимальные потребляемые токи от обоих источников питания;
- б) суммарная потребляемая мощность.

Частотные параметры (определяют по АЧХ ОУ, рис. 12.4):

- а) частота среза  $f_{\text{ср}}$ , начиная с которой АЧХ имеет спадающий характер.
- б) частота единичного усилителя  $f_1$ , при которой  $K_{\text{УОУ}} = 1$ .
- в) граничная частота  $f_{\text{гр}}$ , которой соответствует снижение коэффициента

усиления ОУ в  $\sqrt{2}$  раз.

Скоростные (динамические) параметры:

- а) скорость нарастания выходного напряжения (скорость отклика);
- б) время установления выходного напряжения.

Большинство ОУ изготавливается в виде интегральных микросхем по полупроводниковой технологии (серии К140, К153, К740 и др.), некоторые – по гибридной (серии 284, 286).

Примеры интегральных ОУ: К140УД21, К140УД24 (высокоточные); К157УД1, К1408УД1 (мощные и высоковольтные); К140УД10, К544УД2 (быстродействующие).

Аналоговая схемотехника на основе операционных усилителей позволяет создавать различные вычислительные схемы. На основе операционных усилителей могут быть реализованы операции сложения и вычитания, дифференцирования и интегрирования. Недостатком этих вычислительных схем является невысокая точность вычислений. Однако этой точности в целом ряде случаев бывает вполне достаточно.

Вычислительные схемы на ОУ

*Инвертирующий усилитель* (рис. 13.5).

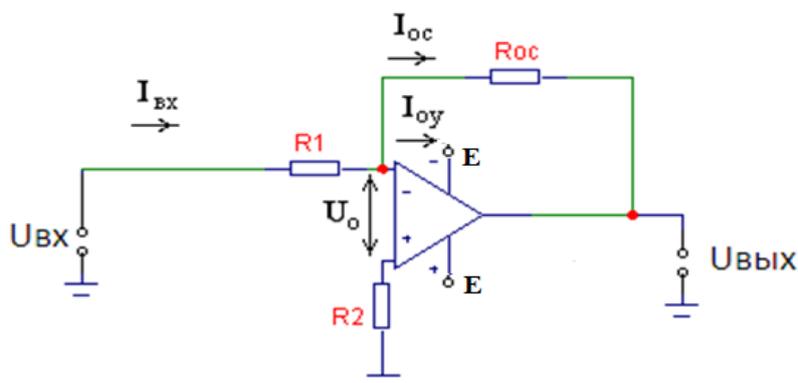


Рисунок 13.5 Инвертирующий усилитель

Инвертирующий усилитель изменяет знак выходного сигнала относительно входного и создается введением по инвертирующему входу ОУ с помощью резистора  $R_{ос}$  отрицательной обратной связи по напряжению. Неинвертирующий вход заземляется. На инвертирующий вход через резистор  $R1$  подается входной сигнал. Если принять значение  $R_{вхОУ} = \infty$  и входной ток ОУ  $I_{ОУ} = 0$ , то ток  $I_{вх} = I_{ос}$ , и тогда  $U_{вх} - U_0 / R1 = U_{вых} - U_0 / R_{ос}$ .

При  $K_{УОУ} \rightarrow \infty$  напряжение на входе ОУ  $U_0 = U_{вых} / K_{УОУ} \rightarrow 0$ , и тогда

$$U_{вх} / R1 = -U_{вых} / R_{ос}.$$

Следовательно, коэффициент усиления по напряжению инвертирующего усилителя с параллельной обратной связью  $K_{УИ} = U_{вых} / U_{вх} = -R_{ос} / R1$ , т.е. определяется параметрами только пассивной части схемы.

*Неинвертирующий усилитель* (рис. 13.6).

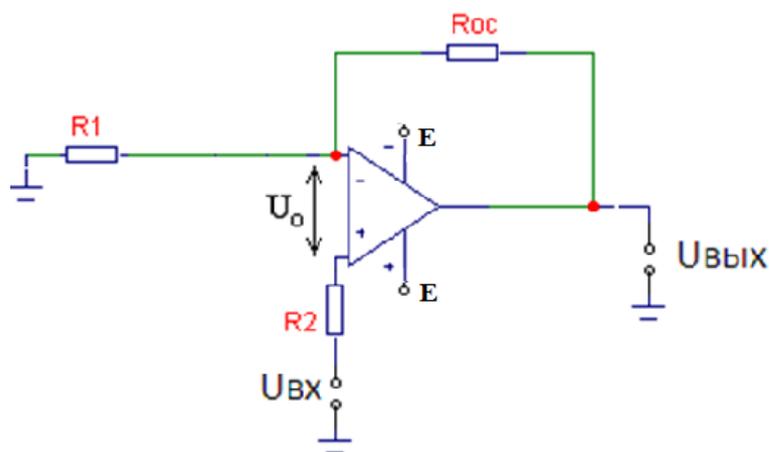


Рисунок 13.6 Неинвертирующий усилитель

Неинвертирующий усилитель содержит последовательную отрицательную обратную связь по напряжению и не изменяет знак выходного сигнала относительно входного. Входной сигнал подается на неинвертирующий вход ОУ. Полагая, что напряжение  $U_0 = 0$  и ток  $I_{OY} = 0$  получим

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} \cdot (R_1 + R_{\text{ОС}}) / R_1.$$

Тогда коэффициент усиления неинвертирующего усилителя  $K_{\text{УН}} = 1 + R_{\text{ОС}} / R_1$ .  $R_{\text{ВХ}}$  неинвертирующего усилителя велико, а  $R_{\text{ВЫХ}} \rightarrow 0$ .

Неинвертирующий и инвертирующий усилители широко используют в качестве высокостабильных усилителей различного назначения [5].

#### Сумматоры

Для суммирования нескольких напряжений используют схемы, построенные на основе операционных усилителей в инвертирующем и неинвертирующем включении, которые называют сумматорами.

Сумматоры делятся на инвертирующие и неинвертирующие. Неинвертирующий сумматор (рис. 13.7, а) реализуется на основе схемы неинвертирующего усилителя путем добавления к входу параллельных ветвей, число которых равно количеству сигналов, предназначенных для сложения. Входные напряжения через резисторы  $R$  подаются на неинвертирующий вход усилителя, который в этой схеме является суммирующей точкой.

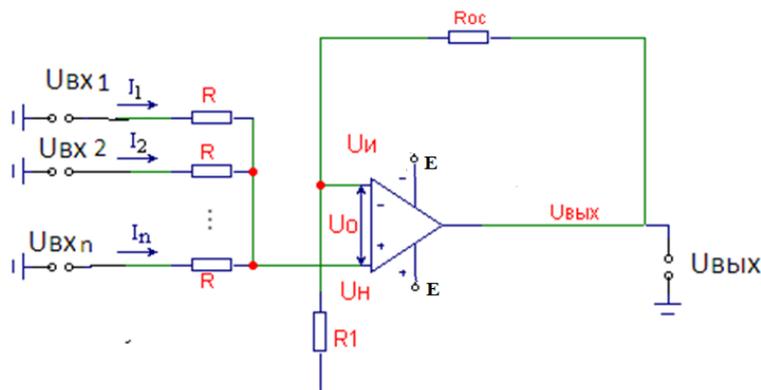


Рисунок 13.7, а. Неинвертирующий сумматор

При напряжении  $U_0 = 0$ ,  $U_H = U_H = [R_1 / (R_1 + R_{oc})] U_{\text{ВЫХ}}$ .

Тогда  $U_1 - U_H / R + U_2 - U_H / R + \dots U_n - U_H / R = 0$ .

Исходя из этого, для неинвертирующего усилителя выходное напряжение будет равно

$$U_{\text{ВЫХ}} = [(R_1 + R_{oc}) / n \cdot R_1] (U_1 + U_2 + \dots U_n).$$

Инвертирующий сумматор (рис. 13.7, б) выполняется по типу инвертирующего усилителя с числом параллельных ветвей на входе, число которых равно количеству сигналов, предназначенных для сложения.

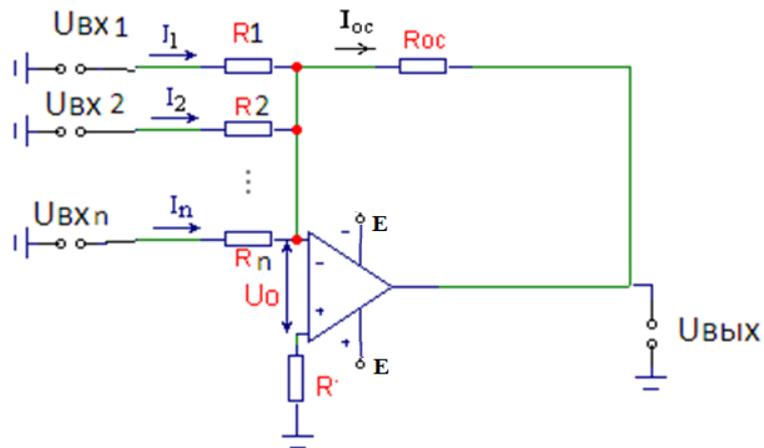


Рисунок 13.7, б. Инвертирующий сумматор

Для инвертирующего сумматора сопротивления резисторов будут равны

$$R_{oc} = R_1 = R_2 = \dots = R_n.$$

При входном токе  $I_{\text{ВХ ОУ}} = 0$  получаем

$$I_{oc} = I_1 + I_2 + \dots + I_n.$$

Тогда выходное напряжение будет равно

$$U_{\text{ВЫХ}} = - (R_{oc} / R_1) U_1 + (R_{oc} / R_2) U_2 + \dots (R_{oc} / R_n) U_n.$$

*Вычитатель* (рис. 13.8)

Для вычитания входных напряжений используется схема вычитателя на ОУ.

Если  $R_1 = R_2$  и  $R_{oc} = R$ , то  $U_{\text{ВЫХ}} = R_{oc} / R_1 (U_{\text{ВХ2}} - U_{\text{ВХ1}})$

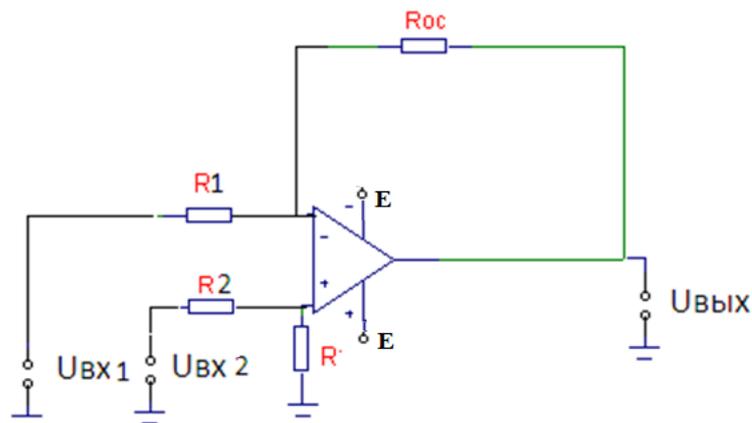


Рисунок 13.8 Вычитатель

### Интегратор (рис. 13.9)

Интегратор создают заменой в схеме инвертирующего усилителя резистора  $R_{oc}$  конденсатором  $C1$ .

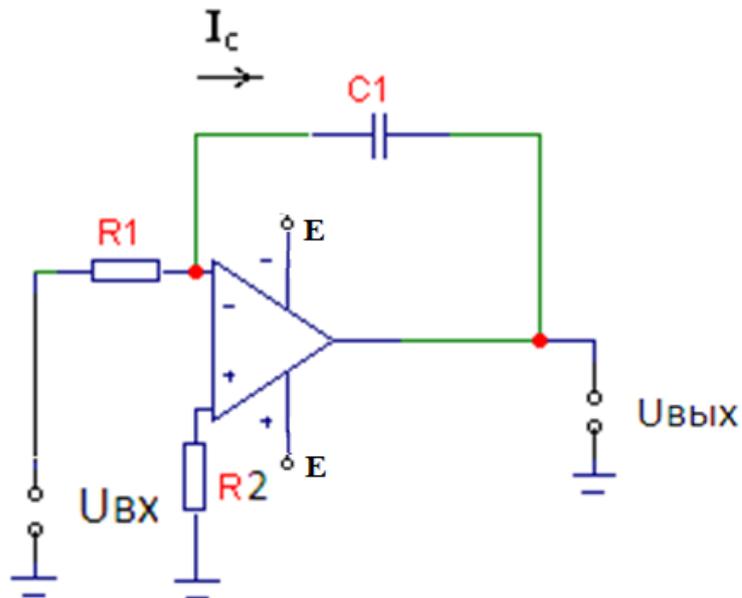


Рисунок 13.9 Интегратор

Выходное напряжение интегратора пропорционально интегралу от входного сигнала. Так как ток  $I_{вх} = I_c$  или  $U_{вх}/R1 = -C1(dU_{вых}/dt)$ , то выходное напряжение равно

$$U_{вых} = -1/R1C1 \int U_{вх} dt + U_{вых0},$$

где  $U_{вых0}$  - выходное напряжение при  $t = 0$ .

Если  $t = 0$  и  $U_{вых0} = 0$ , то тогда  $U_{вых} = -1/\tau \int U_{вх} dt$ ,

где  $\tau = R1C1$  - постоянная времени.

Временные зависимости  $U_{вх}$  и  $U_{вых}$  показаны на рис. 13.10.

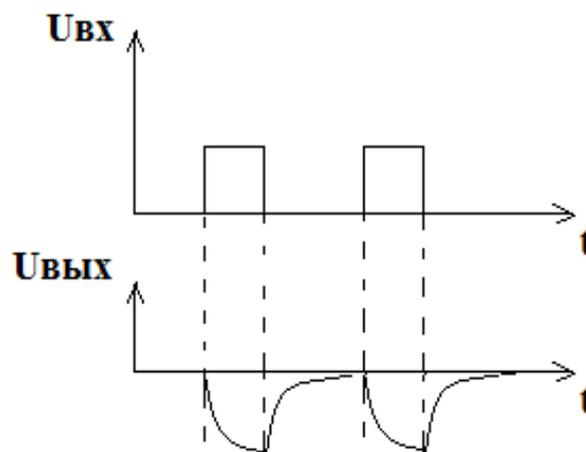


Рисунок 13.10 Зависимости  $U_{вх}$  и  $U_{вых}$  от времени  $t$  для интегратора.

### Дифференциатор (рис. 13.11)

Если в схеме интегратора поменять местами сопротивление  $R1$  и конденсатор  $C1$ , то получим схему дифференциатора.

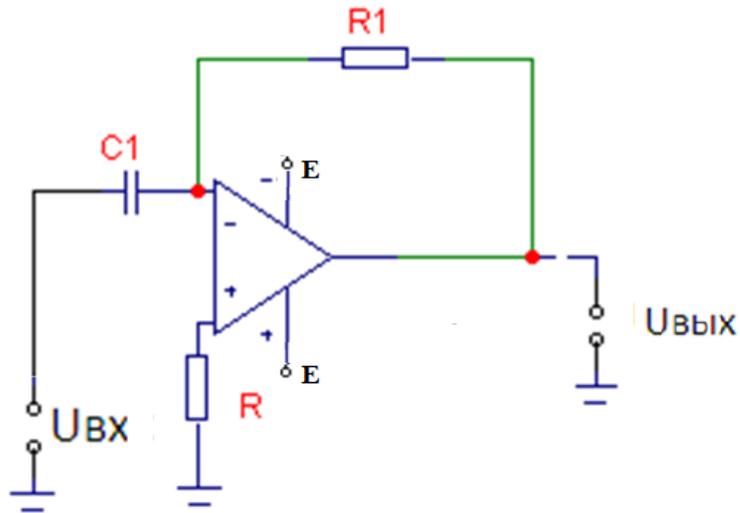


Рисунок 13.11 Дифференциатор

Входной сигнал подается на инвертирующий вход ОУ и формула выполняемой операции определяется выражением

$$U_{\text{ВЫХ}} = -R1C1 (dU_{\text{ВХ}}/dt) = -\tau (dU_{\text{ВХ}}/dt).$$

Временные зависимости  $U_{\text{ВХ}}$  и  $U_{\text{ВЫХ}}$  показаны на рисунке 13.12.

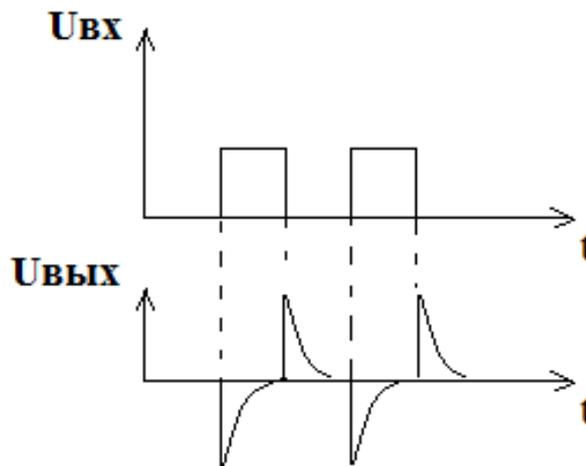


Рисунок 13.12 Зависимости  $U_{\text{ВХ}}$  и  $U_{\text{ВЫХ}}$  от времени  $t$  для дифференциатора

### Компаратор на ОУ (рис. 13.13)

Компараторы играют очень важную роль при аналого-цифровом преобразовании. Компаратором называют устройство, предназначенное для сравнения изменяющегося аналогового входного сигнала с опорным напряжением. При равенстве входного напряжения с опорным выходное напряжение равно нулю. При  $\Delta U_{\text{ВХ}} = U_{\text{оп}} - U_{\text{ВХ}} > 0$  напряжение на выходе ОУ будет равно  $u_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ.м}}$ , если же  $\Delta U_{\text{ВХ}} = U_{\text{оп}} - U_{\text{ВХ}} < 0$ , то  $u_{\text{ВЫХ}} = -U_{\text{ВЫХ.м}}$ .

Уровень входного напряжения компаратора ограничивается допустимым синфазным входным напряжением. Принцип работы устройства поясняется временными диаграммами для  $u_{вх}$  и  $u_{вых}$  (рис.13.13, в). Обратные связи для этого компаратора не предусмотрены ни по одному из входов.

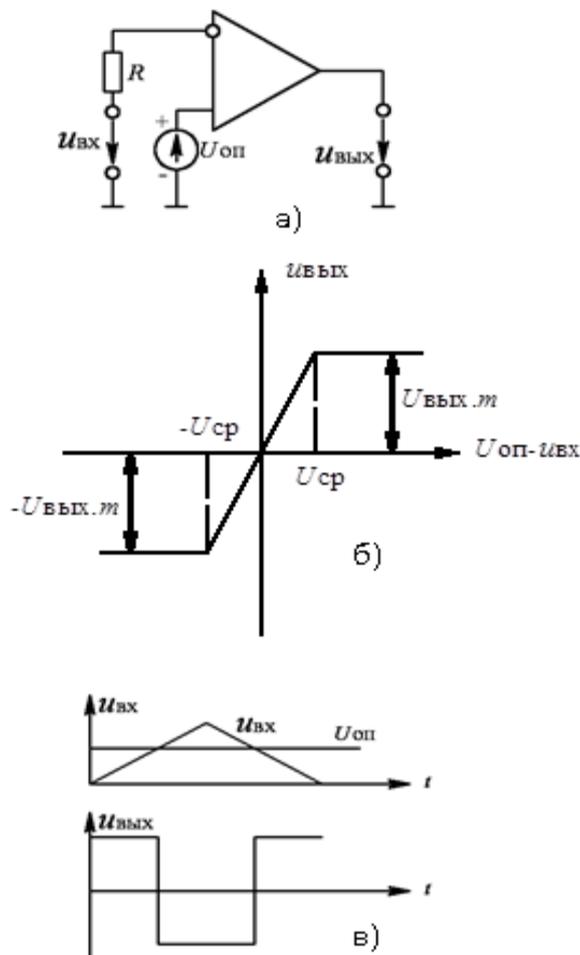


Рисунок 13.13 Компаратор на ОУ

Компараторы выпускаются в интегральном исполнении, а также являются составной частью микросхем аналогово-цифровых преобразователей (АЦП).

### Раздел 3 ИМПУЛЬСНЫЕ УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРОНИКИ

#### ТЕМА 3.1. ГЕНЕРАТОРЫ ИМПУЛЬСНОГО СИГНАЛА

Импульсная и цифровая техника использует импульсный режим работы, при котором кратковременное воздействие сигнала чередуется с паузой.

На базе импульсной техники выполняются системы управления и регулирования, устройства измерения, на ней основана цифровая вычислительная техника.

Преобладающее применение импульсных систем обусловлено:

- значительно меньшим потреблением тока;
- более высокой точностью;
- меньшей зависимостью от температуры;
- большой помехоустойчивостью;
- большей надежностью, меньшими габаритами и массой.

#### *Способы представления информации*

Универсальным способом отображения информации при ее сборе, передаче, хранении и обработке является кодирование. Для представления числовой, буквенной, символьной, логической и других информации в цифровой технике и микропроцессорных системах применяются двоичные позиционные коды, в которых используются только два символа (0 и 1). Двоичные коды реализуются благодаря дискретному представлению электрических и других сигналов в виде импульсов или перепадов (например, рассмотренный выше сигнал прямоугольной формы имеет два фиксированных уровня напряжения: уровень высокого напряжения соответствует уровню логической «1», и уровень низкого напряжения – логического «0»). Поэтому такую информацию называют цифровой, а соответствующие системы обработки дискретными или цифровыми.

Импульсный сигнал характеризуется рядом параметров, которые можно рассмотреть на примере реального импульса напряжения прямоугольной формы (рисунок 14.1):

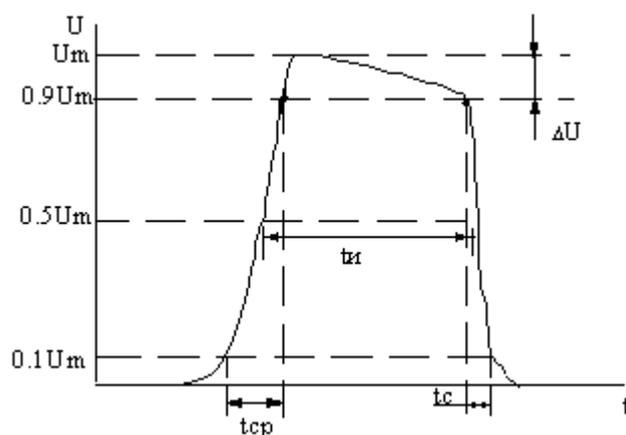


Рисунок 14.1 Параметры сигнала прямоугольной формы

Параметры импульсного сигнала:

- 1) амплитуда импульса  $U_m$ ;

2) длительность импульса  $t_{и}$ , измеряют на уровне  $0,5 U_m$ , иногда на уровне  $0,1 U_m$  в зависимости от формы сигнала;

3) длительность фронта импульса  $t_{ф}$  - определяется временем нарастания импульса от  $0,1 U_m$  до  $0,9 U_m$ ;

4) длительность среза импульса – определяется временем убывания импульса от  $0,9 U_m$  до  $0,1 U_m$ ;

5) спад вершины импульса  $\Delta U$ .

Параметрами последовательности импульсов являются (рисунок 14.2):

1) период повторения  $T$ ;

2) длительность паузы  $t_{п} = T - t_{и}$  – интервал времени между окончанием одного и началом другого импульса;

3) длительность импульса  $t_{и}$ ;

4) частота повторения  $f = 1/T$ ;

5) коэффициент заполнения  $\gamma$ , который характеризуется отношением длительности импульса к периоду их следования  $\gamma = t_{и}/T$ ;

6) скважность  $q = T/t_{и} = 1/\gamma$ .

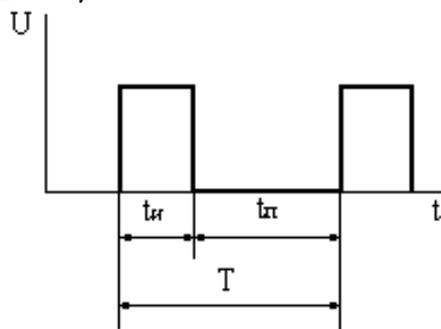


Рисунок 14.2 Параметры последовательности импульсных сигналов

Сигнал прямоугольной формы имеет два фиксированных уровня напряжения: уровень высокого напряжения соответствует уровню логической «1», и уровень низкого напряжения – логического «0». На таком виде сигналов основана работа цифровых вычислительных устройств.

### **Простейшие формирователи импульсных сигналов**

#### ***Транзисторные ключи***

В состав многих импульсных устройств входят электронные ключи, основу которых составляет активный элемент (полупроводниковый диод, транзистор, тиристор), работающий в режиме ключа. Ключевой режим характеризуется двумя состояниями ключа: «Включено», «Выключено».

В реальных ключах токи и уровни  $U_{вых}$ , зависят от типа и параметров активных элементов. Ключи могут собираться на диодах и на транзисторах.

Ключевая схема на биполярном транзисторе показана на рисунке 14.3.

Транзистор выполняет функцию ключа в последовательной цепи с резистором  $R_k$  и источником питания  $E_k$ . Входная (управляющая) цепь отделена от выходной (управляемой) цепи. Состояние ключа, т.е. открыт он или закрыт, определяется по выходной характеристике транзистора (рис. 14.4).

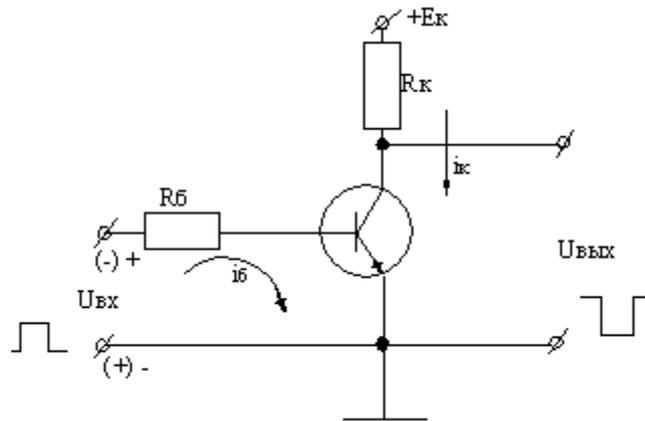


Рисунок 14.3 Ключевая схема на биполярном транзисторе

Первое состояние определяется точка А1 на линии нагрузки, которая строится так же, как и для усилительного каскада.

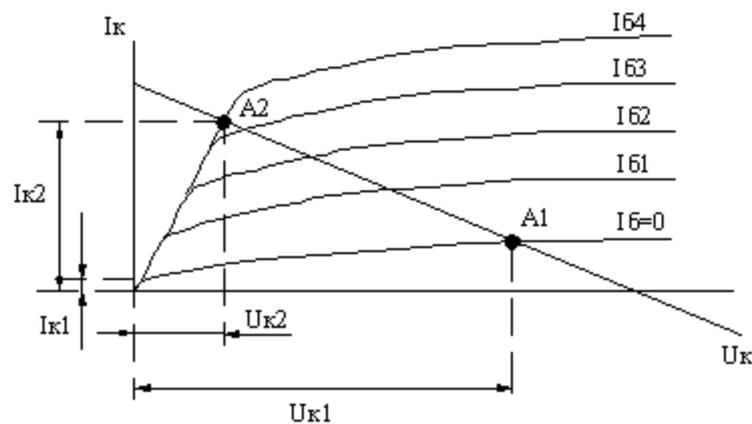


Рисунок 14.4 Выходная характеристика транзистора

Это состояние называют режимом отсечки, который осуществляется подачей на его вход напряжения отрицательной полярности, т.е. при отрицательных потенциалах базы. При токе  $I_b = 0$ , транзистор закрыт, коллекторный ток  $I_{к1}$  равен начальному коллекторному току, а напряжение  $U_k = U_{к1} \approx E_k$ .

Второе состояние определяется точка А2 и называется режимом насыщения. Он реализуется при положительных потенциалах базы. При этом ток базы определяется сопротивлением резистора  $R_b$  и ток  $I_2 = U_{вх}/R_b$ , т.к. сопротивление открытого эмиттерного перехода мало, потому что транзистор открыт. Коллекторный переход так же открыт, ток  $I_{к2} \approx E_k/R_k$ ,  $U_{к2} \approx 0$ . Т.е. повышению  $U_{вх}$  (потенциала базы) соответствует понижение  $U_{вых}$  (потенциала коллектора), и наоборот. Такой ключ называют инвертирующим. Электронные ключи используют в устройствах формирования импульсов.

#### Ключ на полевом транзисторе

Для реализации ключевого режима полевого транзистора в цифровых схемах применяются МОП – транзисторы с индуцированным каналом.

Для ключей на полевых транзисторах характерно: малая мощность источника управляющего сигнала; высокое сопротивление в непроводящем состоянии; малое напряжение на ключе в проводящем состоянии; электрическая развязка между цепью управления и нагрузки.

Очевидно, что при нулевом входном сигнале полевой транзистор (рис.14.5) заперт и  $U_{си} = E_c$ . Если напряжение  $U_{вх}$  больше порогового напряжения  $U_{зи.порог}$  транзистора, то он открывается и напряжение  $U_{си}$  уменьшается. На схеме изображена емкость нагрузки  $C_H$ , моделирующая емкость устройств, подключенных к транзисторному ключу

Напряжение на ключе в его включенном состоянии  $U_{вкл}$  зависит от сопротивления стока  $R_c$ , величины входного сигнала и особенностей стоковых характеристик транзистора. Скорость изменения напряжения на выходе определяется сопротивлением  $R_c$ , емкостью  $C_H$  и частотными свойствами транзистора

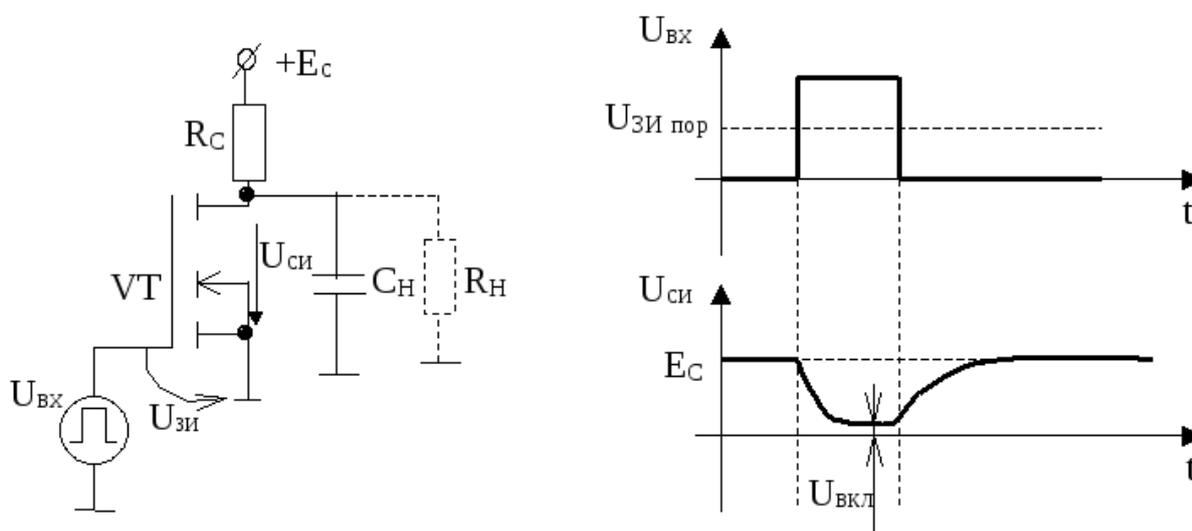


Рисунок 14.5 Ключевая схема на полевом транзисторе

### Диодные ключи

Для ограничения сверху применяют диодные ключи или транзисторные ключи, работающие только в режиме отсечки или только в режиме насыщения. На диаграммах (рис. 14.6) показано, как происходит ограничение синусоидального напряжения с помощью параллельного диодного ключа с ненулевым уровнем включения ключа.

При положительной полярности напряжения  $U_{вх}$   $VD$  открыт (ключ замкнут), напряжение  $U_{вых} = 0$ , при отрицательной полярности напряжения  $U_{вх}$   $VD$  закрыт (ключ разомкнут),  $U_{вых} = U_{вх}$ . Уровень ограничения равен уровню включения ключа (т. А).

Аналогично получают ограничение снизу. Для двухстороннего ограничения используют двойные ключи.

Таким образом, ограничители позволяют сформировать трапецеидальное напряжение или прямоугольное, если амплитуда напряжения  $U_{вх}$  значительно больше уровня ограничения, а также сгладить вершины импульсов, искаженных помехой [3, 4].

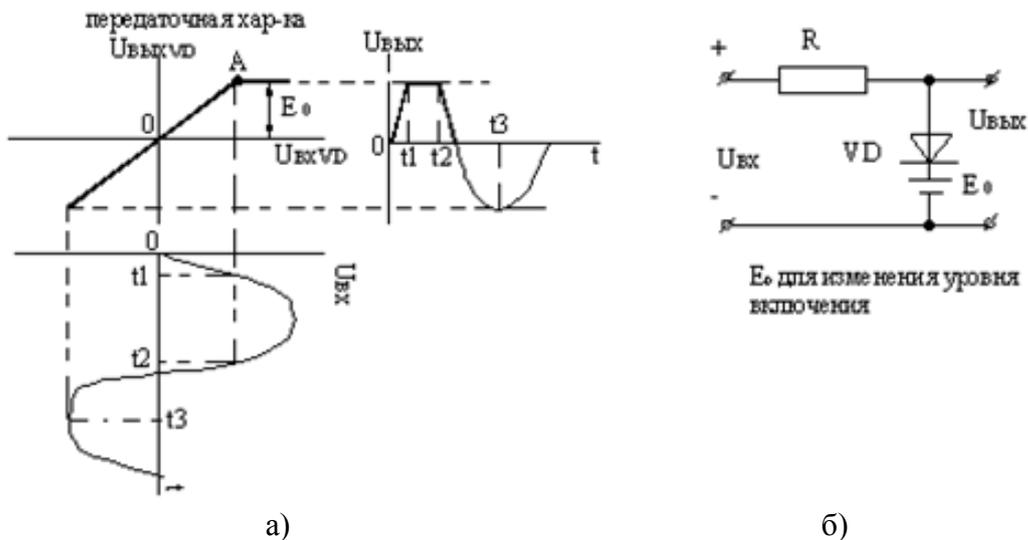


Рисунок 14.6 Диаграмма работы диодного ключа: а) временные диаграммы и передаточная характеристика диодного ключа; б) схема включения диодного ключа

### Линейные цепи

Линейные цепи служат для формирования коротких импульсов. К ним относятся дифференцирующие цепи и интегрирующие цепи. Дифференцирующие цепи – это линейные четырехполосники, у которых напряжение  $U_{\text{вых}}$  пропорционально производной напряжения  $U_{\text{вх}}$  по времени:

$$U_{\text{вых}} = k \frac{dU_{\text{вх}}}{dt},$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности.

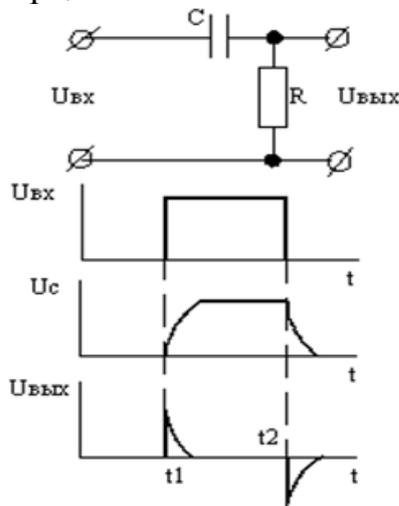


Рисунок 14.7 Дифференцирующая цепь и временные диаграммы ее работы

На входе действует прямоугольный импульс напряжения (рис. 14.7). Конденсатор сначала заряжается, затем какое-то время находится в покое, затем разряжается, на выходе образуются короткие импульсы.

К линейным цепям относятся интегрирующие цепи, у которых  $U_{\text{вых}}$  пропорционально интегралу по времени от  $U_{\text{вх}}$ . При этом в схеме (рис. 14.7)  $C$  и  $R$  меняются местами.

## ГЕНЕРАТОРЫ ИМПУЛЬСОВ

### Мультивибраторы

Мультивибраторы предназначены для генерирования периодической последовательности импульсов напряжения прямоугольной формы. Мультивибраторы обычно выполняют функцию задающего генератора, формирующего запускающие входные импульсы для последующих узлов и блоков.

Классификация мультивибраторов производится по следующим признакам: по виду используемых элементов:

- а) мультивибраторы на транзисторах;
- б) мультивибраторы на ИМС.

по режиму работы:

- а) автоколебательные;
- б) ждущие.

### Автоколебательные мультивибраторы

Подобно генераторам синусоидальных колебаний, автоколебательные мультивибраторы работают в режиме самовозбуждения. Для формирования импульсного сигнала внешнее воздействие не требуется. Процесс получения импульсного напряжения основывается на преобразовании энергии источника постоянного напряжения. Автоколебательные мультивибраторы могут быть построены на транзисторах (рис. 20.7) или на операционном усилителе (ОУ) (рис. 20.8).

### Автоколебательный мультивибратор на транзисторах.

В автоколебательном режиме (рис. 20.7) транзисторы поочередно переходят из открытого состояния в закрытое и обратно. При включении источника коллекторного питания  $+E_k$  один из транзисторов окажется открытым, а другой – закрытым. Если открыт, например, транзистор  $VT1$ , то конденсатор  $C1$ , зарядившийся во время установления процессов в схеме, начинает разряжаться по двум цепочкам: через сопротивления  $R_{к1}$  и  $R1$  и коллектор – эмиттер транзистора  $VT1$  и эмиттер – база транзистора  $VT2$ .

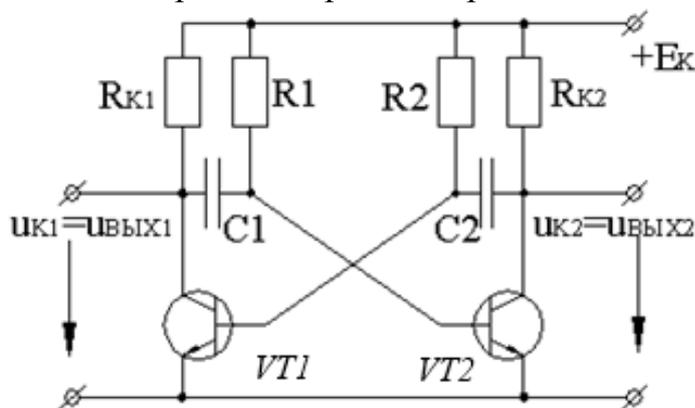


Рисунок 20.7 Схема автоколебательного мультивибратора на транзисторах

Разрядный ток создаёт на резисторе  $R1$  падение напряжения, убывающее по мере уменьшения этого тока по экспоненте. И это напряжение приложено к базе

транзистора  $VT2$  и поддерживает его в закрытом состоянии, т.е.  $U_{бэ}$   $VT2$  увеличивается по экспоненте (рис. 20.8).

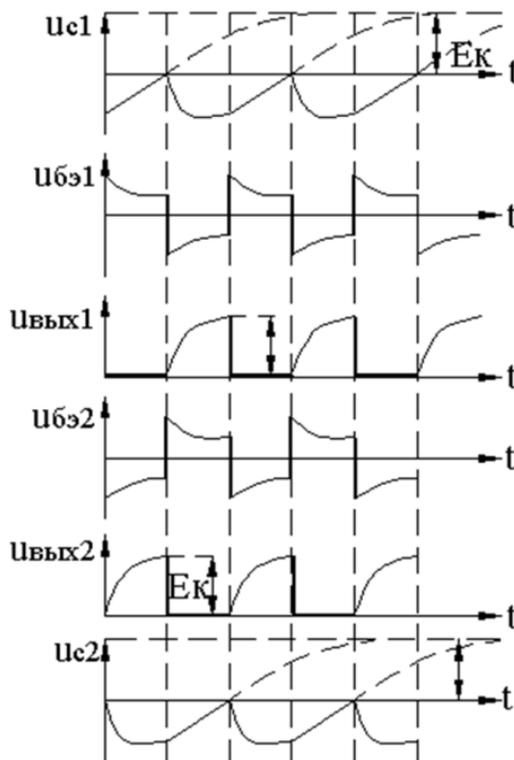


Рисунок 20.8 Временные диаграммы автоколебательного мультивибратора на транзисторах

В это же время конденсатор  $C2$  заряжается от источника  $E_k$  через участок эмиттер – база открытого транзистора  $VT1$  и резистор  $R_{к2}$ . По мере заряда конденсатора  $C2$  ток, протекающий по  $R_{к2}$  уменьшается и потенциал коллектора  $VT2$ , увеличивается по экспоненте. Через время, когда конденсатор  $C2$  зарядится, потенциал коллектора станет примерно равен  $E_k$ . Т.к.  $R1 \gg R_{к2}$ , то процесс разряда конденсатора  $C1$  проходит значительно медленнее, чем процесс заряда конденсатора  $C2$ . Когда потенциал базы  $VT2$  приблизится к нулю, при полной разрядке  $C1$ ,  $VT2$  приоткроется и начнет проводить ток. С этого момента, в результате действия положительной обратной связи, происходит лавинообразный процесс, в результате которого транзистор  $VT2$  открывается, а транзистор  $VT1$  закрывается, т.к. напряжение на конденсаторе  $C2$  приложено обратно к базе – эмиттер  $VT1$ . Далее все процессы повторяются, но уже относительно открытого транзистора  $VT2$ . Таким образом, параметры элементов  $C1, R1, C2, R2$  определяют длительность импульса соответственно на выходе 1 и выходе 2:

В симметричном мультивибраторе выделяют следующие параметры:

1. период колебания  $T \approx 1,4R_1C$  ;
2. амплитуда импульсов  $U_m \approx \frac{E_k}{1,2...1,3}$  ;

3. длительность импульсов  $t_{и} \approx 0,7R_1C$ ;
4. длительность переднего фронта  $t_{\phi} \approx 2R_KC$ .

### Автоколебательный мультивибратор на ОУ

Мультивибратор на ОУ относится к самовозбуждающимся генераторам (рис. 20.9). ОУ работает в импульсном режиме (на нелинейном участке амплитудной характеристики). Он сравнивает два сигнала: по неинвертирующему входу  $U_1$  и по инвертирующему входу  $U_c$  (напряжение конденсатора  $C1$ ). В результате перезарядки конденсатора выходное напряжение скачком изменяется от  $U_{\text{вых max}}$  до  $U_{\text{вых min}} = -U_{\text{вых max}}$ . При  $R3 = R4$  длительность импульса  $t_{и} \approx 1,1 R2C1$ , а период импульса  $T = 2t_{и} \approx 2,2R2C1$ . Изменяя величины сопротивления  $R2$  и конденсатора  $C1$ , можно регулировать длительность, частоту и амплитуду импульсов.

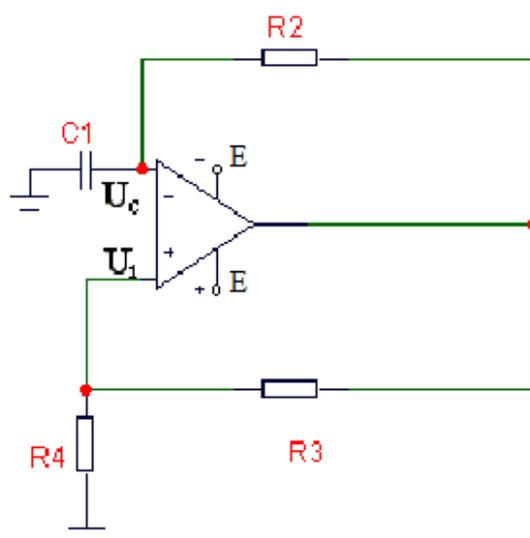


Рисунок 20.9 Схема автоколебательного мультивибратора на ОУ

### Автоколебательный мультивибратор на логических элементах

Такой мультивибратор работает следующим образом (рис. 20.10). Когда логический элемент Э1 И-НЕ закрыт, а логический элемент Э2 И-НЕ – открыт, то на выходе Э1 действует напряжение высокого уровня и конденсатор  $C2$  заряжается, напряжение  $U_{\text{вх2}}$  – высокое и поддерживает Э2 в открытом состоянии, напряжение  $U_{\text{с1}} = 0$ , напряжение  $U_{\text{вх1}}$  – низкое.

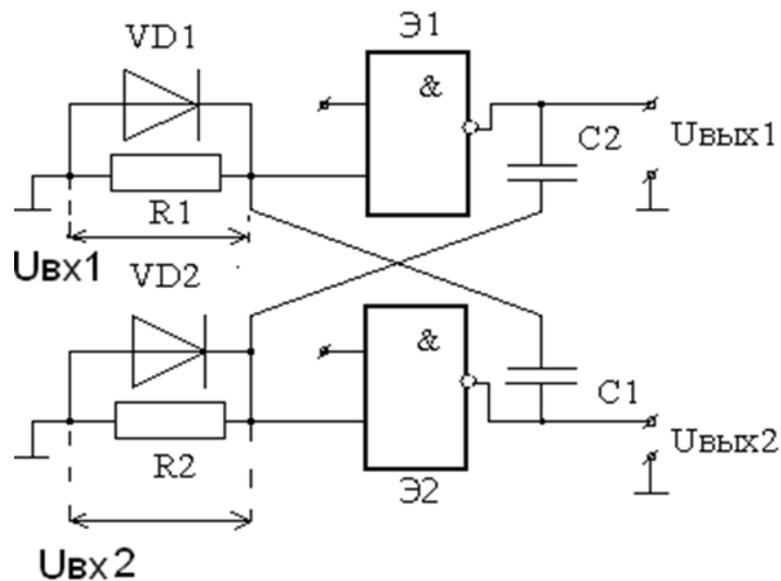


Рисунок 20.10 Схема автоколебательного мультивибратора на ЛЭ

При достижении  $U_{вх2}$  некоторого предельного значения, элемент Э2 запирается,  $U_{вых2}$  через  $C1$  передается на вход логического элемента Э1 и он открывается.

### Ждущий мультивибратор

В ждущем режиме имеется одно состояние устойчивого равновесия и одно состояние квазиравновесия. Переход из первого состояния во второе происходит под воздействием внешнего запускающего импульса, а обратный переход - самопроизвольно по истечении некоторого времени. Ждущие мультивибраторы называют еще одновибраторами.

### Ждущий мультивибратор на транзисторах.

Схема ждущего мультивибратора с эмиттерной связью показана на рисунке 20.11.

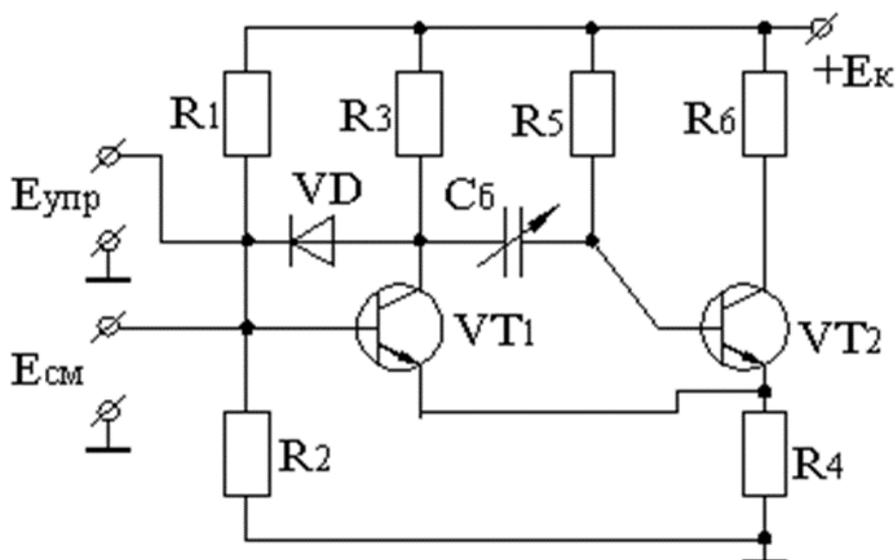


Рисунок 20.11 Схема ждущего мультивибратора на транзисторах

В устойчивом состоянии схемы при отсутствии запускающих импульсов транзистор  $VT2$  открыт положительным смещением от источника питания  $+E_k$  через резистор  $R5$ . Протекающий через резистор ток вызывает падение напряжения на резисторе  $R4$ . Потенциал базы транзистора  $VT1$  устанавливается делителем  $R1, R2$ . Сопротивления  $R1, R2, R4$  выбирают такими, чтобы  $U_{б1} < U_{э2}$ , поэтому в устойчивом состоянии  $VT1$  закрыт. Емкость  $C_6$  оказывается подключенной левой обкладкой через  $R3$  к источнику  $E_k$ , а правой через открытый переход эмиттер – база к резистору  $R4$ .

При поступлении на вход запускающего импульса положительной полярности транзистор  $VT1$  открывается. При этом положительная обкладка конденсатора  $C_6$  присоединяется через открытый  $VT1$  к эмиттеру  $VT2$ , а отрицательная обкладка к его базе. Это приводит к запирающему транзистора  $VT2$  и, следовательно, резкому увеличению потенциала на его коллекторе и прерыванию тока через коллектор – эмиттер транзистора  $VT2$ .

С моментом открывания транзистора  $VT1$  начинается перезаряд емкости током, протекающим по цепи  $+E_k, R5, C_6$ , коллектор – эмиттер  $VT1, R4$ , "земля".

Напряжение  $U_{б2}$  при этом постепенно возрастает и достигает порога отпирания транзистора  $VT2$ . Т. е.  $U_{э2} > U_{б1}$ ,  $VT1$  запирается, возвращая схему в исходное состояние (т.е. напряжение  $U_{к2}$  скачком снижается, заканчивая формирование прямоугольного импульса на выходе схемы).

Таким образом, ждущий мультивибратор реагирует на поступление короткого запускающего импульса формированием одиночного прямоугольного импульса, длительность которого определяется параметрами времязадающей цепи мультивибратора ( $R5, C$ ) с постоянной времени  $\tau \cong R5C$ .

Ждущие мультивибраторы используют для расширения импульсов; для задержки сигнала на заданное время (запускающий импульс может быть задержан на время, равное длительности импульса ждущего мультивибратора; если к его выходу подключить устройство, реагирующее на период напряжения по окончании выходного импульса, то можно реализовать реле времени); для задания регулируемых интервалов времени (таймеры).

#### Ждущий мультивибратор на логических элементах

В исходном состоянии на входе логического элемента Э1 действует напряжение высокого уровня — логическая единица (рис. 20.12).

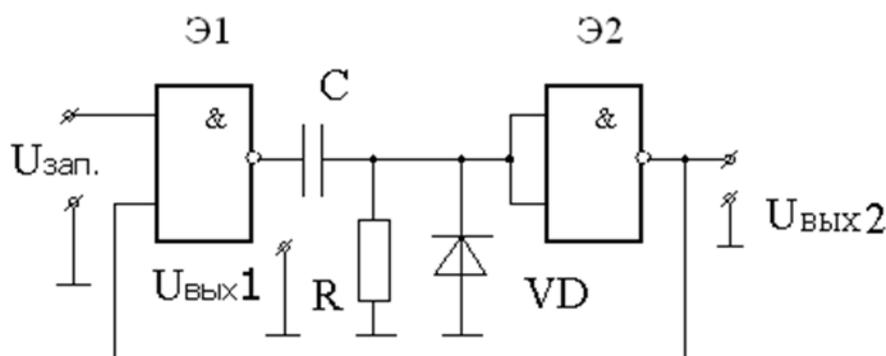


Рисунок 20.12 Схема ждущего мультивибратора на ЛЭ

Напряжение на входах элемента Э2 равно напряжению на резисторе  $R$ , которое создается на нем входным током логического элемента Э2. На входах элемента Э2 имеется логический ноль, на выходе — логическая единица, которая передается на второй вход логического элемента Э1. Таким образом, на каждом входе Э1 имеется логическая единица. Следовательно, Э1 открыт и напряжение на его выходе соответствует логическому нулю. Напряжение на конденсаторе  $C$  также близко к нулю.

При поступлении на вход отрицательного импульса, соответствующего нулю, на выходе элемента Э1 устанавливается логическая единица, соответствующая напряжению высокого уровня. Начинается зарядка конденсатора  $C$ . Ток зарядки протекает от выхода элемента Э1 через конденсатор  $C$  и резистор  $R$ . На резисторе создается положительное напряжение, которое в виде логической единицы поступает на входы элемента Э2 и открывает его. На выходе элемента Э2 образуется низкое напряжение (логический ноль), которое передается на второй вход элемента Э1 и поддерживает его в закрытом состоянии после прекращения действия входного импульса.

При  $U_{\text{вых2}} > U_{\text{пор}}$  на входах элемента Э1 будет логическая единица, Э1 откроется, на его выходе будет напряжение логического нуля. Начнется разрядка конденсатора  $C$ , напряжение на входах Э2 станет меньше порогового, Э2 закроется до прихода следующего импульса. Таким образом, на выходе будет сформирован прямоугольный импульсный сигнал.

### Блокинг–генераторы

Блокинг–генераторы предназначены для формирования импульсов тока или напряжения прямоугольной формы преимущественно малой длительности. Они находят применение в схемах формирования пилообразного тока для формирования развертки электронного луча по экрану осциллографа. На основе блокинг-генератора выполняют формирователи управляющих импульсов в цифровых системах.

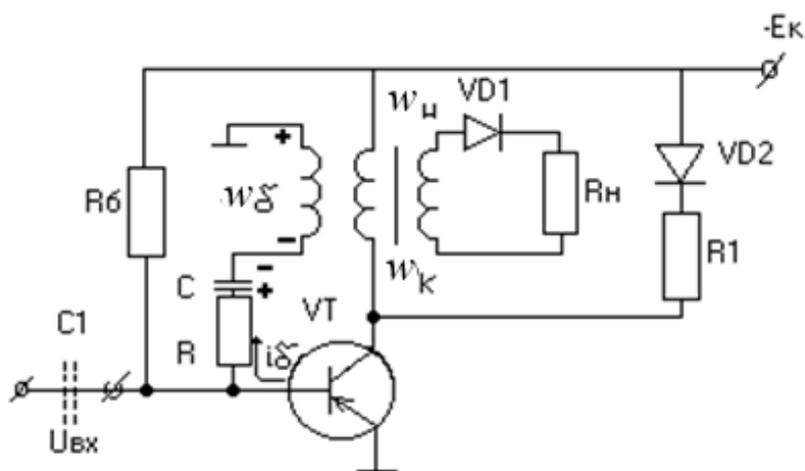


Рисунок 20.13 Схема блокинг-генератора на транзисторе с ОЭ

По принципу построения блокинг-генераторы представляют собой однокаскадные транзисторные усилители с глубокой положительной обратной

связью, которая осуществляется импульсным транзистором. Схема блокинг-генератора, выполненная на транзисторе с ОЭ, показана на рис. 20.13. Цепь положительной обратной связи (ПОС) осуществлена с помощью вторичной обмотки  $w_6$  трансформатора  $Tr$ , конденсатора  $C$  и резистора  $R$ , ограничивающего ток базы. Резистор  $R_6$  создает контур разряда конденсатора на этапе закрытого состояния транзистора.

Выходной сигнал снимают либо непосредственно с коллектора транзистора, либо с дополнительной нагрузочной обмотки  $w_n$  трансформатора  $Tr$ , которая связана с коллекторной обмоткой  $w_k$  трансформатора. Диод  $VD1$  исключает прохождение в нагрузку импульса напряжения отрицательной полярности, который возникает при запираии транзистора  $VT$ . Диод  $VD2$  и сопротивление  $R1$  выполняют функции защиты транзистора от перенапряжения.

Блокинг-генератор может работать в следующих режимах:

- автоколебаний;
- ждущем;
- синхронизации.

В автоколебательном режиме в начальный момент времени транзистор  $VT$  закрыт, напряжение  $U_k = -E_k$ , напряжение на обмотке трансформатора, на базе транзистора  $U_6$  и на нагрузке  $U_n$  равны нулю. Закрытое состояние  $VT$  создается напряжением на конденсаторе  $C$ , который перезаряжается по цепи  $w_6 - C - R - R_6 - (-E_k)$ . Когда напряжение на  $C$  становится равным 0, то транзистор открывается и напряжение на коллекторе  $U_k$  уменьшается, что вызывает появление напряжения на коллекторной обмотке  $w_k$ . Напряжение на  $w_k$  трансформируется в  $w_6$  с такой полярностью, которая приводит в результате ПОС к увеличению базового тока  $i_6$ , что вызывает увеличение коллекторного тока  $i_k$ , снижение напряжения на коллекторе и дальнейшее повышение напряжения на  $w_k$  и  $w_6$ . Процесс завершается переходом транзистора в режим насыщения и называется прямым блокинг-процессом (рис. 20.14).

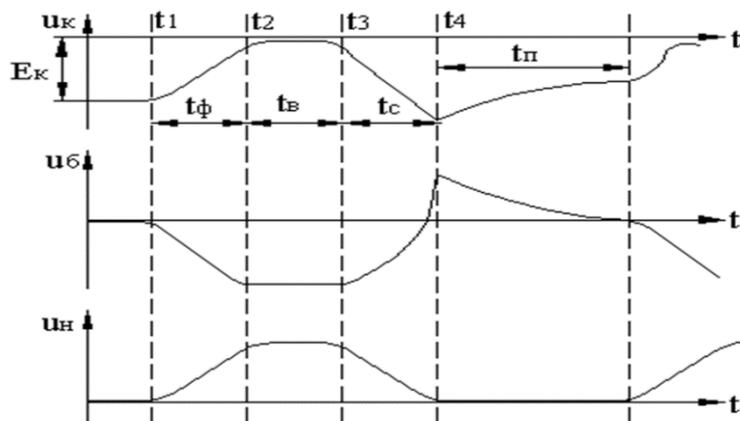


Рисунок 20.14 Временные диаграммы блокинг-генератора

Однако по мере заряда конденсатора, ток базы  $i_6$  уменьшается, вследствие чего уменьшается степень насыщения транзистора. Транзистор начинает закрываться и вместе с этим заканчивается формирование импульса напряжения.

Переход транзистора в закрытое состояние происходит за счет ПОС также лавинообразно и называется обратным блокинг–процессом.

При работе блокинг-генератора в режиме синхронизации в базовую цепь транзистора через конденсатор  $C1$  подают входные импульсы отрицательной полярности. Синхронизирующие импульсы осуществляют отпирание транзистора раньше момента естественного спада напряжения на его базе до нуля, в результате чего частота импульсов блокинг-генератора равна частоте следования импульсов синхронизации

Если блокинг-генератор работает в ждущем режиме, то на базу транзистора подается начальное дополнительное напряжение смещения, в результате чего транзистор остается закрытым до подачи входного импульса.

### Генераторы линейно изменяющегося напряжения

Генераторы линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН) служат для создания развертки электронного луча по экрану осциллографа, получение временных задержек импульсных сигналов, модуляции импульсов по длительности и т.д.

Линейно изменяющееся напряжение (ЛИН)- это импульсное напряжение, которое в течение некоторого времени изменяется практически по линейному закону, а затем возвращается к исходному уровню (рис. 20.15).

Параметры ЛИН:

- максимальное значение амплитуды  $U_m$ ;
- длительность рабочего хода  $t_p$ ;
- время обратного хода  $t_0$ ;
- коэффициент нелинейности  $\epsilon$ .

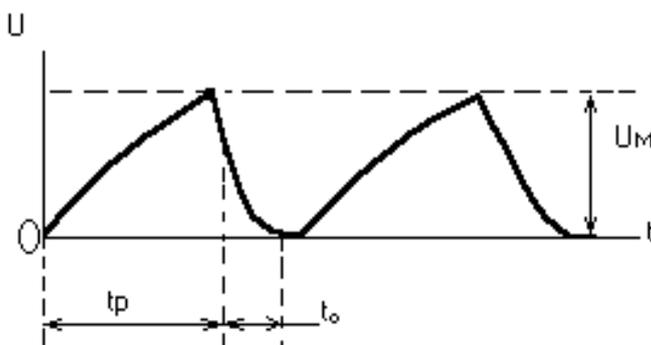


Рисунок 20.15 Вид линейно изменяющегося напряжения

Формирование линейно изменяющегося напряжения (ЛИН) (или пилообразного) основано на чередовании во времени процессов заряда и разряда конденсатора. Схема ГЛИН показана на рис. 20.16.

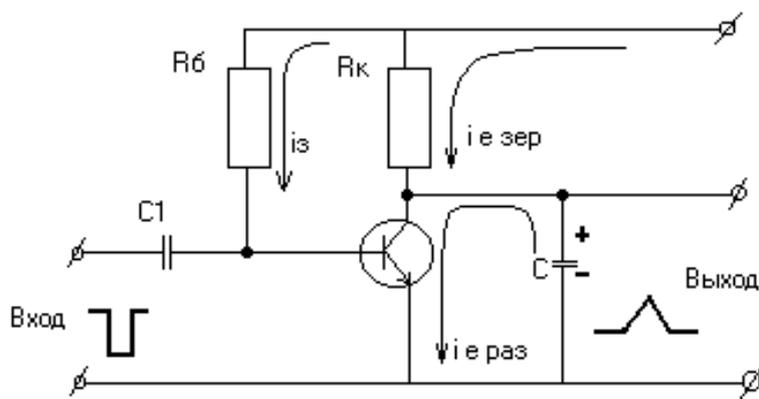


Рисунок 20.16 Схема ГЛИН

На транзисторе  $VT$  собран ключ, управляемый прямоугольными импульсами отрицательной полярности. В исходном состоянии транзистор насыщен (ключ замкнут), что обеспечивается выбором соотношения сопротивлений резисторов  $R_б$  и  $R_к$ .

При воздействии входного импульса длительностью  $t_p$  транзистор закрывается (ключ разомкнут) и конденсатор  $C$  заряжается от источника  $+E_к$  через резистор  $R_к$  (рис. 20.17). Напряжение на конденсаторе изменяется по экспоненте  $U_c = E_к (1 - e^{-t/(RC)})$ . По окончании входного импульса транзистор переходит в режим насыщения (ключ замкнут), и конденсатор быстро разряжается через промежуток коллектор-эмиттер. Используя начальный участок экспоненты, линейность которого достаточно высока, можно получить импульсы с малым коэффициентом нелинейности.

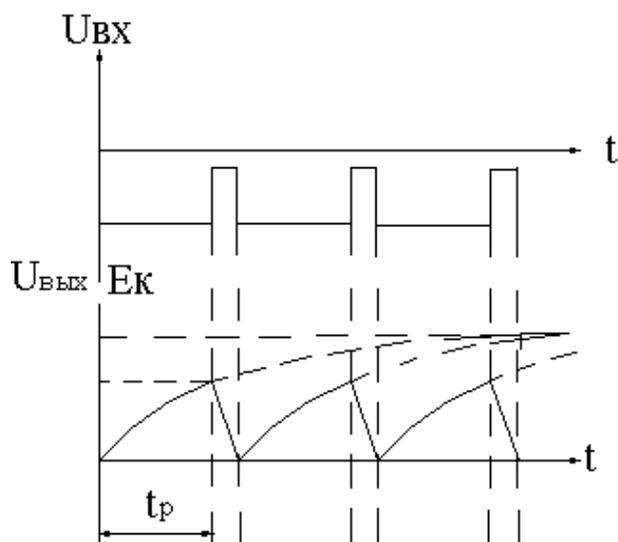


Рисунок 20.17 Временные диаграммы  $U_{вх}$  и  $U_{вых}$  ГЛИН

## ТЕМА 3.2. ЛОГИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ И ЭЛЕМЕНТЫ

### Простые и составные логические элементы.

Логические элементы (ЛЭ) выполняют простейшие логические операции над цифровой информацией и составляют основу вычислительной техники, цифровых измерительных приборов и устройств автоматики.

Цифровая информация представляется двоичными константами 1 и 0. Логические преобразования двоичных сигналов выполняются на базе элементарных операций алгебры Буля (алгебры логики).

Существуют три основные логические операции между логическими сигналами:

- конъюнкция – операция логического умножения (логическое И);
- дизъюнкция – операция логического сложения (логическое ИЛИ);
- инверсия – операция логического отрицания (логическое НЕ).

А также:

- операция И-НЕ (операция Шеффера);
- операция ИЛИ-НЕ (операция «стрелка Пирса»).

Логическая функция  $F$  выражает зависимость выходного логического состояния от входных переменных и принимает значения «0» или «1». Любую логическую функцию удобно представить в виде таблицы состояний (таблицы истинности или таблицы переходов), где записываются комбинации входных сигналов и соответствующие им функции.

ЛЭ, реализующие эти операции, называются элементами «ИЛИ», элементами «И» и элементами «НЕ» и условно обозначаются (рис. 15.1):

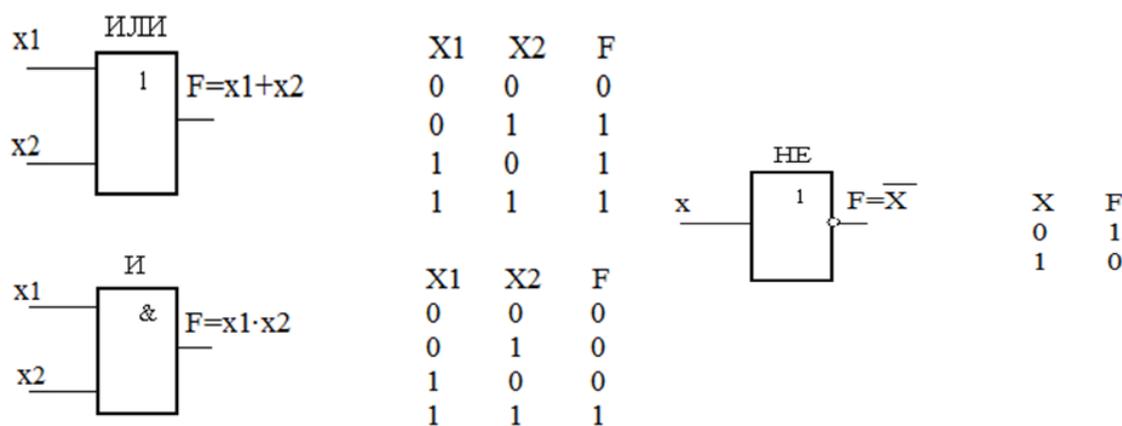


Рисунок 15.1 Условное обозначение простых ЛЭ и правила выполнения логических операций

В элементах «ИЛИ» выходной сигнал  $F = 1$ , если хотя бы на один из  $n$  входов подан сигнал «1». В элементах «И»  $F = 1$ , если одновременно на все  $n$  входов подан сигнал «1».

ЛЭ, реализующие операции Шеффера и «стрелка Пирса», называются элементами «И-НЕ», элементами «ИЛИ-НЕ» и условно обозначаются (рис. 15.2)

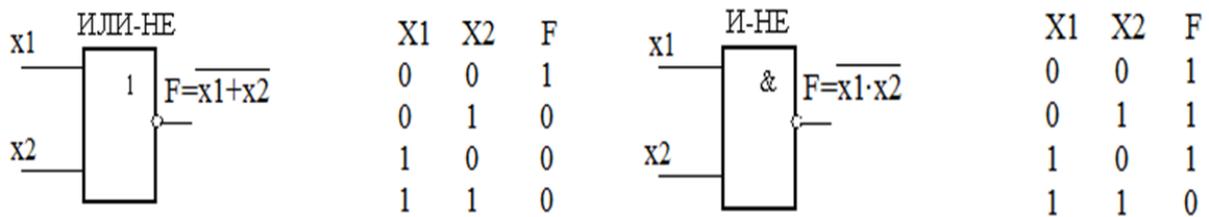


Рисунок 15.2 Условное обозначение составных ЛЭ и правила выполнения логических операций

Основные параметры логических элементов:

- функциональные возможности элемента;
- быстродействие;
- потребляемая мощность;
- помехоустойчивость.

Функциональные возможности определяются коэффициентом разветвления по выходу  $n$  и коэффициентом объединения по входу  $m$ .

Показателем быстродействия является среднее время задержки  $t_{з.с.}$  прохождения сигнала через элемент.

Потребляемая мощность зависит от серии микросхемы.

Помехоустойчивость характеризует меру невосприимчивости логических элементов к изменению своих состояний под воздействием напряжения помех.

Интегральные логические элементы являются основной элементной базой для построения цифровых устройств.

В зависимости от компонентов, на которых построены логические элементы (т.е. в зависимости от того, какая логика работы лежит в основе), различают следующие типы базовых логических элементов, использующих соответствующие логики:

1. Диодно-транзисторная логика (ДТЛ);
2. Транзисторно-транзисторная логика (ТТЛ);
3. Эмиттерно-связанная логика (ЭСЛ);
4. Интегрально-инжекционная логика (И<sup>2</sup>Л);
5. Логика на комплементарных полевых транзистора (КМОП).

В 1-м типе используются диоды и биполярные транзисторы, во 2-м, 3-м и 4-м – только биполярные транзисторы, в 5-м – полевые транзисторы.

Элемент «ИЛИ» наиболее просто реализуется на диодах (рис. 15.3).

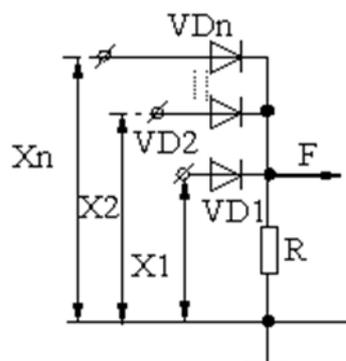


Рисунок 15.3 - Схемная реализация элемента «ИЛИ»

Значение  $F = 1$  на выходе создается передачей входного сигнала вследствие отпираания одного из диодов. Остальные диоды находятся в закрытом состоянии. Элемент «И» также реализуется на диодах (рис. 15.4).

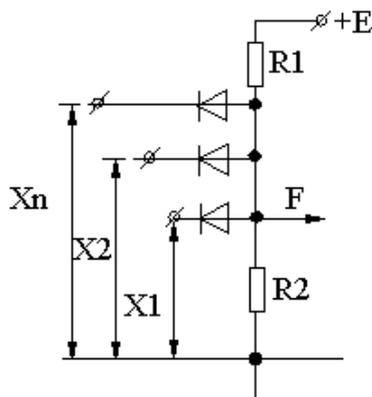


Рисунок 15.4 Схемная реализация элемента «И»

При всех входных сигналах  $= 1$ , на катоде диодов положительный потенциал относительно общей точки, и они закрыты. На выходе  $F = 1$ . При нулевом значении сигнала хотя бы на одном из входов, напряжение на выходе определяется падением напряжения на открытом диоде и близко к нулю ( $F = 0$ ).

Элемент «НЕ» представляет собой ключевую схему на транзисторе, которую мы уже рассматривали (рис. 15.5).

Элемент «ИЛИ-НЕ» объединяет элементы «ИЛИ» и «НЕ» с очередностью проведения операций (рис. 15.6).

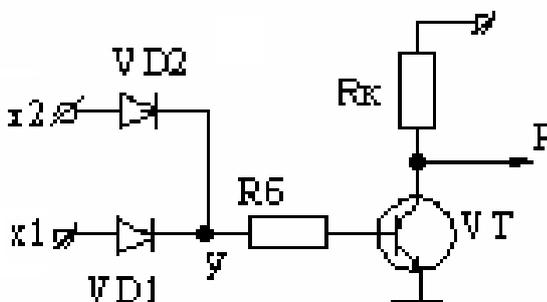


Рисунок 15.6 Схемная реализация элемента «ИЛИ-НЕ»

Входным сигналам, равным 1, соответствует  $F = 0$  на выходе, а при нулевых сигналах на входе, на выходе  $F = 1$ .

В элементе «И-НЕ» (рис. 15.7) единичным сигналам на всех входах соответствует «0» на выходе. При «0» на одном из входов создается логическая «1» на выходе. При «1» на обоих входах диоды  $VD1, VD2$  закрыты. В схеме образуется цепь  $+E_k - R_6 - VD' - VD''$ , которая обеспечивает протекание тока базы транзистора  $I_6 = E_k / R_6$ .

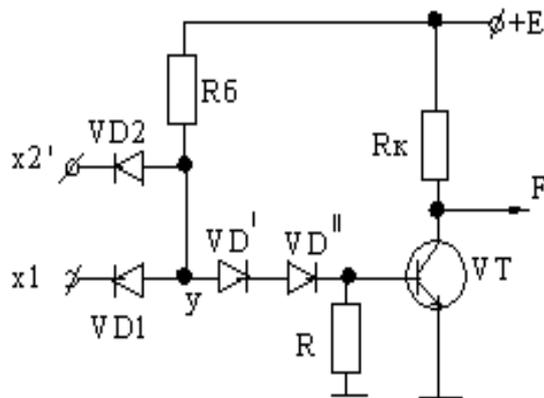


Рисунок 15.7 Схемная реализация элемента «И-НЕ»

Транзистор открыт и насыщен,  $F = 0$ . При логическом «0» на одном из входов (например,  $x_1$ ) открывается  $VD1$ . Образуется цепь:  $+E_k - R_б - VD1 - x_1$ . При этом цепь  $VD' - VD''$  - эмиттерный переход транзистора оказывается шунтированной цепью с проводящим диодом:  $I_б = 0$ , транзистор закрыт,  $F = 1$ .

Назначение диодов  $VD'$ ,  $VD''$ : т.к. потенциал логического «0» реально больше нуля, то при отсутствии  $VD'$  и  $VD''$  это может привести к отпирианию транзистора. При введении  $VD'$  и  $VD''$  напряжение между т. У и эмиттером транзистора будет приложено к диодам, а  $U_{бэ} = 0$ .

Следует отметить, что существуют комбинированные логические элементы, которые позволяют осуществлять более сложные логические операции.

Например, элемент «2И-ИЛИ-НЕ» (рис. 15.8) позволяет выполнять функцию  $F = x_1 \cdot x_2 + x_3 \cdot x_4$ .

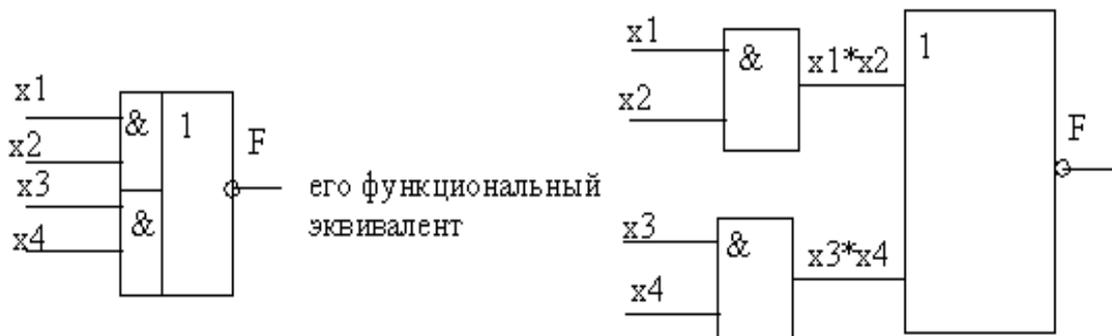


Рисунок 15.8 Условное обозначение и функциональный эквивалент элемента «2И-ИЛИ-НЕ»

Логические преобразования двоичных сигналов выполняются на базе элементарных операций алгебры логики.

### ТЕМА 3.3. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТНЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

Триггером называют устройство, обладающее двумя устойчивыми состояниями, способное скачком переходить из одного состояния в другое под воздействием внешнего управляющего сигнала. Триггер относится к базовым элементам цифровой техники.

Триггеры классифицируются по следующим признакам:  
по функциональному признаку:

- а) *RS*-типа – триггеры с двумя установочными входами;
- б) *D*-типа – триггеры задержки с одним входом;
- в) *T*-типа – триггеры с одним счетным входом;
- г) *JK*- типа – универсальные триггеры с несколькими входами.

по способу управления:

- а) асинхронные;
- б) тактируемые (синхронные).

В асинхронных триггерах переключение из одного состояния в другое осуществляется непосредственно с поступлением сигнала на информационный вход [1, 5, 6].

В синхронных (тактируемых) триггерах помимо информационных входов имеется вход тактовых импульсов. И переключение производится только при наличии разрешающего, тактирующего импульса.

#### ***RS*-триггер**

*Асинхронный RS-триггер* может выполняться на логических элементах «ИЛИ-НЕ» либо «И-НЕ».

Схема асинхронного *RS*-триггера (рис. 16.1) содержит два элемента ИЛИ-НЕ, имеет два входа. При этом, *S*-вход называется установочным (*set* – устанавливать), устанавливает триггер в состояние логической «1»; а *R*-вход – вход сброса (*reset* – вновь устанавливать), переводит триггер в исходное состояние логического «0», и два выхода *Q* – прямой,  $\bar{Q}$  – инверсный. В случае, когда на входах сигналы равны «0» ( $R = 0, S = 0$ ), а на прямом выходе *Q* сигнал равен «1», то на инверсном выходе  $\bar{Q} = 0$ . То есть на прямом выходе состояние  $Q = 1$  сохраняется.

При  $R = 0, S = 0$  возможно и второе устойчивое состояние, при котором  $Q = 0, \bar{Q} = 1$ . То есть при  $R = 0, S = 0$ , триггер находится в состоянии хранения информации (1-го или 2-го устойчивого состояния).

При  $R = 0, S = 1$ , триггер оказывается в первом устойчивом состоянии ( $Q = 1, \bar{Q} = 0$ ), а при  $R = 1, S = 0$  – во втором устойчивом состоянии ( $Q = 0, \bar{Q} = 1$ ).

Комбинация  $R = 1, S = 1$  запрещена, т.е. при  $S = 1$  триггер устанавливается в состояние «1», а при  $R = 1$  – сбрасывается в состояние «0» (см. таблицу переходов рис 16.1).

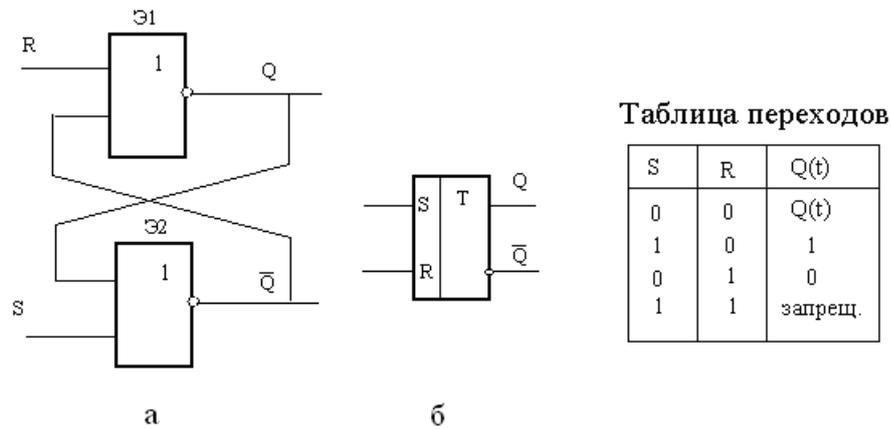


Рисунок 16.1 Схема асинхронного RS-триггера на элементах «ИЛИ-НЕ»  
а) условное обозначение, б) и таблица переходов

Аналогичным образом работает RS-триггер на элементах И-НЕ (рис. 16.2), с той разницей, что он должен иметь инверсные входы, т.е. устанавливаться в состояние «1» при  $S = 0$  и сбрасываться в состояние «0» при  $R = 0$ . Запрещенная комбинация – при  $R = 0, S = 0$ .

На основе асинхронного RS-триггера строится любой, сколь угодно сложный, триггер: к асинхронному RS-триггеру добавляется своя особенная комбинационная схема управления этим триггером.

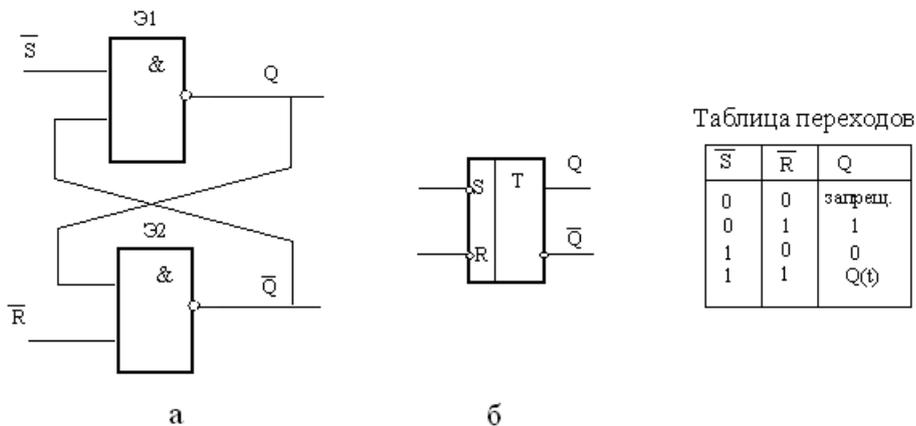


Рисунок 16.2 Схема асинхронного RS-триггера на элементах И-НЕ  
а) условное обозначение, б) таблица переходов

Синхронный RS- триггер на элементах «И-НЕ» показан на рисунке 16.3. Синхронный RS- триггер состоит из схемы асинхронного RS- триггера, на входах которого установлены 2 управляющих элемента «И-НЕ» (Э3, Э4).

Переключение подобного триггера происходит только при наличии разрешающего сигнала, подаваемого на вход C ( $C = 1$ ). Такой триггер имеет статическое управление, т.е. осуществляет прием информации в течение всего интервала времени, пока  $C = 1$ .

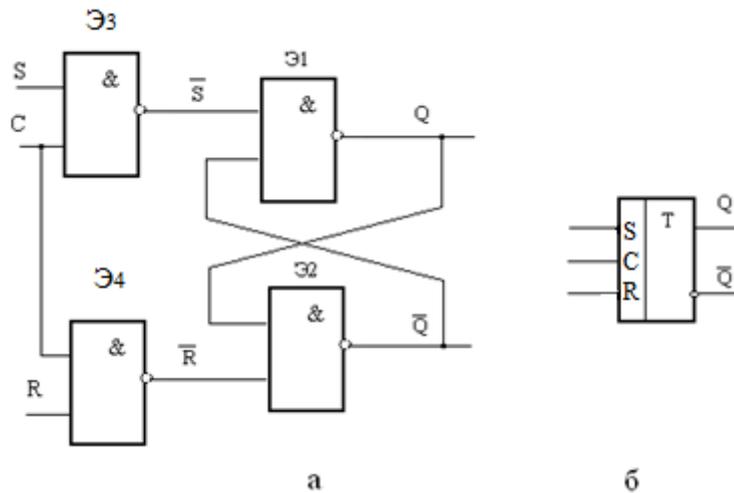


Рисунок 16.3.Схема синхронного  $RS$ -триггера на элементах И-НЕ (а) и его условное обозначение (б)

Следует отметить следующие комбинации входных сигналов:

при  $R = S = C = 0$  – состояние триггера сохраняется;

при  $S = 1, R = C = 0$  – состояние триггера сохраняется;

при  $S = 1, R = 0, C = 1$  – на выходе  $Q = 1$ ;

при  $S = 0, R = 1, C = 1$  – на выходе  $Q = 0$ .

Комбинация  $S = R = C = 1$  должна быть исключена, так как на выходе элементов Э<sub>3</sub>, Э<sub>4</sub> одновременно присутствовал бы «0», что запрещено для асинхронного триггера.

### **D- триггеры**

*D-триггеры* (delay – задержка) используют для приема информации по одному входу.

Схема получается из схемы асинхронного  $RS$ -триггера (в данном случае на элементах «И-НЕ») (рис. 16.4).

Работает триггер следующим образом.  $D$ -триггер переходит в состояние «1», т.е. на выходе  $Q = 1$ , если в момент прихода синхронизирующего сигнала  $C = 1$ , на его информационном входе  $D = 1$ . В этом состоянии триггер остается и после окончания сигнала на входе  $D$ , которое длится до прихода очередного синхронизирующего сигнала, возвращающего триггер в состояние «0».

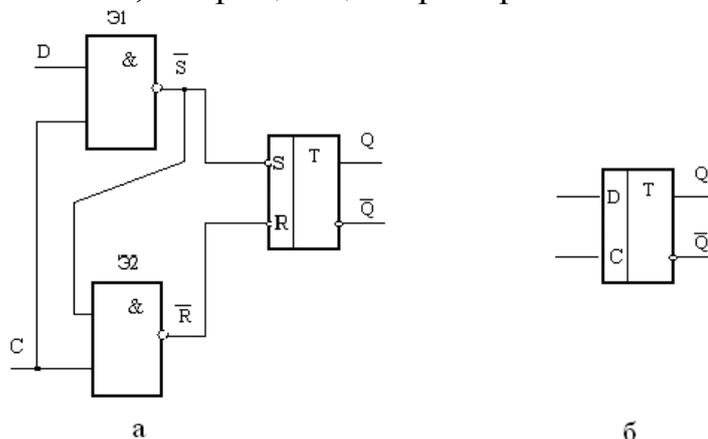


Рисунок 16.4 Схема синхронного  $D$ -триггера (а) и его условное обозначение (б)  
Это видно на временных диаграммах (рис. 16.5).

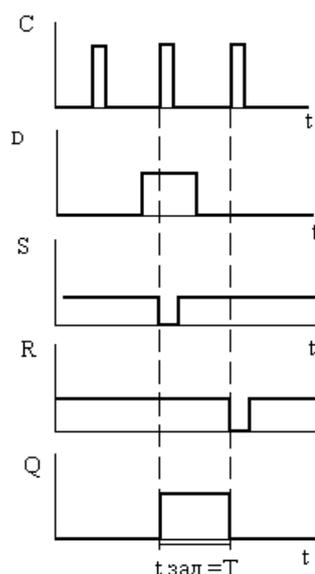


Рисунок 16.5 Временные диаграммы синхронного  $D$ -триггера

При  $D = 1$ ,  $C = 1$  на выходе  $\bar{S}$  элемента  $\mathcal{E}_1$  сигнал «0» ( $\bar{S} = 0$ ), на выходе  $\bar{R}$  элемента  $\mathcal{E}_2$  сигнал «1» ( $\bar{R} = 1$ ). Так как RS- триггер имеет инверсные входы, то при  $\bar{S} = 0$ ,  $\bar{R} = 1$  он переходит в состояние «1» ( $Q = 1$ ) и остается в этом состоянии до тех пор, пока при  $D = 0$  не придет сигнал  $C = 1$ . Тогда  $\bar{S} = 1$ ,  $\bar{R} = 0$  и триггер возвращается в состояние «0» ( $C = 0$ ). При  $D = 0$ ,  $\bar{S} = 1$  и независимо от  $C$  на выходе  $Q = 0$ . Таким образом,  $D$ - триггер «задерживает» поступившую на его вход информацию на время, равное периоду синхронизирующих сигналов.

### **$T$ -триггер**

$T$ -триггер (tumble – опрокидываться), или счетный триггер, имеет один информационный вход и переходит в противоположное состояние в результате воздействия на его вход каждого очередного сигнала. Название «счетный» связано с широким применением  $T$ -триггеров в счетчиках импульсов.

$T$ -триггеры бывают одноступенчатые и двухступенчатые; а так же синхронные и асинхронные. Одноступенчатый  $T$ -триггер может быть реализован на базе  $D$ -триггера путем введения обратных связей (рис. 16.6).

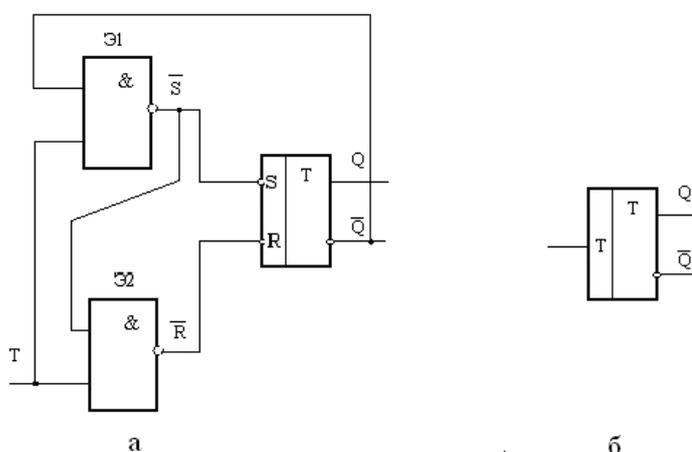


Рисунок 16.6 Схема одноступенчатого  $T$ - триггера (а) и его условное изображение (б)

Состояние такого триггера меняется при каждом изменении сигнала на  $T$ -входе от «0» к «1» (рис. 16.7).

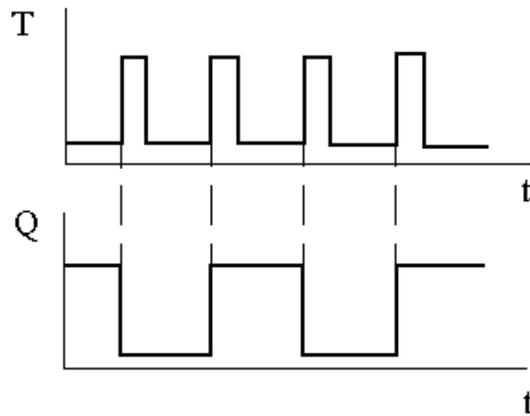


Рисунок 16.7 Временные диаграммы одноступенчатого  $T$ -триггера

Двухступенчатые триггеры  $T$ -типа выполняются путем введения обратных связей на базе двух последовательно соединенных синхронных или асинхронных  $RS$ -триггеров, один из которых называют основным или ведущим; другой – вспомогательным или ведомым (рис. 16.8).

В таком асинхронном  $T$ -триггере вход синхронизации  $C$  преобразуется в счетный вход  $T$ . Состояние такого  $T$ -триггера меняется на противоположное при каждом изменении сигнала на  $T$ - входе от «1» к «0».

Временные диаграммы показаны на рисунок 16.9.

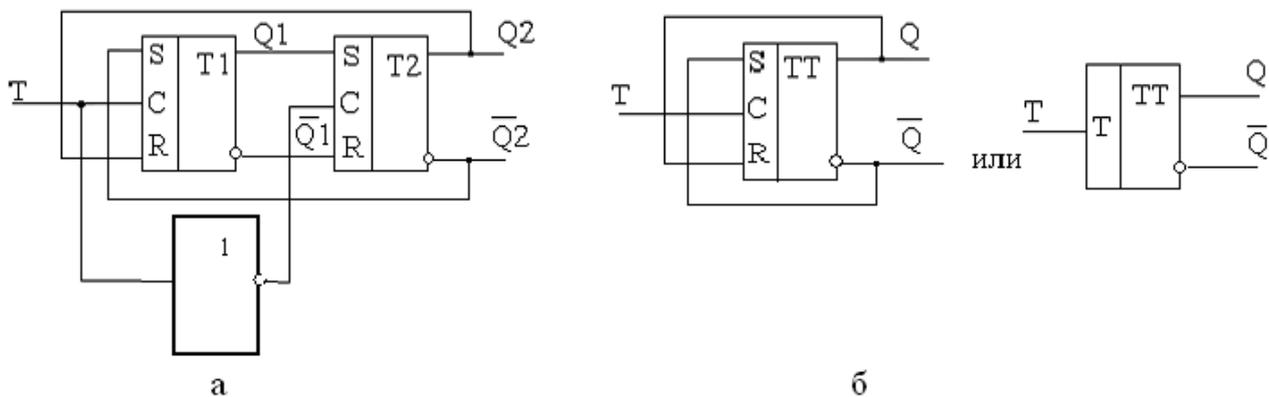


Рисунок 16.8 Схема (а) и условное графическое изображение (б) асинхронного двухступенчатого  $T$ - триггера

В данном случае состояние триггера на выходе  $Q$  меняется по заднему фронту каждого импульса на  $T$ - входе, т.е. при изменении сигнала от «1» к «0». Объясняется это тем, что в момент начала импульса информация записывается в основной триггер, а после его окончания передается во вспомогательный.

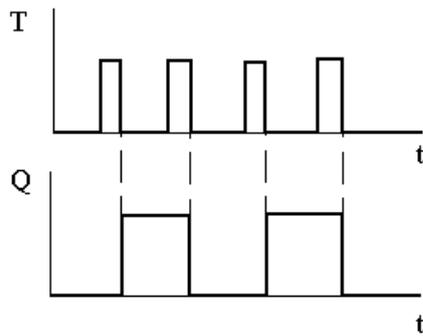


Рисунок 16.9 Временные диаграммы двухступенчатого  $T$ -триггера

### **$JK$ -триггер**

$JK$ -триггер может быть построен на основе двухступенчатого  $T$ -триггера путем использования элементов И-НЕ на входных цепях ведущего триггера (рис. 16.10).

Вход  $J$  соответствует входу  $S$ , а вход  $K$  – входу  $R$ ,  $C$  – синхронизирующий вход. Поэтому на базе  $JK$  - триггеров реализуют синхронный  $RS$  - триггер, у которого комбинация  $R = S = 1$ , запрещенная для обычного  $RS$ - триггера, является разрешающей для переключения при  $C = 1$ .

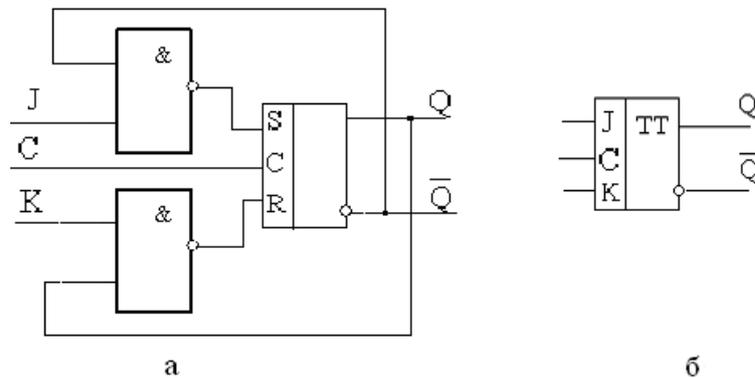


Рисунок 16.10 Схема  $JK$ - триггера (а) и его условное обозначение (б).

При  $J = K = 1$ ,  $JK$ -триггер изменяет свое состояние на противоположное в момент окончания каждого синхронизирующего сигнала, т.е. реализует функции  $T$ -триггера. Поэтому на базе  $JK$ -триггера легко реализуется синхронный  $T$ -триггер путем объединения входов и использования их в качестве входа  $T$  (рис. 16.11, а). Добавляя инвертор на входе  $JK$ -триггера получают  $D$ -триггер (рис. 16.11, б).

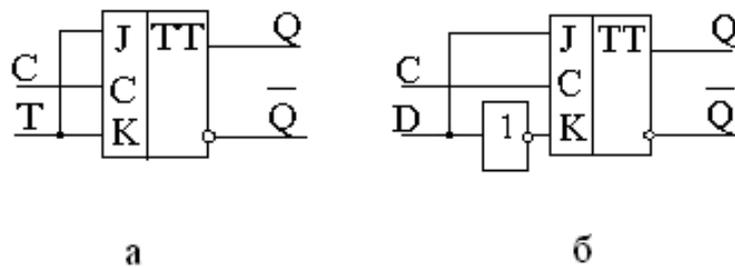


Рисунок 16.11 Схемы  $T$ - триггера (а) и  $D$ - триггера (б) на основе  $JK$ - триггера

Все типы триггеров, реализуемые на основе *JK*-триггера, дают задержку в появлении выходных сигналов, равную длительности синхронизирующего сигнала. Временные диаграммы *JK*-триггера показаны на рисунке 16.12.

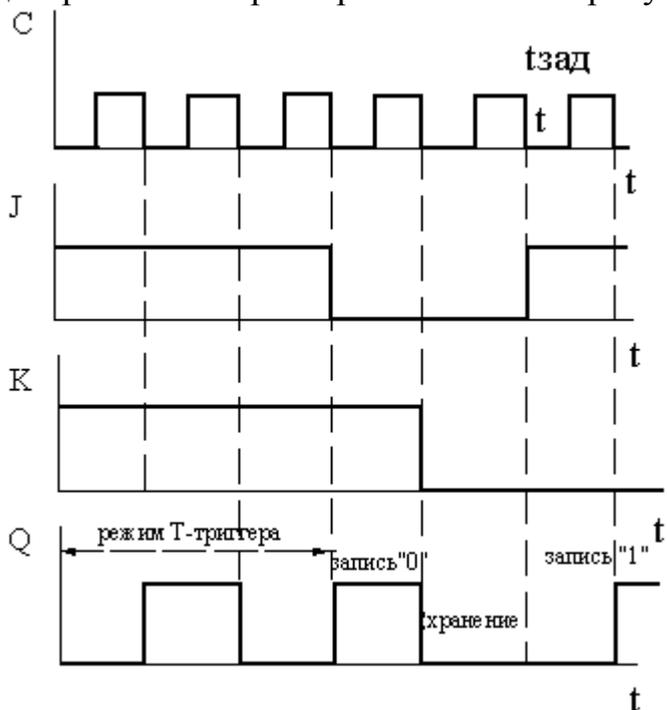


Рисунок 16.12 Временные диаграмм *JK*- триггера

Примером выполнения триггеров на ИМС являются К155ТВ1, КМ155ТВ1, КР15153ТМ2 и др.

## СЧЕТЧИКИ ИМПУЛЬСОВ

Счетчик – это последовательностное устройство, предназначенное для подсчета числа входных импульсов и фиксации этого числа в двоичном коде. В цифровых схемах они применяются для формирования адресов, подсчета количества циклов, записи входной информации в параллельном коде и т.д.

По способу изменения выходного кода счетчики делятся на: суммирующие – в которых, приход импульса увеличивает показание счетчика на единицу;

вычитающие – приход импульса уменьшает показание на единицу;

реверсивные работающие в обоих режимах.

Счетчики импульсов выполняют на основе  $T$ -триггеров, каждому разряду счетчика соответствует 1 триггер

Основным параметром счетчика является коэффициент или модуль счета  $K$  - это наибольшее число импульсов, которое может быть подсчитано счетчиком и равное максимальному числу внутренних состояний.

$$K = 2^n \quad \text{где } n - \text{число триггеров.}$$

По способу управления внутренними триггерами счетчики подразделяются на асинхронные (последовательные) и синхронные (параллельные).

В асинхронных счетчиках переключение последующего триггера осуществляется выходным сигналом предыдущего, а входные счетные импульсы приходят на вход только младшего (нулевого) триггера.

Рассмотрим работу асинхронного суммирующего счетчика, выполненного на четырех  $JK$ -триггерах (рис.17.1). Работу счетчика однозначно определяет таблица состояний (табл.17.1) или временная диаграмма (рис.17.2).

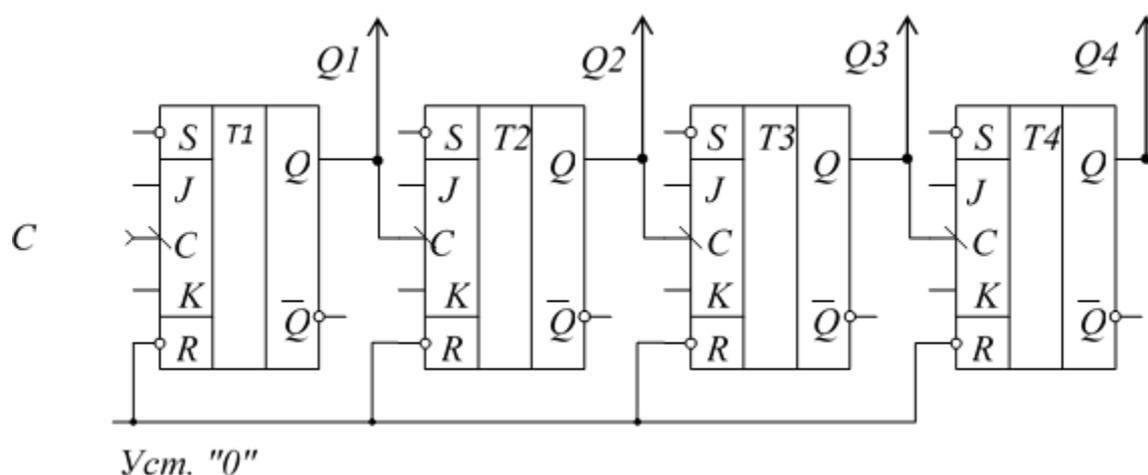


Рисунок 17.1 Схема суммирующего четырехразрядного счетчика импульсов

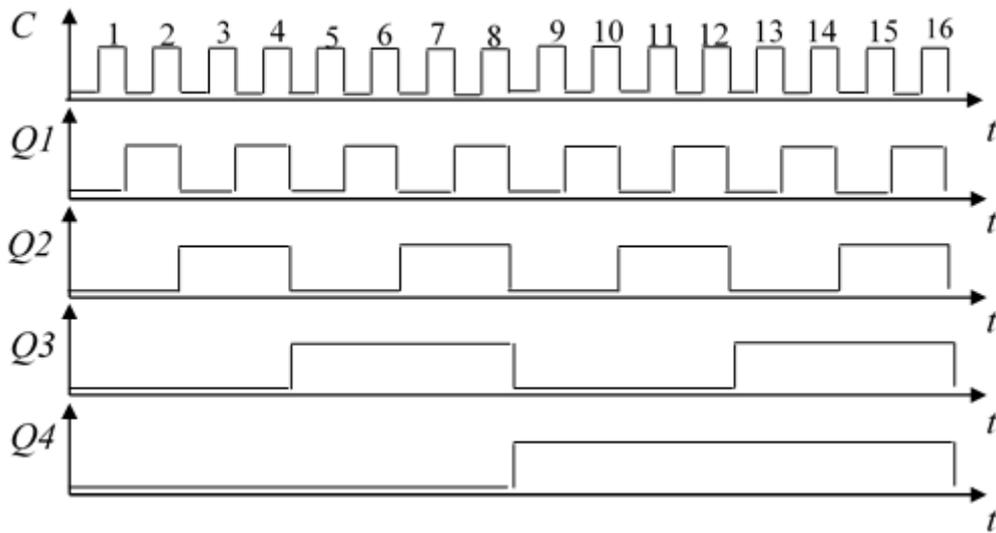


Рисунок 17.2 Временная диаграмма счетчика

Таблица 17.1

Число импульсов	Состояние триггеров				Десятич. число
	$Q_4$	$Q_3$	$Q_2$	$Q_1$	
0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	1
2	0	0	1	0	2
3	0	0	1	1	3
4	0	1	0	0	4
5	0	1	0	1	5
6	0	1	1	0	6
7	0	1	1	1	7
8	1	0	0	0	8
...	...	...	...	...	...
14	1	1	1	0	14
15	1	1	1	1	15

В исходном состоянии на объединенные входы  $R$  всех триггеров подается низкий уровень сигнала ( $R = 0$ ) для предварительного обнуления счетчика и установки на всех прямых выходах логического нуля:  $Q_1=Q_2=Q_3=Q_4=0$ .

Счетные импульсы приходят на вход первого триггера  $T1$ . Выходами счетчика являются прямые выходы триггеров, с которых информация о состоянии предыдущего триггера передается на синхровход последующего. Значение переменной  $Q_i$  соответствующего разряда счетчика изменяется, когда переменная в соседнем младшем разряде  $Q_{i-1}$  переходит из состояния “1” в “0” (см. Табл.17.1). Для реализации этого свойства последовательного счетчика  $JK$ -триггеры в схеме работают в режиме  $T$ -триггера с переключением в новое состояние по спаду входного синхроимпульса. Таким образом, частота

выходного сигнала каждого триггера в два раза меньше, чем частота сигнала на его входе (см. Рис.13.1, б). Счетчик на выходах формирует нарастающие кодовые наборы от 0000 до 1111, являющиеся двоичными эквивалентами десятичных чисел от 0 до 15. Шестнадцатый импульс переводит все триггеры в исходное нулевое состояние ( $K = 2^4 = 16$ ).

Число, записанное в счетчик, считывается от старшего разряда ( $Q_4$ ) к младшему ( $Q_1$ ).

В вычитающем счетчике синхронизирующий вход каждого триггера связан с инверсным выходом ( $\bar{Q}$ ) предыдущего триггера.

Перед началом счета должна быть предусмотрена установка всех его триггеров в исходное состояние "1". При счете импульсов вычитающий счетчик будет формировать на прямых выходах триггеров убывающие кодовые наборы от 1111 до 0000.

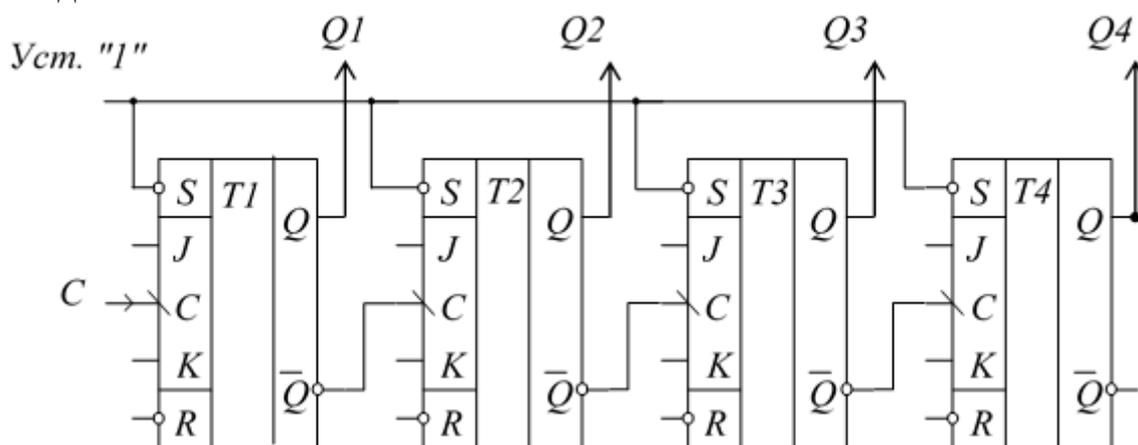


Рисунок 17.3 Вычитающий счетчик

Таблица 17.2

Число импульсов	Состояние триггеров				Десятичн. число
	$Q_4$	$Q_3$	$Q_2$	$Q_1$	
0	1	1	1	1	15
1	1	1	1	0	14
2	1	1	0	1	13
3	1	1	0	0	12
4	1	0	1	1	11
5	1	0	1	0	10
6	1	0	0	1	9
7	1	0	0	0	8
8	0	1	1	1	7
...	...	...	...	...	...
14	0	0	0	1	1
15	0	0	0	0	0

В рассмотренных примерах коэффициент счета связан с числом разрядов (триггеров)  $K = 2^n$  и может быть равен 2, 4, 8, 16, 32 и т.д. На практике часто

требуются счетчики с модулем счета 3, 5, 10, 12. При коэффициенте счета  $K \neq 2$   $n$  счетчик должен содержать  $n$  – триггеров, чтобы  $2^n > K > 2^{n-1}$ . Такой счетчик имеет избыточные состояния, которые устраняются за счет внутренних связей между триггерами.

Рассмотрим реализацию суммирующего десятичного счетчика (модуль счета 10) с естественным порядком счета.

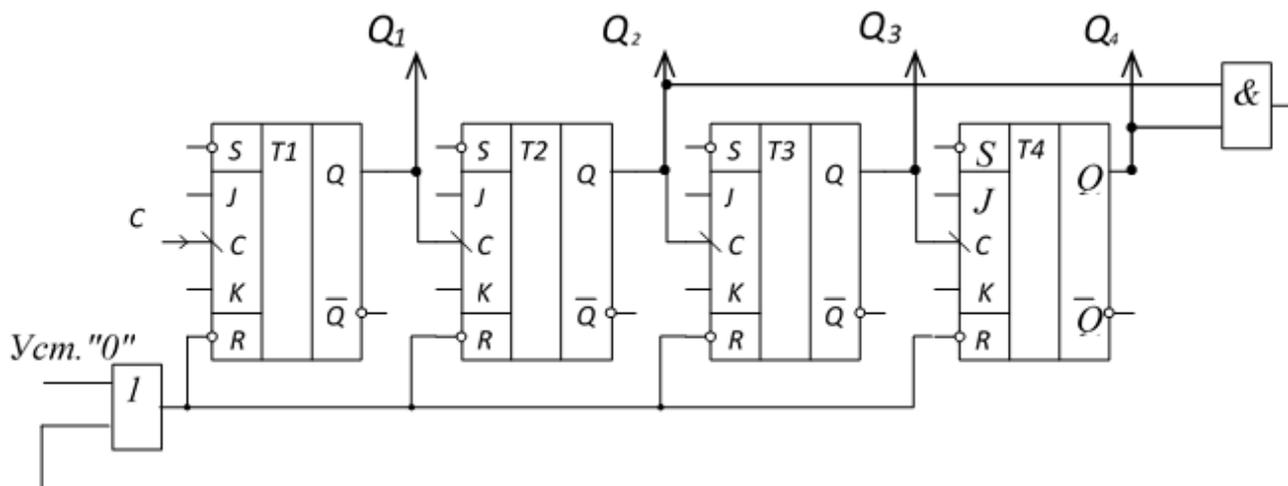


Рисунок 17.4 Суммирующий десятичный счетчик

Таблица 17.3

Число импульсов	Состояние триггеров				Десятич. число
	$Q_4$	$Q_3$	$Q_2$	$Q_1$	
0	0	0	0	0	
1	0	0	0	1	
2	0	0	1	0	
3	0	0	1	1	
4	0	1	0	0	
5	0	1	0	1	
6	0	1	1	0	
7	0	1	1	1	
8	1	0	0	0	
9	1	0	0	1	
10	1	0	1	0	сброс
11	1	0	1	1	

При комбинации на выходах счетчика соответствующей 10 в двоичной системе 1010 логический элемент И формирует сигнал «1», который вызывает

обнуление счетчика. Счет такой же, как и в двоичных счетчиках, но заканчивается раньше, чем  $2^n$ , путем введения обратных связей.

В десятичных счетчиках с **принудительным начеом** исключение избыточных состояний двоичного счетчика, достигается путем принудительной установки отдельных его разрядов в состояние «1» в процессе счета.

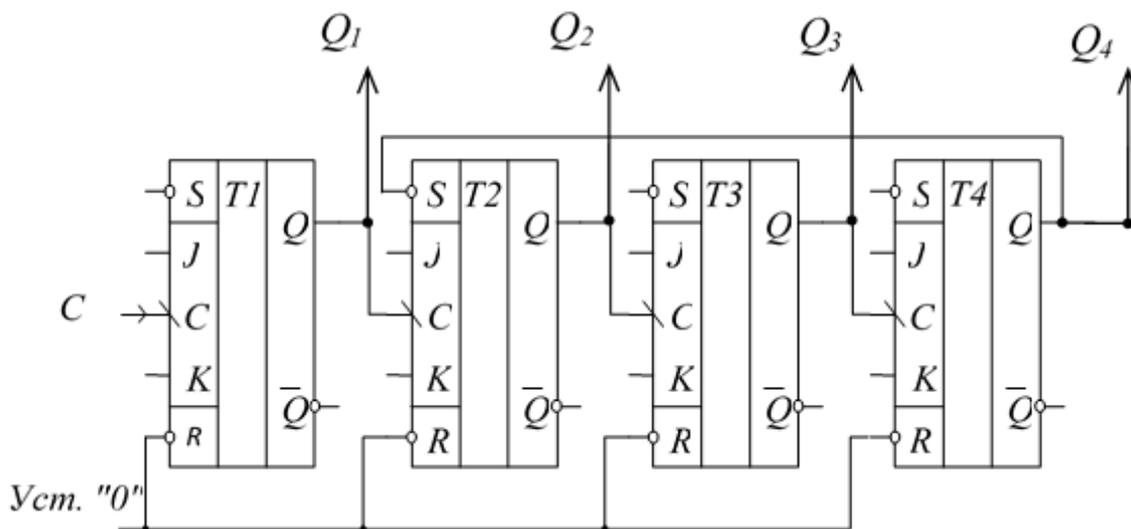


Рисунок 17.5 Суммирующий счетчик с принудительным начеом

Таблица 17.4

Число импульсов	Состояние триггеров			
	$Q_4$	$Q_3$	$Q_2$	$Q_1$
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
		[1]	[1]	
9	1	1	1	1
10	0	0	0	0

системе счисления. Пока  $Q_4=1$  счетчик работает как двоичный. С приходом восьмого импульса принудительно записывается «1» во второй и третий разряд счетчика  $Q_2 = Q_3 = Q_4 = 1$ .

Девятый импульс устанавливает «1» в триггере T1, а 10-й возвращает счетчик в исходное (0) положение.

Счетчики с  $K = 10$  называют десятичными или декадными, при последовательном соединении нескольких счетчиков можно реализовать счет на 100, 1000 и т.д.

Показания рассматриваемого счетчика не соответствует двоичной

## РЕГИСТРЫ

Регистрами называют устройства, предназначенные для приема, хранения, передачи и преобразования информации в виде двоичного числа или другой кодовой информации.

В зависимости от способа записи и считывания информации различают следующие типы регистров:

- 1) параллельные;
- 2) последовательные;
- 3) параллельно-последовательные.

Основные элементы регистра – двоичные ячейки, в качестве которых применяются триггеры. Число триггеров определяется длиной «слова», т.е. числом двоичных разрядов «слова» («слово» - законченный объём информации)

Схема *параллельного 4-разрядного регистра* показана на рис. 18.1. В параллельных регистрах запись двоичного числа, или «слова», осуществляется параллельным кодом, т.е. во все разряды регистра одновременно.

Перед началом работы все разряды регистра устанавливаются в состояние «0» подачей сигнала на все объединённые входы R триггеров. Информация во внутренние разряды регистра записывается по команде «Запись» (т.е. на входе «Запись» должна быть «1»). Тогда сигналы на каждом из 4- входов установят триггеры в соответствующие состояния. На выходной шине регистра информация появится по команде «Считывание», а при ее отсутствии на выходах – нули. При считывании информация, записанная в регистре, сохраняется. Поэтому такие регистры называют регистрами памяти.

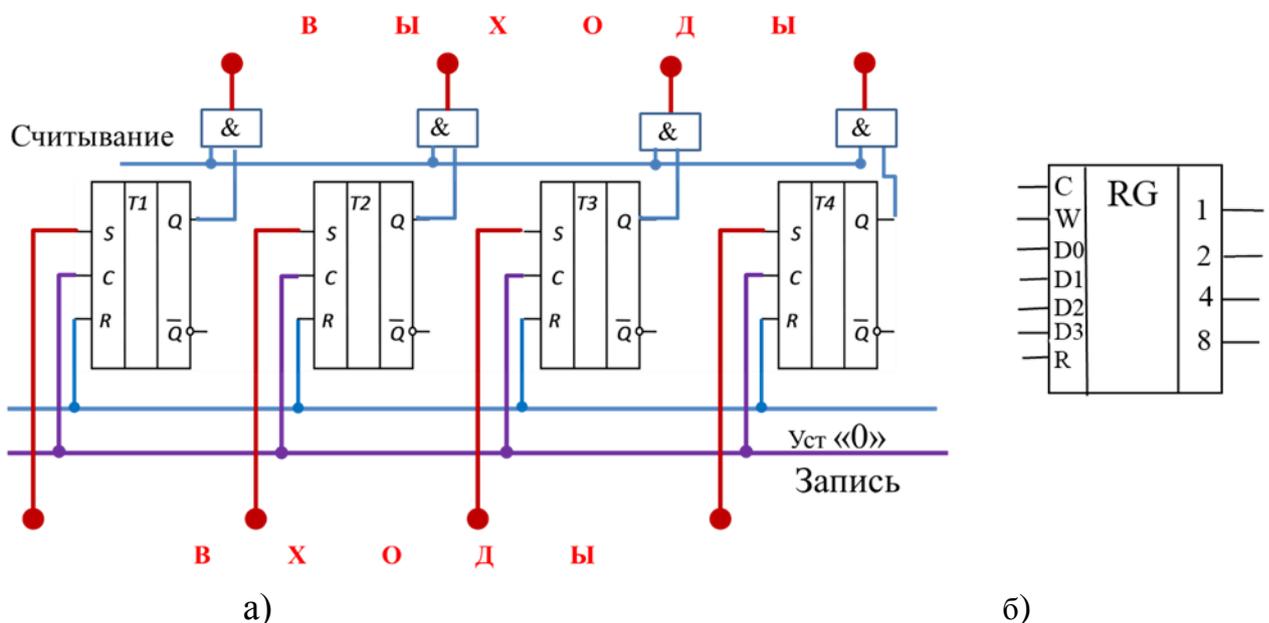


Рисунок 18.1 Параллельный регистр  
а) структура на RS – триггерах, б) условное обозначение

Последовательные (сдвиговые) регистры состоят из последовательно соединенных двоичных ячеек памяти (триггеров), состояния которых передаются (или сдвигаются) на последующие ячейки под действием тактовых импульсов.

Структурная схема последовательного четырехразрядного регистра показана на рис. 18.2. Регистр состоит из JK – триггеров, работающих в режиме D – триггера, что обеспечивается подачей инверсных сигналов на J и K входы. Перед записью информации регистр устанавливается в ноль сигналом на выходы R триггеров.

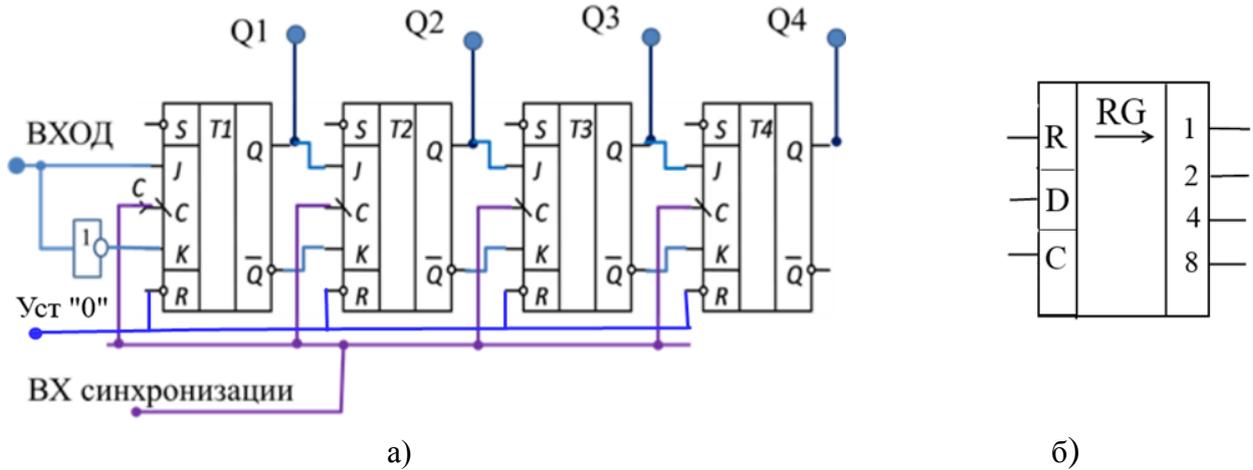


Рисунок 18.2 Структурная схема последовательного регистра (а) и его условное обозначение (б)

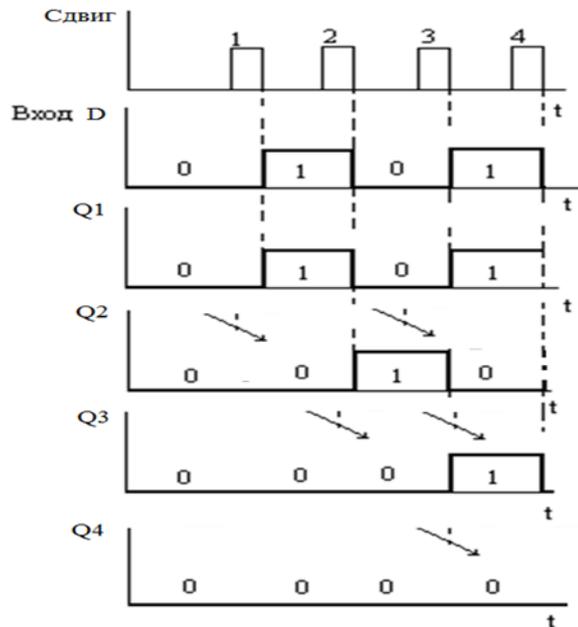


Рисунок 18.3 Временные диаграммы работы сдвигового регистра

При записи информации одновременно с поступлением кода числа подаются тактовые импульсы на входы С. Тактовыми импульсами осуществляется продвижение информации от младшего разряда регистра к старшему. В результате этого процесса после четвертого тактового импульса

ячейки регистра принимают состояние, соответствующее коду входного четырехразрядного числа (рис. 18.3). Регистр сдвига преобразует последовательный код на входе в параллельный на выходе.

В параллельно-последовательных (реверсивных) регистрах сочетаются свойства регистров последовательного и параллельного действия. В этой связи они могут быть использованы для преобразования последовательного кода в параллельный и обратно (рис. 18.4).

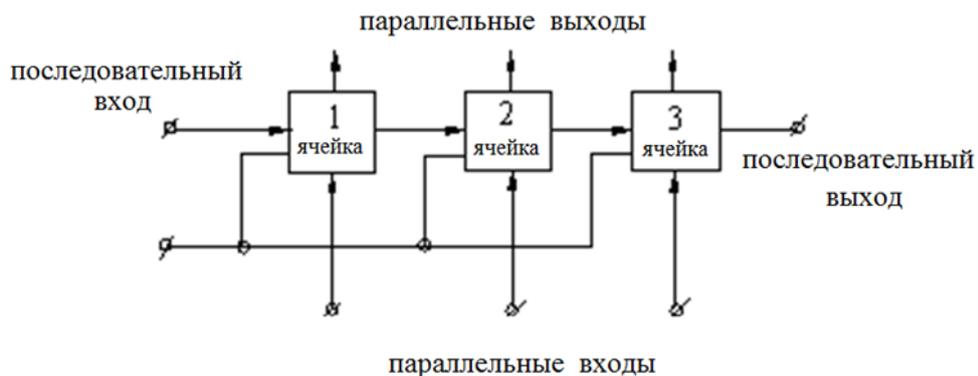


Рисунок 18.4 Структурная схема параллельно-последовательного регистра

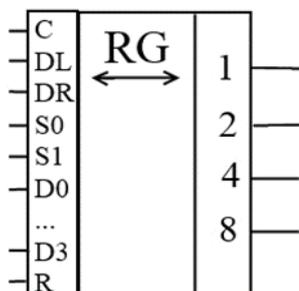


Рисунок 18.5 Обозначение реверсивного регистра

Примеры выполнения регистров на ИМС – К155ИР13, КР580ИР82 и др.

### ТЕМА 3.4. КОМБИНАЦИОННЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

Комбинационными называются логические устройства, выходные сигналы которых однозначно определяются комбинацией входных сигналов. Используются в информационно-измерительных системах, системах автоматического управления, устройствах промышленной автоматики и т.п. К комбинационным схемам относятся следующие устройства: дешифраторы и шифраторы, мультиплексоры и демультимплексоры, сумматоры.

*Шифратор* (CD - кодер) – комбинационная схема, преобразующая однопозиционный код в двоичный позиционный код. Примером является шифратор клавиатуры для ввода в цифровое устройство кода в двоичной системе счисления. При не нажатых клавишах на всех входах шифратора – логический «0», а нажатая клавиша подает на соответствующий вход логическую «1». Совокупность сигналов на входах образует код в двоичной системе, соответствующий нажатой клавише.

Логическая схема шифратора на два выхода приведена на рис. 19.1, а.

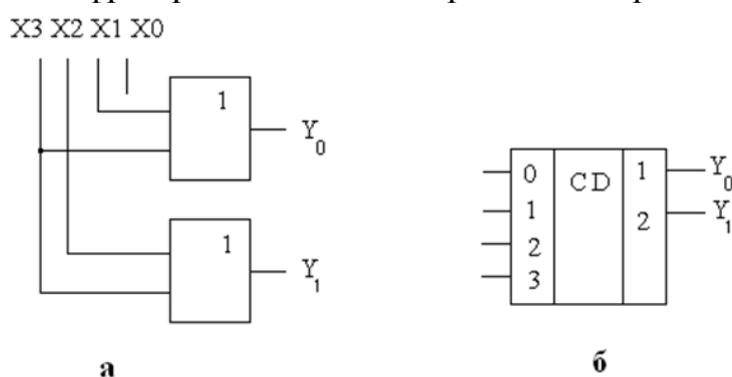


Рисунок 19.1 Схема шифратора (а) и его условное обозначение (б)

Работа схемы описывается таблицей истинности (таб. 19.1), где выходные сигналы определяются в соответствии со схемой по следующим формулам:

$$Y_0 = X1 + X3;$$

$$Y_1 = X2 + X3$$

Таблица 19.2 Таблица истинности шифратора

Входные сигналы				Выходные сигналы	
X3	X2	X1	X0	Y1	Y0
0	0	0	1	0	0
0	0	1	0	0	1
0	1	0	0	1	0
1	0	0	0	1	1

Таким образом, при подаче на вход, например, сигнала  $X_2$  («1» на входе  $X_2$ ) на выходе шифратора получаем сигналы 10 в двоичной системе, что соответствует числу 2 в десятичной системе счисления.

Очевидно, что в данном шифраторе сигнал, подаваемый на вход  $X_0$ , не используется. Примером ИС шифратора может служить ИС К555 ИВЗ.

*Дешифратором (DC - декодером)* называют устройство, предназначенное для распознавания различных кодовых комбинаций (или слов) В дешифраторе каждой комбинации сигналов на входе соответствует сигнал только на одном из его выходов. В микропроцессорах дешифраторы выполняют расшифровку кодов команд, адресов ячеек памяти, осуществляют коммутацию цепей.

Логическая схема дешифратора на два входа приведена на рисунке 19.2, а.

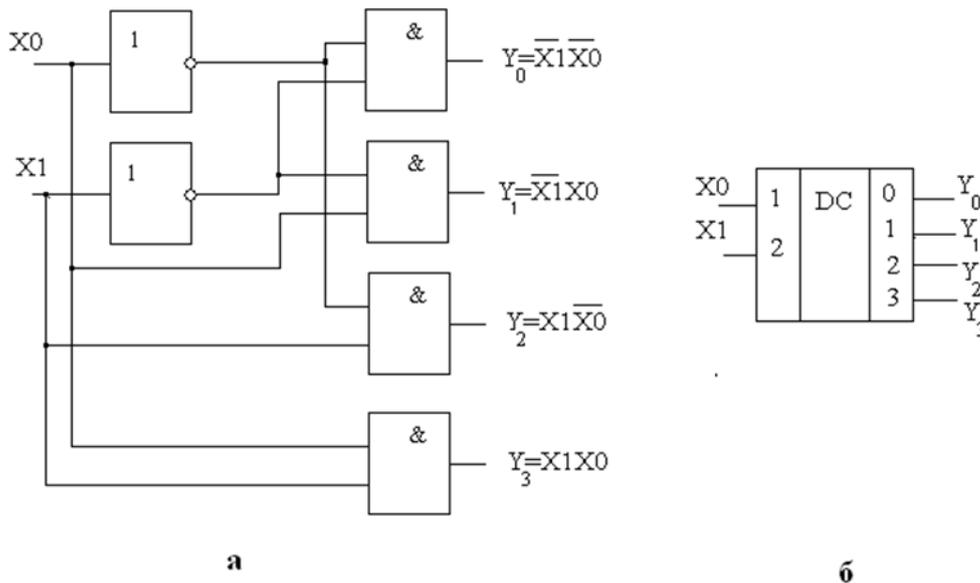


Рисунок 19.2 Схема дешифратора (а) и его условное обозначение (б)

Работа схемы описывается таблицей истинности (табл. 19.1), где выходные сигналы определяются в соответствии со схемой по следующим формулам:

$$Y_0 = \overline{X_1} \cdot \overline{X_0}; Y_1 = \overline{X_1} \cdot X_0; Y_2 = X_1 \cdot \overline{X_0}; Y_3 = X_1 \cdot X_0$$

Таблица 19.2 Таблица истинности дешифратора

Входные сигналы		Выходные сигналы			
$X_1$	$X_0$	$Y_0$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$
0	0	1	0	0	0
0	1	0	1	0	0
1	0	0	0	1	0
1	1	0	0	0	1

Таким образом, в зависимости от комбинации входных сигналов (т.е. двоичного кода) единичный сигнал будет появляться только на одном из

выходов дешифратора. Например, если комбинация входных сигналов 10, то единичный сигнал будет на выходе  $Y_2$ , что соответствует цифре 2 в десятичной системе счисления и т.д.

Дешифраторы выпускаются в виде ИМС различных серий в зависимости от назначения, например, К555 ИДЗ.

*Мультиплексор (MS)* – операционный узел, осуществляющий микрооперацию передачи сигнала с одного из входов на один выход, т.е. используется для последовательного опроса логических состояний большого числа переменных и передачи их на один выход.

Схема мультиплексора с двумя информационными входами ( $X_0, X_1$ ) и управляющим (или адресным) входом  $a$  показана на рисунке 19.3.

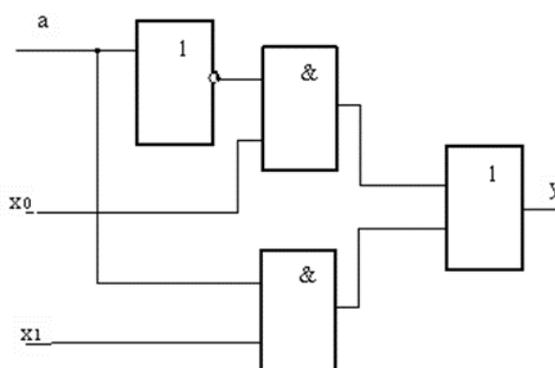


Рисунок 19.3 Схема мультиплексора с двумя информационными входами

При сигнале на адресном входе  $a = 1$  на выход передаётся значение  $x_1$ , а при сигнале  $a = 0$  – значение  $x_0$ .

Мультиплексор на 4 входа ( $x_0 - x_3$ ) имеет 2 адресных входа  $a_0$  и  $a_1$  (рис. 19.4). Если сигнал  $a_0 = 1$ , то передаётся значение  $x_1, x_3$ ; если сигнал  $a_0 = 0$ , то  $x_0, x_2$ ; если  $a_1 = 1$ , то  $x_2, x_3$ ; если  $a_1 = 0$  то  $x_0, x_1$ .

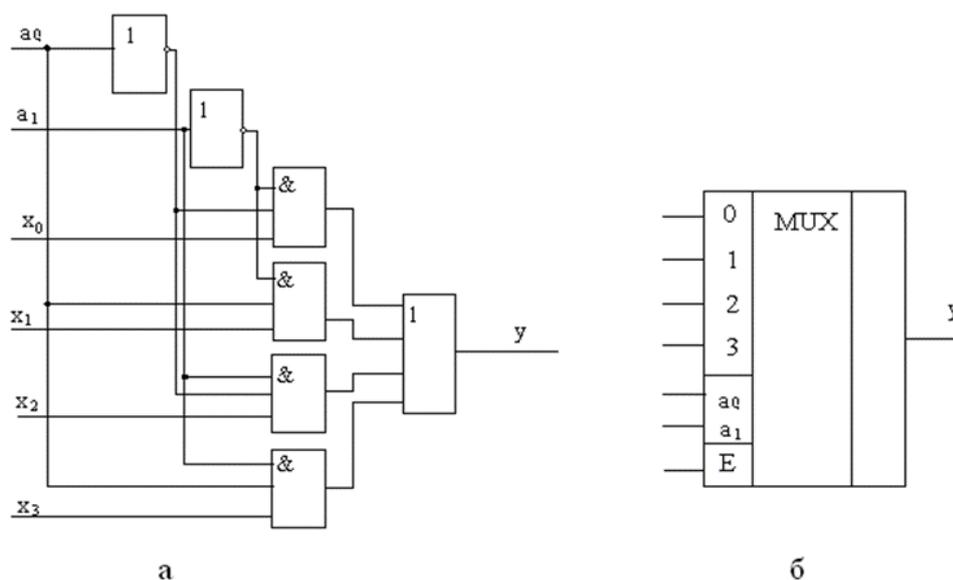


Рисунок 19.4 Схема мультиплексора на 4 входа (а) и его условное обозначение (б)

Из схемы видно, что сигнал на выходе  $y$  будет складываться из 4-х слагаемых:  $y = a_1 \times a_0 \times x_0 + a_1 \times a_0 \times x_1 + a_1 \times a_0 \times x_2 + a_1 \times a_0 \times x_3$

Например, если  $a_1 = 1$ ,  $a_0 = 0$ , то

$y = 0 \times 1 \times x_0 + 0 \times 0 \times x_1 + 1 \times 1 \times x_2 + 1 \times 0 \times x_3 = x_2$ , т.е. адрес входа мультиплексора  $A = (a_1, a_0) = 10_2 = 2_{10}$ , т.е. опрашивается 2 вход.

Мультиплексоры выпускаются в виде ИС, например, ИС К555 КР2, КР1533КР2.

*Демультимплексор (DMS)* – операционный узел, в котором сигналы с одного информационного входа распределяются в желаемой последовательности по нескольким выходам. Схема демультимплексора на четыре выхода показана на рисунке 19.5, а.

Функцию демультимплексора может выполнять стробируемый дешифратор, в котором информационный сигнал  $X$  подается на стробирующий вход  $S$ , а остальные входы используются как адресные.

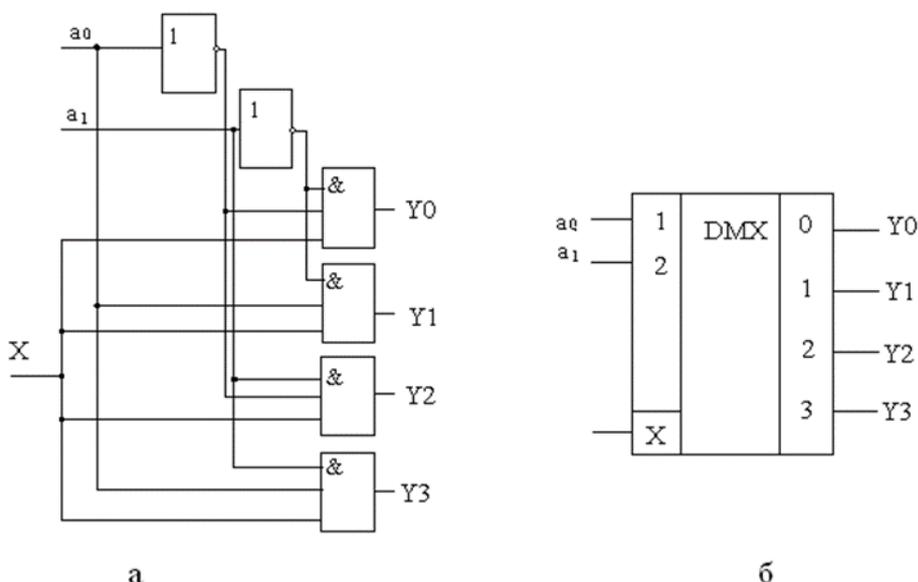


Рисунок 19.5 Схема демультимплексора (а) и его условное обозначение (б)

*Сумматор* – операционный узел, выполняющий арифметическое суммирование кодов чисел. Сумматоры входят в состав арифметико-логического устройства (АЛУ) ЭВМ.

Классификация сумматоров:

По системе кодирования:

- двоичные,
- двоично-десятичные,
- десятичные и др.;

По способу организации суммирования:

- комбинационные (результат суммирования не запоминается),
- накапливающие (результат суммирования запоминается);

По способу выполнения операций:

- последовательные,

- параллельные,
- параллельно-последовательные.

Простейшим сумматором является одноразрядный двоичный сумматор, или *полусумматор*. Он предназначен для сложения двоичных цифр, в результате чего образуется их сумма и осуществляется перенос в соответствии с правилами двоичного сложения, имеет 2 входа ( $X, Y$ ) и 2 выхода ( $S$  – сигнал суммы и  $C$  – сигнал переноса в следующий разряд). Схема на логических элементах и условное графическое изображение полусумматора показано на рис. 19.6.

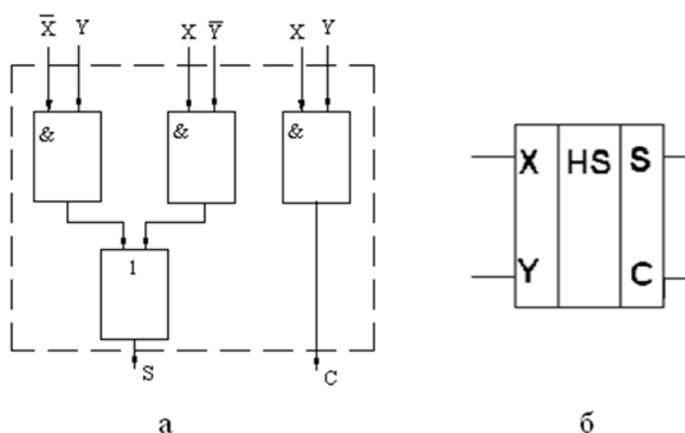


Рисунок 19.6 Схема полусумматора на логических элементах (а) и его условное обозначение (б)

Если только на одном из входов сигнал равен 1, то выходной сигнал на линии выхода  $S = 1$ . Если оба входных сигнала равны 1, то выходной сигнал на выходе  $S = 0$ , а на выходе  $C$  (перенос) сигнал равен 1. Для всех остальных комбинаций входных сигналов перенос  $C = 0$ . Логические соотношения для этой схемы будут таковы:

$$S = \bar{X}Y + X\bar{Y}; C = XY.$$

Комбинации входных сигналов полусумматора  $X, Y$  и соответствующие им выходные сигналы  $S$  и  $C$  показаны в таблице 19.3.

Таблица 19.3 Входные сигналы полусумматора  $X, Y$  и выходные сигналы  $S, C$

Вход		Выход	
$X$	$Y$	$S$	$C$
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

В таком одноразрядном сумматоре не учитывается перенос из младшего разряда. Полный сумматор используется при сложении более двух двоичных цифр. В таком сумматоре три входа: два входа для первого и второго слагаемых, третий вход – для сигнала переноса из младшего разряда.

Рассмотрим пример сложения двух двоичных чисел 1011 и 1110:

$$\begin{array}{r}
 + 1011 \\
 + 1110 \\
 \hline
 11001 \text{ — сумма}
 \end{array}
 \quad \text{или} \quad
 \begin{array}{r}
 + 1011 \\
 + 1110 \\
 \hline
 0101 \text{ — частичная сумма} \\
 11 \text{ — разряды переноса} \\
 \hline
 11001 \text{ — полная сумма}
 \end{array}$$

Цифры переноса в каждом столбце должны быть учтены в процессе сложения.

Таким образом, сумматор (рис. 19.7) имеет 3 входа и 2 выхода: выход  $S$  — для выходного значения поразрядной суммы и выход  $C_0$  — для выходного сигнала переноса, который суммируется в следующем разряде.

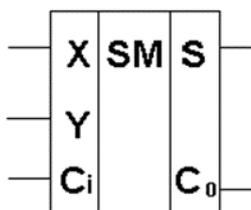


Рисунок 19.7 Условное обозначение сумматора

Логические соотношения для сумматора будут следующими:

$$S = \overline{X} \overline{Y} C_i + \overline{X} Y C_i + X \overline{Y} C_i + X Y C_i, \\
 C_0 = X C_i + X Y + Y C_i.$$

Рассмотрим работу четырехразрядного параллельного двоичного сумматора, схема которого представлена на рисунке 19.8.

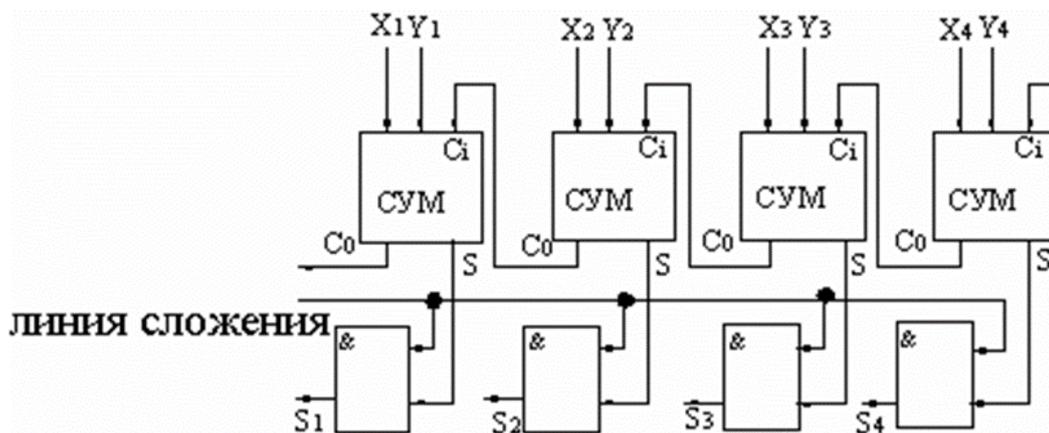


Рисунок 19.8 Схема четырехразрядного параллельного двоичного сумматора

Например, входы для первого слагаемого  $X_1 \dots X_4$ , для второго  $Y_1 \dots Y_4$ . Пусть первое число — 0111, а второе — 0011. Их сумма 1010, т.е.  $S_1 = 1, S_2 = 0, S_3 = 1, S_4 = 0$ .

Так как  $X_4$  и  $Y_4$  — младшие разряды, то перенос из предыдущего разряда в них не поступает.  $X_4 = 1$  и  $Y_4 = 1, S = 0$ , при этом возникает перенос, который

суммируется в сумматоре вместе с разрядами  $X_3$  и  $Y_3$ . Так как  $X_3 = 1$  и  $Y_3 = 1$  и  $C_i = 1$ , то  $S_3 = 1$ , на линии переноса также появится единица.

Так как  $X_2 = 1$ ,  $Y_2 = 0$ ,  $C_i = 1$ , то  $S_2 = 0$ , перенос в следующий разряд будет = 1. Так как  $X_1 = 0$ ,  $Y_1 = 0$ ,  $C_i = 1$ , то  $S_1 = 1$ , перенос будет = 0.

Сумматоры выпускаются в виде ИМС, например, К561ИМ1 – сумматор на 4 разряда.

**ТЕМА 3.5 ЭЛЕМЕНТЫ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ**

## РАЗДЕЛ 4 ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

### Тема 4.1. Классификация измерений. Основные характеристики и классы точности средств измерений.

Измерение физической величины — совокупность операций по применению технического средства, хранящего единицу физической величины, обеспечивающих нахождение соотношения (в явном или неявном виде) измеряемой величины с ее единицей и получение значения этой величины (установление значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств);

Физической величиной называют одно из объективных свойств физического объекта (явления, процесса), которое является общим в качественном отношении для многих физических объектов, отличаясь при этом количественным значением.

Истинное значение физической величины — значение физической величины, которое идеальным образом характеризует в качественном и количественном отношении соответствующую физическую величину. Поскольку истинное значение есть идеальное значение, то в качестве наиболее близкого к нему используют действительное значение, найденное экспериментальным методом, например, с помощью более точных средств измерений (далее – СИ).

Объектом измерений на практике являются различного рода физические величины и технические параметры, которые принято делить на основные и производные. Основные величины независимы друг от друга, но они могут служить основой для установления связей с другими физическими величинами, которые называют производными от них. Совокупность основных и производных единиц

Измерительные принадлежности — это вспомогательные средства измерений величин. Они необходимы для вычисления поправок к результатам измерений, если требуется высокая степень точности. Например, термометр может быть вспомогательным средством, если показания прибора достоверны при регламентированной температуре.

Значение величины получают в результате ее измерения или вычисления в соответствии с основным уравнением измерения:

$$Q = X[Q],$$

где  $Q$  — значение величины;  $X$  — числовое значение измеряемой величины в принятой единице;  $[Q]$  — выбранная для измерения единица.

Однако в процессе измерений возникают различные внешние и внутренние помехи, которые вносят погрешность в результат измерения. Причем каждая из составляющих может воздействовать с разной силой, меняющейся во времени по какому-то закону, или случайным образом. Второй случай наиболее любопытен. Этим определяется тот факт, что при многократном измерении одной и той же величины одним и тем же СИ в одинаковых условиях результаты измерения, как

правило, различаются между собой и не совпадают с истинным значением физической величины.

Можно выделить следующие виды изменений:

- 1) Прямые и косвенные
- 2) Совокупные и совместные
- 3) Абсолютные и относительные
- 4) Статические и динамические

Прямые и косвенные измерения различают в зависимости от способа получения результата измерений. Прямое измерение – измерение, при котором искомое значение физической величины получают непосредственно от средства измерений. В ходе прямых измерений искомое значение величины определяют непосредственно по устройству отображения измерительной информации применяемого средства измерений.

Косвенное измерение – измерение, при котором искомое значение величины определяют на основании результатов прямых измерений других величин, функционально связанных с искомой величиной. При косвенных измерениях искомое значение величины рассчитывают на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, подвергаемыми прямым измерениям.

В зависимости от природы измеряемой величины различают совокупные и совместные измерения.

Совокупные измерения – проводимые одновременно измерения нескольких одноименных величин, при которых искомые значения величин определяют путем решения системы уравнений, получаемых при измерениях этих величин в различных сочетаниях (число уравнений должно быть не меньше числа величин). Пример совокупного измерения – определение массы отдельных гирь из набора по известному значению массы одной из гирь и по результатам сравнений масс с другими гирями.

Совместные измерения – проводимые одновременно измерения двух или нескольких не одноименных величин для определения зависимости между ними. Пример: Снятие вольтамперной характеристики диода.

Для отображения результатов, получаемых при измерениях, могут быть использованы разные оценочные шкалы, в том числе градуированные в единицах измеряемой физической величины, либо в некоторых относительных единицах. В соответствии с этим принято различать абсолютные и относительные измерения. Абсолютное измерение – измерение, основанное на прямых измерениях одной или нескольких основных величин и (или) использовании значений физических констант. Относительное измерение – измерение отношения одноименных величин или функций этого отношения. Пример — измерение твёрдости одного материала, относительно твердости другого.

В зависимости от режима измерения различают статические и динамические измерения.

Статическое измерение – измерение физической величины, принимаемой

в соответствии с конкретной измерительной задачей за неизменную на протяжении времени измерения.

Динамическое измерение – Измерение, при котором средства измерений используют в динамическом режиме. Динамический режим (использования средства измерений) – режим использования средства измерений, связанный с изменениями условий (факторов) за время проведения измерительного эксперимента, которые влияют на результат измерения (оценку измеряемой величины), в т. ч. изменение измеряемой величины за время измерения.

### **Основные характеристики измерений**

Выделяют следующие характеристики измерения:

- 1) Метод
- 2) Принцип
- 3) Погрешность
- 4) Точность
- 5) Корректность
- 6) Достоверность

Разберём каждый из пунктов в отдельности.

1. Метод измерений – это способ или комплекс способов, посредством которых производится измерение данной величины, т. е. сравнение измеряемой величины с ее мерой согласно принятому принципу измерения.

Различают прямой метод измерений и метод сравнения (с мерой).

Прямое измерение – измерение, при котором искомое значение физической величины получают непосредственно от средства измерений. В ходе прямых измерений искомое значение величины определяют непосредственно по устройству отображения измерительной информации применяемого средства измерений. Примером такого измерения может служить измерение силы тока амперметром.

Метод сравнения (с мерой) - метод измерений, в котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой. Пример: измерение массы на рычажных весах с уравновешиванием гирями (мерами массы с известными значениями). Существует несколько разновидностей метода сравнения:

- нулевой метод измерений;
- метод измерений дополнением;
- дифференциальный метод измерений;
- метод измерений замещением.

Нулевой метод измерений – метод сравнения с мерой, в котором результирующий эффект воздействия измеряемой величины и меры на прибор сравнения доводят до нуля. Пример: измерение массы на равноплечих весах, с полным уравновешиванием.

Метод дополнения — метод сравнения с мерой, при котором измеряемая величина дополняется мерой так, чтобы на СИ сравнения действовала их сумма, которая будет равна заранее известному значению.

Дифференциальный метод измерений – метод измерений, при котором

измеряемая величина сравнивается с однородной величиной, имеющей известное значение, незначительно отличающееся от значения измеряемой величины, и при котором измеряется разность между этими двумя величинами.

Метод измерений замещением – метод сравнения с мерой, в котором измеряемую величину замещают мерой с известным значением величины.

2. Принцип измерений – это некое физическое явление, или их комплекс, на которых базируется измерение. В основе приборов, измеряющих одну и ту же величину, могут лежать разные принципы. Например, измерение температуры с помощью термометра сопротивления, или с помощью ртутного термометра.

3. Погрешность измерения – это разность между результатом измерения величины и настоящим (действительным) значением этой величины. Является характеристикой точности измерений. Когда мы говорим про погрешность измерения, мы имеем ввиду совокупную погрешность от разных источников погрешности. Более подробно погрешности будут рассмотрены во второй теме.

4. Точность измерения – это характеристика, выражающая степень соответствия результатов измерения настоящему значению измеряемой величины.

5. Правильность измерения – это качественная характеристика измерения, которая определяется тем, насколько близка к нулю величина постоянной или фиксировано изменяющейся при многократных измерениях погрешности (систематическая погрешность).

6. Достоверность измерений – это характеристика, определяющая степень доверия к полученным результатам измерений.

Система физических величин – совокупность взаимосвязанных физических величин, образованная по принципу, когда есть «главные» независимые величины, и величины определяющиеся как их функции. Первые называются основными, вторые – производными. Отношения между основными и производными величинами устанавливается с помощью уравнений связи.

Единица измерения (единица) - действительная скалярная величина, определенная и принятая по соглашению, с которой можно сравнить любую другую величину того же рода и выразить их отношение в виде числа. Единицы измерения имеют присвоенные им по соглашению наименования и обозначения.

Допустимые значения показателей микроклимата устанавливаются в случаях, когда по технологическим требованиям, техническим и экономически обоснованным причинам не могут быть обеспечены оптимальные значения показателей микроклимата. Существует несколько видов систем физических величин: когерентные и некогерентные. В когерентных единицы измерения производных величин (производные единицы) в системе единиц когерентны (представляют собой произведения степеней единиц основных величин с коэффициентом пропорциональности равным единице). Подробно рассмотрим именно Международную систему единиц (SI), т.к. именно единицы этой системы являются предпочтительными для использования в мире.

В настоящее время применяется Международная система единиц.

Международная система единиц (SI) - система единиц, основанная на Международной системе величин, вместе с наименованиями и обозначениями, а также набором приставок и их наименованиями, и обозначениями вместе с правилами их применения, принятая Генеральной конференцией по мерам и весам (CGPM). Международная система единиц, SI, предпочтительно используется во всем мире как основной язык в области науки, техники, промышленности и торговли с момента своего создания в 1960 г.

В Республике Беларусь допускается применение единиц величин Международной системы единиц (СИ):

- основных единиц величин Международной системы единиц (СИ);
- производных единиц величин, имеющих специальные наименования и обозначения;
- производных единиц величин, образованных в соответствии с пунктами; и внесистемных единиц величин:
- единиц величин, применяемых наравне с единицами величин Международной системы единиц (СИ);
- единиц величин, применяемых в отдельных областях;
- относительных и логарифмических единиц величин;
- единиц количества и скорости передачи информации;
- условных единиц величин, оцениваемых по условным шкалам (шкалам твердости Бринелля, Виккерса, Роквелла и Супер–Роквелла, шкале активности водородных ионов (рН) и другим, для которых в Республике Беларусь созданы условия обеспечения единства измерений);
- единиц величин, применение которых обусловлено выполнением международных обязательств по международным договорам Республики Беларусь, а также международно-правовых актов, составляющих право Евразийского экономического союза.

При осуществлении внешнеторговой деятельности характеристики и параметры экспортируемых товаров могут быть выражены в единицах величин, установленных внешнеторговым договором.

Производные единицы величин образуются из основных единиц величин Международной системы единиц (СИ) по правилам образования когерентных производных единиц величин на основании законов, устанавливающих связь между физическими величинами, или математических формул. Производные единицы величин, имеющие специальные наименования и обозначения, могут быть использованы для образования других производных единиц величин. Когерентные производные единицы величин образуются с помощью простейших уравнений связи между величинами (произведений основных единиц, возведенных в степень), в которых числовые коэффициенты равны 1. Для образования когерентных производных единиц обозначения величин в уравнениях связи заменяются обозначениями единиц величин. Если уравнение связи между величинами содержит числовой коэффициент, отличный от 1, для образования когерентной производной единицы величины в правую часть уравнения подставляются значения величин в основных единицах величин,

дающих после умножения на коэффициент общее числовое значение, равное 1.

Единицы величин, применяемые наравне с единицами величин Международной системы единиц (СИ):

- тонна (масса);
- минута, час, сутки (время);
- градус, минута, секунда (плоский угол);
- литр (объем, вместимость);
- миллиметр водяного столба (давление);
- калория (количество теплоты).

Для величины времени допускается применение других единиц, получивших широкое распространение, например, неделя, месяц, год, век, тысячелетие и др., наименования и обозначения которых не применяют с приставками. Обозначения единиц величин плоского угла «градус», «минута», «секунда» пишутся над строкой. Для единицы объема, вместимости «литр» допускается обозначение L.

Единицы величин, применяемые в отдельных областях:

- морская миля, фут, астрономическая единица, световой год, парсек (длина);
- карат, атомная единица массы (масса);
- град (гон) (плоский угол);
- текс (линейная плотность);
- узел (скорость);
- гал (ускорение);
- оборот в секунду, оборот в минуту (частота вращения);
- бар, миллиметр ртутного столба, килограмм-сила на квадратный сантиметр (давление);
- электрон-вольт, киловатт-час (энергия);
- вольт-ампер (полная мощность);
- вар (реактивная мощность);
- ампер-час (электрический заряд, количество электричества) и др.

Относительные и логарифмические единицы величин:

- единица, 1, %..., (относительная величина: коэффициент полезного действия, относительное удлинение, относительная плотность, деформация, относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости, магнитная восприимчивость, массовая доля компонента, молярная доля компонента и другие);

- бел, Б, децибел, дБ (логарифмическая величина, логарифм безразмерного отношения физической величины к одноименной физической величине, принимаемой за исходную): уровень звукового давления. И другие.

Эталон - это средство измерения, передающее рабочим средствам измерения размер единицы, характеризующий хранение единицы физической величины и ее воспроизведения. Особую точность должен иметь государственный эталон, предназначенный для калибровки средств измерений в стране. Существуют так называемые аттестуемые средства измерений. Они

предназначены для научных экспериментов и имеют точность выше, чем государственные талоны.

Различают следующие виды эталонов:

- 1) первичные и межгосударственные эталоны;
- 2) национальные эталоны;
- 3) исходные эталоны (вторичные).

Первичный эталон – это эталон, который признан в международном масштабе и служит для согласования с ним размеров единиц, которые воспроизводит и хранит национальный эталон.

Национальный эталон – это эталон, признанный уполномоченным на то государственным органом служить основой для установления значений всех других эталонов единицы данной величины в стране.

Исходный эталон – это:

а) применительно к РБ, это эталон, обладающий наивысшими метрологическими свойствами из имеющихся в эталонов, в случае отсутствия национального эталона;

б) применительно к организации/предприятию, лучший по метрологическим свойствам из имеющихся в данной иерархической структуре.

В состав национальных эталонов включаются СИ, при помощи которых воспроизводят и хранят единицу, осуществляют передачу размера единиц и контролируют условия измерения и неизменность размера хранимой единицы. Можно утверждать, что любой национальный эталон является комплексным СИ.

Исходные эталоны делятся на эталоны для хранения и эталоны для передачи единицы. Их создают с целью предохранения национальных эталонов от повреждения, а также для обеспечения единства в той области измерений, где в качестве первичного используется международный эталон. В состав этого эталона входит комплекс средств, при помощи которых осуществляется хранение единицы и передача ее размера нижестоящим СИ, а также СИ, которые контролируют условия измерений и неизменность размера хранимой единицы. Каждая из операций, которая выполняется эталоном, имеет строгое определение. Воспроизведение единицы – это совокупность операций по материализации единицы ФВ с наивысшей в стране точностью (обеспечивается с помощью национального или первичного эталона).

Исходя из вышесказанного, в состав национального эталона должны быть включены СИ при помощи которых:

- 1) воспроизводят и хранят единицы;
- 2) контролируют условия измерений и неизменность размера хранимой единицы;
- 3) осуществляют передачу размера единицы.

Исходный эталон Республики Беларусь – это эталон, обладающий наивысшими метрологическими свойствами из имеющихся эталонов в Республики Беларусь. Эти эталоны предназначены для передачи размера единицы разрядным эталонам и рабочим СИ наивысшей точности. Исходные эталоны получают размер единицы путем сличений с национальными или

международными эталонами. Исходные эталоны создаются в целях предохранения национальных эталонов от повреждений и обеспечения единства измерений, в тех областях измерений, в которых в качестве первичных используются международные эталоны. Создают исходные эталоны органы государственной метрологической службы и метрологические службы предприятий. Утверждает их Госстандарт, а хранят органы метрологической службы предприятий и государства.

Основные метрологические требования к эталонам – должны обеспечивать высокую точность результатов измерений при воспроизведении единицы, хранении и (или) передаче ее размера.

Важнейшим требованием является высокая стабильность, позволяющая обеспечить неизменность размера единицы. Необходимыми также являются высокая чувствительность и малая случайная погрешность эталона, а также его низкая чувствительность к изменению условий измерений. Средством повышения точности измерений на эталоне и уменьшения личных погрешностей оператора является автоматизация измерительных и вычислительных операций.

Главная функция и одновременно отличительная особенность любого государственного эталона состоит в том что он (и только он) воспроизводит единицу данной физической величины, ибо государственный эталон является исходным, т.е. «самым образцовым» ( в рамках государственной системы обеспечения единства измерений) образцом единицы, а под воспроизведением единицы и понимается осуществление материализации единицы, наилучшим образом соответствующей ее определению, т.е. ее исходная материализация. Все остальные средства измерения получают размер единицы от соответствующего государственного эталона и, в лучшем случае, обеспечивают хранение этой единицы.

## Тема 4.2. Устройство и принцип действия электромеханических приборов (ЭМП).

Электромеханические приборы применяют для измерения напряжения, тока, мощности и других электрических величин в цепях постоянного и переменного тока низкой частоты. Название электроизмерительного прибора определяется его назначением. Различают вольтметры, амперметры, ваттметры, омметры, фазометры и комбинированные приборы – ампервольтметры, вольтомметры и другие. По принципу действия электромеханические приборы делятся на приборы магнитоэлектрической, электродинамической, ферродинамической, электромагнитной, электростатической, индукционной и некоторых других систем, используемых реже. Принадлежность прибора к той или иной системе обозначается условным значком на его шкале. Метрологические свойства прибора характеризуют его класс точности. Он обозначается числом на шкале прибора и указывает предел приведенной погрешности прибора, выраженный в процентах. Основой электромеханического прибора является измерительный механизм (ИМ), имеющий отсчетное устройство, неподвижную и подвижную части и демпфер для успокоения собственных колебаний последней. Кроме ИМ прибор может содержать шунты и добавочные резисторы, расширяющие пределы измерения и размещенные в том же корпусе. На подвижную часть ИМ действует вращающий момент, возникающий под действием токов и напряжений, функционально связанных с измеряемой величиной. Для его уравнивания используются спиральные пружинки или растяжки, создающие противодействующий момент, пропорциональный углу поворота подвижной части. Несмотря на разнообразие электромеханических приборов, в их конструкциях можно выделить много общих элементов и сборочных единиц. Каждый прибор состоит из одинаковых по назначению основных частей: корпуса, измерительного механизма, отсчетного устройства, элементов измерительной цепи. Измерительный механизм также содержит несколько общих частей: подвижную и неподвижную части, участвующие в создании момента  $M_{вр}$ , неподвижную соединительную часть (обойму или стойку) с установленными на ней деталями опор, успокоителя и др. Некоторые детали подвижной части ИМ выполняют свое назначение совместно с деталями, входящими в неподвижные части ИМ. К ним относятся: опоры подвижной части, успокоители, отсчетные устройства и элементы, служащие для создания  $M_{вр}$ . Установка подвижной части ИМ осуществляется разными способами: а) на кернах-подпятниках; б) на растяжках; в) на подвесе.

Опора керна-подпятник характеризуется наличием трения, уменьшающим чувствительность прибора и увеличивающим его погрешность и собственное потребление. Из-за трения в опорах появляется вариация показаний. Расчет опоры на керна-подпятник сводится к определению минимального радиуса закругления керна по максимальному напряжению в опоре или же к проверке прочности опор по выбранным размерам и материалам их деталей.

Опора на растяжке характеризуется отсутствием трения, поэтому приборы на растяжках имеют более высокую чувствительность и меньшее

собственное потребление мощности по сравнению с приборами на кернах. Опоры на растяжках применяются в ИМ не только в качестве упругих опор; они создают противодействующий момент, а в ИМ с подвижной рамкой служат также для подвода тока в обмотку рамки. Недостатком растяжек является наличие остаточной деформации, так называемое упругое последствие, вызывающее невозвращение указателя к нулевой отметке. Приборы на растяжках не имеют достаточной надежности при воздействии ударов и тряски, и тогда по-прежнему применяют приборы на кернах. При горизонтальном расположении подвижной части образуется ее провисание  $\Delta$ .

Опора на подвесе применяется в самых чувствительных электромеханических приборах - магнитоэлектрических зеркальных гальванометрах, устанавливаемых на капитальной стене. Подвес служит также токоподводом. В качестве второго токоподвода применяется безмоментная лента - пружинка.

В электромеханических приборах применяются воздушные, магнитоиндукционные и жидкостные успокоители.

Из воздушных успокоителей распространены крыльчатые успокоители, которые применяются в тех приборах, в которые нежелательно вводить магнитное поле, например в переносных электромагнитных и электродинамических.

В магнитоиндукционных успокоителях момент успокоения создается за счет взаимодействия магнитного потока постоянного магнита с вихревыми токами, индуцированными в секторе успокоителя или каркасе рамки при их движении в магнитном поле магнита.

Отсчетные устройства служат для визуального отсчитывания значений измеряемой величины. В электромеханических показывающих приборах они состоят из шкалы и указателя.

Шкала, а также все надписи и знаки, характеризующие прибор, наносятся на основание шкалы (циферблат). Шкалы и циферблаты нормированы ГОСТ 5365—83.

Шкалы по форме делятся на прямолинейные, дуговые и круговые (угол дуги более  $180^\circ$ ), а по соотношению длин делений в пределах одной шкалы - на равномерные и неравномерные. В равномерных шкалах деления (промежутки между соседними отметками) имеют одинаковую длину. В неравномерных отношение длины наибольшего деления к наименьшему (коэффициент неравномерности шкалы) превышает 1,3.

В современных приборах для повышения точности отсчета широко используют многошкальные отсчетные устройства, позволяющие увеличить длину шкалы, число ее делений, длину деления, уменьшить цену деления.

Указателем называется часть ОУ, положение которой относительно отметок шкалы определяет показание прибора. В зависимости от конструкции указателя приборы разделяются на стрелочные и со световым указателем.

Стрелочные просты по конструкции, но имеют малую чувствительность из-за малой длины стрелки и меньшую точность отсчета. В переносных приборах

для устранения погрешности от параллакса применяют зеркальные шкалы и трубчатые стрелки с ножевидным концом.

Световой указатель - это указатель в виде луча света, образующий на шкале световое пятно с индексом, по которому производят отсчет показаний. Путем многократного отражения от зеркал можно получить большую длину светового луча и этим увеличить чувствительность прибора. В ОУ со световым указателем погрешность от параллакса отсутствует.

Корпус служит для размещения элементов и деталей ИЦ, ИМ и ОУ и для защиты их от внешних воздействий (механических повреждений, загрязнений и т. п.). По конструкции корпуса электромеханических приборов можно разделить на две основные группы: корпуса щитовых и корпуса переносных приборов. Большинство из них изготавливается из пластмассы. Применяются также стальные, алюминиевые и комбинированные конструкции корпусов.

На рисунке 1 представлены обозначения измерительных систем:

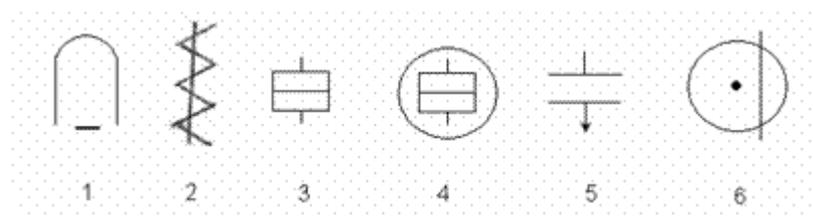


Рисунок 1

1 – магнитоэлектрическая, 2 – электромагнитная, 3 – электродинамическая, 4 – ферродинамическая, 5 – электростатическая, 6 – индукционная.

### Приборы магнитоэлектрической системы.

Устройство магнитоэлектрического ИМ показано на рисунке 2.

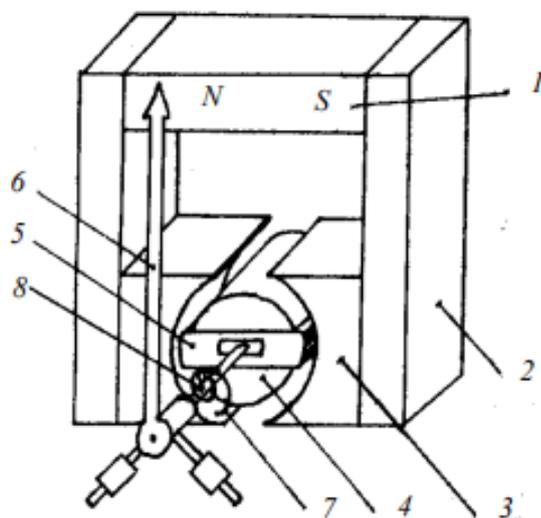


Рисунок 2

Работа его основана на взаимодействии подвижной рамки 5, обтекаемой током, с полем постоянного магнита 1. Это поле с помощью магнитопровода 2, полюсных наконечников 3 и цилиндрического сердечника 4, изготовленных из магнитомягкого материала, концентрируется в зазоре, где движется рамка 5, соединенная полусью 8 со стрелкой 6. Рамка 5 намотана на легкий алюминиевый каркас, в котором при движении возникают вихревые токи, способствующие успокоению ее колебаний. Ток подводится к рамке через спиральные пружинки 7, создающие противодействующий момент. При протекании по обмотке рамки постоянного тока на нее действует вращающий момент:

$$M_{вр} = BS_n I_p ,$$

где  $B$  – индукция магнитного поля в зазоре;

$S$  – площадь рамки;

$n$  – число витков обмотки рамки.

Учитывая, что противодействующий момент пропорционален углу поворота рамки, можно найти угол отклонения, при котором наступает равновесие подвижной части ИМ:

$$\alpha = SB_n I / W ,$$

где  $W$  – коэффициент, зависящий от упругости пружинки.

Коэффициент пропорциональности между углом отклонения и силой тока называется чувствительностью ИМ по току. При постоянстве индукции в зазоре чувствительность магнитоэлектрического ИМ постоянна и шкала линейна. При протекании по обмотке рамки меняющегося во времени тока  $i(t)$  выражение будет описывать связь мгновенных значений тока рамки и действующего на нее вращающего момента. Если частота изменения тока намного меньше частоты собственных механических колебаний подвижной части ИМ, то отклонение рамки определяется мгновенными значениями ее тока. Такой режим работы характерен для регистрирующих приборов, например самописца.

Свойства магнитоэлектрических приборов.

При работе с переменными токами приборы измеряют только постоянную составляющую протекающего через прибор тока. В магнитоэлектрическом ИМ применяют постоянные магниты с высоким значением магнитной индукции  $B$ , что обеспечивает высокую чувствительность механизма. По той же причине этот ИМ мало чувствителен к внешним магнитным полям. Кроме того, на магнитоэлектрический ИМ не действуют высокочастотные наводки. Магнитоэлектрические ИМ относятся к наиболее точным электромеханическим механизмам. При использовании в них высокостабильных магнитов могут быть созданы приборы классов точности вплоть до 0,05. К недостаткам приборов этой системы можно отнести их относительно высокую стоимость и малую стойкость к перегрузкам, обусловленную тем, что рамка ИМ, наматываемая тонким

проводом, при сильных токах может выгорать.

Достоинства: высокая чувствительность, большая точность, относительно небольшое влияние внешних магнитных полей, малое потребление энергии, малое влияние температуры, равномерность шкалы.

Недостатки: работает только в цепи постоянного тока, чувствителен к перегрузкам, высокая стоимость, обусловленная сложностью конструкции.

Электроизмерительные приборы магнитоэлектрической системы предназначаются для измерения силы тока и напряжения в качестве амперметров и вольтметров. Магнитоэлектрический прибор является составной частью омметра, с помощью которого непосредственно измеряют электрическое сопротивление.

Применяя термопреобразователи и выпрямители, магнитоэлектрические приборы используют для измерений в цепях переменного тока.

Почти все технические измерения в цепях постоянного тока осуществляются приборами данной системы. Лишь в немногих случаях, когда значение имеет не точность, а дешевизна и надежность приборов, постоянный ток измеряется электроизмерительными приборами электромагнитной системы.

### Приборы электромагнитной системы.

Устройство электромагнитного ИМ показано на рисунке 3.

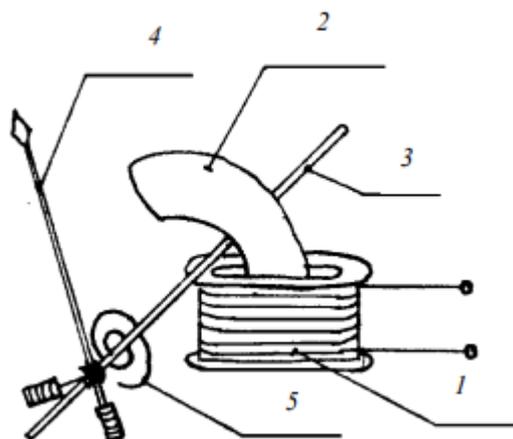


Рисунок 3

Работа его основана на взаимодействии подвижного ферромагнитного сердечника 2, укрепленного вместе со стрелкой 4 на оси 3, с неподвижной катушкой 1, обтекаемой током. Спиральная пружинка 5 используется здесь только для создания противодействующего момента. Успокоение колебаний подвижной части происходит за счет вихревых токов, возникающих в ферромагнитном сердечнике 2.

При повороте сердечника изменение  $W_{эм}$  происходит только за счет изменения индуктивности катушки  $L$ , поэтому

$$\alpha = \frac{1}{2W} \frac{dL}{d\alpha} I_p^2,$$

где  $I_p$  – среднеквадратическое значение тока, протекающего через катушку.

Свойства электромагнитных приборов.

Электромагнитные амперметры и вольтметры измеряют среднеквадратическое значение тока или напряжения и могут использоваться для измерений в цепях постоянного и переменного тока.

Достоинства: пригодность для работы в цепях постоянного и переменного токов, простота и надежность конструкции, дешевизна, устойчивость к перегрузкам.

Недостатки: чувствительность к внешним магнитным полям, сравнительно большая потребляемая мощность, относительно низкие чувствительность и точность.

Область применения: в качестве амперметров и вольтметров для технических измерений.

В лабораторных приборах высокого класса точности для уменьшения влияния внешних магнитных полей применяют экранирование.

### Приборы электродинамической системы

Устройство электродинамического ИМ поясняется рисунке 4.

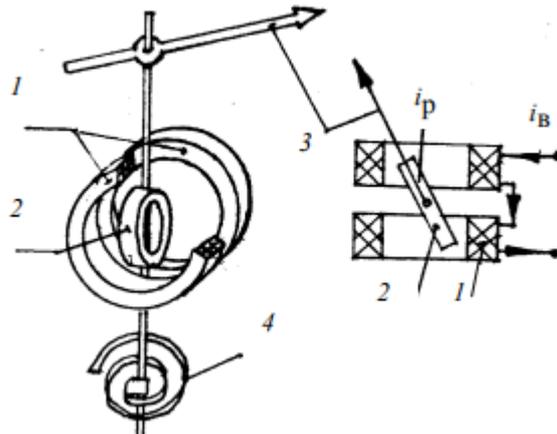


Рисунок 4

Работа его основана на взаимодействии магнитных полей неподвижной и подвижной катушек с токами, взаимное расположение которых поясняется на рисунке. Неподвижную катушку 1 выполняют обычно из двух частей, между которыми проходит ось с закрепленной на ней подвижной катушкой (рамкой) 2 и стрелкой 3. Спиральная пружинка 4 служит для создания противодействующего момента и подвода тока к рамке. Для уменьшения времени успокоения колебаний подвижной катушки применяют воздушный успокоитель. Для получения зависимости угла поворота рамки

электродинамического ИМ от токов, протекающих через его катушки, используют следующее обобщенное выражение вращающего момента, справедливое для всех электромеханических ИМ:

$$m_{вр} = dA/d\alpha = dW_{эм}/d\alpha,$$

де  $dA$  – работа, совершаемая при повороте рамки на угол  $d\alpha$ ;  $W_{эм}$  – энергия электромагнитного поля в ИМ.

Для электродинамического ИМ энергия электромагнитного поля определяется:

$$W_{эм} = \frac{1}{2} L_{в} i_{в}^2 + \frac{1}{2} L_{р} i_{р}^2 + M i_{в} i_{р},$$

где  $L_{в}$  и  $L_{р}$  – индуктивности подвижной и неподвижной катушек соответственно;  $i_{в}$  и  $i_{р}$  – мгновенные значения токов, протекающих через катушки;  $M$  – взаимная индуктивность катушек. При повороте рамки изменение энергии электромагнитного поля происходит за счет изменения взаимной индуктивности подвижной и неподвижной катушек.

$$\alpha = \frac{1}{W} \frac{dM}{d\alpha} \frac{1}{T} \int_0^T i_{в}(t) i_{р}(t) dt.$$

Свойства электродинамических приборов.

Электродинамические амперметры и вольтметры измеряют среднеквадратическое значение тока или напряжения и поэтому могут использоваться для измерений в цепях не только постоянного, но и переменного тока. Электродинамические приборы являются наиболее точными среди других приборов переменного тока, поскольку в них отсутствуют ферромагнитные элементы, а следовательно, отсутствуют и погрешности, связанные с нелинейностью и нестабильностью ферромагнетиков. Класс точности этих приборов – до 0,05. Столь малая погрешность, однако, наблюдается только на низких частотах (до 1,5 кГц), где не сказывается влияние индуктивности катушек. К недостаткам приборов этой системы следует отнести чувствительность к внешним магнитным полям и наводкам, что требует тщательной экранировки. Кроме того, чувствительность у электродинамических приборов меньше, чем у приборов магнитоэлектрических. Это вызвано невозможностью существенного увеличения параметра  $dM/d\alpha$  в системе связи катушек.

Так как в приборах электродинамической системы используют магнитные потоки, действующие в воздухе, то исключается возможность возникновения различного рода погрешностей, связанных с вихревыми токами, гистерезисом и т.п.

Достоинства: относительно высокая точность и пригодность для измерений в цепях постоянного и переменного токов.

Недостатки: повышенную потребляемую мощность (повышенные токи в катушках), необходимую для создания достаточных магнитных потоков и,

следовательно, вращающего момента; повышенную чувствительность к внешним магнитным полям, что требует применения защитных экранов; низкую перегрузочную способность и, как следствие, относительно высокую стоимость.

### Приборы ферродинамической системы

Принципиальная схема прибора представлена на рисунке 5.

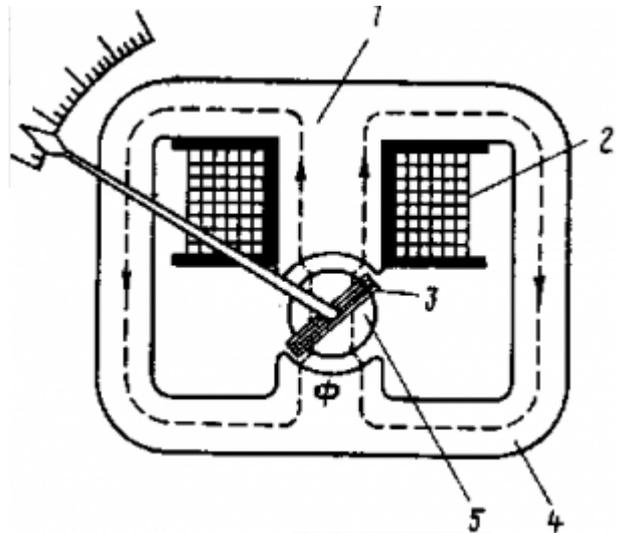


Рисунок 5

Работа ферродинамических приборов основана на том же принципе, что и приборов электродинамической системы. Для усиления магнитного поля в ферродинамическом измерительном механизме применен магнитопровод из ферромагнитного материала. Неподвижная катушка 2 размещается на полюсах ферромагнитного сердечника 4, а подвижная 3 поворачивается так же, как и в приборах магнитоэлектрической системы, в воздушном зазоре между полюсами 1 и неподвижным цилиндрическим сердечником 5. При такой конструкции приборы защищены от влияния внешних магнитных полей. Кроме того, увеличиваются магнитные потоки, создаваемые катушками, и возрастает вращающий момент, действующий на подвижную систему.

Ферродинамические приборы используют в качестве щитовых амперметров, ваттметров и вольтметров, работающих в условиях тряски и . Кроме того, их применяют в качестве самопишущих приборов, так как они имеют значительный вращающий момент, преодолевающий трение в записывающих устройствах.

Важное достоинство в отличие от электродинамических приборов: магнитные потоки действуют, в основном, в магнитопроводе, выполненном из магнитомягкого ферромагнитного материала, благодаря чему они слабо подвержены воздействию внешних магнитных полей.

Недостатки: применение магнитопроводов существенно снижает точность приборов вследствие влияния гистерезиса и вихревых токов.

Наиболее высокий класс точности у них - 0,5.

### Приборы электростатической системы

Электростатические приборы строятся на основе электростатического измерительного механизма, который представляет собой систему подвижных и неподвижных электродов. Под действием напряжения, приложенного к электродам, подвижные электроды отклоняются относительно неподвижных. В электростатических ИМ отклонение подвижной части связано с изменением емкости. Упрощенная схема приведена на рисунке 6.

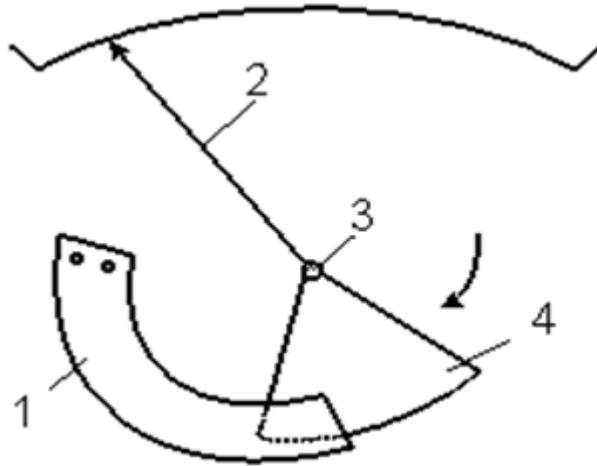


Рисунок 6

Приборы электростатической системы бывают двух разновидностей :

- с изменяющейся площадью пластин;
- с изменяющимся расстоянием между пластинами.

Обе разновидности имеют схожую конструкцию и состоят:

- из системы параллельных неподвижных пластин 1;
- стрелки 2;
- оси 3;
- секторообразной алюминиевой пластины 4.

Остальные детали: подпятники, противодействующая пружина, балансные грузики, корректор, шкала, воздушный или магнитоиндукционный успокоитель подобны деталям приборов других систем.

Перемещение подвижной части приборов этой системы происходит в результате взаимодействия электрически заряженных пластин (проводников), разделенных диэлектриками. При перемещении подвижной части изменяется ёмкость между пластинами вследствие изменения их площади или расстояния между ними.

В приборах с **изменяющейся площадью пластин** при включении в измеряемую цепь неподвижные пластины заряжаются одноименными зарядами, а подвижная - зарядом противоположного знака. Под действием сил

электрического поля подвижная пластина притягивается к неподвижным, поворачивается на оси и входит в зазор между ними, перемещая стрелку вдоль шкалы. Шкала прибора квадратична.

Приборы с **изменяющимся расстоянием между пластинами** состоят из двух неподвижных пластин, одна из которых при измерениях заряжается положительно, а другая - отрицательно. Между ними размещается подвижная пластина, электрически соединенная с одной из неподвижных.

В результате взаимодействия подвижная пластина отталкивается от одной неподвижной пластины и притягивается к другой, перемещая ось и стрелку на угол:

$$\alpha = \frac{U^2}{2W} \frac{dC}{d\alpha}$$

Угол поворота подвижной части находится из равенства вращающего и противодействующего моментов, возникающих в измерительном механизме, где  $C$  - емкость между пластинами;  $U$  - приложенное к электродам напряжение.

Из этой формулы следует, что угол отклонения подвижной части не зависит от полярности приложенного напряжения. В случае переменного напряжения угол отклонения подвижной части пропорционален квадрату действующего значения напряжения.

Для получения равномерной шкалы необходимо выполнить условие:

$$\frac{dC}{d\alpha} = \frac{k}{\alpha}$$

где  $k$  - конструктивная постоянная ИМ.

Практически равномерный шкалы на всем ее протяжении (от 0 до бМАХ) получить нельзя, так как при малых углах емкость ИМ должна быть отрицательной.

Для того чтобы получить характер шкалы вольтметра, близкий к равномерному, применяют один из двух методов выравнивания шкалы: а) метод разбивки шкалы на два участка; б) метод создания начальной емкости. По первому методу шкалу вольтметра разбивают на два участка: квадратичный и равномерный. По второму методу при соответствующем выборе формы подвижных и неподвижных электродов можно получить практически равномерную шкалу на участке от 25 % до 100 % от ее номинального значения).

Электростатические приборы характеризуются: весьма малым собственным потреблением мощности на постоянном токе и низких частотах.

Это, объясняется тем, что оно обусловлено только кратковременным зарядным током и протеканием весьма малых токов утечки через изоляцию. На переменном токе потребление мощности также невелико ввиду малой емкости ИМ и малых диэлектрических потерь в изоляции; широким частотным диапазоном (от 20 Гц до 35 МГц); малой зависимостью показаний от изменений формы кривой измеряемого напряжения; возможностью использования их в цепях постоянного и переменного токов для непосредственного измерения высоких напряжений (до 300 кВ) без применения измерительных трансформаторов напряжения. Наряду с этим электростатические приборы имеют и недостатки: они подвержены сильному влиянию внешних электростатических полей, обладают низкой чувствительностью к напряжению, имеют неравномерную шкалу, которую необходимо выравнять за счет выбора формы электродов, и др.

Достоинства:

- пригодность для измерений в цепях переменного и постоянного токов;
- нечувствительность к изменению температуры окружающей среды;
- небольшая потребляемая мощность;
- высокое входное сопротивление;
- широкий частотный диапазон;
- независимость показаний от формы кривой измеряемого напряжения (показания прибора соответствуют среднеквадратическому значению измеряемого напряжения)

Недостатки:

- нелинейность шкалы (квадратичная шкала);
- низкая чувствительность;
- невысокая точность;
- возможность пробоя между электродами.

### **Приборы индукционной системы**

Рассмотрим принцип действия приборов индукционной системы на примере индукционного счетчика.

Измерение активной энергии в цепях переменного тока проводится с помощью интегрирующих электроизмерительных приборов - электрических счетчиков.

В счетчиках используется индукционный измерительный механизм, устройство которого упрощенно показано на рисунке 7, где 1 – трехстремневой магнитопровод с обмоткой напряжения, 2 – П-образный магнитопровод с токовой обмоткой, 3 – алюминиевый диск, укрепленный на подвижной оси, 4 – противопололюс, 5 – постоянный магнит.

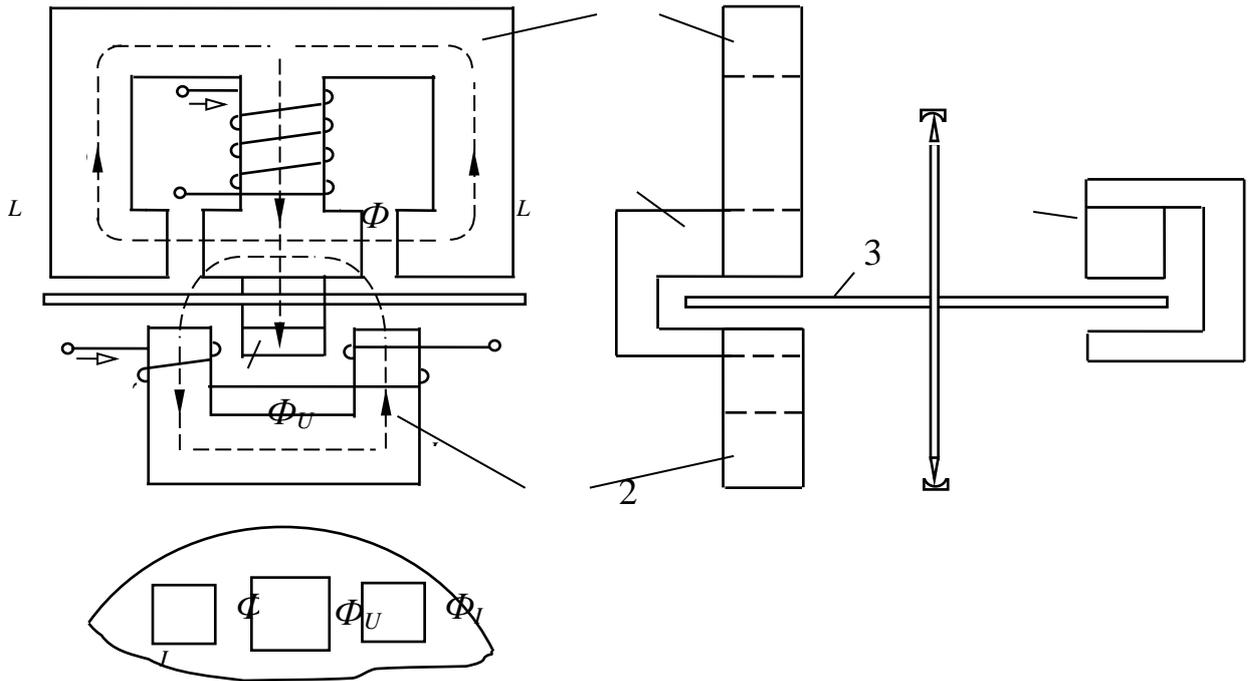


Рисунок 7

Ток в обмотке напряжения  $I_U$  создает магнитный поток  $\Phi$ , часть которого замыкается через боковые стержни ( $\Phi_I$ ), а часть через диск 3 и противоположный полюс 4 – это рабочий поток  $\Phi_U$ , отстающий от тока  $I_U$  на угол  $\alpha_U$  (рис. 8).

Для учета счетчиком только активной энергии необходимо, чтобы вращающий момент был пропорционален активной мощности нагрузки:

$$M = C_1 P = C_1 UI \cos\varphi.$$

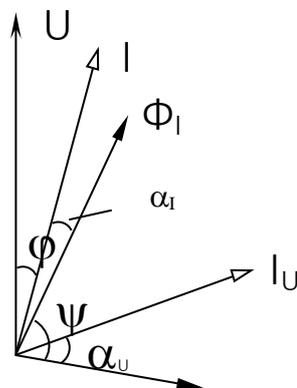


Рисунок 8

Из-за наличия больших воздушных зазоров в сердечниках поток  $\Phi_I$  пропорционален току  $I$ , а поток  $\Phi_U$  – напряжению  $U$ . Следовательно, счетчик учитывает активную энергию, если выполнено фазное условие

$$\sin\psi = \cos\varphi \quad \text{или} \quad \psi + \varphi = 90^\circ.$$

Для обеспечения равномерной угловой скорости диска создают тормозной момент  $M_T$  с помощью постоянного магнита 5. При вращении диска в магнитном поле постоянного магнита в диске наводятся вихревые токи и в результате их взаимодействия с полем постоянного магнита возникает тормозной момент, пропорциональный скорости вращения диска  $n$ ,

$$M_T = C_2 n.$$

Равновесие устанавливается при:

$$M = M_T \quad \text{или} \quad C_1 P = C_2 n$$

За время  $t$  диск сделает  $N = nt$  оборотов, а нагрузка потребит энергию

$$W = Pt,$$

$$C_1 Pt = C_2 nt \quad \text{или} \quad C_1 W = C_2 N.$$

Таким образом, число оборотов диска  $N$  пропорционально учитываемой счетчиком энергии.

Коэффициент пропорциональности  $S = W/N$ , численно равный энергии, приходящейся на один оборот диска, называют действительной постоянной счетчика.

Число оборотов диска, приходящееся на 1 кВт·ч ( $N_0$ ), называют передаточным числом. Оно указывается на счетчике.

Например: 1 кВт·ч – 2500 оборотов диска. Величина, обратная передаточному числу  $N_0$ , определяет номинальную постоянную счетчика  $S_{\text{ном}}$ .

При работе счетчика в опорах диска и в счетном механизме возникают силы трения, зависящие от скорости вращения. Обусловленный ими тормозной момент трения вносит погрешность в показания счетчика. Для компенсации момента трения в счетчике предусмотрена специальная магнитная система, создающая дополнительный вращающий момент, не зависящий от тока нагрузки. Этот компенсационный момент пропорционален квадрату напряжения. При неправильной регулировке счетчика компенсационный момент может превысить момент трения и диск счетчика будет вращаться даже при отключенной нагрузке. Это явление называют самоходом. Если компенсационный момент меньше момента трения, то счетчик не будет работать при малых нагрузках. Минимальная нагрузка  $P_{\text{min}}$ , при которой диск счетчика непрерывно вращается, определяет порог чувствительности (чувствительность):

$$S = \frac{P_{\text{min}}}{P_{\text{ном}}}.$$

Целью поверки счетчика является определение его погрешности, чувствительности и самохода. Наиболее точный метод поверки – метод ваттметра и секундомера – заключается в сравнении энергии, подсчитанной по счетчику:

$$W = C_{\text{ном}} \cdot N = \frac{3600 \cdot 1000}{N_0} N,$$

с действительной энергией, подсчитанной по образцовому ваттметру и секундомеру  $W_{\text{д}} = P_{\text{в}} \cdot t$ .

В результате поверки определяют относительную погрешность счетчика

$$\delta = \frac{W - W_{\text{д}}}{W_{\text{д}}} \cdot 100\%.$$

При маркировке счетчика указывают: тип, единицы измерения электрической энергии, номинальное напряжение, номинальный и максимальный ток

(10–40 (А) или 10(40)А), номинальную частоту сети, постоянную счетчика, класс точности прибора.

По точности измерения счетчики активной энергии подразделяются на классы 1,0; 2,0; 2,5. В отличие от электромеханических приборов других систем, класс точности счетчиков определяется не приведенной, а относительной погрешностью.

### Тема 4.3. Компенсаторы и мосты. Измерение параметров пассивных элементов электрических цепей.

Измерение параметров пассивных элементов выполняют методом непосредственной оценки (напрямую измерительным прибором) либо методом сравнения. Для этого используют измерительные мосты и компенсаторы.

Измерительные мосты подразделяют на одинарные и двойные, а также на мосты постоянного и переменного тока.

#### Устройство одинарных измерительных мостов постоянного тока.

Одинарный мост постоянного тока состоит из трех образцовых резисторов (обычно регулируемых)  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  (рис. 9, а), которые включают последовательно с измеряемым сопротивлением  $R_x$  в мостовую схему.

К одной из диагоналей этой схемы подают питание от источника ЭДС  $GB$ , а в другую диагональ через выключатель  $SA1$  и ограничивающее сопротивление  $R_0$  включают высокочувствительный гальванометр  $PA$ .

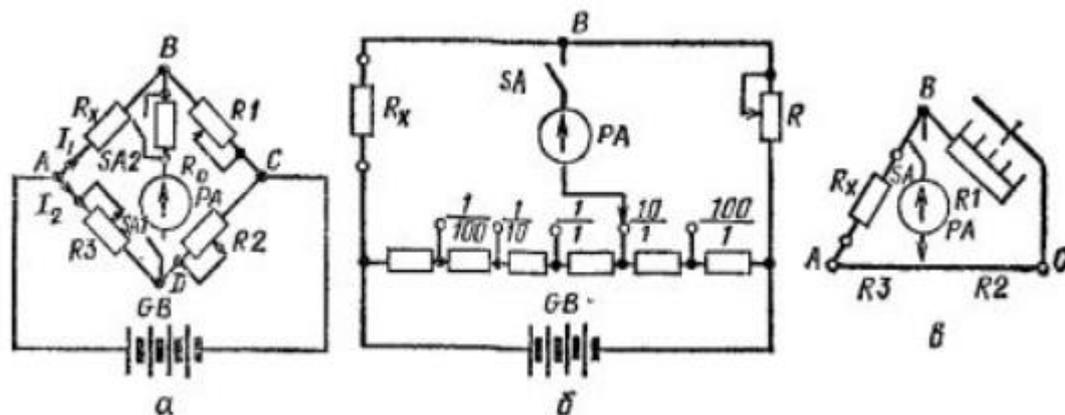


Рисунок 9

При подаче питания через резисторы  $R_x$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  проходят токи  $I_1$  и  $I_2$ . Эти токи вызовут в резисторах падение напряжений  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$ ,  $U_{ad}$  и  $U_{dc}$ .

Если эти падения напряжения будут разными, то и потенциалы точек  $\phi_a$ ,  $\phi_b$  и  $\phi_c$  будут неодинаковы. Поэтому, если выключателем  $SA1$  включить гальванометр, то через него будет проходить ток, равный:

$$I_r = (\phi_b - \phi_d) / R_0.$$

Задача измеряющего заключается в том, чтобы уравновесить мост, то есть сделать потенциалы точек  $\phi_b$  и  $\phi_d$  одинаковыми, другими словами, уменьшить ток гальванометра до нуля.

Для этого начинают изменять сопротивления резисторов  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  до тех

пор, пока ток гальванометра не станет равным нулю.

При  $I_r=0$  можно утверждать, что  $\varphi_b = \varphi_d$ . Это возможно лишь тогда, когда падение напряжения  $U_{ab} = U_{ad}$  и  $U_{bc} = U_{dc}$ .

Подставив в эти выражения значения падений напряжений:

$$U_{ad} = I_2 R_3,$$

$$U_{bc} = I_1 R_1,$$

$$U_{dc} = I_2 R_2,$$

$$U_{ab} = I_1 R_x.$$

Получим два равенства:

$$I_1 R_x = I_2 R_3 \text{ и } I_1 R_1 = I_2 R_2$$

Разделив первое равенство на второе, получим:

$$R_x / R_1 = R_3 / R_2 \text{ или } R_x R_2 = R_1 R_3$$

Последнее равенство есть условие балансировки (равновесия) одинарного моста постоянного тока.

Из него следует, что мост сбалансируется тогда, когда произведения сопротивлений противолежащих плеч будут одинаковыми. Отсюда измеряемое сопротивление определится по формуле  $R_x = R_1 R_3 / R_2$

В реальных одинарных мостах изменяют либо сопротивление резистора  $R_1$  (его называют плечом сравнения), либо отношение сопротивлений  $R_3/R_2$ .

Есть измерительные мосты, у которых меняется только сопротивление плеча сравнения, а отношение  $R_3/R_2$  остается постоянным. И наоборот, изменяется только отношение  $R_3/R_2$ , а сопротивление плеча сравнения остается постоянным.

Наибольшее распространение получили измерительные мосты, у которых плавно изменяется сопротивление  $R_1$  и скачками, обычно кратными 10, изменяется отношение  $R_3/R_2$  (рис.9,б).

В зависимости от конструктивного оформления различают магазинные и линейные (реохордные) измерительные мосты.

В магазинном измерительном мосте сопротивления плеч выполнены в виде штепсельных или рычажных многозначных мер электрических сопротивлений (магазинов сопротивлений), в реохордных мостах плечо сравнений делают в виде магазина сопротивлений, а плечи отклонения — в виде резистора, разделяемого ползунком на две регулируемые части.

По допустимой погрешности одинарные измерительные мосты постоянного тока имеют класс точности: 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 1,0; 5,0. Числовое значение класса точности соответствует наибольшему допустимому значению относительной погрешности.

Погрешность одинарного моста постоянного тока зависит от степени соизмеримости сопротивлений соединительных проводов и контактов с измеряемым сопротивлением. Чем меньше измеряемое сопротивление, тем больше погрешность. Поэтому для измерения малых сопротивлений применяют двойные мосты постоянного тока.

### Устройство двойных мостов постоянного тока.

Плечами двойного (шестиплечего) измерительного моста служат измеряемое сопротивление  $R_x$  (выполняют четырехзажимным для уменьшения влияния переходных контактных сопротивлений и включают в сеть через специальное четырехзажимное приспособление), образцовый резистор  $R_0$  и две пары вспомогательных резисторов  $R_1, R_2, R_3, R_4$ . Схема представлена на рисунке 10.

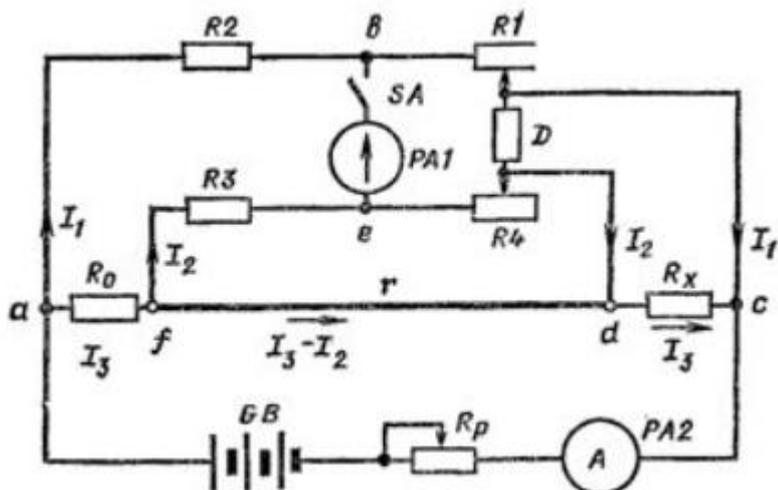


Рисунок 10

Равновесие моста определяется формулой:

$$R_x = R_0 (R_1/R_2) - (r R_3 / (r + R_3 + R_4)) (R_1/R_2 - R_4/R_3)$$

Отсюда видно, что если два отношения плеч  $R_1/R_2$  и  $R_4/R_3$  равны между собой, то вычитаемое равно нулю.

Несмотря на то, что сопротивления  $R_1$  и  $R_4$ , перемещая движок  $D$ , устанавливают одинаковыми, из-за разброса параметров сопротивлений  $R_2$  и  $R_3$  этого добиться очень сложно.

Для уменьшения ошибки измерений надо сопротивление перемычки, соединяющей образцовый резистор  $R_0$  и измеряемое сопротивление  $R_x$ , брать как можно меньшим. Обычно к прибору прилагается специальный калиброванный резистор  $r$ . Тогда вычитаемое выражения практически становится равным нулю.

Значение измеряемого сопротивления можно определить по формуле:

$$R_x = R_0 R_1/R_2$$

Двойные измерительные мосты постоянного тока рассчитаны на работу только с переменным отношением плеч. Чувствительность двойного моста зависит от чувствительности нулевого указателя, параметров мостовой схемы и значения рабочего тока. С увеличением рабочего тока чувствительность увеличивается.

Наибольшее распространение получили комбинированные измерительные мосты постоянного тока, рассчитанные на работу по схемам одинарного и

двойного моста.

### Измерительные мосты переменного тока.

В цепях переменного тока для измерительных целей применяют мостовые схемы. Данные схемы позволяют определять величины емкостей и индуктивностей, тангенсы угла диэлектрических потерь конденсаторов, а также взаимные индуктивности катушек.

Особенно выразительны две группы схем измерительных мостов переменного тока: трансформаторные мосты (с индуктивно-связанными плечами) и емкостные мосты. Емкостные мосты — это четырехплечевые схемы, у которых в плечах установлены емкостные и активные элементы. Мостам трансформаторным свойственно наличие в двух плечах вторичных обмоток трансформаторов, которые служат для подачи на мост питания.

Что касается схем емкостных, то в них могут входить как постоянные емкости и переменные (активные) резисторы, так и постоянные (активные) резисторы и переменные емкости. Мост с постоянными емкостями проще в построении, ведь ему не нужно конденсаторов переменной емкости, особым образом градуированных, вместо этого достаточно магазинов резисторов (активных сопротивлений). Пример измерительного моста переменного тока представлен на рисунке 11.

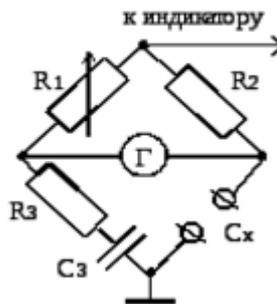


Рисунок 11

Благодаря переменным резисторам, мостовую схему можно уравновесить по реактивной и активной составляющим напряжения. Один переменный резистор градуируется соответственно значениям емкости, другой — в значениях тангенса угла диэлектрических потерь. В итоге получается эквивалентная последовательная схема исследуемого конденсатора. И следующее равенство будет отражать то самое равновесное состояние моста, а приравнивание мнимых и вещественных частей даст как раз значения искомых величин:

$$Z_1 \cdot Z_x = Z_2 \cdot Z_3, \text{ где } Z_1 = R_1$$

$$Z_2 = R_2;$$

$$Z_3 = R_3 - j(1/\omega C_3)$$

$$Z_x = R_x - j(1/\omega C_x)$$

$$R_1 [R_x - j(1/\omega C_x)] = R_2 [R_3 - j(1/\omega C_3)]$$

$$R_x = R_3 R_2 / R_1 \qquad C_x = C_3 R_1 / R_2$$

$$\text{tg} \delta = \omega C_3 R_3$$

Но в реальности паразитные параметры всегда проявляют себя, и дают погрешности уже на звуковых частотах. Паразитные индуктивности, емкости, проводимости — источники данных погрешностей, точность измерения угла диэлектрических потерь оказывается под угрозой. Меры по уменьшению влияния этих факторов - безиндуктивная и безъёмкостная намотка первого резистора. Но на деле просто необходимо эти влияния должным образом компенсировать.

Так, для того чтобы скомпенсировать паразитную индуктивность — присоединяют параллельно второму резистору подстроечный конденсатор. Кроме того, паразитные емкости и паразитные сопротивления возникают из-за наличия изоляционных деталей и трансформатора, поэтому необходимо, чтобы сам трансформатор имел двойное экранирование. Для снижения влияния емкостей и проводимостей деталей — их изготавливают из качественных диэлектриков, таких как фторопласт. В качестве источника питания подойдет генератор звуковой частоты.

Примеры таких мостов представлены на рисунках 12 и 13.

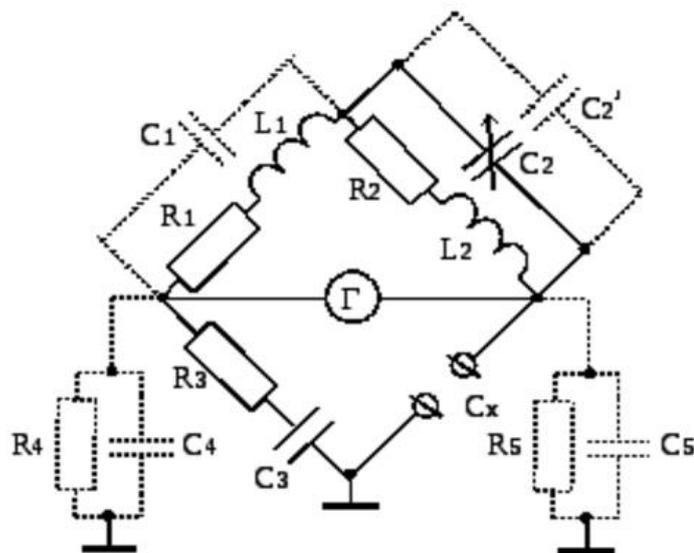


Рисунок 12

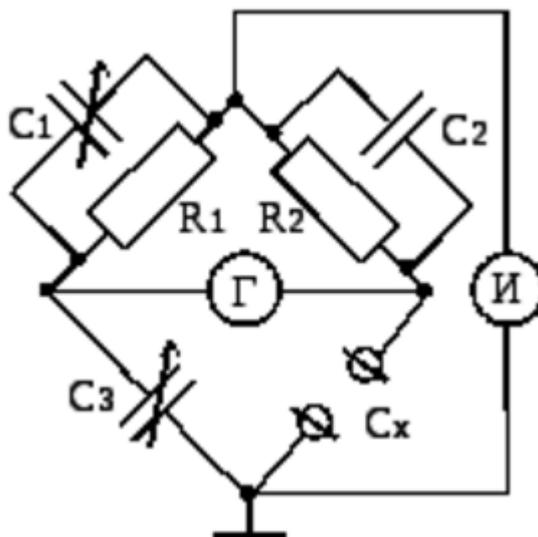


Рисунок 13

Применяемые в мостах постоянные сопротивления дают преимущество: не нужно градуировать никакой переменной резистор. В плечах стоят лишь постоянные сопротивления, постоянный конденсатор и переменные конденсаторы. Измерения их емкостей возможны напрямую. Исследуемая емкость просто подключается к зажимам, затем мост уравнивается регулировкой переменных конденсаторов. Вычисления ведутся по формулам, из которых видно, что шкала для тангенса получается прямо из шкалы переменной емкости, поскольку сопротивление и частота неизменны:

$$C_x = C_3 R_1 / R_2; \operatorname{tg} \delta = \omega R_1 C_1$$

Измерительные мосты с индуктивно-связанными плечами (трансформаторные мосты) превосходят емкостные по ряду аспектов: выше чувствительность по тангенсу и емкости, слабое влияние паразитных проводимостей, включенных как-бы параллельно плечам.

Многосекционные трансформаторы позволяют существенно расширить рабочий диапазон (измерительную шкалу) моста. Существует несколько типичных схем трансформаторных мостов, однако самая популярная — двойной трансформаторный мост. Пример на рисунке 14.

Схема целиком регулируется перебором количества витков, ей не нужны ни переменные конденсаторы, ни переменные резисторы. Так можно создавать измерительные приборы большого диапазона на многосекционных трансформаторах, причем образцовых элементов потребуется минимум.

Цепи здесь гальванически развязаны, то есть очевидно, что помехи в силу паразитных связей минимальны, поэтому и присоединительные провода могут

быть относительно длинными. Справедливы следующие уравнения в условиях равновесия моста:

$$C_x = C_0 \frac{w_2 w_4}{w_1 w_3}; \quad \operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega R_0 C_0} \frac{w_5}{w_4}$$

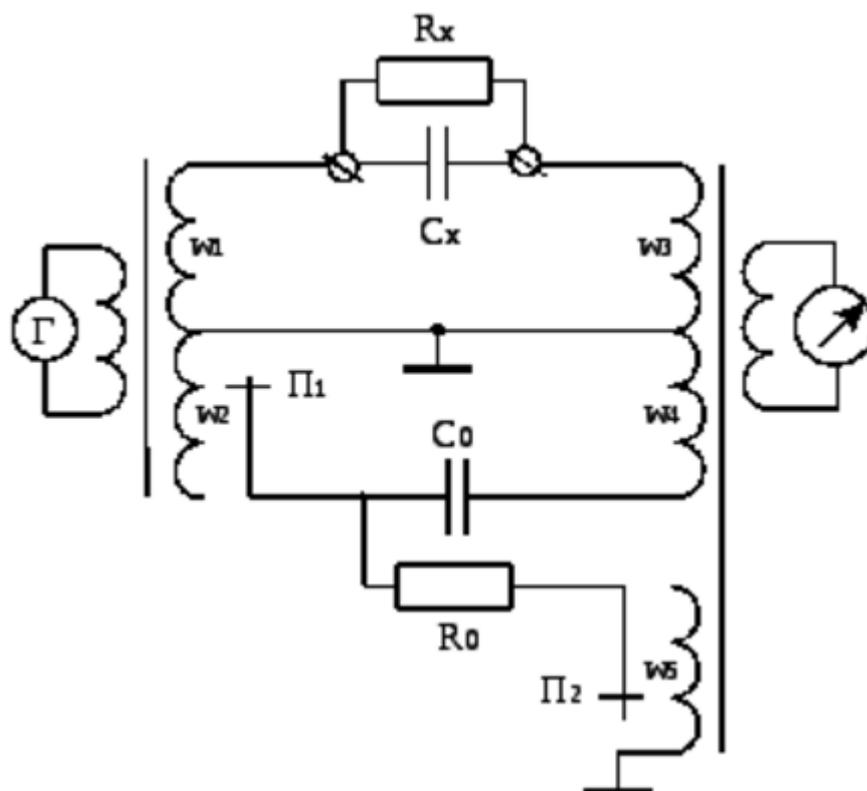


Рисунок 14

Как известно, когда речь заходит об измерении емкостей конденсаторов, активные потери в виде тангенса угла диэлектрических потерь вылезают на первый план. Так, конденсаторы по данному параметру подразделяются на три группы (таблица 1).

Таблица 1

$\operatorname{tg} \delta = 0$	$\operatorname{tg} \delta \leq 0,01$	$\operatorname{tg} \delta \geq 0,01$

Следующие соотношения отражают полное сопротивление конденсатора в цепи переменного тока и его тангенс:

при последовательной схеме замещения

$$Z = R - j \frac{1}{\omega \cdot C}; \operatorname{tg} \delta = \omega \cdot R \cdot C$$

при параллельной схемах замещения

$$\operatorname{tg} \delta = 1 / \omega RC$$

Измерение емкости конденсатора, не обладающего потерями, проводят по следующей схеме, в которой два активных плеча определяют пределы измерения соотношением своих значений, а образцовая емкость является переменной. Здесь в процессе измерения подбирают соотношения резисторов, изменяют величину образцовой емкости (рис.15).

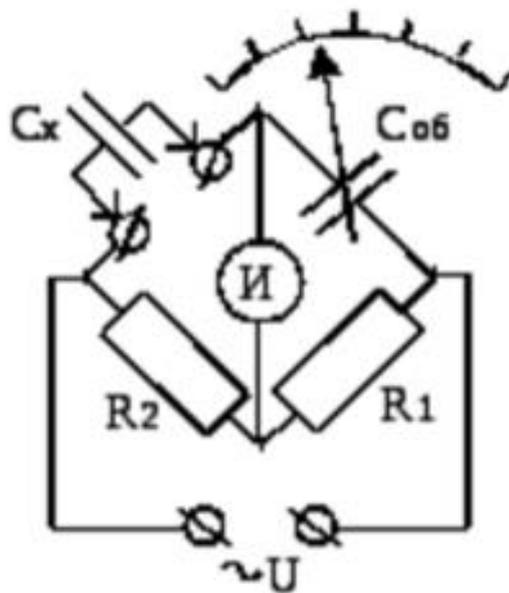


Рисунок 15

Составив условие равновесия, получим:

$$C_x = C_{об} R_1 / R_2$$

Измерение емкости с малыми потерями проводят по схеме последовательного замещения конденсатора, при этом уравнивают мост изменяя емкость и активное сопротивление, достигая минимального показания на шкале индикатора нуля (рис.16).

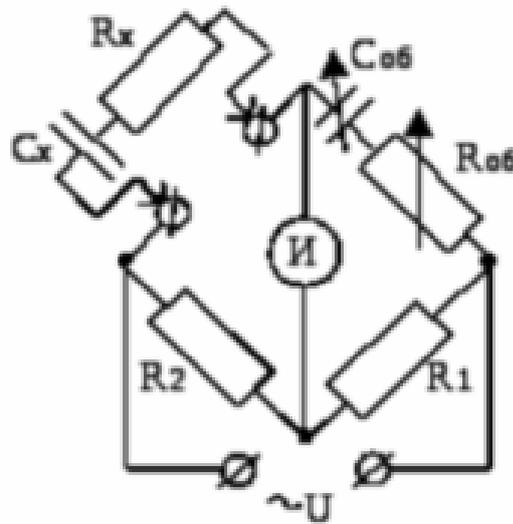


Рисунок 16

Из условия равновесия следует:

$$C_x = C_{0б} R_1 / R_2; \quad R_x = R_{0б} \frac{R_2}{R_1};$$

$$\operatorname{tg} \delta = \omega \cdot R_x \cdot C_x = \omega \cdot R_{0б} \cdot C_{0б}.$$

Конденсаторы с существенными потерями в диэлектрике требуют, чтобы в схеме замещения сопротивление было бы включено параллельно образцу, согласно приведенной выше схеме. Формула для тангенса будет иметь следующий вид:

$$\operatorname{tg} \delta = 1 / \omega \cdot R_{0б} \cdot C_{0б}$$

Так, с помощью мостов возможно проводить измерения емкостей реальных конденсаторов номиналами от единиц пф до десятков мкф, причем с высокой степенью точности (от 1 до 3 порядка).

Измеряя индуктивности, пользуясь описанным выше подходом, возможно сравнивать их с емкостями, а не обязательно с индуктивностями, ведь изготовить точную переменную индуктивность — непростая задача. Так и пользуются схемами замещения с образцовыми емкостями вместо индуктивностей (рис.17).

Условие равновесия позволяет найти сопротивление и индуктивность, записывается результат в следующем виде:

$$r_x = R_1 R_2 / R_{об}$$

$$L_x = C_{об} R_1 R_2$$

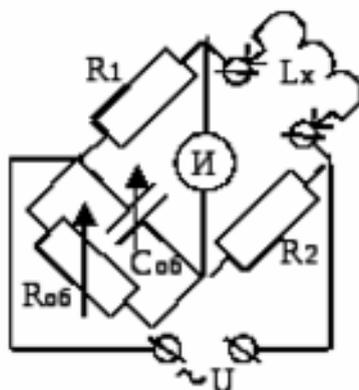
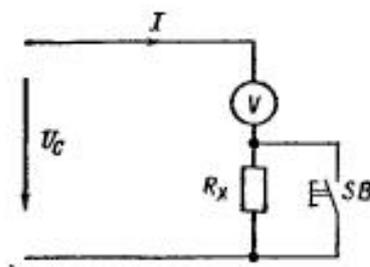


Рисунок 17

### Измерение активного сопротивления.

Следует добавить, что измерение активного сопротивления можно выполнить напрямую с помощью мегомметра, например. А также с помощью



вольтметра (рис.18).

Рисунок 18

Для того чтобы измерить сопротивление вольтметром, его включают последовательно с измеряемым сопротивлением  $R_x$ , которое закорачивают при помощи кнопки SB.

При нажатой кнопке SB определяют показания вольтметра, то есть получают напряжение сети  $U_c$ , после чего размыкают кнопку и фиксируют показания вольтметра  $U_v$ .

Можно определить ток  $I = U_v / R_v$ .

Затем находят падение напряжения на  $R_x$ . Следовательно, зная показания вольтметра при нажатой кнопке  $U_c$  и при разомкнутой  $U_v$  и внутреннее сопротивление вольтметра  $R_v$  можно определить измеряемое сопротивление  $R_x$  по формуле

$$R_x = (U_c / U_v - 1) R_v$$

#### Тема 4.4. Электронные аналоговые приборы.

Магнитоэлектрические приборы являются наиболее чувствительными среди электромеханических. Однако при измерении очень слабых токов или напряжений их чувствительность уже недостаточна. Более высокая чувствительность достигается в аналоговых электронных электроизмерительных приборах. В них измеряемый сигнал вначале усиливается, а затем подается на магнитоэлектрический прибор. Применение электронных устройств позволяет создать аналоговые электронные приборы с высокой чувствительностью, пригодные для измерений как в высокоомных, так и в низкоомных цепях и цепях постоянного и переменного тока. Аналоговые электронные вольтметры делятся на вольтметры постоянного и переменного напряжения и универсальные. Существуют также импульсные и селективные вольтметры. На рисунке 19 приведены упрощенные структурные схемы электронных вольтметров постоянного и переменного напряжений.

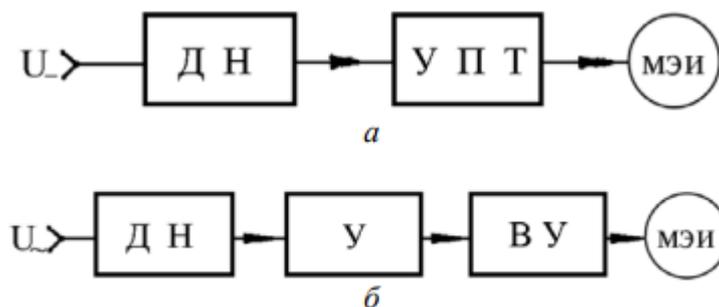


Рисунок 19

В электронном вольтметре постоянного напряжения (рис. 19, а) измеряемое напряжение подается на делитель напряжения (ДН), позволяющий установить требуемый предел измерений, а затем усиливается электронным усилителем постоянного тока (УПТ) до величины, достаточной для работы измерительного механизма магнитоэлектрического индикатора (МЭИ). В случае вольтметра переменного напряжения (рис. 19, б) измеряемое переменное напряжение после ДН усиливается электронным усилителем (У) и затем с помощью выпрямительного устройства (ВУ) преобразуется в постоянное, которое и поступает на МЭИ.

Из изложенного следует, что электронный вольтметр постоянного напряжения по всем своим свойствам подобен вольтметру с магнитоэлектрическим измерительным механизмом, а электронный вольтметр переменного напряжения подобен выпрямительному вольтметру с магнитоэлектрическим измерительным механизмом. Погрешность электронного вольтметра переменного напряжения также существенно зависит от формы кривой измеряемого напряжения, как у электромеханического прибора выпрямительной системы.

Существуют другие разновидности электронных вольтметров: например,

импульсные вольтметры, у которых показания пропорциональны амплитуде измеряемого напряжения (максимальному значению импульса, поступающего на вход прибора).

Основным отличием электронных вольтметров от подобных электромеханических является очень малое потребление энергии от измеряемой цепи. Входное сопротивление таких вольтметров бывает, как правило, не менее 0,5 МОм, что позволяет использовать их для измерений в маломощных цепях, в частности, при наладке электронных схем. Обусловлено это тем, что энергия, необходимая для работы показывающего прибора, потребляется не от измеряемого объекта, а от источника питания. От измеряемого объекта потребляется ничтожная энергия, необходимая только для управления энергией источника питания, поступающей на измерительную схему и показывающий прибор.

Наличие усилителя в электронных вольтметрах обеспечивает возможность измерения очень малых напряжений. Пределы измерения таких приборов могут составлять единицы милливольт и даже единицы микровольт, что практически невозможно для электромеханических вольтметров.

Следует иметь в виду, что при большом входном сопротивлении на результат измерения могут оказывать влияние наводки переменного тока на входную цепь прибора. Например, если к входу электронного вольтметра переменного напряжения с пределом измерения 1 В присоединить просто два неэкранированных разомкнутых провода длиной около метра, его показания будут сильно отличаться от нуля. Чтобы отклонилась стрелка такого прибора, достаточно прикоснуться рукой к незаземленному (не общему) выводу такого прибора. Поэтому при использовании электронных приборов следует или применять специальные кабели, входящие в комплект поставки прибора, или тщательно экранировать его входную цепь.

Электронные аналоговые амперметры строятся по тем же структурным схемам, что и вольтметры. В их состав может дополнительно входить преобразователь силы тока в пропорциональное напряжение (шунты и т.п.). Практически электронные аналоговые приборы для измерения силы тока не получили большого распространения.

В настоящее время аналоговые электронные вольтметры и амперметры выходят из употребления.

При применении аналоговых электронных измерительных приборов следует помнить их особенности и соблюдать определенные правила.

До начала измерений следует установить, какой вход симметричный или несимметричный у применяемого прибора. Если вход несимметричный, нужно строго соблюдать правило общего провода. Невыполнение этого правила может привести к поражению оператора электрическим током, повреждению прибора или схемы, в которой он применяется. Если вход симметричный, то нужно убедиться в том, что потенциал входных зажимов не будет превышать допустимого значения.

Следует установить, каков режим входной цепи у используемого прибора.

Электронные измерительные приборы могут иметь закрытый вход или открытый вход. Если прибор измеряет только переменную составляющую величины (напряжения, силы тока), поданной на его вход, то говорят, что у прибора вход **ЗАКРЫТЫЙ**. Если на показания прибора влияет сумма переменной и постоянной составляющих, говорят, что вход у прибора **ОТКРЫТЫЙ**. У некоторых типов приборов возможно изменение режима работы входа с закрытого на открытый. Если выбран режим закрытого входа, следует убедиться в том, что мгновенные значения измеряемой величины не могут превысить допускаемого для прибора значения. В противном случае прибор может быть поврежден.

Большинство электронных аналоговых вольтметров и амперметров переменного напряжения и тока реагируют на среднее за половину периода значение измеряемой величины, но градуированы в действующих значениях для синусоидального напряжения. Поэтому эти приборы неприменимы для измерения несинусоидальных токов и напряжений. Они имеют большую погрешность при измерении несинусоидальных величин. Существуют электронные вольтметры и амперметры, имеющие квадратичный детектор. Эти приборы реагируют на среднее квадратическое (действующее) значение измеряемой величины, их погрешность не зависит от формы кривой измеряемой величины. Эти обстоятельства следует принимать во внимание при выборе и применении приборов.

Электронные аналоговые вольтметры имеют большое входное сопротивление (сотни килоом). Поэтому они чувствительны к наводкам на входную цепь. Чтобы проверить отсутствие наводок, следует отключить прибор от измеряемой схемы и, не меняя положения проводов, соединяющих прибор с соответствующими точками схемы, замкнуть накоротко концы этих проводов. Стрелка прибора должна установиться на нуле. Если этого не происходит, нужно сделать вывод о том, что на входную цепь прибора действует наводка постороннего сигнала. Измерения невозможны до устранения этой наводки. В большинстве случаев наводка устраняется, если использовать входной экранированный кабель, которым комплектуется прибор, или применять витые провода в экране, соединенном с корпусом прибора. Одной из причин появления наводки может быть неправильное соединение общих проводов, нарушающее условия электромагнитной совместимости.

### **Электронно-лучевой осциллограф.**

Электронный осциллограф предназначен для визуального наблюдения осциллограмм, имеющих вид линий или фигур и представляющих собой функциональную зависимость двух физических величин, преобразованных в пропорциональные им значения электрического напряжения. Наиболее часто исследуется зависимость напряжения от времени (форма сигнала). Функциональная схема осциллографа представлена на рисунке 20.

С его помощью можно измерять постоянное и переменное напряжения и временные параметры (период, длительность и т. д.). Основным элементом

осциллографа является электроннолучевая трубка (ЭЛТ), представляющая собой стеклянный баллон, в котором создан вакуум. Внутри баллона помещены электронная пушка, аноды, отклоняющие пластины и экран, представлены на рисунке 21.

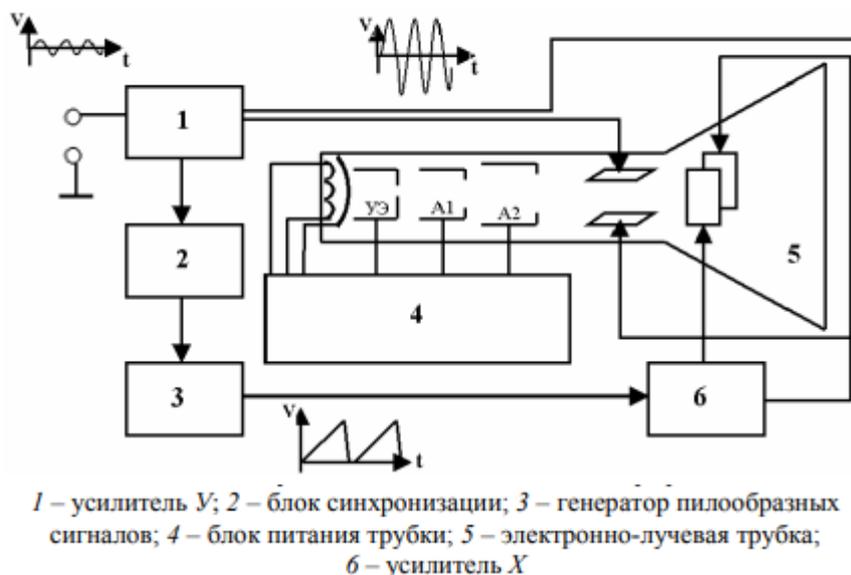


Рисунок 20

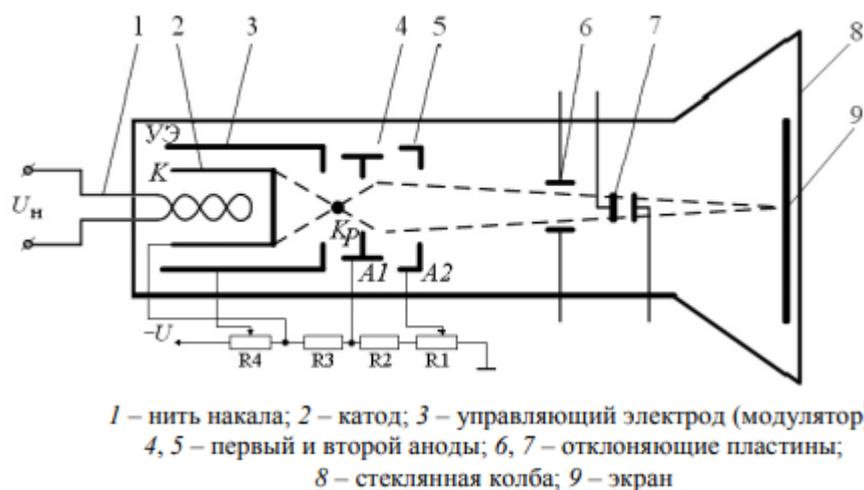


Рисунок 21

Электронная пушка предназначена для получения, формирования и ускорения пучка электронов и состоит из нити накала, катода  $K$ , управляющего электрода ( $УЭ$  или модулятора), двух анодов  $A1$  и  $A2$ . Катод разогревается от

нити накала до высокой температуры. В результате термоэлектронной эмиссии из него вылетают электроны под различными углами к оси трубки. Далее они попадают в электрическое поле между катодом и УЭ, имеющим форму цилиндра с отверстием в центре. На управляющий электрод подается отрицательный потенциал относительно катода. Под действием поля, созданного УЭ, поток электронов становится сходящимся и выходит через узкое отверстие в УЭ. Ток пучка, т. е. число пролетающих электронов за единицу времени, можно регулировать изменением потенциала управляющего электрода. Его поле оказывает еще и тормозящее действие на электроны, возвращая часть из них обратно на катод. При этом регулируется яркость светящегося пятна, возникающего на экране ЭЛТ. После УЭ пучок электронов вначале сходится в виде круга небольшого диаметра в точке Кр, называемой кроссвером (рис. 21), а затем расходится. Далее расходящийся пучок попадает в электрическое поле между УЭ и первым анодом А1 и ускоряется в нем, так как потенциал А1 выше потенциала УЭ. Затем пучок оказывается в электрическом поле фокусирующей системы, состоящей из анодов А1 и А2. Внутри анода А1 имеется диафрагма с узким отверстием для ограничения сечения пучка. В пространстве между А1 и А2 происходит дополнительный разгон электронов за счет ускоряющего электрического поля, поскольку потенциал А2 выше потенциала А1. Это необходимо для сообщения электронам кинетической энергии, достаточной для возбуждения молекул люминофора экрана (свечения).

Для повышения чувствительности, разрешающей способности и яркости свечения во многих ЭЛТ производят дополнительное ускорение электронов луча после его отклонения. Такие трубки называют трубками с последующим ускорением (послеускорением). В них между горизонтально отклоняющими пластинами и экраном располагают один или несколько электродов (анодов), имеющих потенциалы выше, чем потенциалы второго анода и пластин. Поверхность экрана покрыта люминесцирующим веществом. При взаимодействии быстрого электрона с молекулами люминофора в соответствующей точке экрана возникает свечение – часть кинетической энергии электрона преобразуется в световую. На слой люминофора с внутренней стороны трубки наносится тонкий слой алюминия (50–200 мкм). Свечение, возникшее на люминесцирующем экране и направленное внутрь трубки, отражается от алюминиевой подложки и яркость свечения экрана возрастает. Кроме того, подложка препятствует накоплению электронов на поверхности экрана, так как она соединяется со вторым анодом (или с последним анодом послеускорения) через тонкий проводящий слой металла или графита, нанесенный на внутреннюю поверхность ЭЛТ. По данному слою электроны перетекают от экрана к аноду. Слой служит также экраном от внешних электрических полей. От внешних магнитных полей ЭЛТ защищается с помощью кожуха из магнитно-мягкого ферромагнитного материала.

Принцип действия осциллографа.

В электронно-лучевой трубке электронная пушка формирует узконаправленный пучок электронов, под действием которого на экране

высвечивается небольшое пятно, имеющее вид точки. Яркость и форму этого пятна-точки можно регулировать. Смещать точку на экране ЭО можно, подавая напряжение на вертикально отклоняющие или горизонтально отклоняющие пластины, при этом величина смещения будет всегда прямо пропорциональна поданному напряжению. Если напряжение будет меняться, то смещения по осям будут переменными. В результате точка будет двигаться на экране по некоторой траектории. Если напряжение изменяется синхронно и периодически с частотой выше 20 Гц, то траектория будет повторяться и на экране образуется устойчивое изображение – осциллограмма, представляющая собой график зависимости напряжения  $U_y$  от  $U_x$ . Изображение возникает благодаря тому, что при частотах выше 20 Гц переменная освещенность воспринимается глазом как постоянная. С помощью специальных устройств значения неэлектрических величин могут быть преобразованы в пропорциональное им электрическое напряжение. Тогда на экране наблюдается график зависимости одной величины от другой. Так, если на вход Y подать напряжение, пропорциональное индукции магнитного поля в ферромагнетике, а на вход X – напряжение, пропорциональное напряженности магнитного поля в нем, то на экране будем наблюдать зависимость индукции магнитного поля в ферромагнетике от напряженности этого поля (петлю гистерезиса для данного ферромагнетика). На практике чаще всего ЭО применяется для определения зависимости исследуемого напряжения (сигнала) от времени  $t$  (определение формы сигнала). Предположим, что исследуемое напряжение  $U_{y0}$  имеет синусоидальную форму. Вначале оно подается на вход усилителя Y и усиливается им до необходимой величины.

Далее усиленное исследуемое напряжение  $U_y$  поступает на вертикально отклоняющие пластины. Предположим, что напряжение между горизонтально отклоняющими пластинами постоянно. Тогда луч будет перемещаться только в вертикальном направлении (рис. 22).

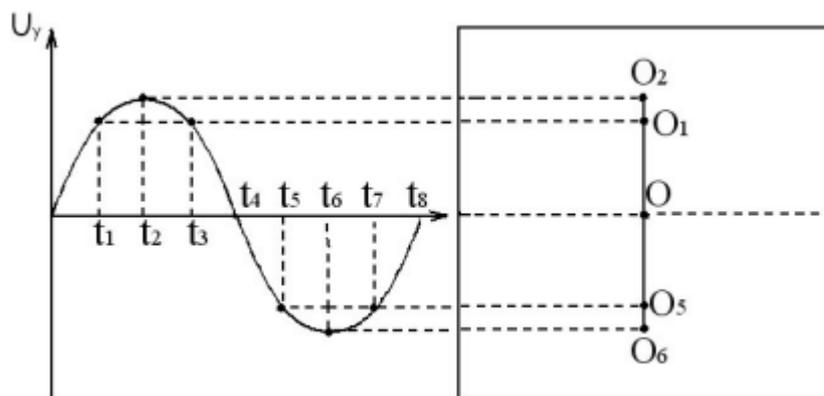


Рисунок 22

Под действием напряжения  $U_y$  луч в промежутке времени от нуля до  $t_2$  сместится от точки O в центре экрана вверх до точки O2, затем в промежутке от  $t_2$  до  $t_4$  – вниз до точки O. Далее в промежутке от  $t_4$  до  $t_6$  луч сместится вниз до

точки  $O_6$ , а в промежуток от  $t_6$  до  $t_8$  возвратится из  $O_6$  в исходную точку  $O$ . Таким образом, за период луч вычертит на экране вертикальный отрезок. Максимальное отклонение, равное половине длины отрезка, будет соответствовать амплитуде сигнала.

Величина отклонения луча  $y$  от первоначального положения прямо пропорциональна напряжению  $U_y$  между вертикально отклоняющими пластинами. Поэтому, измерив величину  $y$ , можно определять величину  $U_y$  по формуле:

$$U_y = \frac{1}{c_y} y = k_y y,$$

$$k_y = \frac{1}{c_y}.$$

Эта величина называется коэффициентом отклонения осциллографа. Он зависит от величины коэффициента усиления усилителя  $1$  и от расстояния между пластинами. Коэффициент  $k_y$  имеет размерность «вольт / деление» или «милливольт / деление». Он численно равен напряжению на входе осциллографа, которое смещает луч на одно деление по вертикали. Величина  $k_y$  устанавливается специальным переключателем.

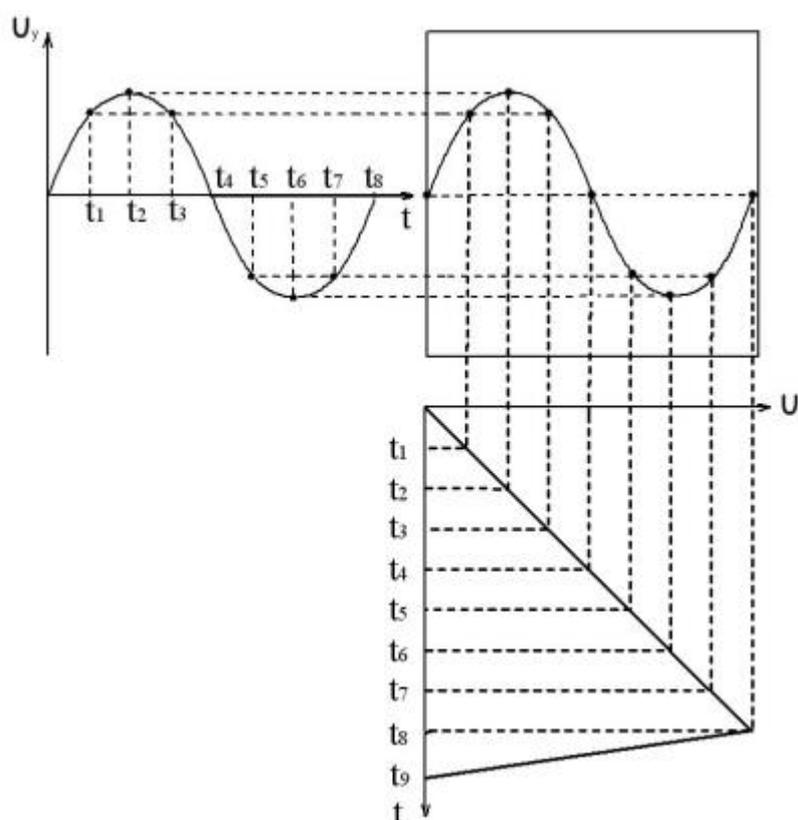


Рисунок 23

Пусть теперь усиленное исследуемое напряжение подается на вертикально отклоняющие пластины и одновременно на горизонтально отклоняющие пластины подается пилообразное напряжение. Тогда электронный луч будет отклоняться одновременно в вертикальном направлении на расстояние, пропорциональное величине исследуемого напряжения, а в горизонтальном направлении равномерно перемещаться от левого края экрана к правому. В результате на экране сформируется в некотором масштабе график зависимости исследуемого напряжения от времени (рис. 23).

Блок синхронизации.

Пусть на вход осциллографа подан периодический сигнал (например, синусоидальный) с периодом  $T_y$ . Если период развертки не кратен периоду исследуемого сигнала, то на экране осциллографа наблюдаются различные участки синусоиды при каждом прямом ходе сигнала развертки, т. е. множество смещенных друг относительно друга в горизонтальном направлении кривых (рис. 24).

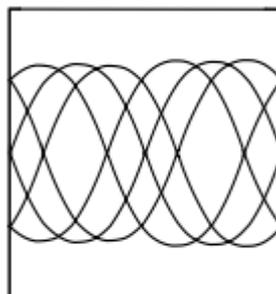


Рисунок 24

Чтобы получить на экране устойчивое изображение, необходимо выполнение условия:

$$T_x = nT_y,$$

где  $n$  – целое число, начиная с единицы.

Таким образом период сигнала развертки  $T_x$  кратен периоду исследуемого сигнала  $T_y$ . В таком случае каждая последующая светящаяся кривая, описанная лучом на экране, полностью совпадает с предыдущей. Для выполнения вышеуказанного условия используется блок синхронизации. С помощью блока синхронизации каждый последующий период сигнала развертки принудительно начинается точно через целое число периодов исследуемого сигнала от момента начала предыдущего периода.

Чтобы период развертки был кратен периоду исследуемого сигнала, специальные устройства в блоке синхронизации формируют короткие импульсы – синхроимпульсы в те моменты времени, когда исследуемое напряжение достигает уровня, задаваемого с помощью ручек управления «Уровень» и «Полярность».

Генератор пилообразного напряжения запускается одним из синхроимпульсов. Иначе говоря, можно выбирать момент запуска генератора пилообразного напряжения при различной величине исследуемого напряжения как на участке его возрастания, так и на участке спада.

#### Тема 4.5. Цифровые измерения.

Промышленные измерения – это потоки измерительной информации. Аналоговая измерительная информация с датчиков преобразуется в цифровую аналого-цифровыми преобразователями (АЦП) и обрабатывается информационно-измерительной вычислительной системой.

Понятие дискретизации.

Аналоговая величина (аналоговый измерительный сигнал) может принимать бесконечное множество значений в любой момент времени и описывается непрерывной функцией времени (рис.25).

Дискретные измерительные сигналы (не величина) могут принимать лишь дискретные значения в дискретные моменты времени. Дискретность сигналов обусловлена их квантованием по уровню и по времени.

Квантованная величина – имеющая конечное целое число единиц – квантов. Квант имеет значение в единицах измерения величины, любое число, например, 1,0 В или 0,3 В. Но измеренная в квантах величина может иметь только целое значение квантов.



Рисунок 25

Цифровой прибор обрабатывает дискретные значения величин, измеренные в квантах, кодированные в двоичной системе счисления.

Таким образом непрерывный аналоговый сигнал в цифровой форме — это поток чисел через кванты времени. Его можно запомнить или передавать в реальном времени на большие расстояния. Структура цифрового измерения приведена на рисунке 26.

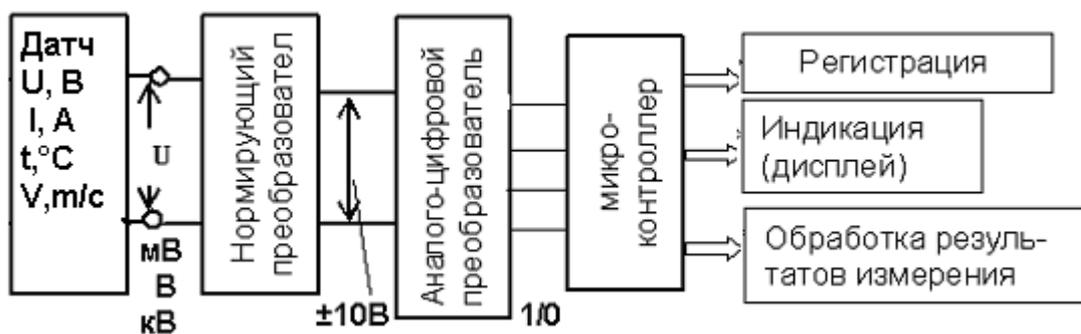


Рисунок 26

Датчик.

Датчики различных физических величин имеют самые разнообразные характеристики: нелинейность, инерционность, гистерезис, зависимость от внешних воздействий и пр. . Некоторые датчики имеют свою схему обработки измерительного аналогового сигнала. Наконец, есть датчики с встроенными средствами обработки измерительного сигнала и выдачи цифрового кода по каналам связи.

Нормирующий преобразователь.

Основное назначение преобразователя – изменить масштаб значения измеряемой величины (мВ, В, кВ), полученной от датчика, до значения, которое находится в диапазоне измерений АЦП ( $\pm 10$  В). Точность этого преобразования должна соответствовать точности всего канала измерения.

Для пропорционального уменьшения входного напряжения АЦП применяют потенциометры (рис. 27,а):

$$U_{\text{АЦП}} = U_{\text{Датч}} R_2 / (R_2 + R_1).$$

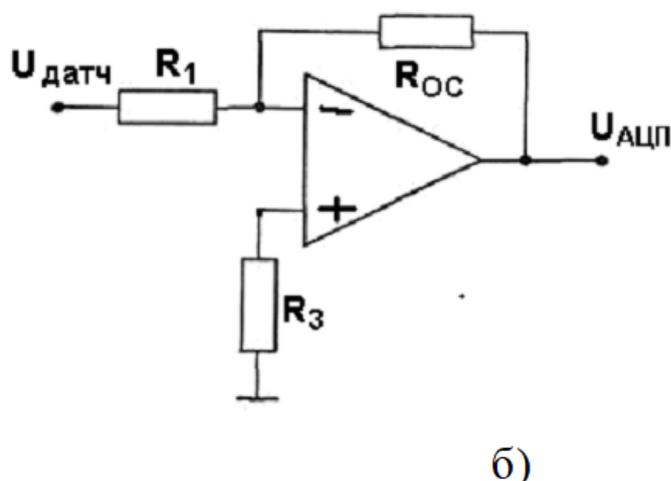
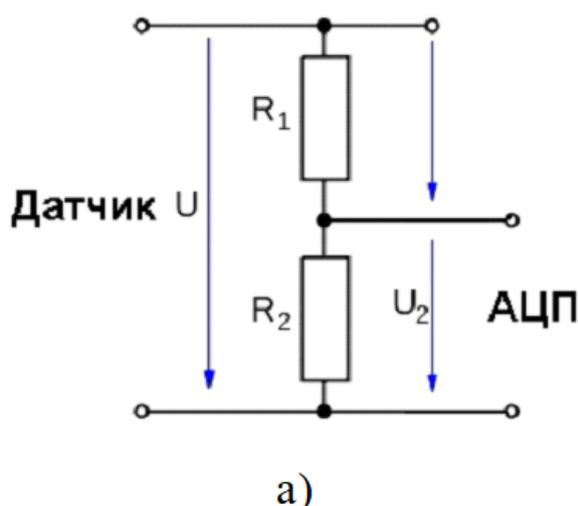


Рисунок 27

Для пропорционального увеличения входного напряжения АЦП применяют операционные усилители (рис. 27,б):

$$U_{\text{АЦП}} = U_{\text{Датч}} R_{\text{ОС}} / R_1.$$

Кроме этого имеются, например, встроенные барьеры искрозащиты входных цепей и/или т.п.

Аналого-цифровой преобразователь.

Аналогово-цифровой преобразователь - самый важный компонент в измерительном информационном оборудовании. АЦП преобразует напряжение (аналоговый сигнал: ток, температура, яркость и громкость видео) в цифровой код, над которым микропроцессор, программное и аппаратное обеспечение выполняют определенные действия (запоминание, удаленная передача и т.д.).

Различные типы измерительного оборудования используют различные типы АЦП. Например, в цифровом осциллографе используется высокая частота дискретизации, но не требуется высокое разрешение. В цифровых мультиметрах нужно большее разрешение, но можно пожертвовать скоростью измерения.

Параллельный АЦП прямого преобразования (рис. 28,а) содержит по одному компаратору  $CP1 \div CPN$  на каждый дискретный уровень входного сигнала  $U_{\text{ВХ}}$ . Дискретные уровни заданы стабильным опорным напряжением  $U_{\text{ОП}}$  и делителем напряжения  $R1 \div R_{N+1}$ . Сигналы превышения с компараторов поступают в шифратор КПр, который выдает соответствующий цифровой код  $D0 \div D_{n-1}$ .

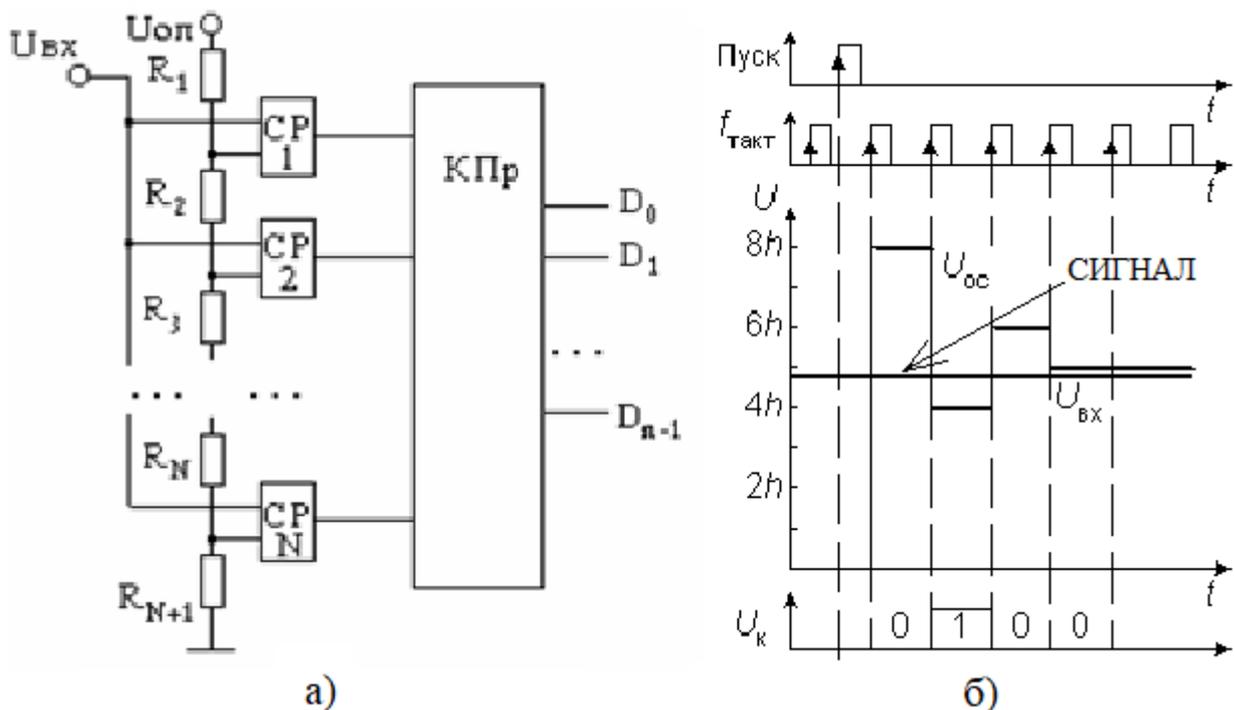


Рисунок 28

Параллельные АЦП прямого преобразования — самые быстрые, но обычно имеют разрешение не более 8 бит ( $2^8 - 1 = 255$  компараторов). АЦП этого типа имеют очень большой размер кристалла микросхемы. Часто они

используются для видео или других высокочастотных сигналов. В промышленности применяются для отслеживания быстро изменяющихся процессов в реальном времени.

АЦП последовательного приближения работает следующим образом (рис. 28,б). На первом такте после импульса «Пуск» делает первое сравнение с уровнем 8 – сигнал ниже попытки – результат 0. Так как сигнал ниже – идет вниз на половину диапазона на уровень 4 – сигнал выше попытки – результат 1. Так как сигнал выше – идет вверх на половину оставшегося диапазона на 6 – сигнал ниже попытки – результат 0. Так как сигнал ниже – идет вниз на половину диапазона на 5 – сигнал ниже попытки – результат 0. Конечный результат – двоичное число 0100 определило число целых 4 В из измеряемого уровня напряжения 4,8 В. Таким образом, АЦП преобразует аналоговый сигнал в цифровой за  $N$  шагов, где  $N$  – разрядность АЦП.

АЦП этого типа обладают одновременно высокой скоростью и хорошим разрешением. Разрядность промышленных АЦП составляет  $10 \div 12$  бит.

Цифроаналоговый преобразователь (ЦАП).

ЦАП (рис. 29) преобразует цифровой код в напряжение для аналоговых регуляторов, например, тока, температуры, видео и аудио воспроизведения и пр.

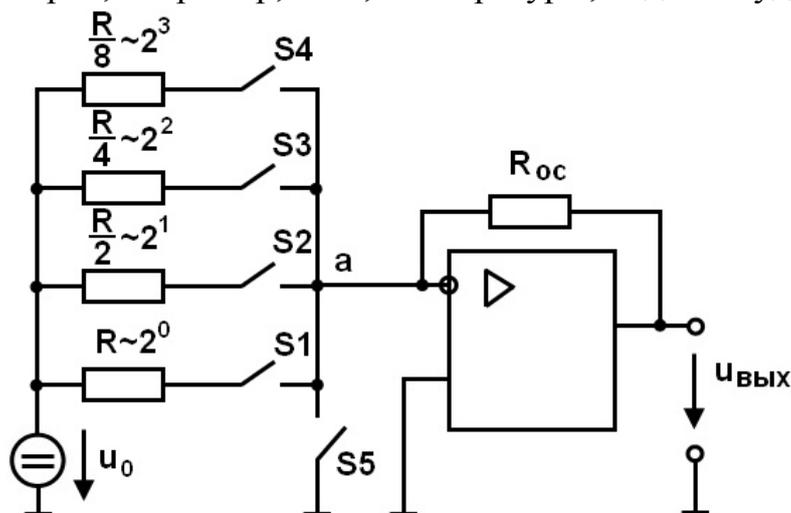


Рисунок 29

Например, при  $U_0 = 10$  В,  $R = R_{OC} = 10$  кОм и полученном цифровом коде  $5 = 0101$  замкнуты ключи  $S_3$  и  $S_1$ . На вход операционного усилителя идет ток  $I_{ВХ} = 4 + 1 = 5$  мА. При отклонении выходного напряжения до  $U_{ВЫХ} = -5$  В и токе отрицательной обратной связи  $I_{OC} = -5$  мА на входе усилителя  $I_{ВХ} + I_{OC} = 0$  мА – усилитель в равновесии. Ключ  $S_5$  замкнут только тогда, когда разомкнуты все ключи  $S_1 \dots S_4$  (при этом  $U_{ВЫХ} = 0$ ).

Микроконтроллер.

Микроконтроллер это процессор, память данных и программ, устройства ввода – вывода информации. В памяти вся необходимая информация для обработки сигнала с датчика (линеаризация, коррекции, калибровка и др.),

сведения для подключения нескольких типов датчиков, протоколы обмена информацией и др.. Таким образом реализуются основные преимущества цифровых измерений – высокая точность, помехоустойчивость, дистанционная передача информации, запоминание.

#### Тема 4.6. Регистрирующие измерительные приборы.

Регистрирующие измерительные приборы предназначены для измерения и регистрации различных величин. Они дают возможность не только определять фиксированные (мгновенные) значения измеряемых величин, но и регистрировать характер их изменения во времени. Кроме того, с помощью регистрирующих приборов можно установить связь между двумя или несколькими измеряемыми величинами.

По принципу преобразования измеряемых величин различают регистрирующие приборы прямого действия и приборы сравнения.

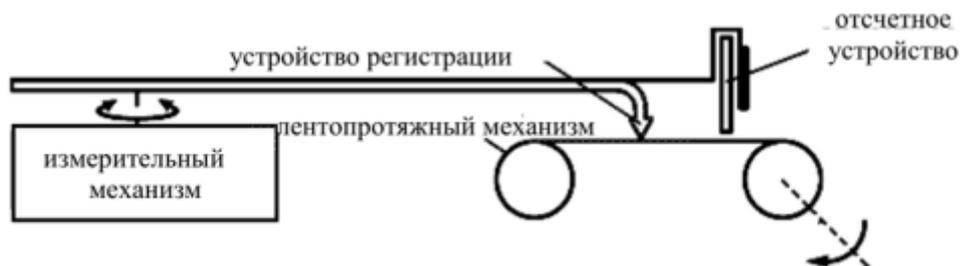
Регистрирующие приборы в зависимости от вида регистрирующего и отсчетного устройств разделяют на аналоговые и цифровые. Обобщенную структурную схему регистрирующего прибора прямого действия можно представить в виде ряда последовательно соединенных преобразователей (рис. 30). В измерительной цепи происходят выбор масштаба регистрации и преобразование измеряемой величины  $x$  в пропорциональный ток. Измерительный механизм преобразует электрическую величину (ток) в пропорциональное перемещение указателя отсчетного устройства  $M_{вр}$  и механически связанного с ним регистрирующего устройства.



Рисунок 30

Самопишущим называют регистрирующий прибор, в котором запись формы измеряемых величин или их функциональной зависимости происходит в виде диаграммы на различные носители. В зависимости от вида регистрации различают приборы с непрерывной и с точечной регистрацией, а по типу измерительного устройства — приборы с измерительным механизмом и компенсационные. Несмотря на различные виды носителей информации и конструктивные различия, принцип устройства самопишущих приборов одинаков.

Измерительный механизм прибора (рис. 31) преобразует измеряемую величину в перемещение указателя и механически связанного с ним регистрирующего устройства. Для перемещения носителя информации используются различные лентопротяжные механизмы. Информация регистрируется на носитель, перемещаемый с помощью лентопротяжного



механизма, снабженного приводом от постороннего двигателя.

Рисунок 31

Измерительный механизм самопишущего прибора должен развивать большой вращающий момент, необходимый для преодоления трения в регистрирующем устройстве. Этому требованию в наибольшей степени удовлетворяют магнитоэлектрические и ферродинамические механизмы.

Способы регистрации информации, применяемые в самопишущих приборах, должны обеспечивать наглядность результатов, минимальные затраты на обслуживание и обработку и возможность длительного хранения результатов. Различают способы регистрации с нанесением слоя вещества на носитель информации, со снятием слоя вещества с носителя информации и с изменением состояния вещества носителя. Для регистрации информации способом нанесения слоя вещества применяют карандаши, пасты, специальные чернила, копировальные бумаги и др. Способ регистрации со снятием слоя вещества носителя предусматривает использование иглы (или резца) из твердого материала, которая при перемещении по поверхности носителя срезает слой предварительно нанесенного парафина или металлического покрытия. В самопишущих приборах иногда применяют способ регистрации с изменением верхнего слоя состояния вещества. Он состоит в том, что на светочувствительный слой носителя информации воздействует световой луч.

Современные самопишущие приборы бывают одноканальными и многоканальными — до восьми каналов при одном носителе информации.

Классы точности самопишущих приборов устанавливают по основной приведенной погрешности от ширины поля записи носителя информации.

Примеры устройства самопишущих приборов представлены на рисунке 32.

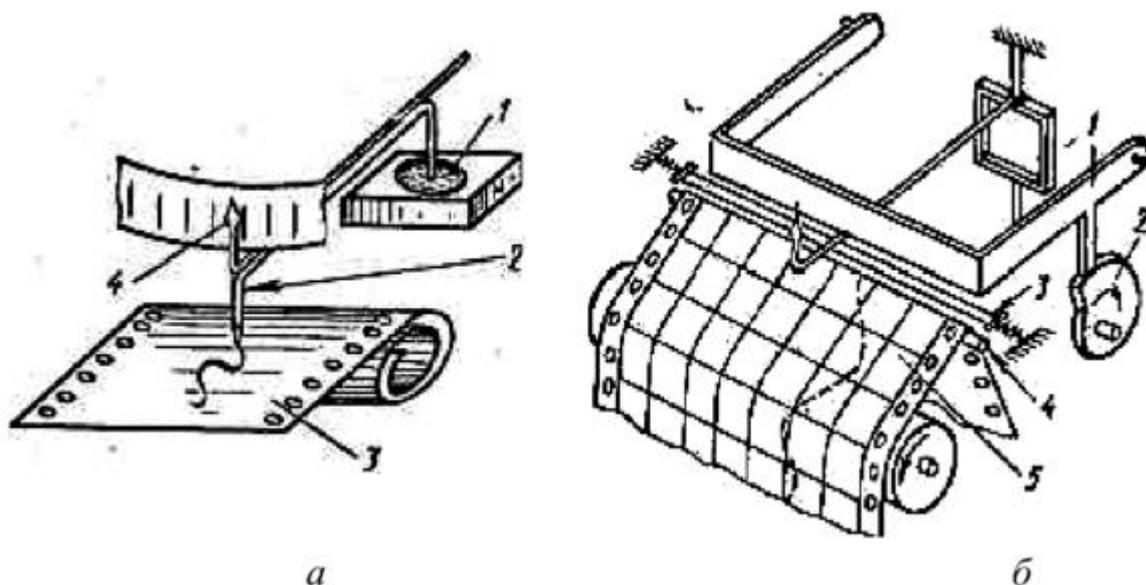


Рисунок 32

На рисунке 32, а приведено устройство с непрерывной записью чернилами: 1 - чернильница; 2 - перо; 3 - носитель; 4 – стрелка.

На рисунке 32.б приведено устройство с точечной записью: 1 - дуга; 2 - кулачек; 3 - красящая лента; 4 - опорный валик; 5 – диаграмма.

Одна из особенностей самопишущих приборов — небольшой частотный диапазон измеряемых (регистрируемых) величин. Для увеличения частотного диапазона необходим измерительный механизм с большой частотой собственных колебаний. Такими свойствами обладают магнитоэлектрический механизм с двумя магнитами (внешним и внутренним) и электромагнитный поляризованный механизм. Электромагнитные поляризованные механизмы по сравнению с магнитоэлектрическими механизмами имеют меньшие габариты и массу подвижной части.

Регистрирующие устройства, используемые в самопишущих приборах, можно разделить на две группы: на основе измерительного механизма и компенсационного типа. В приборах с регистрирующим устройством на основе измерительного механизма происходит непрерывная запись информации на носитель.

Указатель такого прибора жестко соединен с пишущим органом, имеющим постоянный контакт с носителем. При перемещении носителя (диаграммной ленты) пишущий орган оставляет на нем изображение измеряемого сигнала. Измерительный механизм при этом должен обладать большим вращающим моментом для преодоления трения между пишущим органом и носителем.

Конструкция регистрирующего устройства на основе измерительного механизма с точечной записью предусматривает запись посредством кратковременного прижатия упругого указателя специальным рычагом к перемещаемому под его концом носителю информации. В самопишущем

приборе с регистрирующим устройством компенсационного типа пишущий орган приводится в движение с помощью исполнительного механизма, управляемого сигналом измеряемой величины. Для этого в приборе используют автокомпенсатор, сигнал с которого управляет положением подвижного контакта переменного компенсационного резистора и приводит в действие пишущий орган. Применяемый в приборе метод компенсации обеспечивает высокую чувствительность и точность.

Носители информации в самопишущих приборах — это диаграммные ленты и диски.

Различают носители трех типов: ленты с полярной системой координат, которые используют в приборах с регистрирующими устройствами на основе измерительного механизма, ленты с прямоугольной системой координат для использования в приборах с регистрирующими устройствами компенсационного типа и диаграммные диски для применения в приборах с круговым ращением носителя.

Диаграммные ленты в зависимости от типа самопишущего прибора могут быть с перфорацией или без нее. Ширина поля записи диаграммных лент — от 40 до 400 мм.

Ограниченный диапазон рабочих частот самопишущих приборов затрудняет их использование для регистрации быстропротекающих процессов. Чтобы расширить возможности приборов, в современных их модификациях применяют аналого-цифровые преобразователи и микропроцессоры. В таких приборах аналоговая информация поступает в устройство ввода, затем происходит ее аналого-цифровое преобразование.

Микропроцессор, встроенный в прибор, обеспечивает выполнение арифметических и логических операций и хранение информации. Из памяти информация поступает в цифро-аналоговый преобразователь, где преобразуется в пропорциональное (значению измеряемой величины) напряжение постоянного тока, которое подается на регистрирующее устройство.

#### **Тема 4.7. Измерительные трансформаторы тока и напряжения.**

##### **Шунты. Делители напряжения.**

Для расширения пределов измерения измерительных приборов применяют различные преобразователи: шунты, делители, трансформаторы, датчики Холла, Фарадея, Роговского и др.

##### **Шунты**

Назначение шунта — измерение постоянного тока большого значения (рис.33). Принцип действия: измеряемый ток вызывает падение напряжения на сопротивлении шунта, пропорциональное измеряемому току, по этому падению оценивается значение тока.

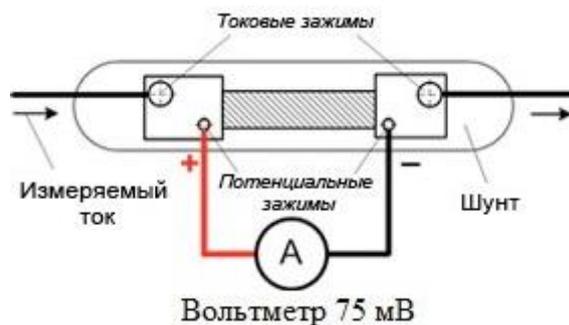
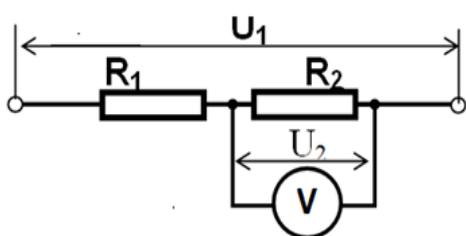


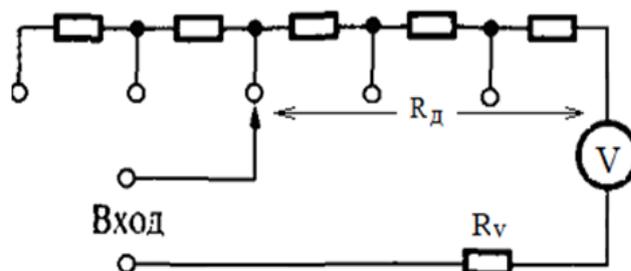
Рисунок 33

Размещаются шунты в корпусе прибора или снаружи. Применяются, в основном, в цепях постоянного тока в магнитоэлектрических приборах. Все шунты имеют стандартное падение напряжения 75 мВ при разных номинальных для них значениях токов. 5 А...50 А, 75 А...1000 А, 1500 А...15000 А. Классы точности от 0,02 до 0,5. Есть микросхемы измерения и цифровой индикации значения тока

Делители напряжения и добавочные резисторы (рис.34).  
Назначение – увеличить диапазон измерения вольтметров.



а) с добавочным резистором



б) с делителем напряжения

Рисунок 34

Принцип действия: измеряемое напряжение вызывает ток в резисторах делителя, имеющих такое сопротивление, что падение напряжения на  $R_2$  находится в диапазоне измерения вольтметра  $V$ . В схеме с добавочным резистором функцию  $R_2$  выполняет собственное сопротивление вольтметра.

Математическая модель:

$$U_2 = U_1 R_2 / (R_1 + R_2) \text{ – схемы с делителем напряжения,}$$

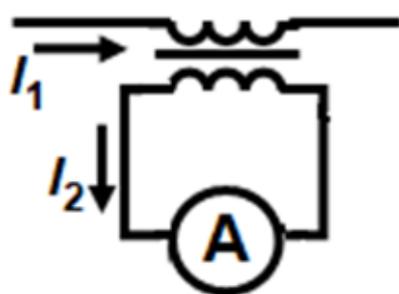
$$U_2 = U_1 R_v / (R_d + R_v) \text{ – схемы с добавочным резистором.}$$

В зависимости от рода тока, элементы делителя выполняют в виде чисто активного сопротивления, емкостного или индуктивного сопротивления. Серийно выпускаемые делители имеют нормированные коэффициенты деления и классы точности от 0,0005 до 0,01.

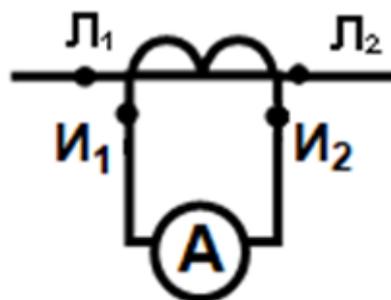
Трансформаторы тока (ТТ).

Схема и условное обозначение приведены на рисунке 35.

Назначение – обеспечить измерение переменного тока большого значения.



а) схема



б) условное обозначение

Рисунок 35

Измеряемый ток  $I_1$  проходит через первичную обмотку трансформатора и индуцирует во вторичной обмотке ток  $I_2$  такой, что МДС обеих обмоток равны и противоположно направлены.

Математическая модель:

$$I_1 w_1 = I_2 w_2 \Rightarrow I_2 = I_1 \frac{w_1}{w_2}.$$

Особенности трансформаторов тока:

одинаковый выход всех трансформаторов тока 5А при различных номинальных значениях измеряемых токов;

для работающего трансформатора тока недопустим разрыв цепи вторичной обмотки;

сопротивление в цепи вторичной обмотки должно быть не более указанного в паспорте трансформатора тока.

Классы точности трансформаторов тока: 0,1; 0,5; 1; 3. 10

Трансформаторы напряжения (ТН).

Схема подключения приведена на рисунке 36.

Назначение – измерение переменного напряжения большого значения.

Принцип действия: первичное напряжение  $U_1$  индуцирует во вторичной обмотке ЭДС  $U_2$ , пропорциональную  $U_1$ .

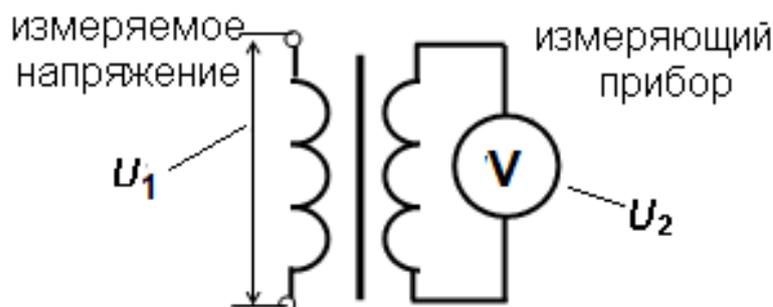


Рисунок 36

Математическая модель:

$$\frac{U_1}{w_1} = \frac{U_2}{w_2} \Rightarrow U_2 = U_1 \frac{w_2}{w_1}$$

Особенности трансформаторов напряжения:

- все трансформаторы напряжения имеют одинаковое вторичное напряжение  $U_2 = 100$  В при различных значениях первичного напряжения  $U_1$ ;
- сопротивление в цепи обмотки  $w_2$  должно быть достаточно велико, чтобы обеспечить режим трансформатора, близкий холостому ходу.

Классы точности трансформаторов напряжения: 0,2; 0,5; 1; 3; 10.

Датчики тока на эффекте Холла.

Датчики, выполненные в виде микросхемы (рис.37), состоят из очень точного линейного датчика Холла, интегрированного на кристалл микросхемы, и медного проводника, размещенного близко к кристаллу. Электрический ток, протекая через проводник, создает магнитное поле, которое фиксируется датчиком Холла и преобразуется в напряжение, пропорциональное значению входного тока.

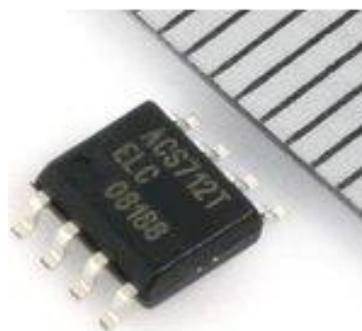


Рисунок 37

Высокая точность, гальваническая изоляция измерительной схемы, термостабильность и малые габариты делают датчики хорошим решением для применения в преобразовательной технике, бытовой, автомобильной и промышленной электронике.

Для иллюстрации показаны технические данные датчика Холла ACS712ELCTR-05B-T на токи 5 – 100 А. Ошибка датчика 1,5% при +25°C и 4% при -40°C...+85°C. Время нарастания выходного сигнала 5 мкс, и максимальная частота 80 кГц. Силовая и измерительная цепи гальванически развязаны, пробивное напряжение 2,1 кВ. Микросхема датчика обеспечивает настройку чувствительности, настройку температурного коэффициента, регулировку смещения нуля. Датчики для больших токов имеют другую конструкцию, например, линейный датчик тока на 550А AC/DC переменного/постоянного тока CSLA2EL (рис.38).

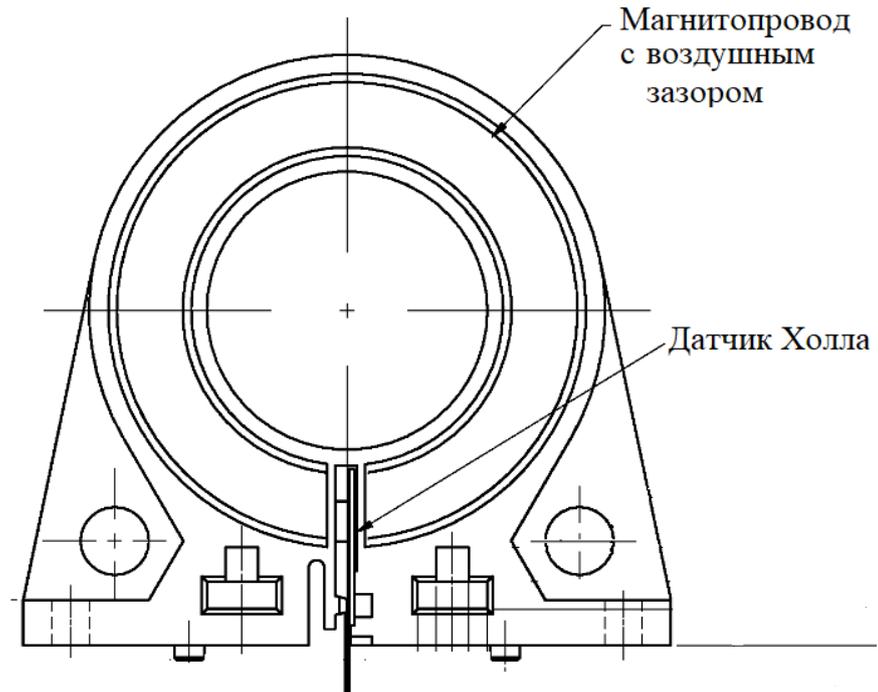


Рисунок 38

#### Оптоволоконные датчики тока

Оптоволоконные датчики тока проектируются на основе эффекта Фарадея. Магнитооптический эффект, в результате которого в процессе распространения линейно поляризованного света, находящегося в магнитном поле, через оптически неактивное вещество, наблюдается изменение угла плоскости поляризации света называется эффект Фарадея (рис.39).

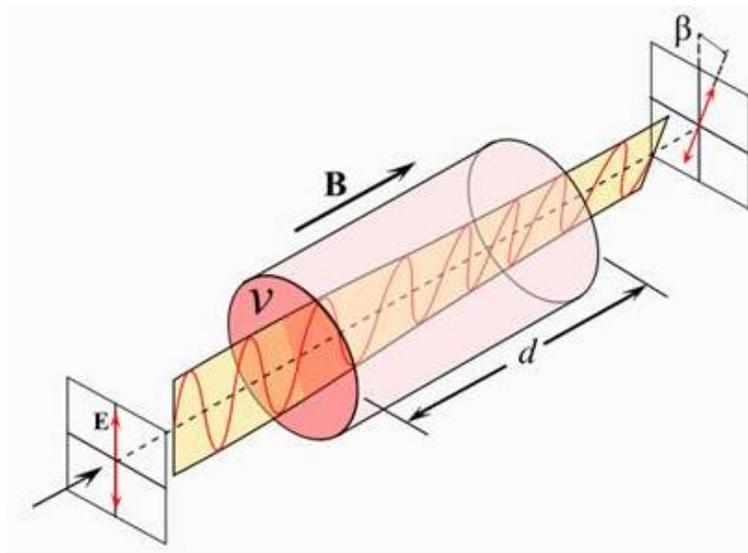


Рисунок 39

На рисунке 40 представлена схема измерения тока эффектом Фарадея

через угол «+  $\Phi$ ».



Рисунок 40

В производстве алюминия, меди, марганца, цинка, стали и хлора требуются огромные объемы электроэнергии. Электролизные ванны, например, для производства алюминия обычно питаются напряжением 100 В и потребляют постоянный ток до 500 килоампер. Повышение точности измерения особенно очевидно, если учесть, что ошибка на 0,1% в измерении такого тока означает ошибку на 0,5 МВт – этого достаточно, чтобы снабжать дорогой электроэнергией 1000 домов.

Для измерения больших токов оптоволоконный датчик обладает рядом преимуществ по сравнению с датчиками Холла:

асимметрично распределенные поля и магнитные помехи, компенсируются благодаря самому принципу действия прибора. Магнитные поля соседних проводников не влияют на измерения;

головка датчика состоит из диэлектрических материалов, и совершенно безопасна. Электронные схемы обработки сигналов полностью гальванически развязаны от шин;

широкая полоса пропускания (частота дискретизации 4 кГц) восстанавливает переменные составляющие тока;

погрешность датчика – в пределах  $\pm 0,1\%$  при токах 1...120% от максимального;

диапазон рабочих температур головки датчика: от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+85^{\circ}\text{C}$ , для электроники контроллера: от  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $+55^{\circ}\text{C}$ .

Измерители тока электронные оптические высоковольтные и представлены на рисунке 41



Рисунок 41

Преимущества оптоволоконных датчиков тока:

- нет медных вторичных цепей, снижение стоимости материалов и затрат на монтаж;
- нет феррорезонанса. измерение постоянного и переменного тока;
- нет наводок и помех во вторичных цепях вследствие их естественной гальванической изоляции (передача сигнала по оптическому волокну);
- возможность измерения постоянного и переменного тока и гармонических составляющих до 100 порядка;
- класс точности измерительного комплекса на базе оптических преобразователей не достижим для традиционных схем измерений;
- повышение безопасности персонала при работе во вторичных цепях;
- высокая точность измерений (по цифровому интерфейсу) обеспечение их единства для всех приборов – получателей данных.

Датчики тока - пояс Роговского

Катушка Роговского охватывает проводник для измерения силы проводимого тока. Ток создает переменное магнитное поле, вызывающее напряжение в обмотке. Так как необработанный выходной сигнал пропорционален производной тока в первичной цепи по времени, контакты пояса Роговского обычно подсоединяются к интегратору, чтобы получить выходное напряжение, точно передающее значение силы тока, благодаря чему и происходит измерение тока проводника.

Например, электроизмерительные клещи АРРА s Flex 10D (рис 42) имеют гибкую токоизмерительную петлю длиной 25/45см разъемной конструкции с

фиксатором замкнутого состояния. Пределы измерения переменного тока 30А/ 300А/ 3000А с базовой погрешностью  $\pm 3\%$ . Соединительный кабель 2 м для подключения к внешнему мультиметру/ вольтметру, совместная работа с любым осциллографом через адаптер для исследования переходных процессов.

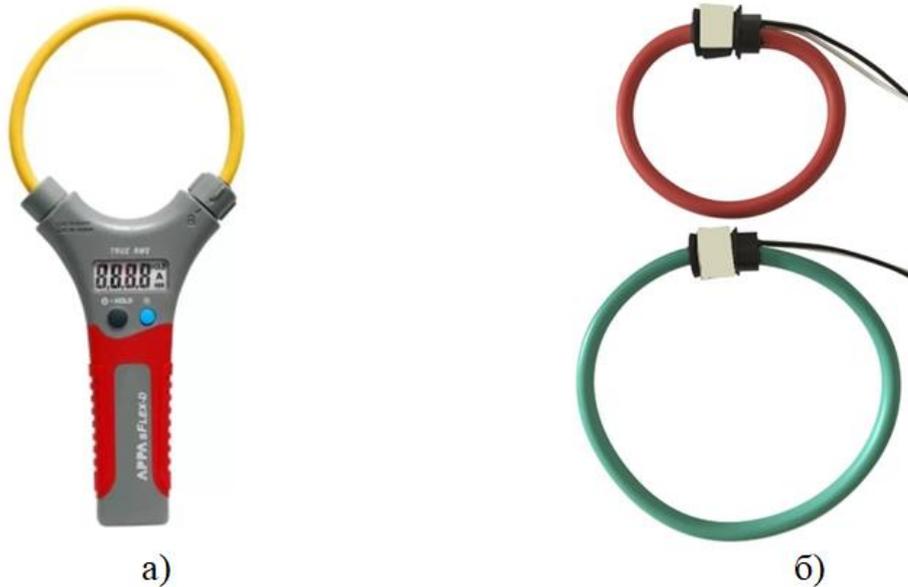


Рисунок 42

Катушка Роговского ТТС-KR (рис. 42,б) применяется в измерительной технике в качестве трансформатора тока. Благодаря гибкому неметаллическому корпусу катушки просты и удобны в использовании и монтаже на новые и уже существующие системы учета электроэнергии.

Особенности катушки Роговского ТТС-KR:

- гибкость и простота в использовании;
- установка на уже существующие и новые системы учета электроэнергии;
- возможность измерения параметров тока в реальном времени и высокая скорость срабатывания;
- отсутствие эффекта гистерезиса, срыва фазы или магнитного насыщения благодаря отсутствию ферромагнитных материалов;
- большой диапазон частот от 1 Гц до 1 МГц.

#### **Тема 4.8. Измерения напряжения и силы тока, активной и реактивной мощности и энергии в однофазных и трехфазных цепях переменного тока.**

Измерение мощности и энергии в однофазных цепях подробно указано в разделе 2 (при описании индукционного счетчика).

В данном разделе рассмотрим схемы подключения приборов измерения мощности в трехфазных цепях.

При симметричной нагрузке трехфазной цепи ( $Z_A = Z_B = Z_C = Z$ ) активная и реактивная мощность всех фаз одинакова и для определения мощности цепи достаточно измерить мощность одной фазы, затем результат утроить:

$$P_A = P_B = P_C = P_\phi = U_\phi I_\phi \cos\varphi;$$

$$Q_A = Q_B = Q_C = Q_\phi = U_\phi I_\phi \sin\varphi;$$

$$P = 3P_\phi = 3U_\phi I_\phi \cos\varphi = \sqrt{3} U_{лл} I_{лл} \cos\varphi;$$

$$Q = 3Q_\phi = 3U_\phi I_\phi \sin\varphi = \sqrt{3} U_{лл} I_{лл} \sin\varphi,$$

где  $\varphi$  – угол сдвига фаз между фазным напряжением и фазным током.

Полная мощность цепи:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 3U_\phi I_\phi = \sqrt{3} U_{лл} I_{лл}.$$

Приведенные формулы справедливы при любой схеме соединения трехфазной симметричной нагрузки (звездой или треугольником).

Для измерения активной мощности любой фазы достаточно иметь один ваттметр и включить его на фазное напряжение и фазный ток (рис. 10.1). Показание ваттметра равно активной мощности одной фазы:

$$P_W = P_\phi = U_\phi I_\phi \cos\varphi$$

Активная мощность трехфазной цепи

$$P = 3P_W$$

Рассмотренный метод измерения активной мощности симметричной цепи называют методом одного прибора (рис. 43).

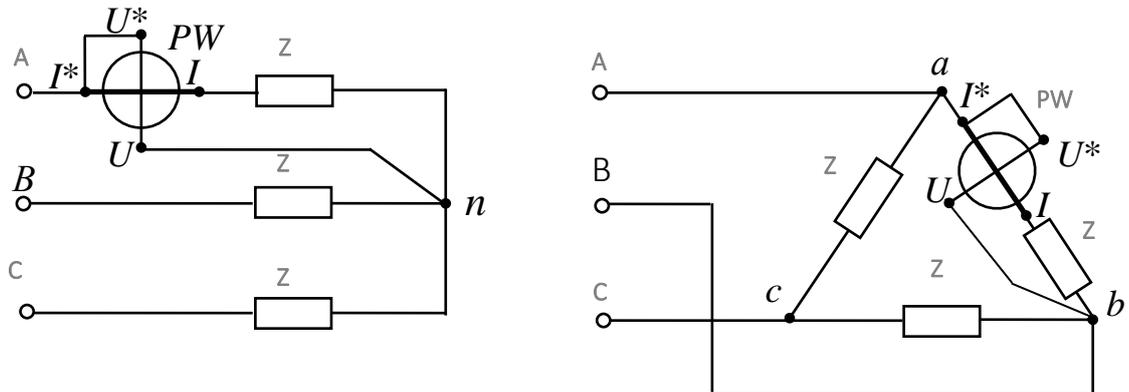


Рисунок 43

Реактивную мощность фазы и всей симметричной цепи можно определить косвенным методом, дополнительно измеряя напряжение и ток фазы.

Вычислив  $\cos\varphi = \frac{P_\phi}{U_\phi I_\phi}$ , получим  $Q_\phi = U_\phi I_\phi \sin\varphi$ ,  $Q = 3Q_\phi$ .

Однако реактивную мощность симметричной цепи можно измерить обычным ваттметром, включенным на «чужое напряжение». При этом параллельная обмотка ваттметра включается на «чужие фазы» по отношению к фазе, в которую включена последовательная (токовая) цепь прибора (рис. 44).

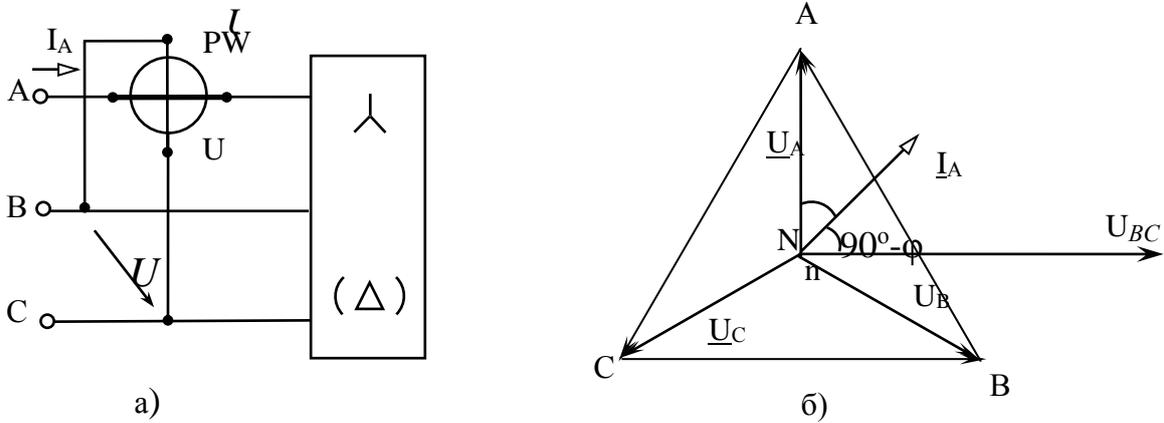


Рисунок 44

Как видно из векторной диаграммы (рис. 44б), показание ваттметра

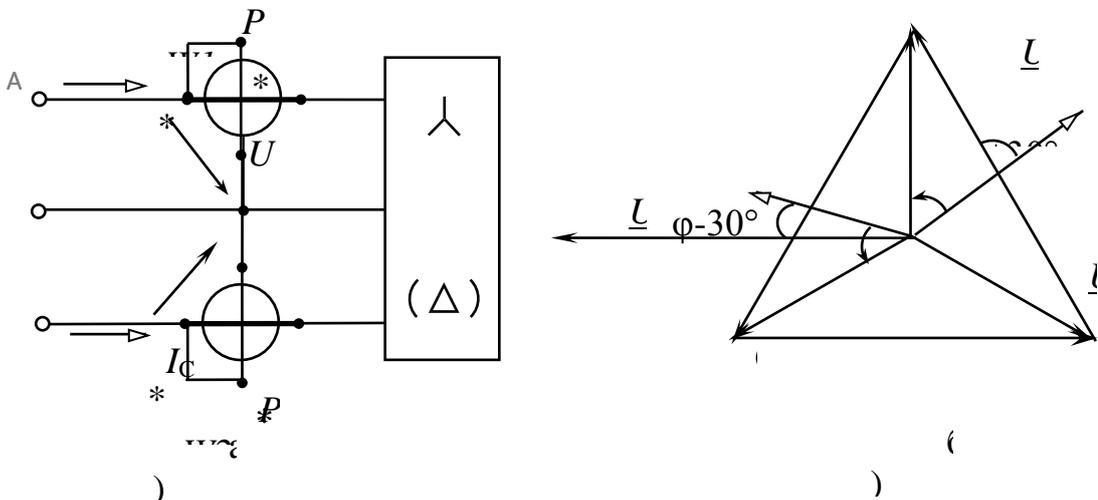
$$P_W = U_{BC} I_A \cos(\underline{I}_A \wedge \underline{U}_{BC}) = U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos(90^\circ - \varphi) = U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi = \frac{Q}{\sqrt{3}}.$$

Отсюда следует, что для определения реактивной мощности трехфазной симметричной цепи надо показание ваттметра увеличить в  $\sqrt{3}$  раз, т.е.

$$Q = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi = \sqrt{3} P_W$$

Основным методом измерения активной мощности в трехпроводных трехфазных цепях при любой асимметрии цепи является метод двух ваттметров (рис. 45).

Рисунок 45



В данном случае мгновенные мощности, учитываемые ваттметрами:

$$p_1 = u_{AB} i_A ; \quad p_2 = u_{CB} i_C .$$

Сумма этих мощностей равна мгновенной мощности трехфазной цепи:

$$p_1 + p_2 = u_{AB} i_A + u_{CB} i_C = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C = p_A + p_B + p_C ,$$

так как  $u_{AB} = u_A - u_B ; \quad u_{CB} = u_C - u_B ; \quad i_B = -(i_A + i_C)$ .

Переходя к средней или активной мощности, выраженной через действующие значения напряжений и токов, получим, что активная мощность, измеренная ваттметрами,

$$P = U_{AB} I_A \cos(\overset{\Delta}{U}_{AB} \overset{\Delta}{I}_A) + U_{CB} I_C \cos(\overset{\Delta}{U}_{CB} \overset{\Delta}{I}_C) = P_1 + P_2 .$$

Таким образом, активная мощность, измеренная методом двух ваттметров, равна алгебраической сумме показаний ваттметров.

На рис. 10.3б приведена векторная диаграмма для симметричной активно-индуктивной нагрузки. При этом угол между векторами  $\underline{U}_{AB}$  и  $\underline{I}_A$  равен  $(\varphi + 30^\circ)$ , а угол между векторами  $\underline{U}_{CB}$  и  $\underline{I}_C$  равен  $(\varphi - 30^\circ)$ .

Показания ваттметров

$$P_1 = U_{л} I_{л} \cos(\varphi + 30^\circ); \quad P_2 = U_{л} I_{л} \cos(\varphi - 30^\circ).$$

Активная мощность всей цепи

$$P = U_{л} I_{л} \cos(\varphi + 30^\circ) + U_{л} I_{л} \cos(\varphi - 30^\circ) = \sqrt{3} U_{л} I_{л} \cos \varphi .$$

Показания ваттметров зависят от угла  $\varphi = \arctg R\varphi/X\varphi$  (для параллельной схемы замещения). При активной нагрузке ( $\varphi = 0$ ) показания обоих ваттметров одинаковы

$$P_1 = P_2 = U_{л} I_{л} \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} U_{л} I_{л}; P = \sqrt{3} U_{л} I_{л} .$$

В случае  $\varphi \neq 0$  показания ваттметров различны, причем если  $\varphi = 60^\circ$ , то  $P_1 = 0$ , а  $P_2 = P$ ; если  $\varphi > 60^\circ$ , то угол  $(\varphi + 30^\circ) > 90^\circ$  и показание первого ваттметра станет отрицательным ( $P_1 < 0$ ) и его стрелка отклоняется влево от нуля. Для отсчета показания необходимо изменить направление тока в одной из обмоток прибора, т.е. переключить зажимы обмотки тока или обмотки напряжения, а показание записать со знаком минус.

При симметричной нагрузке метод двух ваттметров позволяет рассчитать и реактивную мощность цепи. Рассмотрим разность показаний приборов:

$$P_2 - P_1 = U_{л} I_{л} \cos(\varphi - 30^\circ) - U_{л} I_{л} \cos(\varphi + 30^\circ) = U_{л} I_{л} \sin \varphi .$$

Как видно из выражения, для определения реактивной мощности цепи необходимо разность  $(P_2 - P_1)$  умножить на  $\sqrt{3}$ :

$$Q = \sqrt{3}(P_2 - P_1) = \sqrt{3} U_{л} I_{л} \sin \varphi .$$

По показаниям ваттметров можно выяснить характер нагрузки

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P} = \sqrt{3} \cdot \frac{P_2 - P_1}{P_2 + P_1}.$$

#### Тема 4.9. Измерение частоты. Электромеханические, электронные и цифровые частотомеры.

Частотомер – это прибор для измерения частоты периодических процессов (колебаний). Частоту механических колебаний обычно измеряют с помощью вибрационных механических и электронных частотомеров, используемых совместно с преобразователями механических колебаний в электрические.

Простейший вибрационный механический частотомер, действие которого основано на резонансе, представляет собой ряд упругих пластин, укрепленных одним концом на общем основании. Пластины подбирают по длине и массе так, чтобы частоты их собственных колебаний составили некую дискретную шкалу, по которой и определяют значение измеряемой частоты. Механические колебания, воздействующие на основание прибора, вызывают вибрацию упругих пластин, при этом наибольшая амплитуда колебаний наблюдается у той пластины, у которой частота собственных колебаний равна (или близка по значению) измеряемой частоте.

Для измерения частоты электрических колебаний применяют электромеханические, электродинамические, электронные, электромагнитные, магнитоэлектрические частотомеры.

Простейший электромеханический частотомер вибрационного типа состоит из электромагнита и ряда упругих пластин (как в механическом) на общем основании, соединённом с якорем электромагнита (рис. 46).

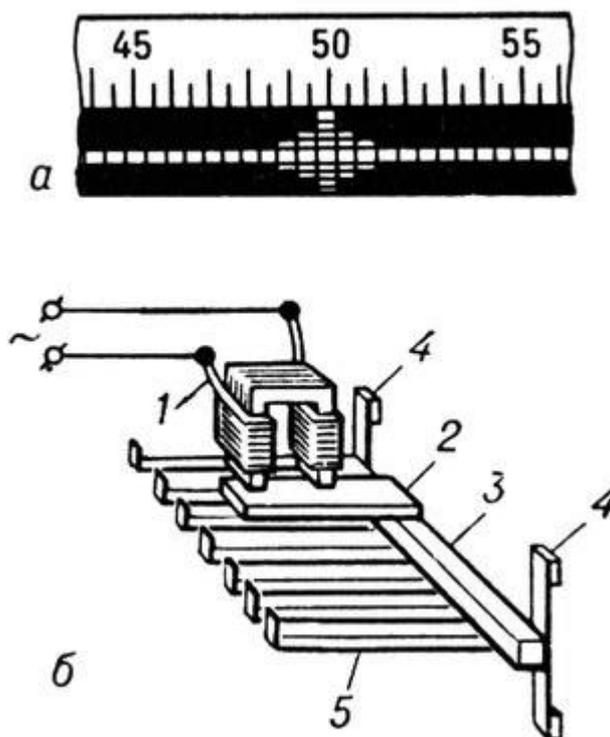


Рисунок 46

Измеряемые электрические колебания подают в обмотку электромагнита; возникающие при этом колебания якоря передаются пластинам, по вибрации которых определяют значение измеряемой частоты. В электродинамических Ч. основным элементом является логометр, в одну из ветвей которого включен колебательный контур, постоянно настроенный на среднюю для диапазона измерений данного прибора частоту (рис. 47).

При подключении такого частотомера к электрической цепи переменного тока измеряемой частоты подвижная часть логометра отклоняется на угол, пропорциональный сдвигу фаз между токами в катушках логометра, который зависит от соотношения измеряемой частоты и резонансной частоты колебательного контура. Погрешность измерений электродинамического частотомера составляет  $10^{-1}$ - $5 \cdot 10^{-2}$ .

Частоту электромагнитных колебаний в диапазоне радиочастот и СВЧ измеряют при помощи электронных частотомеров (волномеров) — резонансных, гетеродинных, цифровых и др.

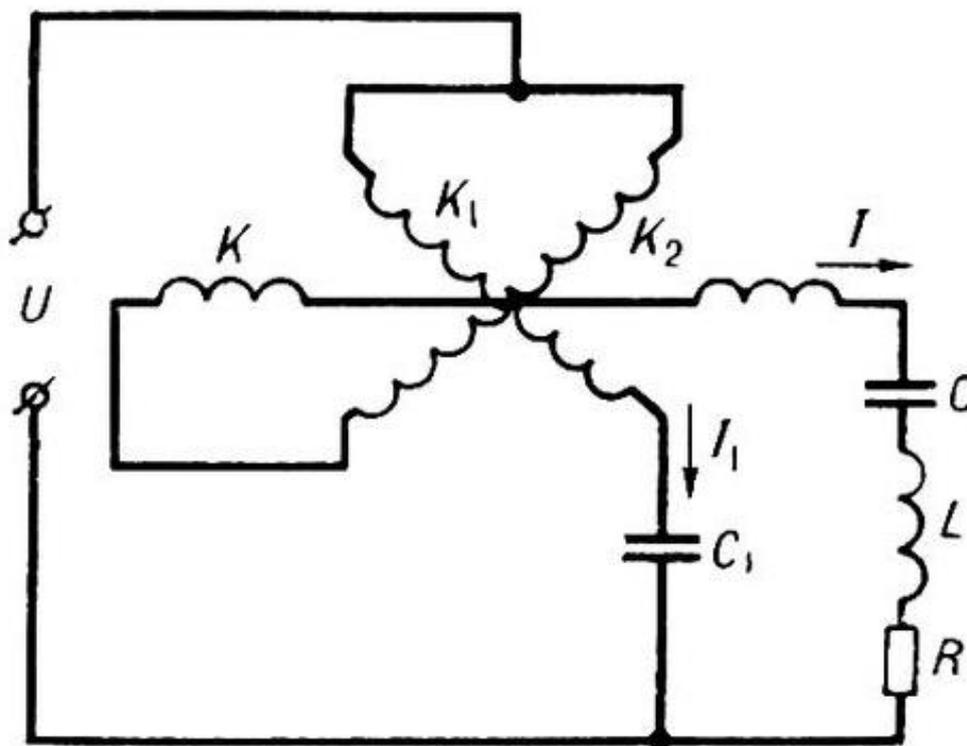


Рисунок 47

Действие резонансного частотомера основано на сравнении измеряемой частоты с частотой собственных колебаний электрического контура (или резонатора СВЧ), настраиваемого в резонанс с измеряемой частотой.

Резонансный частотомер состоит из колебательного контура с петлёй связи, воспринимающей электромагнитные колебания (радиоволны), детектора, усилителя и индикатора резонанса (рис. 48). При измерении контур настраивают при помощи калиброванного конденсатора (или поршня резонатора в диапазоне

СВЧ) на частоту воспринимаемых электромагнитных колебаний до наступления резонанса, который регистрируют по наибольшему отклонению указателя индикатора. Погрешность измерений таким прибором  $5 \cdot 10^{-3}$ — $5 \cdot 10^{-4}$ .

В гетеродинных частотомерах измеряемая частота сравнивается с известной частотой (или её гармониками) образцового генератора — гетеродина. При подстройке частоты гетеродина к частоте измеряемых колебаний на выходе смесителя (где происходит сравнение частот) возникают биения, которые после усиления индицируются стрелочным прибором, телефоном или (реже) осциллографом. Относительная погрешность гетеродинных частотомерах  $5 \cdot 10^{-4}$ — $5 \cdot 10^{-6}$ .

Больше всего распространены устройства прямого отсчета, то есть цифровые устройства. Они позволяют с удобством и высокой точностью измерять необходимые параметры частоты. Главная их особенность в том, что они подсчитывают число импульсов, поступающих от входного формирователя за конкретный период времени. Данный прибор способен измерить не только частоту, но также периоды времени и число импульсов.

Цифровые устройства позволяют выполнять с большой точностью исследования частот импульсного и гармонического характера в пределах 10 Гц – 50 ГГц. Подобные приборы в основном применяются для измерения частот, временных параметров.

По принципу действия подобный частотомер можно классифицировать на 4 группы:

- Устройства средних значений, которые являются наиболее распространенными. При помощи этих устройств можно измерять среднее значение частоты за определенное время. Пределы измеряемых частот составляют от 10 герц до 100 мегагерц. При использовании специальных преобразователей данный предел можно расширить до 1000 мегагерц.

- Устройства мгновенных значений. При помощи них можно узнать частоту в узком диапазоне. Подобные приборы чаще всего применяют для измерения инфранизких и низких частот.

- Устройства номинальных значений применяются с целью исследования изменений частот в узких пределах. Процентные устройства измеряют частоту в относительных единицах.

- Следящие устройства лучше всего подходят для измерения средних частот. Они измеряют частоту непрерывно. Если говорить прямо, то все электронные, а также электромеханические устройства являются следящими. К их преимуществам можно отнести возможность создания отчетов в каждый момент времени. К следящим устройствам также относятся и многие цифровые приборы.

В отдельную категорию можно выделить устройства, которые расширяют функционал следящих устройств. Это могут быть сервисные или универсальные приборы. Сервисные устройства имеют малые габариты, так как в них применяются интегральные схемы. Чаще всего они применяются в качестве автономных устройств, переносных, а также встроенных агрегатов в структуре

автоматизированных систем. Их можно использовать для измерения разных величин.

Универсальные аппараты в большинстве случаев многофункциональны. Они имеют конструкцию, которая позволяет задействовать сменные блоки. Благодаря этому можно существенно повысить их функциональность. Специализированные устройства заточены под конкретные параметры измерений, поэтому в большей части случаев у них более простая конструкция.

Устройство.

Частотомер может иметь разное конструктивное исполнение. К примеру, электронно-счетное устройство выделяется блочно-модульным исполнением. Его базу составляет кроссплата, где монтируются модульные платы. От них выходят проводники на управляющие и индикаторные элементы, в том числе входящие и выходящие разъемы. Лампы и индикаторы находятся в модуле, которой расположен за панелью. Индикация осуществляется динамически.

В отдельной кассете находится блок питания и генератор. Имеется возможность подключить внешний генератор. Для защиты от перегрева используется термостат. Вычисление осуществляется с помощью декад и делителей. Кроме того, в состав устройства входят умножитель, узел сброса и самонастройки, автоматический блок и входной формиратор. В качестве элементной базы для этих элементов используются транзисторы. Подобные устройства уже считаются устаревшими, но все равно иногда применяются.

Самый простой частотомер производится на базе микросхем. В качестве входного элемента используется триггер Шмидта, трансформирующий напряжение синусоидального характера в импульсы одинаковой частоты. Чтобы триггер нормально работал, требуется конкретная амплитуда входного сигнала. Важно, чтобы она не была выше заданной величины. Чтобы повысить чувствительность, в устройстве может применяться дополнительный усилитель входящего сигнала. К примеру, для этого может быть использован полупроводниковый транзистор малой мощности либо аналоговая микросхема.

Когда колебания проходят через конденсатор, происходит усиление его показателей посредством второго конденсатора. После этого колебания направляются на вход триггера. Следующий конденсатор убирает обратную связь. Чтобы пользователь мог увидеть показатели частоты, используются стрелочные приспособления, а также подсвечиваемая шкала.

Принцип действия.

Частотомер позволяет определить частоту тока в элементе какого-нибудь оборудования. Например, Вам надо получить схему, которая состоит из 2-х блоков: передатчика и приемника. До готовности передатчика можно задействовать генератор сигналов. Большинство генераторов способно обеспечить создание сигналов с разными параметрами.

Чтобы точно определить частоту сигнала необходимо подключить генератор к входу устройства для измерения частоты. У ряда генераторов имеются встроенные модули, предназначенные для определения частоты.

Цифровой частотомер использует счетно-импульсный принцип, благодаря которому счетный блок подсчитывает число импульсов, поступающих на вход за конкретный период времени. То есть устройство осуществляет подсчет числа импульсов, период времени определяется с помощью опорных частот.

На входе устройства измеряемое колебание усиливается, превращаясь в последовательность усиленных импульсов с такой же частотой, которую и необходимо измерить. В то же время кварцевый генератор создает последовательность эталонных импульсов, которые приводят к старту схемы управления. В качестве нее выступает стробирующая схема. Она задает стандартное время измерений, за которое подаются колебания на вход. Счетчик устройства подсчитывает импульсы за данный период времени. Их количество выводится на цифровом индикаторе. В случае необходимости нового измерения имеется кнопка, которая направляет сигнал на схему сброса. Она ставит счетчик в нулевое положение.



Рисунок 48

Универсальный частотомер (рис.48) в большинстве случаев используется для автоматизированного определения частоты, непрерывности сигналов, времени, пика напряжения, которое является входящим. Также устройство применяется с целью исследования времени прохождения импульсов, времени, фазового сдвига между сигналами, исследования отношений частотных характеристик, подсчитывания количества импульсов.

Частотомер в большей части случаев используется с целью настраивания, испытания и калибрующих работ в разнообразных устройствах. К примеру, это могут быть преобразователи, генераторы, фильтрующие устройства. Частотомеры часто применяют для настраивания оборудования связи и так далее. Они довольно часто применяются в связном деле, измерительной технике, навигации, локации, ядерной физике, электронике, а также при создании, изготовлении и эксплуатации радиоэлектронных устройств.

#### Тема 4.10. Измерение угла сдвига фаз. Электромеханические, электронные и цифровые фазометры.

Фазой гармонического напряжения  $U(t) = U_m \sin(\omega t + \phi_0)$  называется аргумент функции  $U(t)$ , описывающей колебательный процесс.

Фаза гармонического напряжения является линейной функцией времени.

Угол сдвига фаз представляет собой модуль разности фаз двух гармонических сигналов  $U_1(t)$  и  $U_2(t)$  одинаковой частоты.

Таким образом, если  $U_1(t) = U_{1m} \sin(\omega t + \phi_1)$ , а  $U_2(t) = U_{2m} \sin(\omega t + \phi_2)$ , то согласно определению угол сдвига фаз  $\Delta\phi$  равен  $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$ .

Если  $\phi_1$  и  $\phi_2$  постоянны во времени, то  $\Delta\phi$  от времени не зависит. При  $\Delta\phi = 0$  гармонические напряжения называются синфазными, при  $\Delta\phi = \pm\pi$  – противофазными.

Выбор метода измерения угла сдвига фаз зависит от диапазона частот, амплитуды сигнала и, главным образом, от требуемой точности измерения.

Измерение угла сдвига фаз может выполняться как методом непосредственной оценки, так и методом сравнения. Результат измерения выражается либо в градусах, либо в радианах.

Измерительные приборы, специально предназначенные для измерения угла сдвига фаз, называются фазометрами. Угол сдвига фаз может быть измерен также с помощью осциллографа. Измерение угла сдвига фаз методом непосредственной оценки может быть выполнено с помощью фазометров различных типов.

При измерении на низких частотах в промышленных цепях удобно использовать электромеханические фазометры на основе электродинамических и ферродинамических логометров. Однако они имеют сравнительно низкий класс точности от 0,5 до 2,5, и их показания заметно зависят от частоты.

Электронные аналоговые фазометры используют принцип преобразования фазового сдвига во временной интервал. Этот временной интервал формируется в приборе так, что его длительность оказывается пропорциональна значению измеряемого угла сдвига фаз. В течение этого временного интервала через магнитоэлектрический измерительный механизм (ИМ) прибора протекает постоянный ток фиксированного значения, в результате показания ИМ оказываются пропорциональными значению измеряемой величины.

Электронные аналоговые фазометры могут использоваться в различных цепях и позволяют измерять угол сдвига фаз в диапазоне частот от десятков герц до единиц мегагерц. Относительная погрешность таких фазометров составляет 1 – 2%, им присущи общие для аналоговых приборов недостатки.

В лабораторных условиях в маломощных цепях для измерения угла сдвига фаз методом непосредственной оценки удобно использовать осциллограф. Такие измерения) могут выполняться методом линейной развертки или методом эллипса (фигур Лиссажу). В первом случае на экране получают изображение двух кривых  $U_1(t)$  и  $U_2(t)$ , взаимное расположение которых несет искомую

информацию, во втором случае на экране 3 осциллографа наблюдается эллипс, форма которого определяется значением измеряемого угла сдвига фаз.

Измерение угла сдвига фаз с помощью осциллографа можно выполнять в широком диапазоне частот, но их точность невелика. Осциллограф можно также использовать для выполнения измерений угла сдвига фаз методом компенсации.

При равенстве фаз между исследуемыми напряжениями на экране осциллографа место эллипса будет наблюдаться отрезок прямой).

Этот метод измерений заметно точнее, чем предыдущий. Диапазон рабочих частот в этом случае определяется главным образом частотными характеристиками фазовращателя. В диапазоне частот от долей герца до десятков мегагерц наилучшие результаты по точности дает цифровой фазометр. Такие фазометры рекомендуется применять в маломощных цепях, а также при искаженной форме напряжения. В настоящей работе для измерения угла сдвига фаз используется именно цифровой фазометр, рассмотрим принцип его действия.

В основе работы цифровых фазометров всех систем лежит принцип преобразования измеряемого угла сдвига фаз во временной интервал, длительность которого пропорциональна значению измеряемой величины. Длительность временного интервала определяется при этом методом дискретного счета непосредственно, или с промежуточным преобразованием длительности временного интервала в пропорциональное ему значение величины напряжения постоянного тока. Фазометры с непосредственным преобразованием значения длительности временного интервала в код в свою очередь подразделяются на две группы: с измерением за один период входных напряжений и с измерением за несколько периодов входных напряжений. Фазометры первой группы называются фазометрами мгновенного значения, а второй группы – фазометрами среднего значения.

Фазометры среднего значения, называемые также фазометрами с постоянным временем измерения, благодаря хорошим характеристикам получили наибольшее распространение.

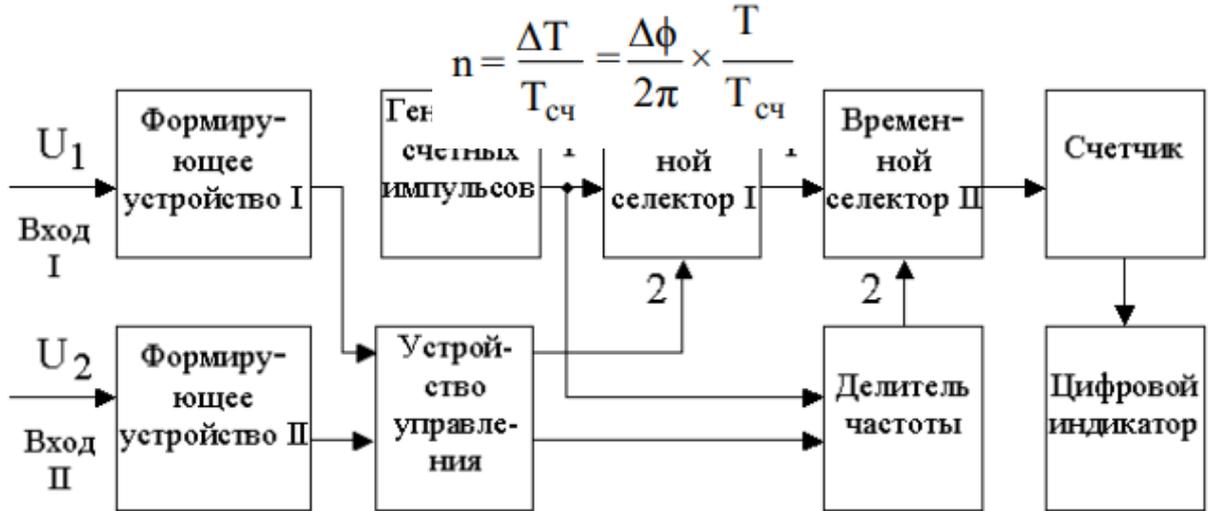
На рисунке 49 приведена структурная схема такого фазометра.

Входные синусоидальные напряжения  $U_1$  и  $U_2$  с помощью формирующих устройств преобразуются в периодические последовательности коротких импульсов, сдвинутые относительно друг друга на временной интервал:

$$\Delta T = \frac{\Delta \phi}{2\pi} \times T$$

Эти импульсы, попадая на два входа устройства управления,  $2\pi$  формируют на его выходе последовательность прямоугольных импульсов длительностью  $\Delta T$  и с периодом следования  $T$ . Полученные прямоугольные импульсы подаются на вход 2 (управляющий) временного селектора  $I$ , а на его вход 1 (сигнальный) подается последовательность коротких импульсов с выхода генератора счетных импульсов, период следования которых равен  $T_{сч}$ .

В результате на выходе временного селектора I формируется последовательность пачек счетных импульсов (рис.3.7.2). При условии, что  $\Delta T > T_{сч}$ , число импульсов  $n$  в каждой пачке, без учета погрешностей, может быть подсчитано по формуле:



Эти пачки счетных импульсов подаются, в свою очередь, на вход 1 временного селектора II. На его вход 2 с выхода формирователя, в качестве которого работает делитель частоты, подается прямоугольный импульс длительностью  $T_{изм}$ . В результате, на выходе временного селектора II образуется конечная последовательность пачек счетных импульсов.

Рисунок 49

Длительность одного цикла измерений  $T_{изм}$  выбирается так, чтобы

$$T_{изм} \gg T_{нижн} ,$$

где  $T_{нижн}$  – период самого низкочастотного напряжения, исследуемого фазометром. При выполнении этого условия общее количество счетных импульсов  $N$ , попавших на вход счетчика, можно определить по формуле:

$$N = n \times \frac{T_{изм}}{T} = \frac{\Delta \phi}{2\pi} \times \frac{T_{изм}}{T_{сч}}$$

Если длительность одного цикла измерений выбрать в соответствии с выражением:

$$T_{изм} = \frac{KT_{сч}}{2}$$

где  $K$  – коэффициент деления частоты, то выражение можно записать в виде:

$$N = n \times \frac{T_{\text{изм}}}{T} = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \times \frac{T_{\text{изм}}}{T_{\text{сч}}} = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \times \frac{K}{2} = \frac{K \times \Delta\varphi}{720^\circ}$$

Видно, что такой цифровой фазометр является прямопоказывающим, это одно из его достоинств. Важная особенность цифрового фазометра с усреднением состоит в том, что его погрешность дискретности имеет две составляющие: одна связана с ограниченным числом импульсов в каждой пачке, а другая – с ограниченным числом пачек, попадающих в интервал  $T_{\text{изм}}$ .

С изменением частоты входных напряжений влияние этих двух составляющих погрешности дискретности изменяется в противоположных направлениях. С увеличением частоты количество импульсов в каждой пачке уменьшается, но количество подсчитанных пачек возрастает, с уменьшением частоты происходит противоположный процесс.

#### Тема 4.11. Магнитные измерения.

Для решения технических задач или в исследовательских целях, возникает потребность в измерении магнитных величин. Безусловно, значение требуемой магнитной величины можно найти и косвенным путем, прибегнув к формулам с опорой на известные исходные данные. Однако, для получения наиболее точного значения магнитного потока  $\Phi$ , магнитной индукции  $B$  или напряженности магнитного поля  $H$  лучше подойдет метод прямого измерения. Давайте же рассмотрим методы прямого измерения магнитных величин (рис.50).



Рисунок 50

Принципиально метод измерения магнитной величины может быть основан на действии магнитного поля на ток или на проводник. Сила, вызываемая магнитным полем, связывается с электрическим процессом, и затем, посредством электроизмерительного прибора, получается значение измеряемой величины в удобном для человеческого восприятия виде.

Основных методов измерения магнитных величин два: индукционный и гальваномагнитный.

Первый основан на наведении ЭДС при изменении магнитного потока, второй — на действии магнитного поля на ток. Рассмотрим два этих метода по отдельности.

Метод электромагнитной индукции

Известно, что при пересечении витков катушки  $L$  магнитным потоком  $\Phi$  (при изменении магнитного потока, пронизывающего контур) в проводе катушки индуцируется ЭДС ( $E$ ), пропорциональная скорости изменения магнитного потока  $d\Phi/dt$ , то есть пропорциональная и его величине  $\Phi$ .

Данное явление описывается формулой:

$$E = -w \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}; w - \text{количество витков}$$

При однородном магнитном поле магнитный поток  $\Phi$  будет прямопропорционален магнитной индукции  $B$ , а коэффициентом пропорциональности будет площадь контура  $S$ , пронизываемого линиями магнитной индукции.

Далее — магнитная индукция  $B$  окажется прямопропорциональна напряженности магнитного поля  $H$  через магнитную постоянную  $\mu_0$ , если явление происходит в вакууме, либо с учетом магнитной проницаемости среды — еще и через относительную магнитную проницаемость  $\mu$  этой среды.

$$B = \frac{\Phi}{S}; H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{\Phi}{\mu_0 S}$$

Так, индукционный метод позволяет найти значения: магнитного потока  $\Phi$ , магнитной индукции  $B$  и напряженности магнитного поля  $H$ . Приборы для измерения магнитного потока называются веберметрами или флюксометрами (от flux – поток).

Простейшая схема прибора представлена на рисунке 51.

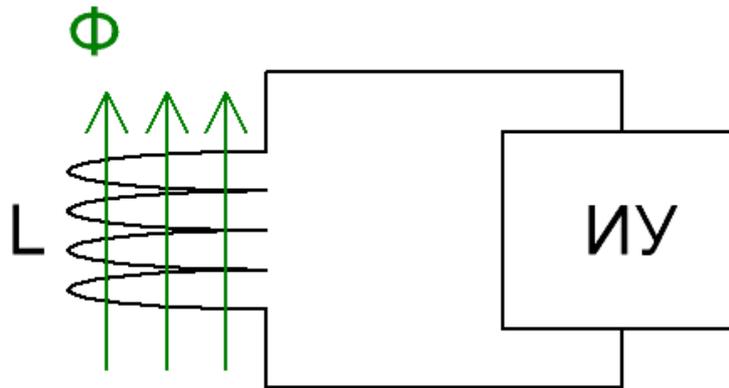


Рисунок 51

Веберметр состоит из индукционной катушки с заранее известными параметрами и интегрирующего устройства ИУ. Интегрирующее устройство представляет собой магнитоэлектрический гальванометр.

Если катушку веберметра вносить или выносить из пространства, где присутствует магнитное поле, то отклонение измерительного механизма веберметра (отклонение стрелки или изменение цифр на дисплее) будет пропорционально индукции  $B$  этого магнитного поля. Математическая зависимость легко описывается формулой:

$$\Phi = \frac{C_{\phi}}{w} \alpha$$

где  $w$  – количество витков,  $C_{\phi}$  – цена деления,  $\alpha$  – угол отклонения стрелки.

#### Гальваномагнитный метод (метод Холла)

Общеизвестно, что на проводник с током, находящийся во внешнем магнитном поле, действует сила Ампера, а если рассмотреть процесс более щепетильно, то на движущиеся внутри проводника заряженные частицы действует сила Лоренца.

Так, если проводящую пластину поместить в магнитное поле, и пропустить через пластину постоянный или переменный электрический ток, то на краях пластины возникнет постоянная или переменная разность потенциалов. Эта разность потенциалов  $E_x$  называется ЭДС Холла.

Исходя из известных параметров пластины, зная ЭДС Холла, можно определить значение магнитной индукции  $B$ . Устройство, предназначенное для измерения магнитной индукции называется тесламетром (рис. 52).

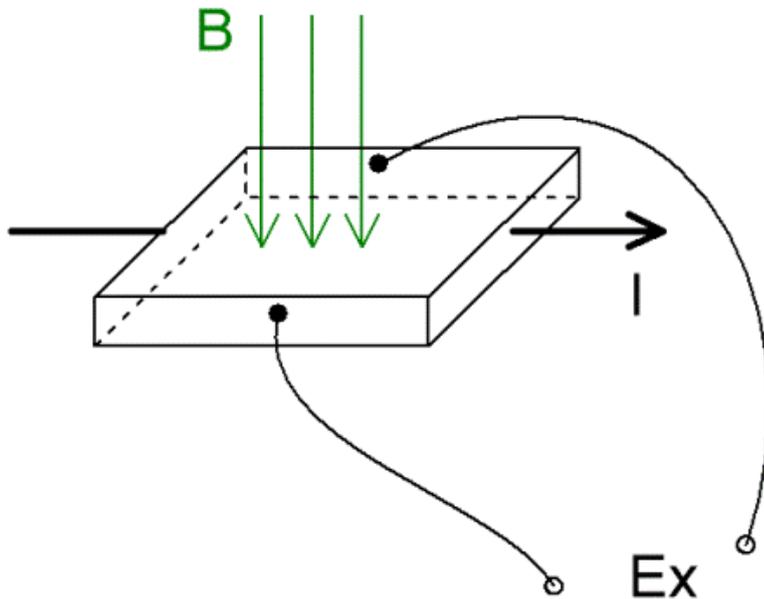


Рисунок 52

$$E_x = S_x B$$

Где  $E_x$  – ЭДС Холла,  $S_x$  – чувствительность датчика.

Если преобразователь Холла (датчик Холла) запитать от одного источника, а затем подать компенсирующую разность потенциалов от второго источника, то можно компенсационным методом при помощи сравнивающего устройства определить ЭДС Холла.

Устройство довольно просто: компенсирующее напряжение, снимаемое с регулируемого резистора, подают в противофазе с ЭДС Холла, и так определяют значение ЭДС Холла. Когда компенсационная цепь и датчик Холла питаются от одного источника, то исключается погрешность, могущая возникнуть от нестабильности напряжения и частоты генератора (рис. 53).

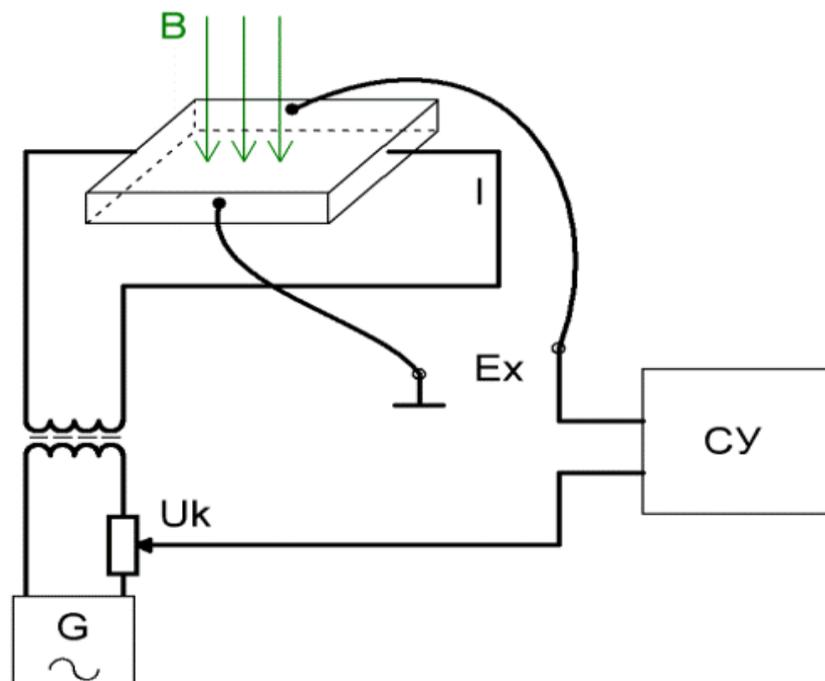


Рисунок 53

Датчики Холла широко применяют в качестве датчиков положения ротора в электродвигателях и в других машинах, где можно получить сигнал от перемещающегося постоянного магнита или от намагничиваемого сердечника трансформатора. В частности, датчик Холла в некоторых применениях выступает своеобразной альтернативой измерительному трансформатору тока.

### Тема 4.12 Автоматизация измерений. Информационно-измерительные системы и комплексы.

Технологические процессы в промышленности (энергетика, металлургия, химическое производство, транспорт и др.) имеют множество отдаленных точек измерения и управления. Для дистанционного сбора измерительных данных, их отображения и регистрации, а также дистанционного управления разработаны программно - аппаратные комплексы, например SCADA (рис. 54).

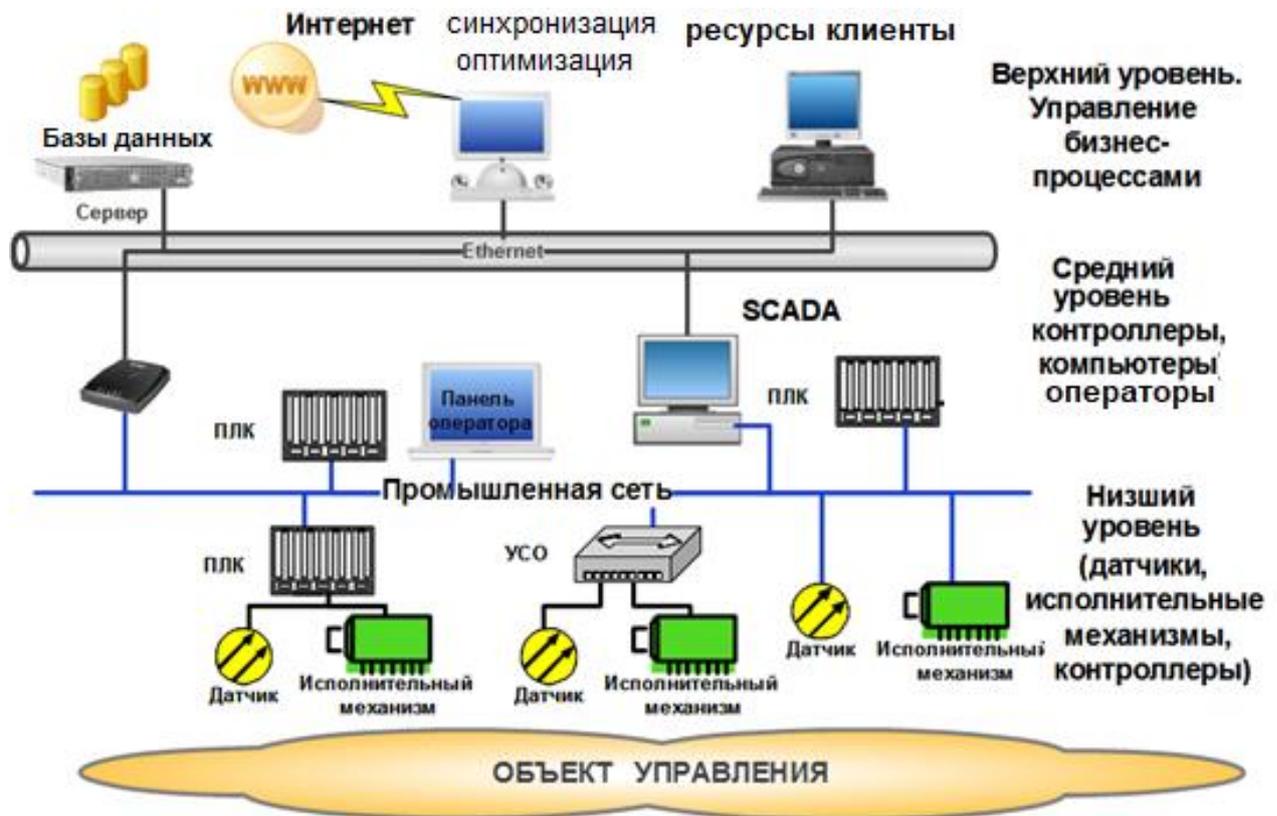


Рисунок 54

Состав типовой распределенной иерархической системы измерения и управления:

1. Уровень датчиков:

- датчики: тока, напряжения, температуры, расхода, давления, скорости, ускорения, влажности, расстояния ...;
- исполнительные механизмы: переключатель, нагреватель, электропривод, компрессор, клапан, задвижка ....

2. Контроллерный уровень:

- устройства связи с объектом (УСО), усилители, ограничители, защита от перенапряжений . . .;
- микроконтроллеры для обработки сигналов с датчиков (линеаризация, коррекции, калибровка ...); аналого-цифровые и цифро-

аналоговые преобразователи сигналов с датчиков и управляющих сигналов для исполнительных механизмов. . . ;

- программируемые логические контроллеры (ПЛК) локальное управление в реальном времени, передача измерительной информации в верхний уровень; выполнение команд от компьютеров верхнего уровня;

- надежная цифровая передача данных в условиях помех, промышленные протоколы передачи информации.

### 3. Диспетчерский уровень:

- обмен информацией с операторами и периферийными устройствами, дистанционное управление от операторов;

- серверы (обмен данными с технологическим процессом в реальном времени), аварийные ситуации, архивирование и др

- базы данных, оптимизация процессов и ресурсов, интернет.

На рисунке 55 отражено устройство связи с объектом (измерение температуры).

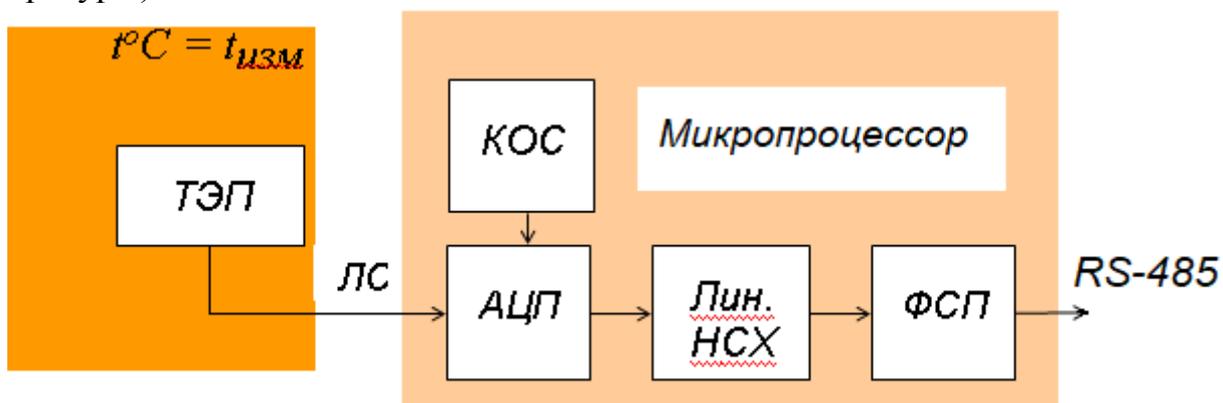


Рисунок 55

ТЭП – термоэлектрический преобразователь (термопара); ЛС – линия связи ~ 50 мВ, 1 ÷ 2 м; КОС – компенсация ЭДС температуры опорного спая ТЭП; Лин. НСХ – линеаризация нелинейной статической характеристики ТЭП;

ФСП – фильтр сетевой помехи 50 Гц; RS-485 – встроенная коммуникация с верхним уровнем. На рисунке 56 отображена схема промышленного устройства

измерения температуры. В таблице 2 указаны технические данные (возможности) устройства связи с объектом.

Таблица 2

Входные каналы	8 диф-ных, термопары разл. типов
Входные величины	mV, V, mA jumper (выбор)
Частота измерений	8 изм/с
Точность	±0.15%
Защита от перенапряжений	±240 В
Изоляция	3000 V DC
Контроль обрыва	Да
Питание	+10 to +30 V DC, 1.2W
Рабочая температура	-25°C to +75°C

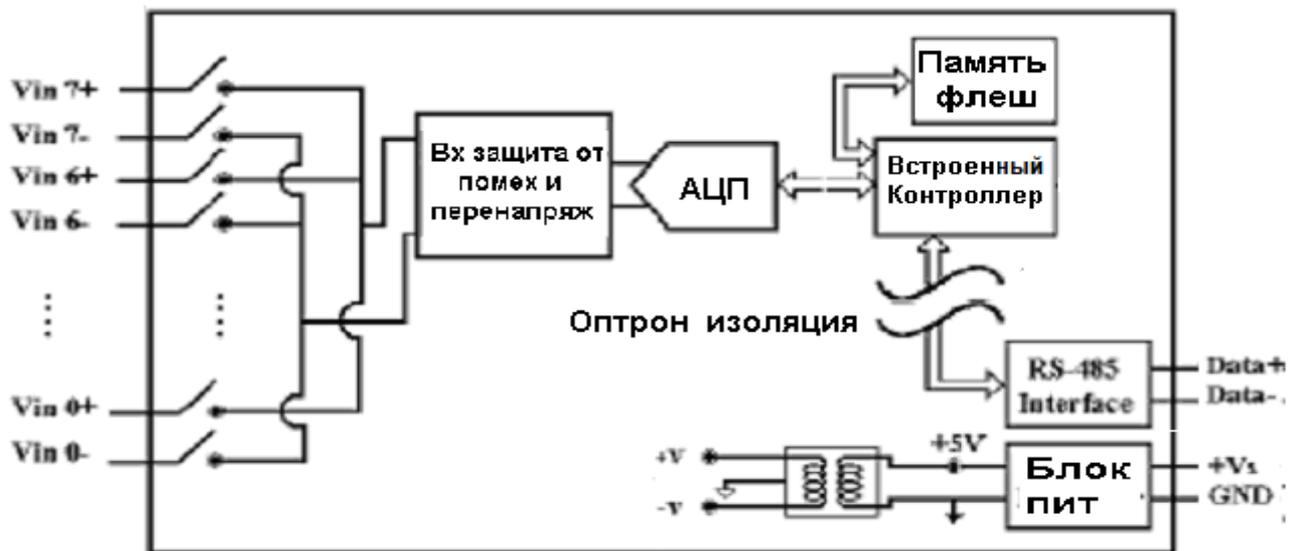


Рисунок 56

Дифференциальные линии связи с термопарами  $V_{in\ 0+}$  . . .  $V_{in\ 0-}$  более устойчивы к помехам. Можно одновременно работать с термопарами различных типов. Программа микроконтроллера и флеш-память позволяют индивидуально конфигурировать и запоминать тарированную измерительную характеристику каждой подключенной термопары. Данное устройство измерения температуры имеет оптронную электрическую развязку от канала передачи информации **Data+** . . . **Data-** и трансформаторную развязку от цепи питания **+V** . . . **GND**.

Для измерения токов, напряжений, мощностей и других величин применяют аналогичные блоки. В ответственных системах применяются сторожевые таймеры и супервизоры питания. Сторожевой таймер получает от контролируемого работающего блока периодические импульсы. Если импульсы прекратились, сторожевой таймер перезапускает контролируемый блок. Супервизор питания перезапускает контролируемый блок если напряжение питания блока вышло за допустимые пределы и нет уверенности правильной работы цифровой части блока.

Программируемые логические контроллеры (ПЛК). Система реального времени.

ПЛК ориентированы на работу с объектами через развитый ввод сигналов измерительных датчиков и вывод сигналов на исполнительные механизмы. Обычно ПЛК работает самостоятельно, передавая на верхний уровень только измеренные результаты работы и получая корректирующие сигналы. Такое децентрализованное измерение и управление повышает надежность и живучесть систем.

В системах аварийной защиты промышленных объектов, бортовых системах измерения и управления (самолёт, корабль, и пр.) недопустимы

задержки реакции системы. В подобных условиях применяют системы жесткого реального времени, обеспечивающие требуемое время выполнения задачи даже в худших случаях. Обработка измерительных данных обеспечивается в пределах заданного временного цикла с учетом приоритетов.

### Тренд

Тренд показывает оператору график изменения нескольких измеряемых величин за определенное время. Оперативный тренд показывает скользящий график измерений за последний текущий интервал времени, например, за последнюю минуту, пять минут, час. Такой тренд позволяет оператору оценивать динамику технологического процесса и заранее предпринять корректирующие действия, если в тренде появились неблагоприятные изменения технологического процесса (рис. 57).



Рисунок 57

Архивный тренд может хранить графики измеренных величин за час, сутки, месяц. Из анализа архивного тренда можно судить о качестве измерений и качестве регулирования технологического процесса. По результатам анализа можно выработать рекомендации по оптимизации технологического процесса.

### Алармы

В отличие от события, аларм (от английского "alarm" - "сигнал тревоги") представляет собой предупреждение о важном событии, в ответ на которое нужно срочно предпринять некоторые действия.

Система управления тревогами алармы – это программа, обеспечивающая автоматический контроль технологических событий, отнесение их к категории нормальных, предупреждающих или аварийных, а также обработку событий оператором или компьютером

Примеры алармов: – достижение критической температуры хранения зерна в элеваторе, после которого начинается его возгорание; – достижение

критического значения давления в автоклаве, после которого возможен разрыв оболочки; – срабатывание датчика открытия охраняемой двери; – превышение допустимого уровня загазованности в котельной и т.п.

Алармы делятся на дискретные и аналоговые. Дискретные сигнализируют об изменении дискретной переменной (1/0). Аналоговые алармы появляются, когда измеряемая переменная входит в аварийный интервал своих значений (рис.58).

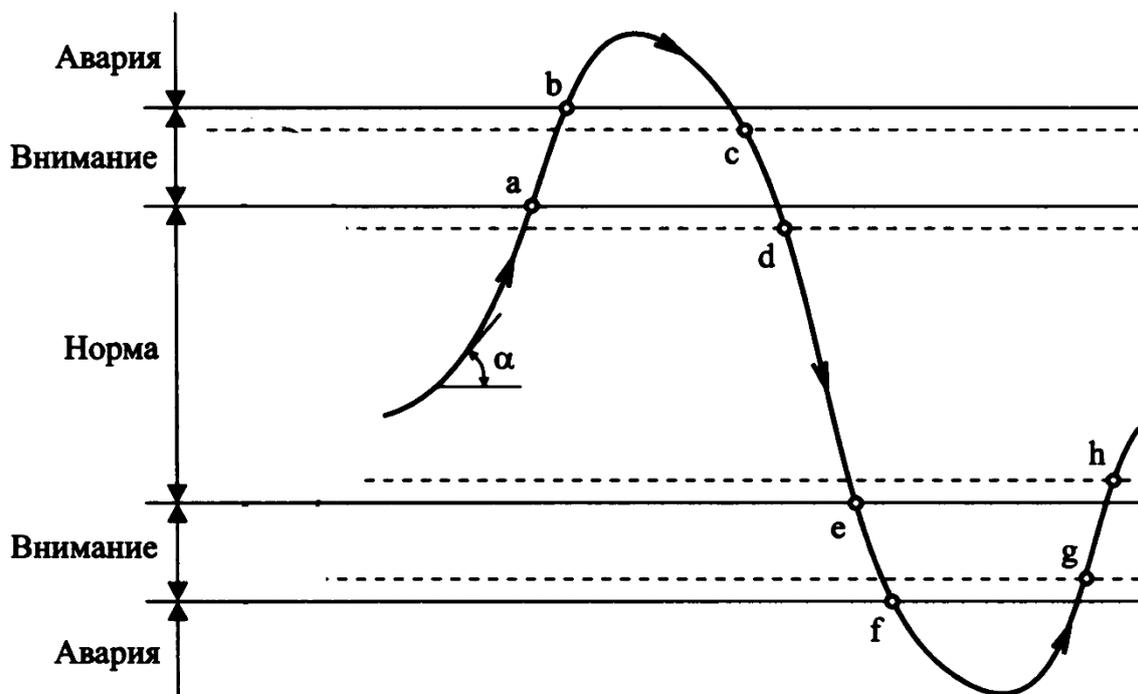


Рисунок 58

Аналогичные границы назначают для скорости изменения измеряемой переменной (угол  $\alpha$  наклона касательной к кривой).

Система выдачи алармов должна быть надежной. Всплывающие окна с сообщениями алармов должны быть всегда поверх остальных окон, алармы могут дублироваться звуком и светом. Поскольку алармов в системе может быть много, им назначают разные приоритеты, разные громкости и тоны звукового сигнала и т. п.

## ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

### Лабораторная работа №1

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ И ТИРИСТОРОВ

**Ц е л ь р а б о т ы:** выяснение механизма образования  $n$ - $p$  перехода; снятие вольтамперных характеристик выпрямительного диода и стабилитрона; ознакомление с принципом действия тиристора и снятие его основных характеристик.

#### Общие сведения

К полупроводниковым относятся материалы, которые при комнатной температуре имеют удельное сопротивление  $\rho = 10^{-3} \dots 10^{10}$  Ом·см, зависящее от температуры, освещенности, ионизирующего излучения, электрического поля и др.

Для изготовления полупроводниковых приборов применяют простые полупроводниковые вещества - германий, кремний, селен - и некоторые химические соединения, например, арсенид галлия  $GaAs$ , антимонид индия  $InSb$ , фосфид индия  $InP$ , карбид кремния  $SiC$ .

Полупроводники имеют кристаллическую структуру, которая однородна при температуре абсолютного нуля. По мере нагрева часть валентных связей нарушается вследствие тепловых колебаний в кристаллической решетке, что приводит к одновременному образованию свободных электронов и незаполненных связей (дырок). Генерация пар

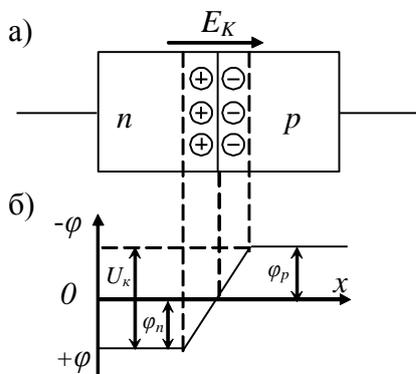


Рисунок 1.1  
 $P$ - $N$  переход

носителей заряда может происходить также под действием света, электрического поля, излучения и др. Электропроводность собственного полупроводника, обусловленную парными носителями заряда (электронами и дырками), называют **с о б с т в е н н о й**. Вводя в собственный полупроводник примеси, получают **п р и м е с н у ю** электропроводность. Донорные примеси, атомы которых отдают электроны, образуют полупроводники с преобладающей **э л е к т р о н н о й** электропроводностью ( $n$ -типа). Полупроводники с преобладающей **д ы р о ч н о й** электропроводностью называют полупроводниками  $p$ -типа, а соответствующие примеси - акцепторами.

Область на границе контакта двух полупроводников с противоположным типом электропроводности называется **э л е к т р о н н о - д ы р о ч н ы м** или  $n$ - $p$ -переходом. Переход обладает несимметричной проводимостью, т. е. имеет нелинейное сопротивление. Работа большинства полупроводниковых приборов (диодов, тиристоров и др.) основана на использовании свойств  $n$ - $p$ -переходов.

Рассмотрим процессы в  $n-p$ -переходе при отсутствии внешнего источника напряжения (рис.1.1). Так как носители заряда совершают беспорядочное тепловое движение, то происходит их диффузия из одного полупроводника в другой. Концентрация электронов в  $n$ -слое больше, чем в  $p$ -слое, и часть электронов перейдет из  $n$ -слоя в  $p$ -слой. Одновременно наблюдается диффузионный переход дырок из  $p$ -слоя в  $n$ -слой. В результате в  $n$ -слое остается нескомпенсированный объемный заряд положительных ионов (в основном донорной примеси), а в  $p$ -слое - нескомпенсированный объемный заряд отрицательных ионов акцепторной примеси. Между образовавшимися объемными зарядами возникает контактная разность потенциалов  $U_k = \varphi_n - \varphi_p$  и электрическое поле напряженностью  $E_k$ . На потенциальной диаграмме  $n-p$ -перехода (рис. 1.1 б) за нулевой потенциал принят потенциал граничного слоя. В  $n-p$ -переходе возникает потенциальный барьер, препятствующий диффузионному перемещению носителей заряда. Высота барьера равна контактной разности потенциалов и обычно составляет десятые доли вольта. На рис. 1.1б изображен барьер для дырок, стремящихся за счет диффузии перемещаться из области  $p$  в область  $n$ .

Таким образом, в  $n-p$ -переходе вследствие ухода электронов и дырок вглубь  $p$ - и  $n$ -областей образуется обедненный зарядами слой, называемый запирающим и обладающий большим сопротивлением в сравнении с сопротивлением остальных объемов  $n$ - и  $p$ -областей.

Если источник внешнего напряжения положительным полюсом подключить к полупроводнику  $p$ -типа и отрицательным к  $n$ -типа (прямое включение), то электрическое поле, создаваемое в  $n-p$ -переходе прямым напряжением  $U_{пр}$ , действует навстречу контактной разности потенциалов  $U_k$ . Потенциальный барьер понижается до величины  $U_k - U_{пр}$ , уменьшаются толщина запирающего слоя и его сопротивление  $R_{пр}$ .

Если полярность внешнего источника изменить на обратную, то потенциальный барьер возрастает до величины  $U_k + U_{обр}$ . В этом случае через переход могут пройти только неосновные носители: электроны из  $p$ -области в  $n$ -область и дырки во встречном направлении. Так как концентрация основных носителей заряда на несколько порядков выше концентрации неосновных, то прямые токи на несколько порядков больше обратных. Электронно-дырочный переход обладает выпрямляющими свойствами, которые используются для создания диодов.

Диодом называют полупроводниковый прибор с одним  $n-p$ -переходом и двумя внешними выводами. По назначению диоды делят на выпрямительные, высокочастотные, импульсные, стабилитроны и т.д. Их изготавливают на основе германия или кремния. Выпрямительные диоды предназначены для преобразования переменного тока

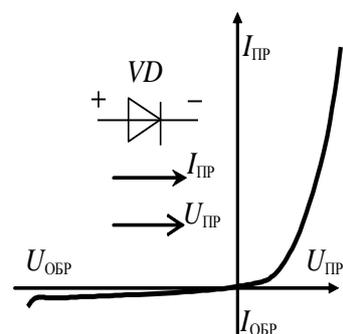


Рисунок 1.2  
ВАХ диода

низкой частоты в постоянный ток. Вольтамперная характеристика (ВАХ) выпрямительного диода, его условное графическое изображение и буквенное обозначение даны на рис.1.2. Основные параметры выпрямительного диода: предельно допустимый постоянный ток диода  $I_{пр.мах}$  и максимально допустимое обратное напряжение  $U_{обр.мах}$ .

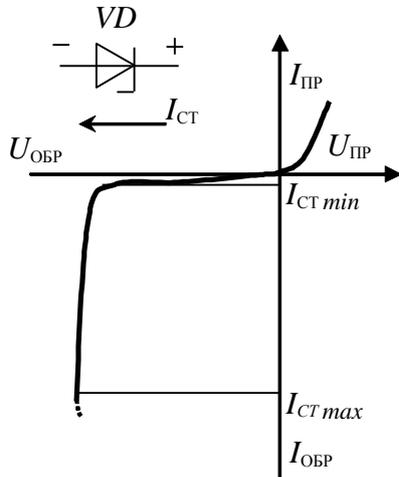


Рисунок 1.3  
ВАХ стабилитрона

С т а б и л и т р о н представляет собой кремниевый полупроводниковый диод, который нормально работает при электрическом пробое  $n-p$ -перехода. При этом напряжение на диоде незначительно зависит от протекающего тока. Электрический пробой не вызывает разрушения перехода, если ограничить ток до допустимой величины. Стабилитроны применяют для стабилизации постоянного напряжения. ВАХ стабилитрона и его условное графическое обозначение приведены на рис.1.3. Основные параметры стабилитрона: напряжение стабилизации  $U_{ст.ном}$ , минимальный  $I_{ст.мин}$  и максимальный  $I_{ст.мах}$  токи стабилизации, максимальная мощность  $P_{ст.мах}$ .

Т и р и с т о р о м называют полупроводниковый прибор с тремя или более  $n-p$ -переходами и двумя (д и н и с т о р) или тремя (т р и н и с т о р) выводами. Он может находиться в одном из двух устойчивых состояний: низкой проводимости (закрит) или высокой проводимости (открыт). Структура, условное графическое и буквенное обозначения тиристора, его вольтамперная характеристика даны на рис.1.4а, б, в.

Основу прибора составляет кристалл кремния, в котором созданы четыре слоя с разными типами электропроводности. Внешний  $p$ -слой называют анодом (А), внешний  $n$ -слой - катодом (К), а два внутренних слоя - базами. Одна из баз имеет вывод - управляющий электрод (У).

При прямом включении (анод положителен по отношению к катоду) переходы П1 и П3 смещены в прямом направлении, а переход П2 - в обратном направлении. До тех пор, пока П2 закрыт, прямой ток практически равен нулю (участок  $oa$  характеристики рис. 1.4в). При некотором значении прямого напряжения, равном  $U_{вкл.мах}$ , за счет перераспределения зарядов в области баз переход П2 открывается (точка  $a$ ). Сопротивление его быстро уменьшается (участок  $ab$ ), и тиристор работает на участке  $бв$  характеристики, которая подобна ВАХ диода.

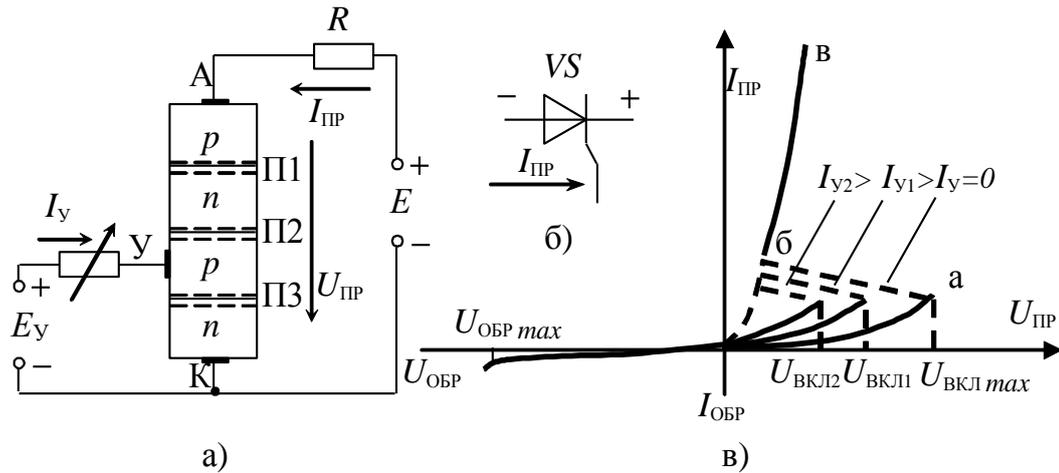


Рисунок 1.4 Тиристор: структура(а),  
Обозначение (б), ВАХ (в)

Напряжение включения  $U_{\text{вкл.max}}$  можно уменьшить введением добавочных носителей заряда в любой из слоев, прилегающих к переходу П2. Добавочные носители заряда на рис.1.4а вводятся в слой  $p$  от вспомогательной управляющей цепи с независимым источником  $E_y$ . При увеличении тока управления  $I_y$  характеристика (рис.1.4 в) смещается влево (к естественной прямой ветви ВАХ диода). Тиристор остается во включенном состоянии, пока протекающий через него ток больше критического, называемого током удержания  $I_{\text{уд}}$ . Как только  $I_{\text{пр}}$  станет меньше  $I_{\text{уд}}$ , тиристор закрывается.

Следует отметить, что после включения тиристора объемные заряды в области перехода П2 будут компенсированы основным током, если он больше тока  $I_{\text{уд}}$ , и тогда ток управления  $I_y$  не нужен. Поэтому для снижения потерь в тиристоре он управляется короткими импульсами  $I_y$ .

При обратном включении тиристора (анод отрицателен по отношению к катоду) закрыты два перехода П1 и П3, и тиристор тока не проводит. Во избежание пробоя необходимо, чтобы обратное напряжение было меньше  $U_{\text{обр.max}}$ .

Основные параметры, используемые при выборе тиристорov: предельно допустимый анодный ток в открытом состоянии тиристора  $I_{\text{пр.max}}$ , предельно допустимое обратное напряжение  $U_{\text{обр.max}}$ , предельно допустимое прямое напряжение в закрытом состоянии тиристора  $U_{\text{пр.max}}$ , ток удержания  $I_{\text{уд}}$ .

Маломощные тиристоры применяют в релейных схемах и маломощных коммутирующих устройствах. Мощные тиристоры используют в управляемых выпрямителях, инверторах и различных преобразователях.

### Предварительное задание к эксперименту

Изучить устройство и принцип работы выпрямительного диода, стабилитрона, тиристора. Письменно дать обоснованный ответ на вопрос соответствующего варианта.

ТАБЛИЦА 1.1

Вариант	В о п р о с
1	Можно ли с помощью тока управления закрыть тиристор?
2	Рассчитайте прямое сопротивление выпрямительного диода, если $I_{пр}=0,05\text{А}$ , $U_{пр}=0,67\text{В}$ . Как изменится $R_{пр}$ при увеличении тока диода?
3	Можно ли с помощью тока управления включить тиристор при анодном напряжении, практически равном нулю?
4	Рассчитайте статическое сопротивление стабилитрона, если $U_{ст}=4\text{В}$ , $I_{ст}=0,05\text{А}$ . Как изменится $R_{ст}$ при увеличении тока стабилитрона?
5	Нужно ли поддерживать ток управления после включения тиристора для дальнейшей его работы в открытом состоянии?
6	Рассчитайте сопротивление открытого тиристора при $U_{пр}=1\text{В}$ , $I_{пр}=0,19\text{А}$ . Как изменится $R_{пр}$ при увеличении тока тиристора?
7	Как следует изменить ток управления тиристора для уменьшения напряжения его включения?
8	Что такое ток удержания тиристора? Закроется ли тиристор при уменьшении прямого тока, если $I_{пр}>I_{уд}$ ?

### Порядок выполнения эксперимента

1. Изучить лабораторный стенд по схеме рис.1.5. Установить регулятор потенциометра  $R2$  в крайнее левое положение, переключателем П2.1 подключить выпрямительный диод.

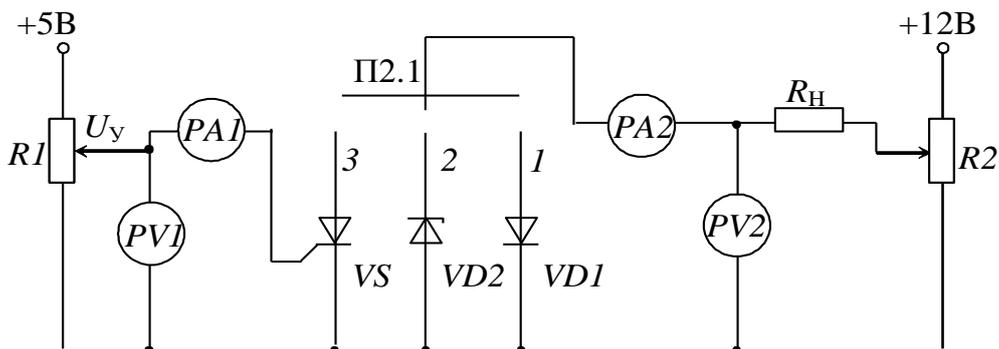


Рисунок 1.5

2. Включить цепь под напряжение с помощью шнура питания стенда и, регулируя напряжение потенциометром  $R2$ , снять ВАХ диода в прямом направлении  $I_{пр}(U_{пр})$ . Результаты измерений записать в табл.1.2.

ТАБЛИЦА 1.2

$I_{пр}, \text{мА}$						
$U_{пр}, \text{В}$						

3. Проверить экспериментом ответ на вопрос предварительного задания (вариант 2).

4. Установить потенциометр  $R2$  в исходное положение (п.1), затем подключить стабилитрон и снять обратную ветвь ВАХ стабилитрона  $I_{обр}(U_{обр})$ . Измерения записать в табл.1.3.

5. Проверить экспериментом ответ на вопрос предварительного задания (вариант 4).

ТАБЛИЦА 1.3

$I_{обр}, \text{мА}$						
$U_{обр}, \text{В}$						

6. Снять характеристику включения тиристора  $U_{вкл}(I_y)$ . Для этого переключателем подключить тиристор, регуляторы  $R1, R2$  установить в крайние левые положения. Регулируя анодное напряжение от 0 до 12 В ступенями через 2 В и медленно увеличивая ток управления  $I_y$  до момента включения тиристора, зафиксировать и записать в табл.1.4 значения тока управления. Построить характеристику включения тиристора  $U_{вкл}(I_y)$ .

ТАБЛИЦА 1.4

$U_{вкл}, \text{В}$	0	2	4	6	8	10	12
$I_y, \text{мА}$							

7. Снять характеристику прямой передачи тока тиристора  $I_{пр}(I_y)$ : потенциометром  $R1$  установить ток  $I_y=0$ , а потенциометром  $R2$  - напряжение  $U_{пр}=8\text{В}$ , затем увеличивать ток управления до момента включения тиристора, записать значения  $I_y, I_{пр}$ . Увеличивая далее  $I_y$  до 10 мА, убедиться в постоянстве анодного тока. Построить график  $I_{пр}(I_y)$ .

8. Снять вольтамперную характеристику тиристора  $I_{пр}(U_{пр})$ , установив ток управления, при котором открывается тиристор (см. п.6). Результаты измерений представить таблицей 1.5. Построить ВАХ тиристора.

ТАБЛИЦА 1.5

$I_{пр}, \text{мА}$						
$U_{пр}, \text{В}$						

9. Проверить экспериментом ответы на вопросы предварительного задания (варианты 1,3,5...8).

### Содержание отчета

Цель работы; ответ на вопрос предварительного задания; схема исследований (рис.1.5); таблицы измерений; ВАХ выпрямительного диода, стабилитрона и тиристора; характеристики включения  $U_{\text{вкл}}(I_y)$  и прямой передачи  $I_{\text{пр}}(I_y)$  тиристора; сравнение прямых падений напряжений на диоде, стабилитроне и тиристоре; выводы о возможном практическом использовании выпрямительных диодов, стабилитронов и тиристоров.

### Контрольные вопросы

1. Что представляет собой собственная и примесная электропроводности? 2. Что такое  $n$ - $p$ -переход и как объяснить его вентильные свойства? 3. Чем обусловлена контактная разность потенциалов  $n$ - $p$ -перехода? 4. Охарактеризуйте состояния  $n$ - $p$ -перехода при прямом и обратном включении? 5. Поясните графики ВАХ диода и стабилитрона. Как влияет температура на ВАХ? 6. Каковы основные параметры диода, стабилитрона? 7. Поясните устройство и принцип работы тиристора, вид его ВАХ? 8. Каково влияние тока управления на работу тиристора? 9. Что такое динистор, тринистор, однооперационный и двухоперационный (запираемый) тиристоры? 10. Каковы основные параметры и характеристики тиристора? 11. Приведите примеры использования диодов, стабилитронов, тиристоров.

## Лабораторная работа №2

### ИССЛЕДОВАНИЕ БИПОЛЯРНОГО И ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРОВ

**Ц е л ь р а б о т ы :** изучение устройства и принципа работы транзисторов; снятие их статических характеристик в схемах с общим эмиттером и общим истоком, определение основных параметров; сравнительный анализ.

#### Общие сведения

**Б и п о л я р н ы м т р а н з и с т о р о м** называют полупроводниковый прибор с двумя *n-p*-переходами, образованными слоями полупроводникового материала *n-p-n* или *p-n-p*-типа. Он имеет три или более выводов, изготавливается на основе германия или кремния, обеспечивает усиление мощности электрических сигналов. На рис.2.1 приведены структурные схемы, условные графические и буквенные обозначения транзисторов *n-p-n*-типа (рис.2.1,а) и *p-n-p*-типа (рис.2.1,б).

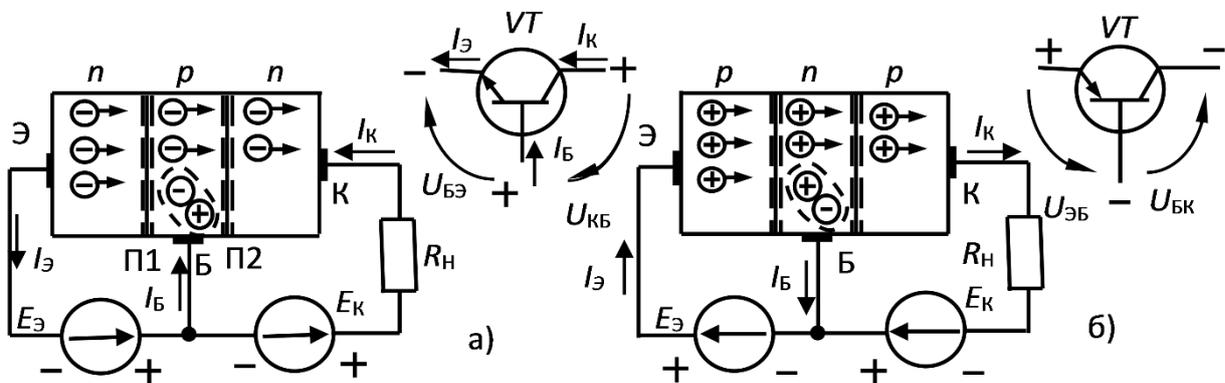


Рисунок 2.1 Биполярный транзистор

Средний слой кристалла называют **б а з о й**. Ее толщина мала, составляет несколько микрометров и концентрация примесей здесь значительно меньше, чем в соседних слоях. Крайние слои называют **э м и т т е р о м** (Э) и **к о л л е к т о р о м** (К).

Для нормальной работы транзистора между его выводами должны быть включены источники питания. Если источники включены так, что оба перехода П1, П2 находятся под обратным напряжением, то токи транзистора практически равны нулю - этот режим называют **о т с е ч к о й**. Если переходы транзистора имеют прямое смещение, то их сопротивление мало, и транзистор можно рассматривать как узел цепи. Такой режим работы называют **н а с ы щ е н и е м**. В усилительном каскаде транзистор работает в **а к т и в н о м** режиме, при этом эмиттерный переход смещен в прямом направлении, а коллекторный - в обратном (рис.2.1). Прямосмещенный эмиттерный переход имеет небольшое сопротивление - несколько Ом. Коллекторный переход, при отсутствии инжекции из эмиттера, имеет очень большое сопротивление - несколько мегаОм, поэтому в цепь коллектора можно

включать нагрузку с большим сопротивлением, практически не изменяя тока коллектора.

Под действием источника  $E_3$  основные носители заряда из эмиттера преодолевают  $n-p$ -переход и попадают в область базы, где частично рекомбинируют с основными носителями заряда базы, образуя ток базы  $I_6$ . Так как концентрация дырок (для  $n-p-n$ -типа) и электронов (для  $p-n-p$ -типа) в базе мала, то не все инжектированные из эмиттера заряды рекомбинируют. Большинство зарядов, вследствие диффузии и поля источника  $E_k$ , преодолевает коллекторный переход и образуют ток коллектора.

Коэффициент передачи тока эмиттера

$$\alpha = \Delta I_k / \Delta I_3 \text{ при } U_{кб} = const.$$

В современных транзисторах база очень тонкая и  $\alpha = 0,99$  и больше.

Когда  $I_3 = 0$ , то будет небольшой ток через коллекторный переход  $I_{к0}$ , обусловленный движением неосновных носителей заряда.

Рассмотренная на рис.2.1 схема включения транзистора называется схемой с общей базой (ОБ), так как база является общим электродом для входной и выходной цепей. Она обеспечивает усиление сигнала по напряжению и мощности, но ток в нагрузке будет меньше, чем входной ток источника сигнала.

Наиболее часто используется в электронных устройствах схема включения транзистора с общим эмиттером (ОЭ) - рис.2.2,а. Входным здесь является ток базы  $I_6$ , а выходным - ток коллектора  $I_k$ .

Коэффициент передачи тока базы схемы ОЭ

$$\beta = \Delta I_k / \Delta I_6 \text{ при } U_{кэ} = const; \beta = \alpha / (1 - \alpha) \gg 1.$$

Эта схема обеспечивает усиление тока и напряжения сигнала и максимальное усиление мощности.

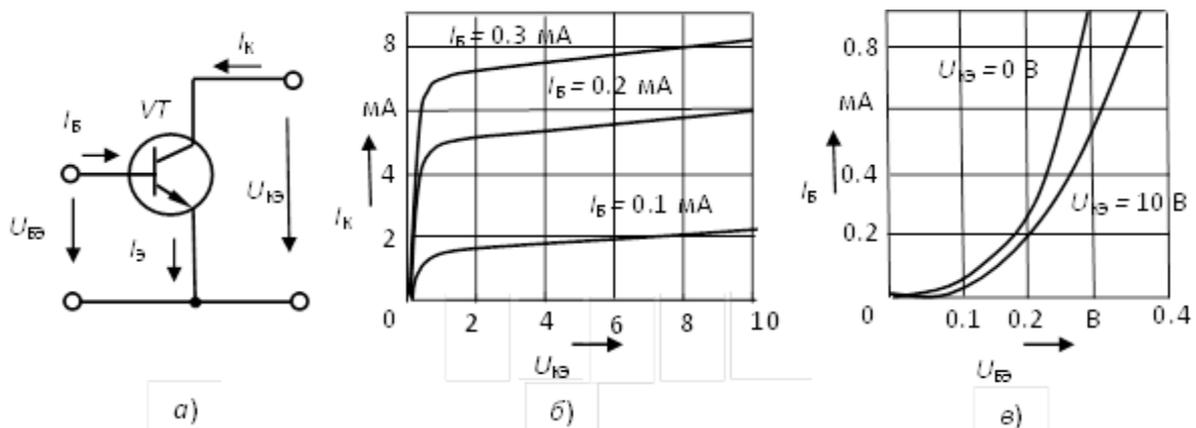


Рисунок 2.2 Биполярный транзистор включенный по схеме с общим эмиттером

Основными характеристиками транзисторов ОЭ являются

- 1) выходные -  $I_k(U_{кэ})$  при  $I_6 = const$  (рис.2.2, б),
- 2) входные -  $I_6(U_{63})$  при  $U_{кэ} = const$  (рис.2.2, в).

Они определяют связь между постоянными составляющими токов и напряжений, дают возможность выбрать наилучший режим работы, оценить нелинейные искажения усиливаемого сигнала.

Для расчета цепей с биполярными транзисторами в настоящее время используются  $h$ -параметры: транзистор представляют четырехполюсником и записывают уравнения четырехполюсника в  $h$ -параметрах. Коэффициенты четырехполюсника ( $h$ -параметры) выражаются следующим образом:

$$h_{11} = \Delta U_{бэ} / \Delta I_{бэ} \text{ при } U_{кэ} = \text{const} - \text{входное сопротивление } R_{вх}, \text{ Ом};$$

$h_{12} = \Delta U_{бэ} / \Delta U_{кэ} \text{ при } I_{бэ} = \text{const} - \text{безразмерный коэффициент обратной связи по напряжению};$

$$h_{21} = \Delta I_{к} / \Delta I_{бэ} \text{ при } U_{кэ} = \text{const} - \text{безразмерный коэффициент передачи тока } (\beta);$$

$$h_{22} = \Delta I_{к} / \Delta U_{кэ} \text{ при } I_{бэ} = \text{const} - \text{выходная проводимость } (1/R_{вых}), \text{ См}.$$

$h$ -параметры приводятся в справочниках, а также могут быть определены по семейству входных и выходных характеристик транзистора.

Биполярные транзисторы управляются током и потребляют заметную мощность от входной цепи. Указанного недостатка лишены полевые транзисторы (ПТ) - это полупроводниковые приборы с каналом, ток в котором управляется электрическим полем. Принцип действия их основан на использовании носителей заряда только одного знака (электронов или дырок), поэтому их иначе называют униполярными.

Главным достоинством ПТ является высокое входное сопротивление, т.е. они практически не потребляют ток из входной цепи. Кроме того, они более технологичны и дешевле, чем биполярные, обладают хорошей воспроизводимостью требуемых параметров.

По способу создания канала различают ПТ с управляющим  $n$ - $p$ -переходом, со встроенным каналом и с индуцированным каналом. Последние два типа относятся к разновидностям МДП-транзисторов с изолированным затвором.

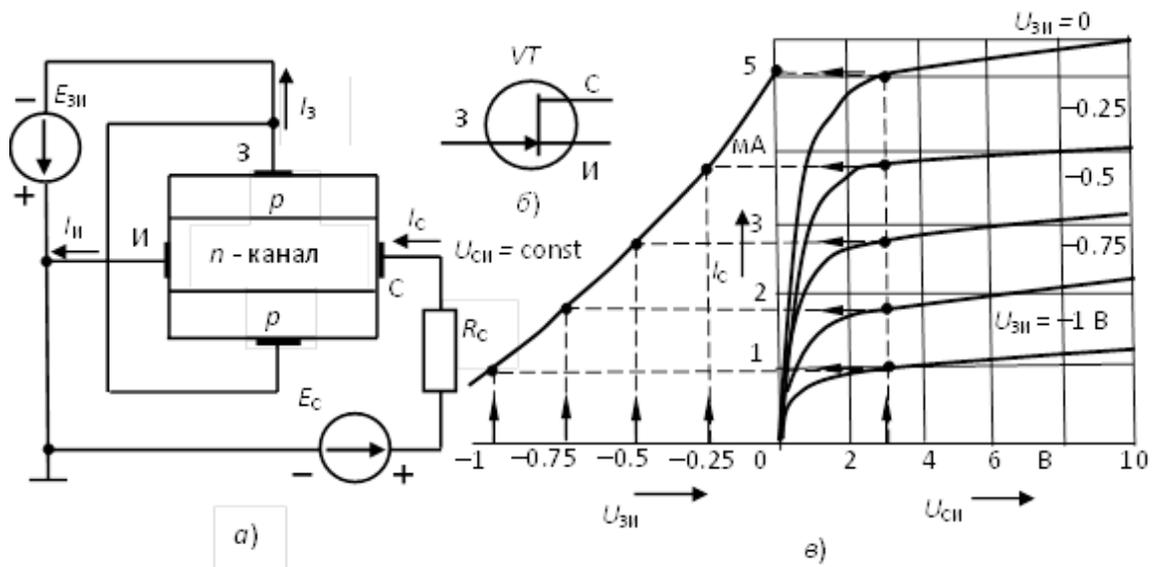


Рисунок 2.3 Полевой транзистор с управляющим  $p$ - $n$  - переходом:  
а) структура; б) обозначение; в) характеристики

У ПТ с управляющим  $n$ - $p$ -переходом (рис.2.3,а) канал - это слой полупроводника  $n$ -типа (может быть  $p$ -типа), заключенный между двумя  $n$ - $p$ -переходами. Канал имеет два вывода во внешнюю цепь:

и с т о к (И), из которого заряды выходят в канал, с т о к (С), в который заряды входят из канала. Слои  $p$ -типа соединены между собой и имеют вывод во внешнюю цепь, называемый з а т в о р о м (З). Затвор служит для регулирования поперечного сечения канала. Особенность ПТ в том, что движение основных носителей заряда только одного знака происходит по каналу от истока к стоку, а не через переход, как в биполярном транзисторе.

Управляющее напряжение между З и И является обратным для обоих  $n$ - $p$ -переходов ( $U_{зи} < 0$ ). Оно вызывает вдоль канала равномерный слой, обедненный носителями заряда при  $U_{си} = 0$ . Изменяя  $U_{зи}$ , изменяют ширину  $n$ - $p$ -переходов, тем самым регулируют сечение токопроводящего канала и его проводимость. Напряжение  $U_{си} > 0$  вызывает неравномерность обедненного зарядами слоя, наименьшее сечение канала вблизи стока.

Управляющее действие затвора иллюстрируют п е р е д а т о ч н о й (стоко-затворной) характеристикой  $I_c(U_{зи})$  при  $U_{си} = const$ . На практике чаще используют в ы х о д н ы е (стоковые) характеристики  $I_c(U_{си})$  при  $U_{зи} = const$ , по которым строят передаточные (рис.2.3, в).

МДП - т р а н з и с т о р ы с о в с т р о е н н ы м к а н а л о м имеют структуру металл - диэлектрик - полупроводник. У поверхности кристалла полупроводника (подложки  $p$ -типа) созданы две области  $n$ -типа и тонкая перемычка между ними - к а н а л (рис.2.4,а). Области  $n$ -типа имеют выводы: И - и с т о к и С - с т о к . Кристалл покрыт окисной пленкой диэлектрика  $SiO_2$ , на которой расположен металлический з а т в о р (З), электрически изолированный от цепи исток - сток. Подложка соединяется с истоком внутри прибора, либо имеет вывод во внешнюю цепь (П).

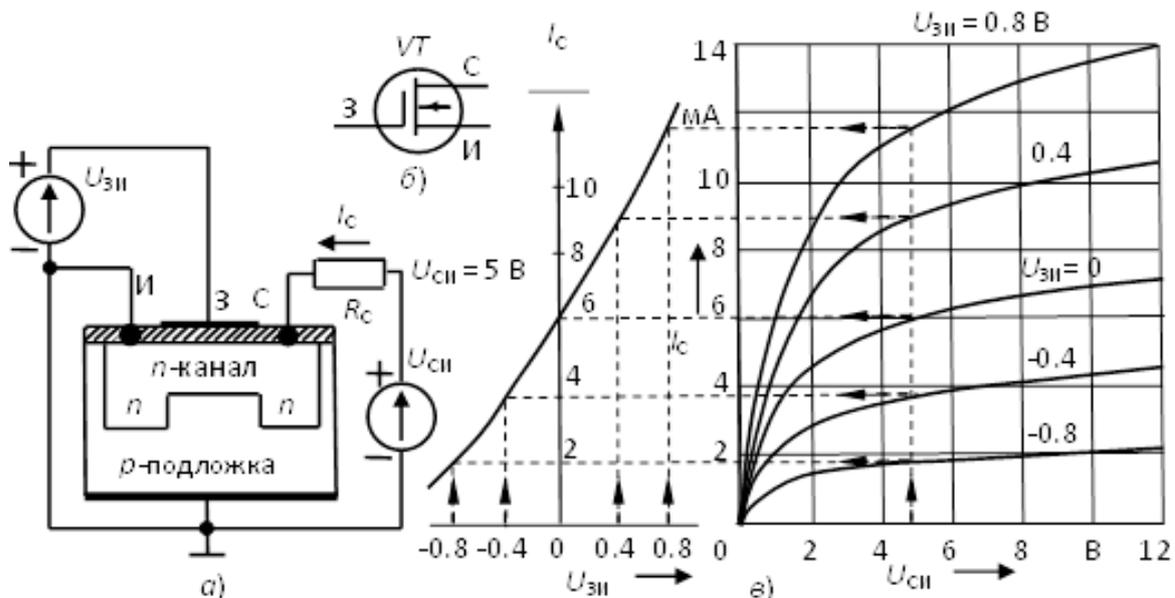


Рисунок 2.4 МДП транзистор со встроенным каналом

При отрицательном потенциале на затворе  $U_{зи} < 0$  поле затвора выталкивает электроны из канала в  $p$ -подложку, исток и сток. Канал обедняется электронами,

его сопротивление увеличивается и ток стока уменьшается. Такой режим называют режимом обеднения. Характеристики  $I_c(U_{си})$  располагаются ниже кривой при  $U_{зи} = 0$  (рис.2.4, в). Если на затвор подано  $U_{зи} > 0$ , то под действием поля затвора канал насыщается электронами из  $p$ -подложки, истока и стока - это режим обогащения.

Таким образом, МДП-транзистор со встроенным каналом может работать как в режиме обеднения, так и в режиме обогащения, что наглядно показывают его характеристики. Структура, условное графическое изображение, передаточная  $I_c(U_{зи})$  при  $U_{си} = const$  и стоковые  $I_c(U_{си})$  при  $U_{зи} = const$  характеристики ПТ со встроенным каналом даны на рис.2.4, а, б, в.

МДП-транзисторы с индуцированным каналом не имеют специально созданного канала между истоком и стоком, и при  $U_{зи} = 0$  выходной ток  $I_c = 0$ . Канал индуцируется при положительном потенциале на затворе  $U_{зи} > 0$  благодаря притоку электронов из  $p$ -подложки, истока и стока. Этот прибор работает только в режиме обогащения.

Основными параметрами полевых транзисторов являются крутизна  $S = \Delta I_c / \Delta U_{зи}$  при  $U_{си} = const$  и внутреннее (выходное) сопротивление  $R_i = \Delta U_{си} / \Delta I_c$  при  $U_{зи} = const$ . Иногда пользуются третьим параметром - коэффициентом усиления  $\mu = \Delta U_{си} / \Delta U_{зи}$  при  $I_c = const$ ;  $\mu = SR_i$ .

### Предварительное задание к эксперименту

1. По характеристикам биполярного транзистора ОЭ (рис.2.2, б, в) определить заданный вариантом табл.2.1 параметр транзистора, указать размерность, пояснить физический смысл.

ТАБЛИЦА 2.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
Параметр	$h_{11}$	$h_{12}$	$h_{21}$	$h_{22}$	$R_{вх}$	$\beta = \Delta I_K / \Delta I_B$	$R_{ввых}$	$k_U = \Delta U_{кэ} / \Delta U_{бэ}$
$U_{си}, В$	5	3	10	4	6	4,5	7	5,5

2. По стоковой характеристике полевого транзистора (рис.2.4, в) построить передаточную характеристику  $I_c(U_{зи})$  при заданном в табл.2.1 напряжении  $U_{си}$ . Определить крутизну  $S$ , внутреннее сопротивление  $R_i$  при  $U_{зи} = 0$  и коэффициент усиления  $\mu$ .

3. Сравнить свойства биполярного и полевого транзисторов.

### Порядок выполнения эксперимента

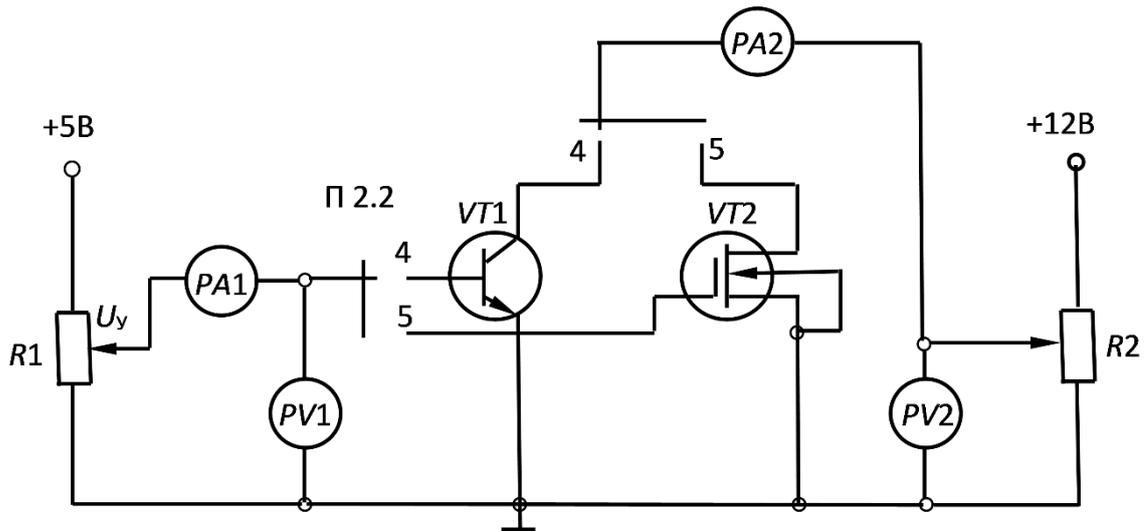


Рисунок 2.5 Схема экспериментальной установки

1. Подготовить схему рис.2.5 для исследования биполярного транзистора  $VT1$ : регуляторы  $R1$  и  $R2$  установить в крайние левые положения, переключатель  $\Pi 2.2$  установить в положение 4. После проверки преподавателем включить схему к источнику напряжения.

2. Снять семейство выходных (коллекторных) характеристик транзистора  $I_k(U_{кэ})$  при  $I_b = const$ . Для этого тумблер управляющего напряжения включить в положение «+», регулятором  $R1$  установить значение  $I_b$  согласно табл. 2.2 и, изменяя регулятором  $R2$  напряжение  $U_{кэ}$  от 0 до 8...10 В, записать значения тока коллектора  $I_k$  в табл.2.2.

Проверить работу транзистора при  $I_b = 0$ .

ТАБЛИЦА 2.2

$U_{кэ}, В$		0	0,2	0,5	1,0	2,0	5,0	8...10
$I_k, mA$ при	$I_b=0,1mA$							
	$I_b=0,2mA$							
	$I_b=0,3mA$							
	$I_b=0,4mA$							

3. Снять семейство входных характеристик  $I_b(U_{бэ})$  при  $U_{кэ} = 0$  и при  $U_{кэ}=8...10$  В. Для этого регулятором  $R2$  установить напряжение  $U_{кэ}$  и, поддерживая его неизменным, изменять регулятором  $R1$  ток базы согласно табл.2.3. Значения напряжения  $U_{бэ}$  записать в табл.2.3.

ТАБЛИЦА 2.3

$I_b, mA$		0	0,1	0,2	0,4	0,6
$U_{бэ}, мВ$ при	$U_{кэ} = 0$					
	$U_{кэ} = 8...10$					

4. Регуляторы  $R1$  и  $R2$  установить в крайние левые положения. Переключатель П2.1 установить в положение 5 для исследования полевого транзистора  $VT2$ .

5. Снять семейство выходных (стоковых) характеристик МДП-транзистора  $I_c(U_{си})$  при  $U_{зи} = const$ . С этой целью регулятором  $R1$  поочередно установить заданные табл.2.4 значения напряжения  $U_{зи}$  и, поддерживая  $U_{зи} = const$ , изменять регулятором  $R2$  напряжение  $U_{си}$  от 0 до 8...10В. Значения тока стока записать в табл.2.4 (во избежание повреждения транзистора ток стока не должен превышать 13 мА).

ТАБЛИЦА 2.4

$U_{си}, В$		0	0,2	0,5	1,0	2	3	4	6	8...10
$I_c, мА$ при	$U_{зи} = 0,8 В$									
	$U_{зи} = 0,4 В$									
	$U_{зи} = 0$									
	$U_{зи} = -0,4 В$									
	$U_{зи} = -0,8$									

6. Снять передаточные характеристики  $I_c(U_{зи})$  при  $U_{си} = const$ . Для этого регулятором  $R2$  установить заданные табл. 2.5 значения напряжения  $U_{си}$  и, изменяя  $U_{зи}$  согласно табл.2.5, записать значения тока стока.

ТАБЛИЦА 2.5

$U_{зи}, В$		0,8	0,4	0	-0,4	-0,8
$I_c, мА$ При	$U_{си} = 5 В$					
	$U_{си} = 8...10 В$					

7. По результатам п.п.2, 3 и 5, 6 построить характеристики. По характеристикам п.п.2,3 определить параметр биполярного транзистора, заданный вариантом предварительного задания. По характеристикам п.п.5,6 определить крутизну  $S$ , внутреннее сопротивление  $R_i$  и коэффициент усиления  $\mu$  полевого транзистора. Сравнить эти значения с полученными в предварительном задании.

### Содержание отчета

Цель работы; расчет предварительного задания к эксперименту с вычерченными на миллиметровой бумаге графиками характеристик биполярного и полевого транзисторов (рис.2.2, б, в; 2.4, в); сравнительный анализ биполярного и полевого транзисторов; схема экспериментальной установки (рис.2.5); таблицы измерений; на графиках рис.2.2, б, в и 2.4, в нанести экспериментальные точки; зависимость  $\beta(I_k)$  при  $U_{кэ} = 10 В$ ; расчет максимального значения крутизны передаточной характеристики полевого транзистора при  $U_{си}=10 В$ .

**Контрольные вопросы**

1. Как образуется *n-p*-переход и каковы его свойства? 2. Каково устройство биполярного транзистора и принцип его работы в схеме с общей базой и с общим эмиттером? 3. Как изображают на схемах транзисторы *n-p-n* и *p-n-p*-типов? 4. Какова полярность напряжений между электродами транзисторов *n-p-n* и *p-n-p* типов? 5. Какие функции выполняет эмиттер и коллектор? 6. Объясните характер входных и выходных характеристик биполярного транзистора. 7. Почему запрещается отключать вывод базы при наличии напряжения на эмиттере и коллекторе? 8. Что представляет собой обратный ток коллекторного перехода? 9. Объясните физический смысл *h*-параметров транзисторов и как они определяются по входным и выходным характеристикам? 10. Почему коэффициент усиления по току  $\beta$  не остается постоянным при изменении тока эмиттера? 11. Каковы конструкции полевых транзисторов с *n-p*-переходом и с изолированным затвором? 12. Принцип действия полевых транзисторов, их основные характеристики и параметры. 13. Что такое напряжение отсечки полевого транзистора, как оно определяется? 14. Что такое ток насыщения транзистора и как он определяется? 15. Каковы преимущества полевых транзисторов перед биполярными?

### Лабораторная работа № 3

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ С ФИЛЬТРАМИ

**Ц е л ь р а б о т ы :** изучение устройства, принципа действия и режимов работы однофазных выпрямителей и сглаживающих фильтров.

#### Общие сведения

В ы п р я м и т е л е м называют устройство, предназначенное для преобразования электрической энергии источника переменного тока в электрическую энергию, потребляемую приемником постоянного тока. Такое преобразование необходимо в том случае, когда первичным источником электроэнергии является однофазная (трехфазная) сеть или автономный генератор переменного тока, а потребитель электроэнергии работает на постоянном токе.

Для потребителей постоянного тока мощностью до нескольких сотен ватт используют о д н о ф а з н ы е в ы п р я м и т е л и , подключаемые к однофазной сети переменного тока. Однофазные выпрямители, как правило, входят в состав источников в т о р и ч н о г о э л е к т р о п и т а н и я (ИВЭ) радио- и телевизионных, измерительных, вычислительных электронных устройств, применяют для питания электродвигателей постоянного тока, зарядки аккумуляторных батарей и др.

Для потребителей постоянного тока мощностью более 1 кВт используют т р е х ф а з н ы е в ы п р я м и т е л и , подключаемые к промышленной трехфазной сети.

Структурная схема традиционного однофазного источника питания постоянного тока представлена на рис.3.1.

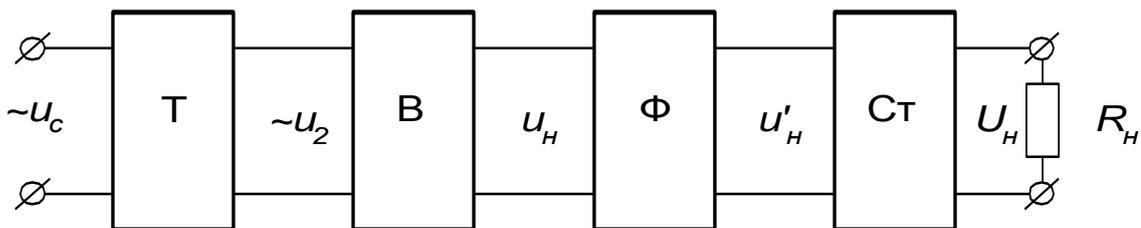


Рисунок 3.1 Структурная схема выпрямителя

Основным и обязательным элементом схемы является выпрямитель (В) на полупроводниковых вентилях. Принцип действия любого выпрямителя основан на односторонней проводимости вентилях, преобразующих переменный ток в пульсирующий ток постоянного направления. Для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения после выпрямителя может быть включен сглаживающий фильтр (Ф), а при необходимости постоянства величины напряжения  $U_n$  на нагрузке - стабилизатор напряжения (Ст). Выпрямитель подключается к питающей сети переменного тока через трансформатор (Т) в

случае, если требуется преобразование уровня напряжения питающей сети  $U_c$  к необходимому уровню напряжения нагрузки  $U_n$ , а также для электрического разделения цепей.

Основными недостатками выпрямителей с трансформаторным входом являются большие габариты, масса трансформатора и сглаживающего фильтра. В малогабаритных ИВЭ электронной аппаратуры применяют схемы с бестрансформаторным входом, работа которых основана на многократном преобразовании электрической энергии. В таких схемах выпрямитель подключен непосредственно к питающей сети, а согласование уровней напряжений сети и нагрузки производится трансформатором на повышенной промежуточной частоте переменного тока, что позволяет значительно уменьшить габариты и массу трансформатора и фильтра.

В данной работе рассматриваются два вида неуправляемых однофазных выпрямителей: **о д н о п о л у п е р и о д н ы й** и **д в у х п о л у п е р и о д н ы й м о с т о в о й**. В неуправляемых выпрямителях нет возможности регулировать величину выпрямленного напряжения, потому что они выполняются на неуправляемых вентилях - **п о л у п р о в о д н и к о в ы х д и о д а х**. При анализе работы выпрямителей будем считать вентили и трансформатор идеальными, т.е. сопротивление диодов при прямом включении равно нулю, при обратном включении - бесконечности; для трансформатора пренебрегаем сопротивлением рассеяния и активным сопротивлением обмоток.

**О д н о ф а з н ы й о д н о п о л у п е р и о д н ы й** выпрямитель содержит один вентиль  $VD$ , включенный в цепь вторичной обмотки трансформатора  $T$  последовательно с нагрузкой  $R_n$  (рис.3.2,а). Временные диаграммы напряжений и токов, поясняющие работу выпрямителя на активную нагрузку без фильтра, представлены на рис.3.2,б. В первый полупериод напряжения вторичной обмотки трансформатора  $u_2 = U_{2m} \sin(\omega t)$ , когда оно положительно, диод  $VD$  открыт, т.к. на его аноде действует положительный потенциал. На этом интервале времени ( $0 - T/2$ ) через нагрузку будет протекать ток  $i_i = \frac{U_{2m}}{R_i} \sin(\omega t)$ , являющийся для диода прямым током. При этом  $u_b = 0$ ,  $u_n = u_2 = U_{2m} \sin(\omega t)$ . На втором полупериоде напряжение  $u_2$  становится отрицательным, и диод закрывается под действием отрицательного потенциала на аноде диода. На этом интервале времени ( $T/2 - T$ )  $i_n = 0$ ,  $u_n = 0$ , напряжение на вентиле  $u_b = u_2 = U_{2m} \sin(\omega t)$  будет являться обратным напряжением диода.

В результате такой работы вентиля ток через нагрузку будет протекать в течение только одного полупериода переменного напряжения  $u_2$  и вызывать на нагрузке периодическое несинусоидальное напряжение  $u_n$ , среднее значение которого может быть определено

$$U_i = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} U_{2m} \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{U_{2m}}{\pi} = \frac{\sqrt{2}U_2}{\pi} = 0,45U_2.$$

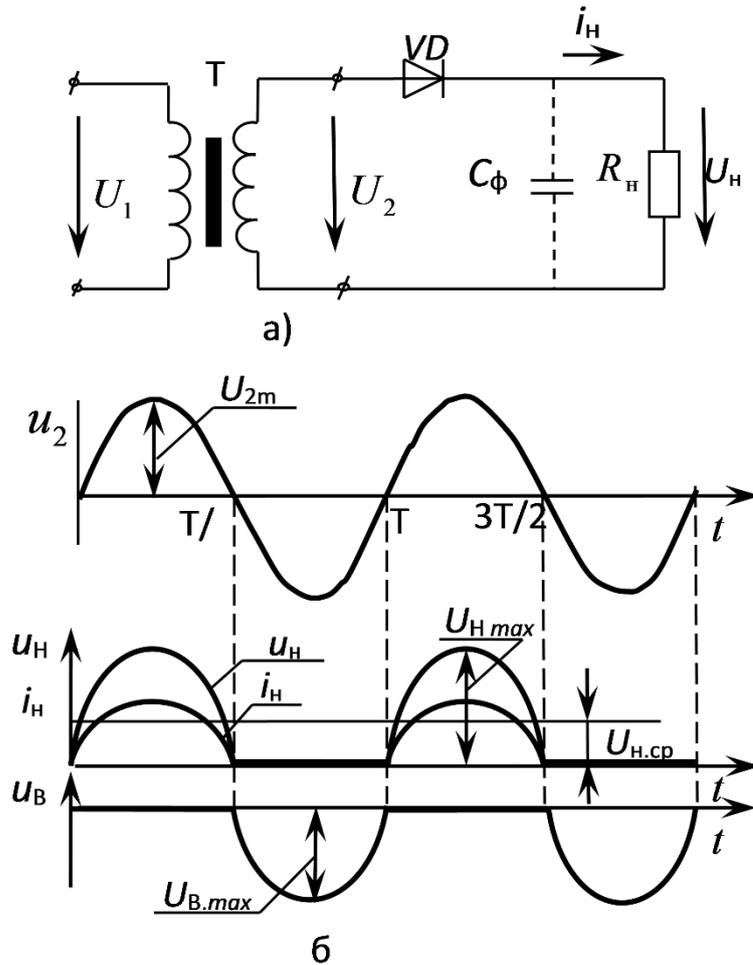


Рисунок 3.2 Однофазный однополупериодный выпрямитель

Средний ток через вентиль  $I_{пр}$  равен среднему току нагрузки  $I_{пр}=I_n$ .

Максимальное напряжение на закрытом вентиле

$$U_{â\max} = U_{2m} = \sqrt{2}U_2 = \pi \cdot U_i = 3,14U_i.$$

Действующее значение напряжения вторичной обмотки трансформатора

$$U_2 = \frac{\pi}{\sqrt{2}}U_i = 2,22U_i.$$

Действующее значение тока вторичной обмотки трансформатора

$$I_2 = \frac{\pi U_i}{2R_i} \approx 1,57I_i.$$

Расчетная мощность трансформатора

$$S_0 = (S_1 + S_2)/2 \approx S_2 = U_2 I_2 = 2,22U_i \cdot 1,57I_i \approx 3,5P_i.$$

Недостатками однополупериодного выпрямителя являются большой уровень пульсаций выпрямленного напряжения, вынужденное намагничивание сердечника трансформатора за счет постоянной составляющей тока вторичной обмотки, плохое использование трансформатора ( $S_T = 3,5P_n$ ),

низкие коэффициенты использования вентиляей ( $K_I = I_{B.max}/I_H = \pi$ ,  $K_U = U_{вmax}/U_H = \pi$ ).

Однополупериодные выпрямители применяются для питания маломощных усилителей, электронно-лучевых трубок и в высоковольтных установках для испытания изоляции.

Однофазный двухполупериодный мостовой выпрямитель состоит из четырех вентиляей, включенных по мостовой схеме (рис.3.3,а). К одной диагонали моста подано переменное напряжение  $u_2 = U_{2m} \sin(\omega t)$ , к другой - подключена нагрузка  $R_H$ . Временные диаграммы напряжений и токов представлены на рис.3.3, б. В первый полупериод напряжения  $u_2$ , когда потенциал на аноде  $VD1$  положительный, диоды  $VD1$  и  $VD3$  открыты, и ток нагрузки протекает через  $VD1$ ,  $R_H$  и  $VD3$ . В этом интервале времени  $u_H = u_2$ , диоды  $VD2$  и  $VD4$  закрыты и находятся под обратным напряжением. На втором полупериоде напряжение  $u_2$  становится отрицательным, и диоды  $VD1$  и  $VD3$  будут теперь в закрытом состоянии находиться под обратным напряжением, а диоды  $VD2$  и  $VD4$  - открыты. Ток  $i_H$  будет протекать через  $VD2$ ,  $VD4$  и через нагрузку  $R_H$  в том же направлении, что и в предыдущий полупериод.

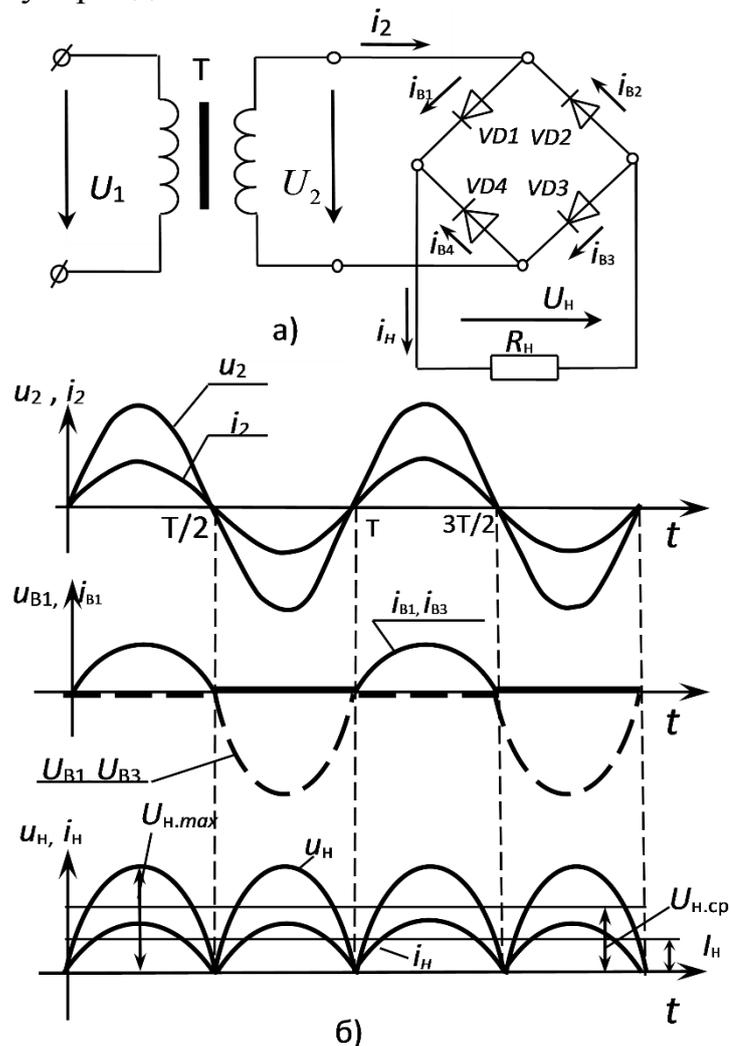


Рисунок 3.2 Однофазный мостовой выпрямитель

В результате такой попарной работы диодов ток в нагрузке будет протекать в течение двух полупериодов и вызывать напряжение  $u_n$ , среднее значение которого будет в два раза больше, чем при однополупериодном выпрямлении

$$U_1 = 2 \cdot U_m / \pi = 0,9U_2; U_2 = 1,1U_1; I_2 = 1,1I_1.$$

Так как пары диодов проводят ток нагрузки поочередно по полпериода, то прямой ток вентиля будет равен  $I_{пр} = 0,5I_n$ .

$$\text{Максимальное напряжение на закрытых вентилях } U_{\hat{a}\max} = U_{2m} = 1,57U_1.$$

$$\text{Расчетная мощность трансформатора } S_0 = S_1 = S_2 = U_2 I_2 = 1,23P_1.$$

Д в у х п о л у п е р и о д н ы й выпрямитель в сравнении с однополупериодным имеет следующие преимущества: выпрямленный ток и напряжение вдвое больше, значительно меньший уровень пульсаций  $u_n$ , вентили выбираются по половине тока нагрузки, хорошо используется трансформатор и отсутствует вынужденное подмагничивание его сердечника. Мостовая схема имеет преобладающее применение в выпрямителях небольшой и средней мощности.

Для оценки пульсаций выпрямленного напряжения пользуются понятием коэффициента пульсаций  $q$ , который равен отношению амплитуды первой гармоники выпрямленного напряжения к среднему значению:

$$q = U_{1\hat{a}m} / U_{i.\text{ср}}.$$

Для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения применяют с г л а ж и в а ю щ и е фильтры. Основными элементами п а с с и в н ы х фильтров являются реактивные элементы: конденсаторы и дроссели. На базе транзисторов и операционных усилителей выполняются более сложные активные фильтры. Эффективность фильтра характеризуется коэффициентом сглаживания, равным отношению коэффициентов пульсаций до и после установки фильтра

$$S = \frac{q_{\text{до}}}{q_{\text{после}}}.$$

Е м к о с т н о й фильтр состоит из конденсатора, подключаемого параллельно нагрузке, при этом напряжение  $u_n = u_C$  определяется процессами заряда и разряда конденсатора. В однополупериодном выпрямителе конденсатор  $C_\phi$  будет заряжаться через вентиль, если  $u_2 > u_C$  (интервал времени  $t_1 - t_2$  на рис. 3.4). Когда  $u_2 < u_C$  ( $t_2 - t_3$ ), вентиль закрыт, и конденсатор разряжается через сопротивление нагрузки  $R_n$  с постоянной времени  $\tau_p = C_\phi R_n$ ; при этом  $u_1 = u_C = U_{C\max} e^{-t/\tau_p}$ .

Достоинством емкостного фильтра является простота, повышенное напряжение на нагрузке и хорошее сглаживание при малых выходных токах. С увеличением тока нагрузки при уменьшении  $R_H$  уменьшается постоянная разряда конденсатора и возрастает коэффициент пульсаций на нагрузке. Емкостной фильтр целесообразно использовать при высокоомной нагрузке с малым значением выпрямленного тока.

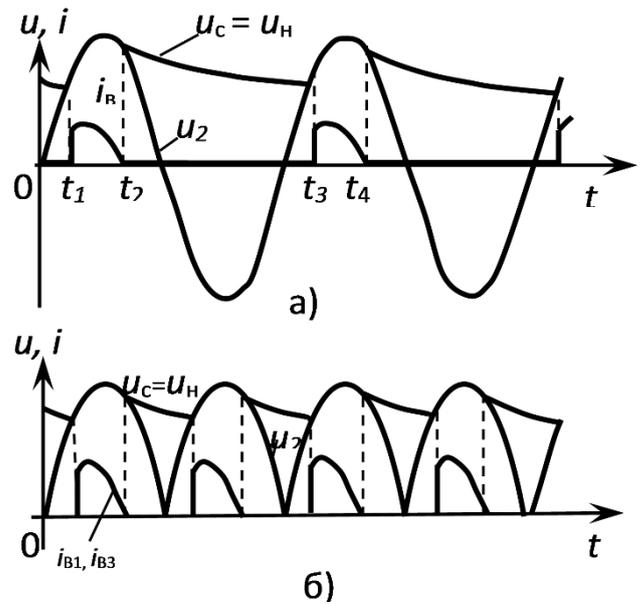


Рисунок 3.3 Принцип действия C- фильтра

И н д у к т и в н ы й фильтр состоит из индуктивной катушки (дросселя), включаемой последовательно с нагрузкой. Дроссель с индуктивностью  $L_\Phi$  не оказывает сопротивления постоянной составляющей тока нагрузки, но подавляет переменные составляющие тока, для которых реактивное сопротивление катушки возрастает с увеличением частоты высших гармоник.

Недостатками индуктивных фильтров являются большие габариты и масса дросселя, поэтому применяются такие фильтры преимущественно в трехфазных выпрямителях большой и средней мощности при низкоомной нагрузке с большими значениями токов.

Для более эффективного сглаживания применяют составные или многозвенные фильтры, коэффициент сглаживания которых равен произведению коэффициентов сглаживания отдельных звеньев  $S_0 = S_1 \cdot S_2 \cdot \dots \cdot S_n$ . К составным фильтрам можно отнести Г- и П-образные LC-фильтры (табл. 3.1).

Расчет выпрямителя сводится к выбору вентиля, определению типа и параметров фильтра и трансформатора. Исходными данными к расчету являются напряжение  $U_1 = U_c$  и частота  $f_1$  питающей сети, напряжение  $U_H$  и мощность  $P_H$  нагрузки.

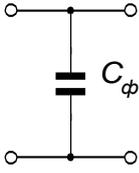
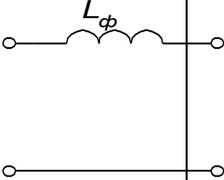
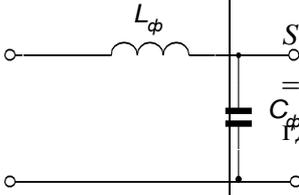
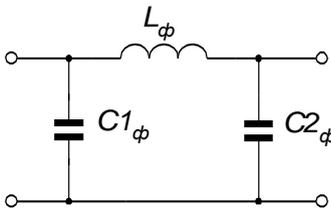
Для надежной работы вентиля их выбирают из условия, чтобы среднее значение тока через открытый вентиль  $I_{пр}$  и максимальное обратное напряжение на закрытом вентиле  $U_{вmax}$  не превышали допустимый прямой ток вентиля  $I_{пр,max}$  и обратное максимальное напряжение  $U_{обр,max}$

$$I_{пр} < I_{пр,max} \text{ и } U_{вmax} < U_{обр,max} .$$

$I_{пр}$  и  $U_{вmax}$  рассчитываются из соотношений, приведенных в табл. 3.2 для соответствующей выпрямительной схемы, а  $I_{пр,max}$  и  $U_{обр,max}$  определяются из справочника для выбираемых вентилях.

Выбор трансформатора проводится по расчетной мощности  $S_T$  и коэффициенту трансформации  $k_o = U_1/U_2$  (см. табл. 3.2).

ТАБЛИЦА 3.1

Тип фильтра	Коэффициент Сглаживания фильтра	Условия Эффективной Работы
1. Емкостной 	$S_C = 2\pi f_1 m R_i C_\phi,$ где $m$ – число пульсаций выпрямленного напряжения	$\frac{1}{\omega_{i(1)} C_\phi} \ll R_i;$ $C_\phi \gg \frac{1}{\omega_{i(1)} R_i},$ где $\omega_{i(1)}$ – частота основной гармоники пульсаций;
2. Индуктивный 	$S_L = \frac{2\pi f_1 m L_\phi}{R_i}$	$R_\delta \ll R_i$ $\omega_{i(1)} L_\phi \gg R_i$ $L_\phi \gg \frac{R_i}{\omega_{i(1)}}$
3. Г-образный 	$S_{\bar{A}} = S_L S_C =$ $= m^2 \omega^2 C_\phi L_\phi,$ где $\omega = 2\pi f_1$ ;	$\omega_{i(1)} L_\phi = (5 \div 10) R_i;$ $\frac{1}{\omega_{i(1)} C_\phi} \leq (0,1 \div 0,2) R_i;$
4. П-образный 	$S_{\bar{I}} = S_{\bar{N}1} S_{\bar{A}}$	Задавшись $C_{\phi 1} = C_{\phi 2}$ , определяют $S_{C1}, S_{\bar{A}} = \frac{S_{\bar{I}}}{S_{C1}}$

При расчете фильтра известными являются: величина допустимого коэффициента пульсаций на нагрузке  $q_n = q_{\text{вых}}$ , коэффициент пульсаций выпрямителя  $q = q_{\text{вх}}$ , и соотношения определяемых параметров фильтра с его коэффициентом сглаживания (см. табл. 3.1).

ТАБЛИЦА 3.2

Схема	$U_2/U_{\text{н.ср.}}$	$I_2/I_n$	$I_1 k_T / I_n$	$S_T / P_n$	$U_{\text{вmax}} / U_n$	$I_B / I_n$	$q$	$m$
Однополу- периодная	2.22	1.57	1.21	3.5	3.14	1	1.57	1
Мостовая	1.11	1.11	1.11	1.23	1.57	0.5	0.667	2

Основной характеристикой выпрямителя является внешняя характеристика, которая показывает зависимость выходного напряжения от тока нагрузки  $U_H=f(I_H)$ . Приблизительный расчет выходного напряжения выпрямителя с учетом внутреннего падения напряжения на вторичной обмотке трансформатора, вентилях и элементах фильтра может быть выполнен по формуле:

$$U_i = U_{i.н\ddot{o}}^{\ddot{o}\ddot{o}} - (R_{\ddot{o}} + R_{i\ddot{o}} + R_{\ddot{o}})I_i = U_{i.н\ddot{o}}^{\ddot{o}\ddot{o}} - R_{\ddot{a}\ddot{u}\ddot{o}} I_i,$$

где  $U_{i.н\ddot{o}}^{\ddot{o}\ddot{o}}$  - выходное напряжение выпрямителя в режиме холостого хода;

$R_T$  – сопротивление вторичной обмотки трансформатора;

$R_{пр}$  – суммарное сопротивление открытых вентилях;

$R_{\phi}$  – суммарное сопротивление фильтра.

### Предварительное задание к эксперименту

1. Для заданного в табл.3.3 выпрямителя и указанных там же значений напряжения  $U_H$ , мощности  $P_H$  нагрузки рассчитать прямой ток вентилях  $I_{пр}$ , обратное напряжение  $U_{в\max}$  и по справочнику выбрать диоды. Определить для трансформатора напряжение вторичной обмотки  $U_2$ , коэффициент трансформации  $k_T$ , расчетную мощность  $S_T$ , если напряжение питающей сети  $U_1=220В$ , частота  $f_1=50$  Гц. Рассчитать параметры сглаживающего фильтра для обеспечения коэффициента пульсаций напряжения нагрузки  $q_H$  согласно данным табл.3.3. Для составных фильтров принять  $C_{\phi} = 20$  мкФ. Результаты расчетов записать в табл.3.4.

2. Рассчитать и построить внешнюю характеристику для заданного в табл.3.3 выпрямителя, приняв его  $R_{в\text{ых}}=10 \dots 15$  Ом в диапазоне изменения нагрузочного тока от 0 до 500 мА.

*Примечание:* объем предварительного задания может быть уменьшен по указанию преподавателя.

ТАБЛИЦА 3.3

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
Тип выпрямителя	Рис.3.2	Рис.3.3	Рис.3.2	Рис.3.3	Рис.3.2	Рис.3.3	Рис.3.2	Рис.3.3
$U_H$ , В	7	13	8	14	8,5	15	9	16
$P_H$ , Вт	1,2	4	0,4	4	0,05	3	0,01	1,6
Тип фильтра	L	Г-обр. LC	П-обр. LC	L	C	Г-обр. LC	C	П-обр. LC
$q_H$	0,02		0,01		0,01		0,02	

ТАБЛИЦА 3.4

Параметры	$I_H$ , мА	$I_{пр}$ , мА	$U_{в\max}$ , В	$U_2$ , В	$k_T$	$S_T$ , Вт	S	$C_{\phi}$ , мкФ	$L_{\phi}$ , Гн
Вычислено									

### Порядок выполнения эксперимента

1. Ознакомиться с устройством стенда для исследования однофазных выпрямителей.

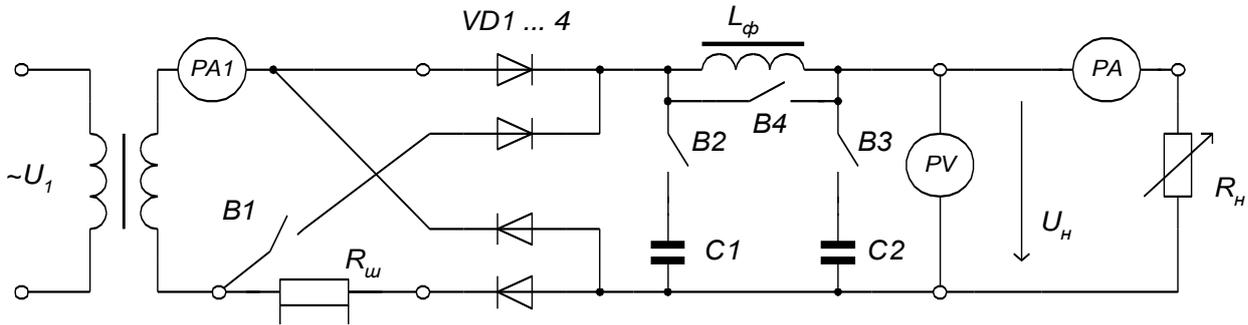


Рисунок 3.5 Схема установки

2. Подключить согласно рис.3.5 к выходным клеммам выпрямительного устройства нагрузку  $R_n$ , вольтметр  $PV$ , амперметр  $PA$  и осциллограф. Подать питание на стенд и измерительные приборы.

3. В режиме холостого хода для однополупериодного ( $B1$  отключен) и для мостового ( $B1$  включен) выпрямителей установить регулятором напряжения  $U1$  максимальное выходное напряжение, измерить его значения и определить кратность напряжений  $U_2 / U_{i.н\delta}$  в режиме работы без фильтра ( $B2$  и  $B3$  отключены,  $B4$  включен).

4. Изменяя сопротивлением  $R_n$  ток нагрузки выпрямителя  $I_n$  от 0 до максимального значения, снять внешние характеристики однопериодного и мостового выпрямителей при работе без фильтра; с емкостным; индуктивным; Г-образным; П-образным фильтрами. Результаты измерений записать в табл.3.5. Обратит внимание на изменение напряжения на нагрузке и увеличение потребления переменного тока при включении конденсаторов фильтра.

ТАБЛИЦА 3.5

Тип выпрямителя									
без фильтра		с С-фильтром		с L-фильтром		с Г-обр. LC		с П-обр. CLC	
$I_n$	$U_n$	$I_n$	$U_n$	$I_n$	$U_n$	$I_n$	$U_n$	$I_n$	$U_n$
0		0		0		0		0	

5. Зарисовать с экрана осциллографа кривые выпрямленного напряжения на нагрузке для всех режимов работы выпрямителей согласно п.4. Для режимов работы с фильтром график напряжения зарисовать для режима холостого хода и максимальной нагрузки. На рисунках показать масштабную сетку, ось времени и значения масштабов по напряжению и времени.

6. Подключить осциллограф на шунт  $R_{ш}$ , получить на экране осциллографа и зарисовать временную диаграмму тока вентиля  $i_B(t)$  при максимальном токе нагрузки и отключенном фильтре.

7. По результатам измерений (табл.3.5) построить в единой системе координат внешние характеристики выпрямителей при работе с разными типами фильтров. Сопоставить внешнюю характеристику, рассчитанную в предварительном задании с экспериментальными. Рассчитать по экспериментальным характеристикам  $R_{вых}$  выпрямителей при работе без фильтра, сравнить расчетные значения с диапазоном значений в предварительном задании.

### Содержание отчета

Цель работы; схема лабораторной установки (рис.3.5), расчет предварительного задания, внешние характеристики выпрямителей без фильтра и с фильтрами в общей системе координат, осциллограммы временных диаграмм напряжений и токов.

### Контрольные вопросы

1. Объясните принцип действие выпрямителей. 2. Как влияет емкостный фильтр на величину обратного напряжения на вентиле? 3. Почему уменьшаются пульсации выпрямленного напряжения при включении емкостного или индуктивного фильтра? 4. Достоинства и недостатки разных типов фильтров. 5. Что такое коэффициент пульсаций и коэффициент сглаживания? 6. По каким критериям осуществляется выбор вентиля? 7. Как определяется мощность трансформатора в выпрямителях? 8. Как изменится форма напряжения на нагрузке при пробое одного вентиля в исследуемых выпрямителях?

### Лабораторная работа № 4

#### ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛИЗАТОРОВ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА

Цель работы: изучение устройства, принципа действия и исследование характеристик компенсационного стабилизатора напряжения и стабилизатора тока.

#### Общие сведения

Стабилизатором называют устройство, автоматически поддерживающее с заданной точностью напряжение или ток в нагрузке при изменении питающего напряжения или сопротивления нагрузки в заданных пределах.

Основным параметром стабилизатора напряжения является коэффициент стабилизации напряжения, а стабилизатора тока - коэффициент стабилизации тока

$$K_{\text{ст } U} = \frac{\Delta U_{\text{вх}}}{U_{\text{вх}}} / \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{U_{\text{вых}}}; \quad K_{\text{ст } I} = \frac{\Delta U_{\text{ао}}}{U_{\text{ао}}} / \frac{\Delta I_{\text{ао}}}{I_{\text{ао}}}$$

при  $R_{\text{н}} = \text{const}$ ,

где  $U_{\text{вх}}$ ,  $U_{\text{вых}}$ ,  $I_{\text{вых}}$  - номинальные напряжения на входе и выходе стабилизатора и номинальный ток нагрузки;

$\Delta U_{\text{вх}}$ ,  $\Delta U_{\text{вых}}$ ,  $\Delta I_{\text{вых}}$  - изменения напряжений на входе и выходе стабилизатора и изменение тока нагрузки.

Влияние нагрузки  $R_{\text{н}}$  оценивается по внешним характеристикам  $U_{\text{вых}}(I_{\text{вых}})$  и  $I_{\text{вых}}(R_{\text{н}})$  или выходным (внутренним) сопротивлением стабилизатора

$$R_{\text{вых}} = \frac{\Delta U_{\text{ао}}}{\Delta I_{\text{ао}}} \text{ при } U_{\text{вх}} = \text{const}.$$

Для стабилизатора напряжения  $R_{\text{вых}} \ll R_{\text{н}}$ , а для стабилизатора тока -  $R_{\text{вых}} \gg R_{\text{н}}$ .

Применяют два типа стабилизаторов: параметрические и компенсационные.

В параметрических стабилизаторах используются элементы с нелинейной вольтамперной характеристикой (ВАХ), обеспечивающие постоянство напряжения при значительных изменениях тока для стабилизаторов напряжения и постоянство тока при изменении напряжения в стабилизаторах тока. Такими элементами могут быть стабилитроны или транзисторы.

Компенсационные стабилизаторы напряжения имеют большие коэффициенты стабилизации и меньшее  $R_{\text{вых}}$  при более высоком КПД. Структурная схема такого стабилизатора приведена на рис. 4.1. Стабилизатор состоит из источника эталонного напряжения 1, измерительного элемента 2 и регулирующего элемента 3.

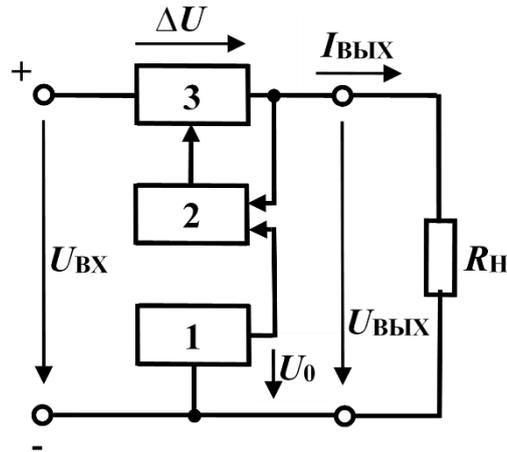


Рисунок 4.1 Структурная схема стабилизатора

На входы измерительного элемента подаются эталонное напряжение  $U_0$  и  $U_{\text{ВЫХ}}$ . Если  $U_{\text{ВЫХ}}$  не равно  $U_0$  появляется сигнал рассогласования, который поступает на вход регулирующего элемента. Под действием этого сигнала падение напряжения на регулирующем элементе меняется таким образом, чтобы  $U_{\text{ВЫХ}}$  оставалось постоянным

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} - \Delta U = \text{const.}$$

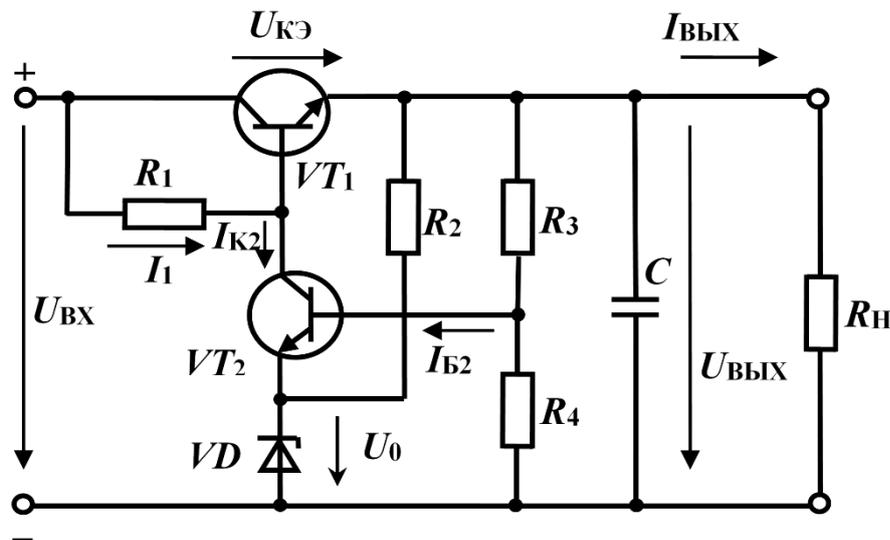


Рисунок 4.2 Компенсационный стабилизатор напряжения

В качестве источника эталонного напряжения чаще всего используется стабилитрон, а роль регулирующего элемента выполняет транзистор или составной транзистор. В большинстве современных стабилизаторов измерительный элемент выполняется на операционном усилителе

В работе предлагается исследовать компенсационный стабилизатор на транзисторе, схема которого показана на рис. 4.2. В этой схеме в качестве регулирующего элемента использован транзистор  $VT_1$ , измерительный элемент реализован на транзисторе  $VT_2$ . Ток этого транзистора зависит от разности

напряжений между базой и эмиттером. В качестве эталонного источника напряжения применен параметрический стабилизатор на резисторе  $R_2$  и стабилитроне  $VD$ . Выходное напряжение поступает на базу транзистора  $VT_2$  через делитель напряжения  $R_3, R_4$ .

Если напряжение на выходе стабилизатора по каким-либо причинам возросло, то возрастает напряжение  $U_{БЭ}$  транзистора  $VT_2$ , что приводит к росту токов  $I_{Б2}, I_{К2}$ . К коллектору  $VT_2$  подключена база транзистора  $VT_1$ , следовательно, изменение  $I_{К2}$  вызывает противоположное изменение  $I_{Б1}$ , т.к.  $I_1 = const$ . Снижение тока  $I_{Б1}$  приведет к увеличению выходного сопротивления транзистора  $VT_2$ , падение напряжение на транзисторе  $U_{КЭ1}$  возрастет, таким образом  $U_{ВЫХ} = U_{ВХ} - U_{КЭ1}$  остается практически неизменным. Основные параметры стабилизатора определяют:

$$K_{cm U} = \frac{U_{\text{а\ddot{u}0}} \cdot R_1 \cdot R_4}{U_{\text{а\ddot{o}}} \cdot (R_3 + R_4)} h_{21} / (h_{11} + R_1);$$

$$R_{\text{ВЫХ}} = \frac{h_{11} \cdot R_4}{h_{21} \cdot (R_3 + R_4)}.$$

Схема исследуемого стабилизатора тока показана на рис. 4.3. На базе транзистора  $VT$  поддерживается постоянный потенциал, задаваемый параметрическим стабилизатором на стабилитроне  $VD$ . Нагрузка  $R_H$  включена в коллекторную цепь транзистора  $VT$ , который включен по схеме с общей базой, где  $I_K = \alpha I_Э$ .

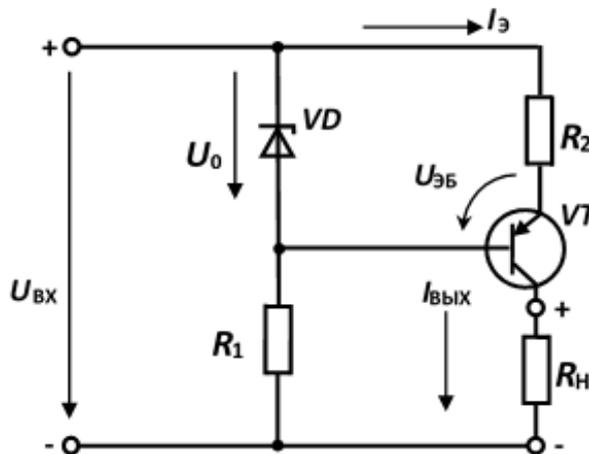


Рисунок 4.3 Компенсационный стабилизатор тока

Ток эмиттера  $I_Э$  определяется напряжением  $U_{ЭБ} = U_0 - R_2 I_Э$ .

Благодаря этому устанавливается режим работы

$$I_Э = (U_0 - U_{ЭБ}) / R_2 = const.$$

У современных транзисторов  $\alpha \rightarrow 1$ , таким образом, получается устройство, выходной ток которого  $I_{\text{ВЫХ}} = I_K \approx I_Э$ , не зависит от  $R_H$ , а определяется

только  $U_0$  и  $R_2$ . Режим стабилизации поддерживается до тех пор, пока транзистор  $VT$  работает в активном режиме, т.е.

$$U_{\text{ВХ}} > \Delta U + I_{\text{ВЫХ}} R_{\text{Н}},$$

где  $\Delta U$  - напряжение насыщения транзистора.

Отсюда максимальное значение сопротивления нагрузки, при котором сохраняется рабочий режим стабилизатора

$$R_{\text{Н max}} = \frac{U_{\text{ВХ}} - \Delta U}{I_{\text{ВЫХ}}}.$$

Коэффициент стабилизации тока

$$K_{\text{ст}} = I_{\text{ВЫХ}} / (U_{\text{ВХ}} h_{22}).$$

Выходное сопротивление стабилизатора

$$R_{\text{ВЫХ}} = \frac{h_{21} \cdot R_2}{h_{22}(r_{\text{д}} + h_{11})}.$$

### Предварительное задание к эксперименту

1. Для компенсационного стабилизатора напряжения (рис. 4.2) рассчитать  $K_{\text{ст}}$  и  $R_{\text{ВЫХ}}$ , если  $R_1 = 6,8$  кОм;  $R_3 = 1,2$  кОм;  $R_4 = 6,8$  кОм; для транзистора  $VT_2$ :  $h_{11} = 1,2$  кОм;  $h_{21} = 180$ . Входное и выходное напряжения принять  $U_{\text{ВХ}} = 22$  В;  $U_{\text{ВЫХ}} = 12$  В.

2. Используя метод эквивалентного генератора при  $U_{\text{âô}}^{\text{ôô}} = 12 \text{ \AA}$  и рассчитанном в п.1 значении  $R_{\text{ВЫХ}}$ , определить изменение выходного напряжения  $\Delta U = I_{\text{Н}} R_{\text{ВЫХ}}$  и выходное напряжение стабилизатора  $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{âô}}^{\text{ôô}} - \Delta U$  при заданном в табл.4.1 токе нагрузки  $I_{\text{Н}}$ .

3. Рассчитать  $R_{\text{ВЫХ}}$  стабилизатора тока (рис. 4.3), если  $R_2 = 180$  Ом, дифференциальное сопротивление стабилитрона  $r_{\text{д}} = 35$  Ом. Транзистор  $VT$  имеет следующие параметры:  $h_{11} = 50$  Ом;  $h_{22} = 1$  мСм;  $h_{21} = 30$ .

4. Определить для стабилизатора тока максимально допустимое сопротивление нагрузки  $R_{\text{Н max}}$  при  $U_{\text{ВХ}}$  и  $I_{\text{ВЫХ}}$ , заданных в табл. 4.1. Принять  $\Delta U = 1$  В.

ТАБЛИЦА 4.1

Варианты	1	2	3	4	5	6	7	8
$I_{\text{Н}}, \text{ мА}$	30	40	50	60	70	80	90	100
$U_{\text{ВХ}}, \text{ В}$	23		24		25		26	
$I_{\text{ВЫХ}}, \text{ мА}$	20				40			

### Порядок выполнения эксперимента

1. Входное напряжение  $U_{\text{вх}}$  на стабилизаторы подается от выпрямителя, который исследовался в лабораторной работе 3.  $U_{\text{вх}}$  измеряется вольтметром  $V_1$ .
2. Подготовить схему однофазного мостового выпрямителя с П-образным фильтром, поставив в нужное положение выключатели В1-В4.
3. Подключить нагрузку  $R_{\text{н}}$  к выходным клеммам стабилизатора напряжения и цифровые приборы для измерения тока нагрузки  $I_{\text{н}}$  и выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$ .
4. Включить выключатель стабилизатора напряжения и выключатель выпрямителя (выключатель стабилизатора тока должен быть выключен). При минимальном токе нагрузки снять зависимость  $U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})$ , изменяя  $U_{\text{вх}}$  от 0 до максимального значения с помощью регулятора напряжения  $U_1$ . Построить график зависимости и определить по ней  $K_{\text{ст}}$ . Сравнить с расчетным по п.1 предварительного задания  $K_{\text{ст}}$ .

ТАБЛИЦА 4.2

$U_{\text{вх}}$ В	0					
$U_{\text{вых}}$ В						

5. Установить максимальное входное напряжение  $U_{\text{вх}}$ . Изменяя сопротивление нагрузки во всем диапазоне, снять зависимость  $U_{\text{вых}}(I_{\text{н}})$ . Построить выходную характеристику стабилизатора и определить по ней  $R_{\text{вых}}$ . Сравнить с результатами расчетов по п.2 предварительного задания.

ТАБЛИЦА 4.3

$I_{\text{н}}$ мА						
$U_{\text{вых}}$ В						

6. Отключить выключатели выпрямителя и стабилизатора напряжения. Подключить нагрузку к выходу стабилизатора тока.
7. Включить выключатель стабилизатора тока и выключатель выпрямителя. Установить с помощью регулятора  $U_1$  максимальное входное напряжение. Изменяя  $R_{\text{н}}$  во всем диапазоне, снять зависимость  $I_{\text{вых}}(U_{\text{вых}})$ . По полученным результатам рассчитать для каждого измерения  $R_{\text{н}}$  и построить  $I_{\text{вых}}(R_{\text{н}})$ . Определить  $R_{\text{н max}}$  и  $R_{\text{вых}}$  стабилизатора. Сравнить с результатами расчетов предварительного задания.

ТАБЛИЦА 4.2

$I_{\text{вых}}$ мА						
$U_{\text{вых}}$ В						
$R_{\text{вых}}$ Ом						

8. Установить минимальное сопротивление нагрузки  $R_{\text{н}}$  (минимальное  $U_{\text{вых}}$ ). Изменяя  $U_{\text{вх}}$  от 0 до максимального значения, снять зависимость  $I_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})$ . Построить график  $I_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})$  и определить  $K_{\text{ст}}$ . Сравнить с результатами расчетов предварительного задания.

$U_{\text{вх}}$ В						
$I_{\text{вых}}$ мА						

### С о д е р ж а н и е о т ч е т а

Цель работы; полные схемы компенсационного стабилизатора напряжения и стабилизатора тока с обозначением всех элементов, указанием токов, напряжений; результаты расчета предварительного задания; результаты эксперимента в виде таблиц и графиков; результаты расчетов  $K_{\text{ст}}$ ,  $R_{\text{вых}}$  по графикам; сравнительный анализ результатов.

### К о н т р о л ь н ы е в о п р о с ы

1. Каково назначение электронных стабилизаторов? 2. Как устроен и как работает параметрический стабилизатор напряжения и тока? 3. Поясните назначение элементов схемы компенсационного стабилизатора напряжения? 4. От каких элементов зависит коэффициент стабилизации? 5. Как можно осуществить регулирование  $U_{\text{вых}}$  стабилизатора напряжения? 6. Поясните принцип действия стабилизатора тока. 7. Как можно изменить выходной ток стабилизатора? 8. Почему стабилизатор тока может работать только на нагрузку с  $R$  меньше  $R_{\text{нmax}}$ ? 9. Почему стабилизатор тока и стабилизатор напряжения имеют разные выходные сопротивления?

## Лабораторная работа №5 ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ

**Ц е л ь р а б о т ы :** изучение основных характеристик операционного усилителя (ОУ); исследование типовых аналоговых и импульсных устройств на базе ОУ.

### Общие сведения

Операционные усилители (ОУ) являются разновидностью усилителей постоянного тока, имеют большой коэффициент усиления по напряжению  $k_u = \frac{U_{\text{а\ddot{u}o}}}{U_{\text{а\ddot{o}}}} = 5 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^6$  и высокое входное сопротивление  $R_{\text{вх}} = 20 \text{ кОм} - 10 \text{ МОм}$ .

Современные ОУ выполняются многокаскадными и включают в себя ряд дополнительных устройств (защиту, термокомпенсацию и др.) Массовое применение ОУ обусловлено их универсальностью: устройства на их базе могут осуществлять усиление, выполнять математические операции, сравнивать электрические величины, генерировать сигналы различной формы.

В данной работе использована микросхема К544УД1А, которая представляет собой операционный усилитель общего назначения с высоким входным сопротивлением. На рис.5.1 приведены условные обозначения и типовая схема включения ОУ. Он имеет два входа и один выход. При подаче сигнала на инвертирующий вход  $U_{\text{вх.и}}$  приращение выходного сигнала  $U_{\text{вых}}$  находится в противофазе (противоположное по знаку) с приращением  $U_{\text{вх}}$ , а при подаче на неинвертирующий вход - совпадают по фазе (одинаковы по знаку). В зависимости от конкретного устройства на базе ОУ используют как инвертирующий, так и неинвертирующий входы.

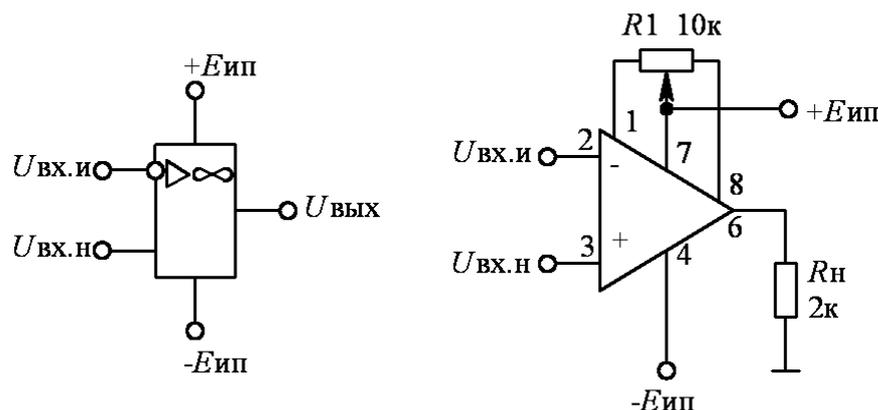


Рисунок 5.1 Обозначение операционного усилителя

На рис.5.2 приведена принципиальная схема ОУ К544УД1А. Высокое входное сопротивление ОУ обеспечивается согласованной парой полевых транзисторов  $VT1, VT5$  входного дифференциального каскада, включающего

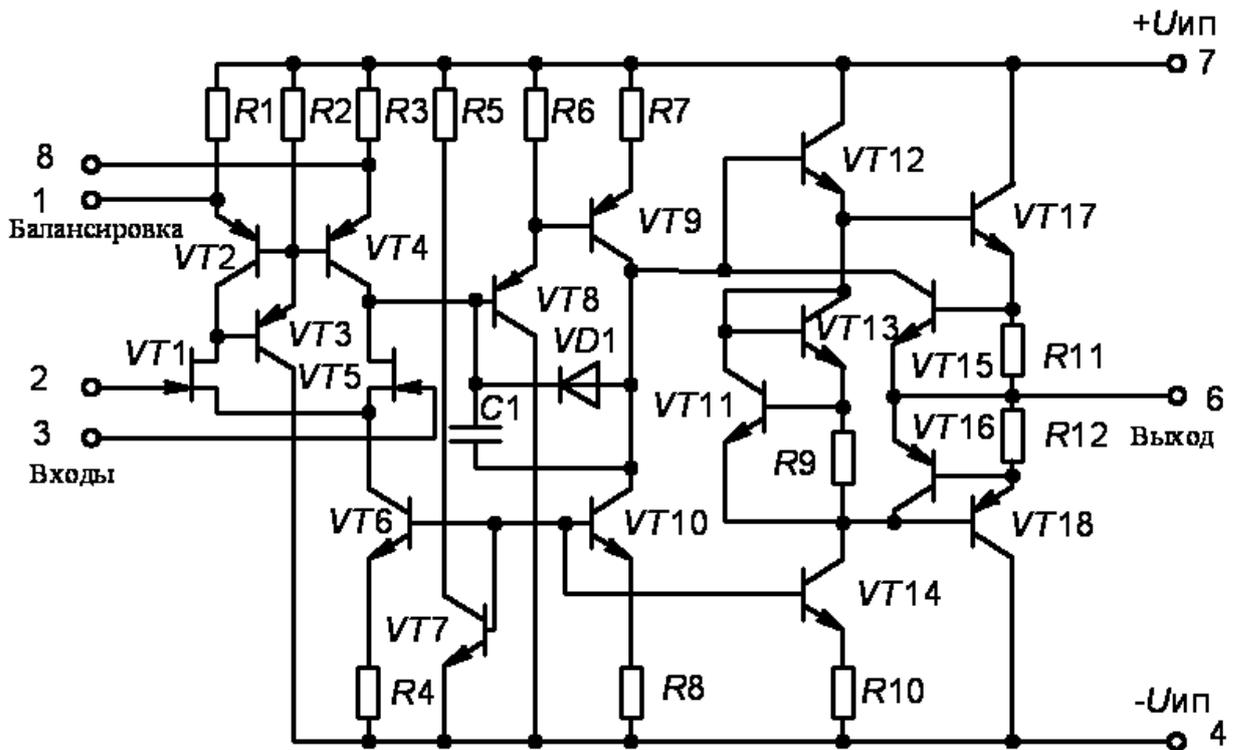


Рисунок 5.2 Принципиальная схема ОУ

в себя кроме названных транзисторы  $VT2$ ,  $VT4$  и резисторы  $R1$ ,  $R3$ . Работа этого каскада обеспечивается стабилизатором тока, включающим транзисторы  $VT6$ ,  $VT7$  и резисторы  $R4$ ,  $R5$ . Температурная компенсация осуществляется звеном, выполненным на транзисторах  $VT10$ ,  $VT14$  и резисторах  $R8$ ,  $R10$ . ОУ имеет защиту от коротких замыканий по выходу ( $VT16$ ,  $VT18$ ,  $R12$ ). Выходным каскадом является составной эмиттерный повторитель ( $VT12$ ,  $VT17$ ,  $VT15$ ,  $R11$ ), имеющий низкое выходное сопротивление и обеспечивающий нагрузочную способность. Выходной каскад имеет свой стабилизатор тока ( $VT11$ ,  $VT13$ ,  $R9$ ). В согласующее звено между входными и выходными цепями входят элементы:  $R6$ ,  $R7$ ,  $VT8$ ,  $VT9$ ,  $VD1$ ,  $C1$ .

Важнейшими характеристиками

ОУ являются амплитудные

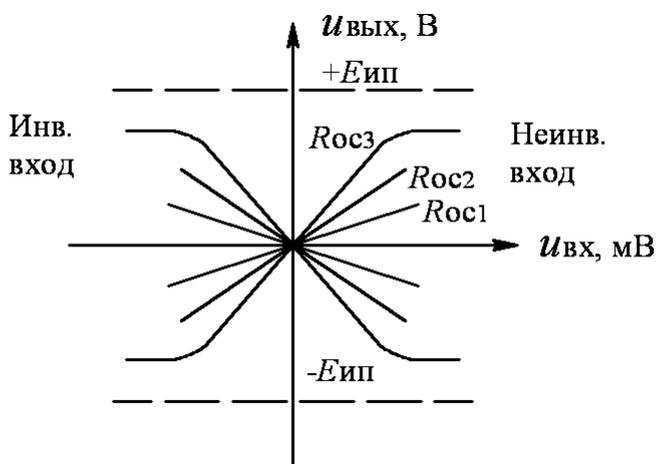


Рисунок 5.3

Амплитудная характеристика

(передаточные)  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$

(рис.5.3) и амплитудно-

частотные (АЧХ)  $k_u(f)$ .

Последние имеют вид АЧХ

усилителя постоянного тока за

исключением специальных

частотнозависимых устройств

(избирательный усилитель и

др.). Передаточные

характеристики имеют

линейный участок, для

которого  $k_u = \frac{U_{\hat{a}\hat{o}}}{U_{\hat{a}\hat{o}}} = const$ , и

нелинейный -  $k_u' < k_u$ . При реализации конкретных устройств используют линейные и нелинейные участки. Рассмотрим примеры построения устройств на базе ОУ.

### Аналоговые схемы, работающие на линейных участках амплитудных характеристик

**И н в е р т и р у ю щ и й у с и л и т е л ь** (рис. 5.4) изменяет знак выходного сигнала относительно входного. На инвертирующий вход через резистор  $R_1$  подается  $U_{вх}$  и вводится параллельная отрицательная обратная связь по напряжению с помощью резистора  $R_{о.с.}$ . Коэффициент усиления

$$k_{u.и} = \frac{U_{\hat{a}\hat{o}}}{U_{\hat{a}\hat{o}}} = -\frac{R_{i.\hat{n.}}}{R_1}.$$

Для уменьшения погрешностей от изменения входных токов делают симметричные входы, выбирая  $R_2 = R_1 \parallel R_{о.с.}$ .

**Н е и н в е р т и р у ю щ и й у с и л и т е л ь** (рис. 5.5) не изменяет знак выходного сигнала относительно входного и

$$k_{u.н} = \frac{U_{\hat{a}\hat{o}}}{U_{\hat{a}\hat{o}}} = 1 + \frac{R_{i.\hat{n.}}}{R_1}.$$

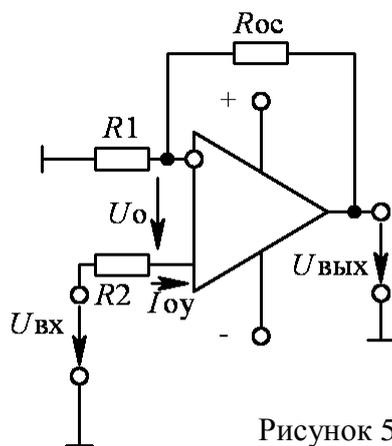


Рисунок 5.5  
Неинвертирующий  
усилитель

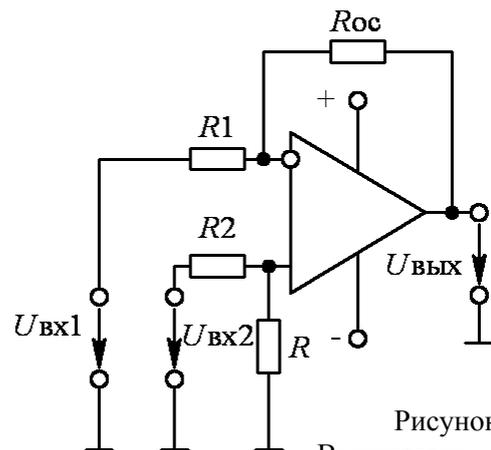


Рисунок 5.6  
Вычитатель - усилитель

**В ы ч и т а т е л ь - у с и л и т е л ь** (рис. 5.6) предназначен для усиления разностных сигналов. Если  $R_1 = R_2$  и  $R_{о.с.} = R$ , то  $U_{вых} = (U_{вх2} - U_{вх1})$ .

**С у м м а т о р ы**. Схемы инвертирующего и неинвертирующего сумматоров приведены на рис.5.7, 5.8. Для инвертирующего сумматора выходное напряжение определяется по формуле

$$U_{\hat{a}\hat{o}} = -\left(\frac{R_{i.\hat{n.}}}{R_1}U_{\hat{a}\hat{o}1} + \frac{R_{i.\hat{n.}}}{R_2}U_{\hat{a}\hat{o}2} + \dots + \frac{R_{i.\hat{n.}}}{R_n}U_{\hat{a}\hat{o}n}\right).$$

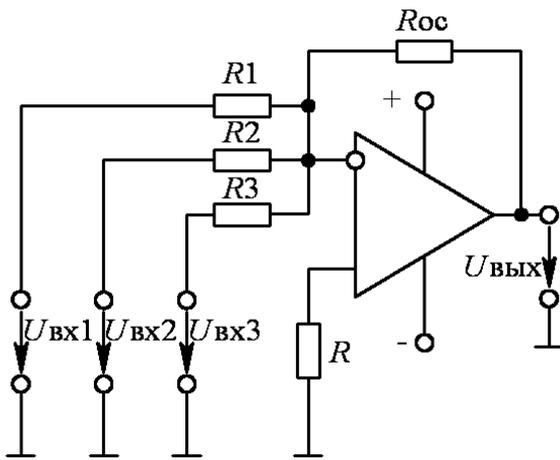


Рисунок 5.7  
Инвертирующий сумматор

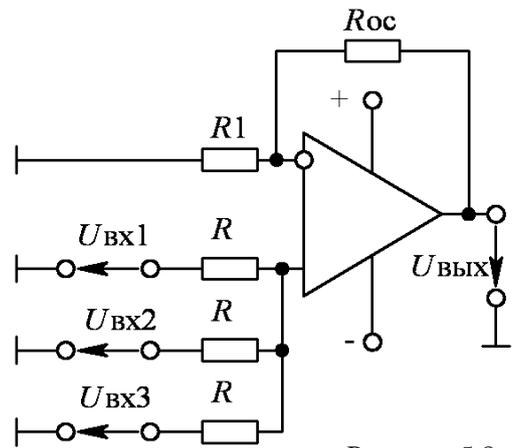


Рисунок 5.8  
Неинвертирующий сумматор

При равенстве входных сопротивлений  $R_1 = R_2 = R$

$$U_{\text{ВЫХ}} = -\frac{R_{\text{i.н.}}}{R} (U_{\text{ВХ.1}} + U_{\text{ВХ.2}} + \dots + U_{\text{ВХ.n}}) \text{ - для инвертирующего сумматора;}$$

$$U_{\text{аоо}} = \frac{1 + R_{\text{i.н.}}/R}{n} (U_{\text{ао1}} + U_{\text{ао2}} + \dots + U_{\text{аон}}) \text{ - для неинвертирующего сумматора.}$$

В схеме сумматоров переменным параметром является сопротивление обратной связи  $R_{o.c}$ , которое и определяет коэффициент усиления. Формулы приведены для постоянных величин (числовой сумматор)  $U_{\text{ВХ.1}}$ ,  $U_{\text{ВХ.2}}$  и т.д. В работе исследуется также инвертирующий геометрический сумматор, для которого складываются мгновенные значения  $U_{\text{ВХ.1}}$  и  $U_{\text{ВХ.2}}$ .

И н т е г р а т о р , схема которого показана на рис.5.9, реализует операцию

$$u_{\text{аоо}} = -\frac{1}{R_1 C_{\text{i.н.}}} \int_0^t u_{\text{ао}} \cdot dt = -\frac{1}{\tau} \int_0^t u_{\text{ао}} \cdot dt$$

где  $\tau = R_1 C_{o.c}$  - постоянная времени.

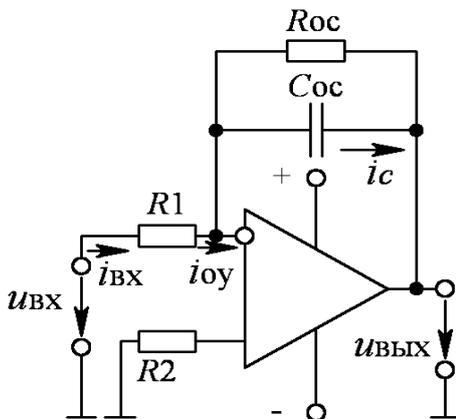


Рисунок 5.9  
Интегратор

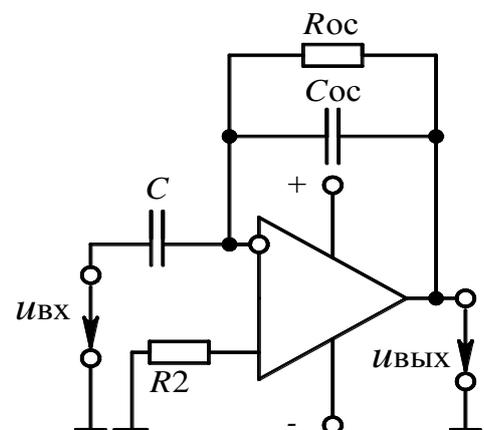


Рисунок 5.10  
Дифференциатор

Д и ф ф е р е н ц и а т о р (рис. 5.10) выполняет операцию

$$u_{\text{ВЫХ}} = -R_{\text{о.с}}C \frac{du_{\text{ао}}}{dt} = -\tau \frac{du_{\text{ао}}}{dt}.$$

Для интегратора и дифференциатора на инвертирующий вход подаются прямоугольные импульсы с выхода симметричного мультивибратора. На рис.5.11, а приведен электрический аналог и на рис.5.11,б временные диаграммы, поясняющие принцип дифференцирования и интегрирования в электрических и электронных цепях.

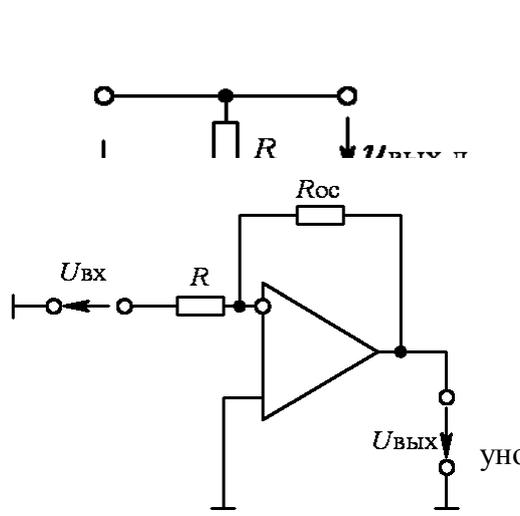


Рисунок 5.12  
Линейный усилитель

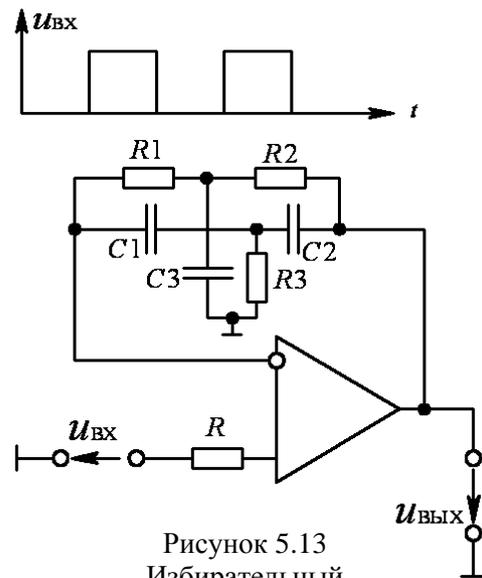


Рисунок 5.13  
Избирательный усилитель

Л и н е й н ы е у с и л и т е л и представлены инвертирующим усилителем (рис.5.12), для которого  $U_{\text{ВЫХ}} = -\frac{R_{\text{и.л}}}{R_1} \cdot U_{\text{ао}}$  и избирательным усилителем (рис.5.13) с частотно-зависимым двойным Т-образным мостом на базе резисторов  $R_1, R_2, R_3$  и конденсаторов  $C_1, C_2, C_3$ , подключенным по схеме отрицательной обратной связи, для которого  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$ . Мост выполняется симметричным, т.е.  $R_1 = R_2 = R, C_1 = C_2 = C$  и  $R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 0,5R$ . Если  $C_3 = C_1 + C_2 = 2C$ , тогда  $\omega_0 = \frac{1}{R_1 C_1} = \frac{1}{R_2 C_2} = \frac{1}{R_3 C_3} = \frac{1}{RC}$ .

## Г е н е р а т о р ы

Мультивибратором называется генератор периодически повторяющихся импульсов прямоугольной формы. Мультивибратор (рис.5.14) является автогенератором и работает без подачи входного сигнала. Рассматриваемый генератор является симметричным и для него длительность импульса и паузы равны  $t_{и}=t_{п}=R_{о.с}C \cdot \ln(1+)$ , при  $R_1=R_2$   $t_{и}=t_{п}=R_{о.с}C \cdot \ln 3$ , период

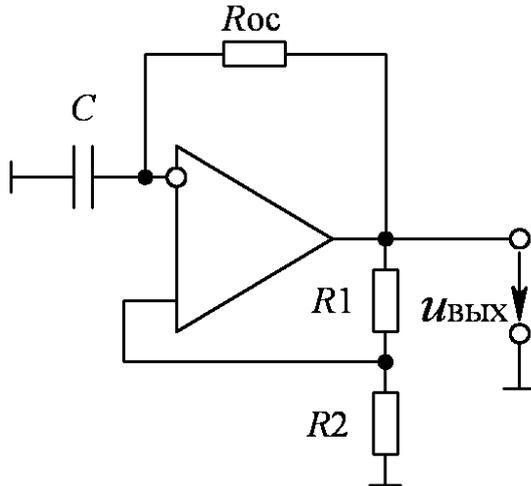


Рисунок 5.14  
Мультивибратор

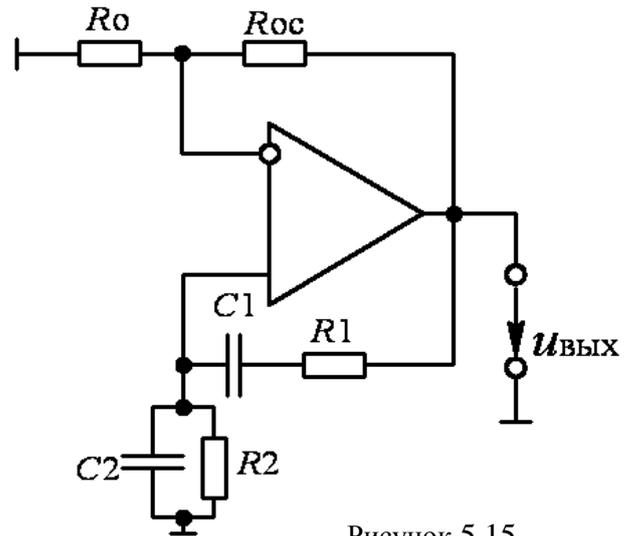


Рисунок 5.15  
Генератор  
остом Вина

повторения импульсов  $T_{п} = (t_{и}+t_{п}) = 2t_{и}$ , скважность  $Q = \frac{T_{и}}{t_{е}} = 2$ . Изменяя  $\tau = R_{о.с}C$  и величины  $R_1$ ,  $R_2$ , можно регулировать длительность, частоту и амплитуду импульсов.

Генератор гармонических колебаний с мостом Вина на базе ОУ (рис. 5.15) является самовозбуждающимся устройством. Мост Вина, состоящий из элементов  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ , образует звено частотно-зависимой положительной обратной связи, для которого  $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1R_2C_1C_2}}$  - частота генерации частотно-зависимой цепи. При  $R_1 = R_2 = R$  и

$C_1=C_2=C$  (условие обязательное)  $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$ . Соотношение параметров  $R_{о.с}$  и  $R_0$  определяет коэффициент усиления  $k_{и}$ .

Генератор линейно-изменяющегося напряжения (ГЛИН) предназначен для получения напряжения, которое в течение некоторого времени нарастает или спадает по линейному или близкому к линейному закону и используется в каскадах сравнения, схемах временной

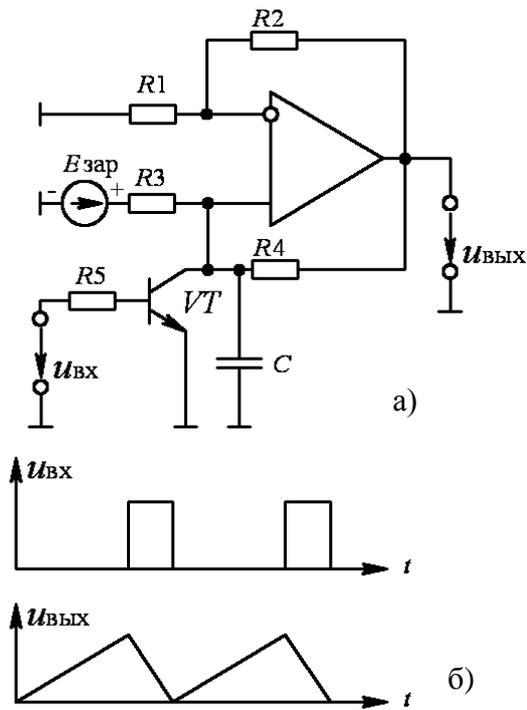


Рисунок 5.16  
Генератор ГЛИН

вид “пилы”.

задержки импульсов, для получения временных разверток в электронно-лучевых трубках и т.д. Реализация ГЛИНа на ОУ и временные диаграммы входного и выходного напряжений даны на рис.5.16. Принцип работы основан на применении зарядного или разрядного устройства, интегрирующего конденсатора  $C$  и электронного ключа на транзисторе  $VT$ . При закрытом состоянии ключа происходит заряд конденсатора  $C$  от  $E_{зар}$  через  $R_3$  с постоянной времени  $\tau_{зар} = R_3C$ , что определяет длительность прямого (рабочего) хода. Замыкание ключа приводит к быстрой разрядке конденсатора и время обратного хода определяется сопротивлением насыщенного транзистора. Выходное напряжение повторяет форму напряжения на конденсаторе  $C$  и имеет

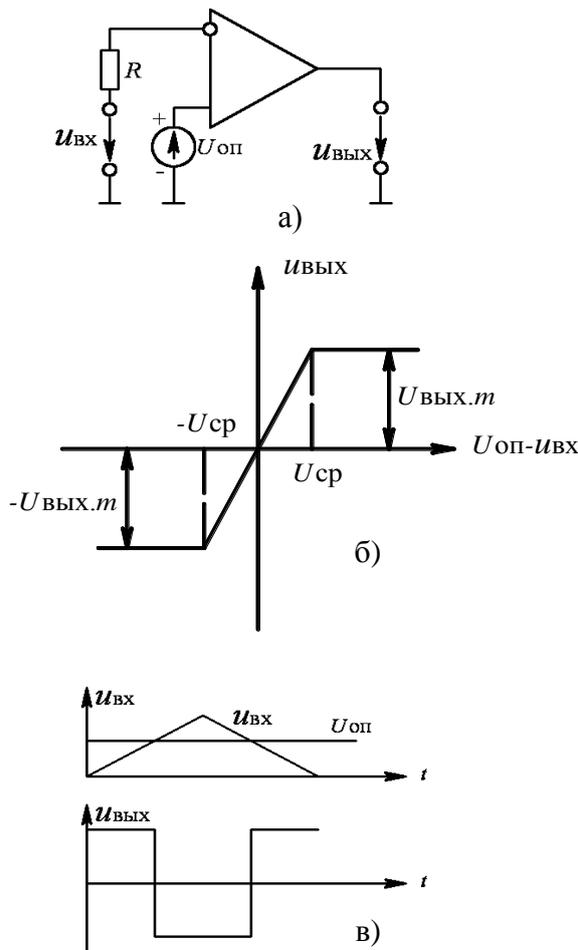


Рисунок 5.17  
Компаратор

Пороговые устройства предназначены для сравнения двух входных величин. В рассматриваемых схемах сравниваются постоянное  $U_{оп}$  и переменное  $u_{вх}$  напряжения. На рис.5.17, а приведен двух входовой компаратор, у которого сравнивающиеся сигналы поступают на оба входа усилителя. Поэтому состояние выхода компаратора (полярность выходного напряжения) определяется большим по уровню напряжением одного из входов, что отражает идеализированная (без учета гистерезиса) передаточная характеристика (рис.5.17, б). При равенстве входных напряжений выходное напряжение равно нулю. При  $\Delta U_{вх} = U_{оп} - U_{вх} > 0$  напряжение на выходе ОУ будет равно  $u_{вых} = U_{вых.м}$ , если же  $\Delta U_{вх} = U_{оп} - U_{вх} < 0$ , то  $u_{вых} = -U_{вых.м}$ .

Уровень входного напряжения компаратора ограничивается допустимым синфазным входным напряжением. Принцип работы устройства поясняется временными диаграммами для  $u_{вх}$  и  $u_{вых}$  (рис.5.17, в). Обратные связи для этого компаратора не предусмотрены ни по одному из входов.

Для ускорения процесса переключения используют ускоряющие цепи на основе введения положительных обратных связей (ПОС). Такой компаратор с ПОС называется также триггером Шмитта (рис.5.18, а). Здесь применяется ПОС через цепочку  $R_1, R_2$ , а входной сигнал подается на инвертирующий вход.

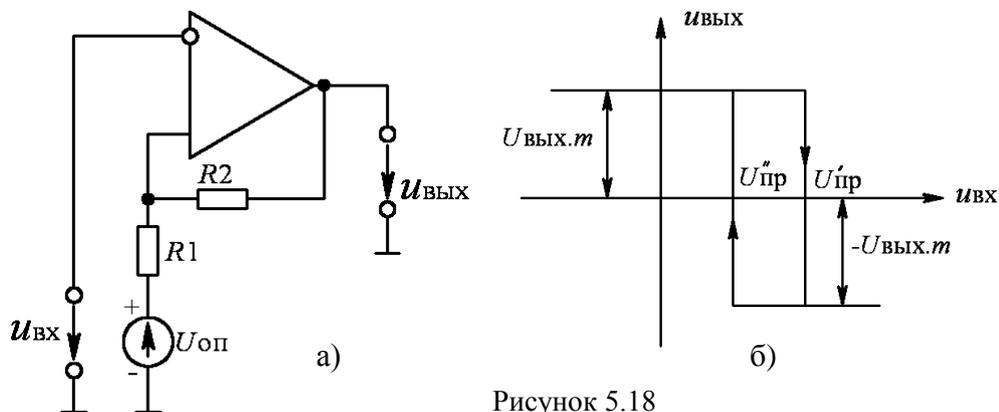


Рисунок 5.18  
Триггер Шмитта

На рис.5.18,б построена передаточная характеристика этого компаратора, для которой

$$U_{\text{пр}}' = U_{\text{оп}} \frac{R_2}{R_1 + R_2} + U_{\text{а.о. м}} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$U_{\text{пр}}'' = U_{\text{оп}} \frac{R_2}{R_1 + R_2} - U_{\text{а.о. м}} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$U_{\text{г}} = U_{\text{пр}}' - U_{\text{пр}}'' = 2U_{\text{а.о. м}} \frac{R_1}{R_1 + R_2},$$

$U_{\text{г}}$  - ширина петли, определяющая соотношением сопротивлений делителя  $R_1$  и  $R_2$ .

### Предварительное задание к эксперименту

1. Для инвертирующего усилителя (рис.5.4)  $R_1=10$  кОм и  $R_{\text{о.с}}=20, 100$  и  $270$  кОм рассчитать и построить амплитудную характеристику при изменении  $U_{\text{вх}}$  от 0 до 1000 мВ и ограничении  $U_{\text{вых}}=12$  В.

2. Рассчитать  $U_{\text{вых}}$  вычитателя-усилителя (рис.5.6) при  $R_1=R_2=R=10$  кОм и  $R_{\text{о.с}}=10$  и  $20$  кОм при трех значениях  $U_{\text{вх1}}$  и  $U_{\text{вх2}}$  в пределах  $\pm 1000$  мВ. Результат внести в табл.5.2.

3. Рассчитать  $U_{\text{вых}}$  инвертирующего сумматора (рис.5.7) при  $R_1=R_2=R=10$  кОм и  $R_{\text{о.с}}=20, 50, 100$  кОм при трех различных наборах  $U_{\text{вх1}}$  и  $U_{\text{вх2}}$  в пределах  $\pm 1000$  мВ. Результат внести в табл.5.2.

4. Определить постоянную времени  $\tau$  для интегратора ( $R_1=10$ кОм;  $C_{\text{о.с}}=5$  и  $10$  нФ) и дифференциатора ( $R_{\text{о.с}}=10$  и  $50$  кОм,  $C=10$  и  $5$ нФ).

5. Рассчитать резонансную частоту  $f_0$  и период  $T_0$  избирательного усилителя (рис.5.13) при  $R=24$  кОм и  $C=1,1$  нФ.

6. Рассчитать длительность импульсов ( $t_{\text{и}}$ ) и пауз ( $t_{\text{п}}$ ), а также период повторения импульсов ( $T_{\text{п}}$ ) выходного напряжения мультивибратора (рис.5.14) при  $C=6,8$  нФ и  $R_{\text{о.с}}=16$  кОм.

7. Определить частоту и период выходного напряжения генератора гармонических колебаний (рис.5.15) при  $R=24$  кОм и  $C=1,1$  нФ.

Примечание: объем предварительного задания может быть уменьшен по указанию преподавателя.

### Порядок выполнения эксперимента

При включенном стенде и отсутствии входного напряжения произвести балансировку усилителя потенциометром “установка 0”.

Для инвертирующего (рис.5.4) или неинвертирующего (рис.5.5) усилителя снять передаточные характеристики для заданных в предварительном задании значений  $R_{\text{о.с}}$ . Входное напряжение снимается с источников опорного напряжения с полярностью “+” и “-”, устанавливаемой переключателями  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ . Уровень входного напряжения меняется в диапазоне от 0 до 1000 мВ. Результаты измерений занести в табл.5.1.

ТАБЛИЦА 5.1

$U_{вх}, мВ$	0							1000
$U'_{вых}, В$ при $R_{o.c.}=20$ кОм	0							
$U''_{вых}, В$ при $R_{o.c.}=100$ кОм	0							
$U'''_{вых}, В$ при $R_{o.c.}=270$ кОм	0							

По результатам измерений построить передаточные характеристики. Недостающие характеристики в трех четвертях системы координат строятся по зеркальному отображению по отношению к снятым по табл.5.1. На построенных характеристиках нанести точки по предварительному расчету.

3. Собрать цепь вычитателя-усилителя согласно рис.5.6 и подать на входы от источников постоянного тока напряжения различные по уровню и знаку при различных значениях  $R_{o.c.}$ . Значения входных и выходного напряжений занести в табл.5.2.

4. а) Для инвертирующего (рис.5.7) или неинвертирующего (рис.5.8) цифрового сумматора произвести измерения входных и выходного напряжений для различных по знаку и величине входных напряжений при двух значениях  $R_{o.c.}$ . По п.п. 3,4 уровень входных напряжений брать в пределах  $\pm 1В$ . Результаты измерений занести в табл.5.2.

ТАБЛИЦА 5.2

	$U_{вх1}, мВ$	$U_{вх2}, мВ$	$U_{вых}, мВ$	$R_{о.с}, кОм$	$U_{вых}, расч., мВ$
Вычитатель				10	
				10	
				20	
Сумматор				20	
				50	
				100	

б) В геометрическом неинвертирующем сумматоре на входы подаются переменные напряжения: первое - с выхода симметричного мультивибратора стенда (включить источник питания 5В стенда), второе - с генератора низкочастотных сигналов (синусоидальный выход). Ослабление - 20. Частота 3-6 кГц.  $R_{о.с}$  сумматора 10 или 20 кОм. Снять осциллограммы входных  $u_{вх}(t)$  и выходного  $u_{вых}(t)$  напряжений, по которым определить параметры входных сигналов (амплитуду, частоту, период). Произвести графическое сложение входных сигналов с коэффициентом усиления  $k_u=2$ .

5. По рис.5.9 и 5.10 на входы дифференциатора и интегратора подаются прямоугольные импульсы с выхода симметричного мультивибратора стенда. Снять осциллограммы и определить параметры входных  $u_{вх}(t)$  импульсов (амплитуда, период, частота), а также снять осциллограммы выходных  $u_{вых}(t)$  напряжений при следующих номинальных данных устройств: для дифференциатора -  $C_{вх}=10$  и 5 нФ,  $R_{о.с}=20$  и 30 кОм,  $C_{о.с}=2$  нФ; для интегратора -  $R_{вх}=10$  кОм,  $C_{о.с}=10$  и 5нФ,  $R_{о.с}=20$  кОм. По снятым осциллограммам определить графическим способом постоянную времени  $\tau$  и сравнить с результатами предварительного расчета.

6. Собрать схему линейного усилителя согласно рис.5.12 с подключением на вход генератора низкочастотных колебаний (синусоидальный выход). Снять амплитудную характеристику на частоте 1кГц в линейном режиме, который контролируется осциллографом на выходе усилителя, для значений  $R_{о.с}=91$  и 270 кОм. Результаты эксперимента свести в табл.5.3.

ТАБЛИЦА 5.3

$R_{о.с} = 91 кОм$	$U_{вх}, мВ$						
	$U_{вых}, В$						
$R_{о.с} = 270 кОм$	$U_{вх}, мВ$						
	$U_{вых}, В$						

По результатам измерений построить соответствующую характеристику  $U_{вых} = f(U_{вх})$ .

7. По рис.5.13 собрать схему избирательного усилителя. На вход подключается низкочастотный генератор сигналов на синусоидальном выходе с

уровнем выходного напряжения 90 мВ (входное для усилителя). Снять амплитудно-частотную характеристику  $k_u(f)$  в диапазоне частот 4,5-7,5 кГц. Результаты эксперимента занести в табл.5.4.

ТАБЛИЦА 5.4

$U_{\text{вх}} = 90\text{мВ}$						
$f$ , кГц						
$U_{\text{вых}}$ , В						
$k_u$						

По результатам табл.5.4 построить АЧХ, определить резонансную частоту, которую сравнить с результатами предварительного расчета. По АЧХ определить  $f_n, f_b$ , полосу пропускания.

8. Согласно рис.5.14 и 5.15 при включенном питании стенда снять осциллограммы выходных  $u_{\text{вых}}(t)$  напряжений мультивибратора и генератора гармонических колебаний, по которым определить параметры сигналов: амплитуду, частоту, период. Результаты эксперимента сравнить с результатами предварительного расчета.

9. На вход генератора линейно-изменяющегося напряжения (ГЛИН) по схеме рис.5.15 подать  $u_{\text{вх}}$  от несимметричного мультивибратора. По осциллограммам  $u_{\text{вх}}(t)$  и  $u_{\text{вых}}(t)$  определить: для  $u_{\text{вх}}$  - частоту, коэффициент заполнения, скважность импульсов, для  $u_{\text{вых}}$  - амплитуду, длительность прямого (рабочего) хода, длительность обратного хода.

10. На вход компаратора (рис.5.17) подать синусоидальное напряжение от генератора сигналов при ослаблении "0". Снять осциллограммы входного  $u_{\text{вх}}(t)$  и выходного  $u_{\text{вых}}(t)$  напряжений.

11. Для триггера Шмитта (рис. 5.18) при подаче на вход напряжения (по п.10) снять передаточную характеристику  $u_{\text{вых}}(u_{\text{вх}})$  устройства.

**Примечание:** п.п.4б, 5, 9, 10, 11 выполнять, используя оба канала осциллографа (канал А - вход, канал Б - выход). **Внимание!** Перед включением осциллографа в схему обязательно проверьте положение входа "⊥" (общая точка схемы).

### Содержание отчета

Цель работы, рабочие схемы исследуемых устройств, результаты предварительного расчета, характеристики, осциллограммы, рассчитанные параметры.

### Контрольные вопросы

1. К какому классу усилителей относится ОУ? 2. Чем объясняется широкое использование ОУ? 3. Поясните структурную компоновку ОУ. 4. Что такое обратные связи в усилителях и как они используются при построении конкретных устройств на базе ОУ? 5. Какие основные характеристики ОУ и какой они имеют вид? 6. Где используют линейный и нелинейный режим усиления? 7. Поясните принцип построения инвертирующего и

неинвертирующего усилителя на базе ОУ. 8. Как определяется их коэффициент усиления? 9. Поясните принцип построения вычитателя, сумматора, дифференциатора, интегратора. Запишите формулы выполняемых операций. 10. Что такое “избирательный усилитель”? Особенности АЧХ. Что такое и как определяется полоса пропускания? 11. Основные принципы построения самовозбуждающихся устройств на базе ОУ. 12. Что такое частотно-зависимые цепи и в каких устройствах они используются? 13. Принцип построения и использование ГЛИНа. 14. Что такое “пороговые устройства”? 15. Какое принципиальное отличие при построении компаратора и триггера Шмитта на ОУ? 16. Поясните, что такое “гистерезис” в электронных цепях?

## Лабораторная работа № 6 ЛОГИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ И МИКРОСХЕМЫ

**Ц е л ь р а б о т ы :** изучение принципов построения серийных логических микросхем; исследование логических функций одного и двух переменных и их реализация; построение простых устройств автоматики на базе логических и цифро-импульсных устройств.

### Общие сведения

Л о г и ч е с к и е э л е м е н т ы (ЛЭ) широко применяются в автоматике, вычислительной технике и цифровых измерительных приборах. Их создают на базе электронных устройств, работающих в ключевом режиме, при котором уровни сигналов могут принимать только два значения. В положительной логике принято, что высокий уровень сигнала соответствует логической единице (1), а низкий – логическому нулю (0).

Все логические устройства можно разделить на две группы :

- 1) комбинационные, в которых выходные сигналы в данный момент однозначно определяются входными сигналами;
- 2) последовательностные, в которых выходные сигналы зависят не только от входных сигналов, но и от предыдущего состояния устройства.

Логическая функция выражает зависимость выходных логических переменных от входных и принимает значения 0 или 1. Любую логическую функцию удобно представить в виде таблицы состояний (таблицы истинности), где записываются возможные комбинации аргументов и соответствующие им функции.

ТАБЛИЦА 6.1

Название функции	Обозначение функции	Значение $x$	
		0	1
Нулевая	$y_0$	0	0
Повторение	$y_1$	0	1
Инверсия	$y_2$	1	0
Единичная	$y_3$	1	1

В общем случае число элементарных логических функций от  $n$  переменных равно  $2^{2^n}$ . Так, при одной переменной возможны четыре функции (табл.6.1). Здесь единичная и нулевая функции не зависят от значения аргумента и являются постоянными. Двум переменным соответствует 16 функций:  $2^{2^2} = 16$ . В табл. 6.2 приведены основные логические функции двух переменных.

Работу логических устройств анализируют с помощью алгебры логики (булевой алгебры), где переменная может принимать только два значения: 0 или 1.

Основными логическими операциями являются (см. табл.6.2):

- 1) логическое умножение:  $y=x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n$  (читается “и  $x_1$ , и  $x_2, \dots$ , и  $x_n$ ”);

- 2) логическое сложение:  $y = x_1 + x_2 + \dots + x_n$  (читается “или  $x_1$ , или  $x_2, \dots$ , или  $x_n$ ”);  
 3) логическое отрицание: (читается “не  $x$ ”).

Как видно из табл. 6.2, выходной сигнал  $y$  элемента ИЛИ равен 1, если хотя бы один из его входов подан сигнал 1. Элемент И выдает 1, если на все входы поданы сигналы 1.

Все возможные логические функции  $n$  переменных можно образовать с помощью комбинации трех основных операций: И, ИЛИ, НЕ. Поэтому такой набор называют логическим базисом или функционально полным. Используя законы булевой алгебры (табл. 6.3), можно доказать, что таковыми являются наборы из одной функции И-НЕ, ИЛИ-НЕ.

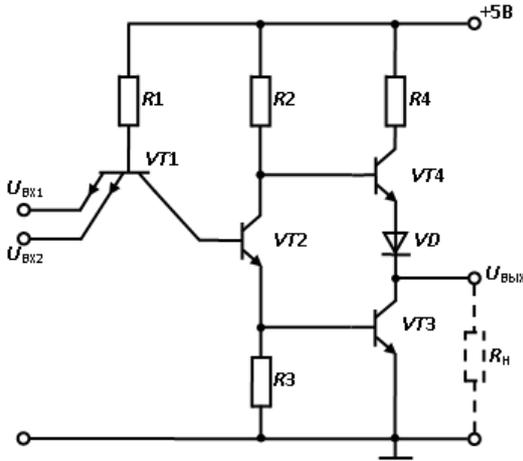


Рисунок 6.1 Реализация элемента И-НЕ

В базовых элементах одной серии использована одинаковая микросхемная реализация. Серия характеризуется общими электрическими, конструктивными и технологическими параметрами.

Интегральные микросхемы серии 155 представляют собой транзисторно-транзисторные логические (ТТЛ) элементы с 14 или 16 выводами. Базовым элементом серии является логический элемент И-НЕ, состоящий из многоэмиттерного транзистора  $VT1$  и сложного усилителя-инвертора (рис.6.1).

Если на входы ЛЭ поданы высокие положительные потенциалы  $U_{\text{вх}}^1 \geq 2.4 \text{ В}$ , то переходы база-эмиттер  $VT1$  закрываются, а через его открытый переход база-коллектор и резистор  $R1$  протекает ток базы транзистора  $VT2$ , достаточный для его насыщения. При этом ток эмиттера  $VT2$  открывает транзистор  $VT3$  и подключает выход ЛЭ к общей шине. Вследствие падения напряжения на резисторе  $R2$ , а также за счет включения диода  $VD$  напряжение на переходе база-эмиттер транзистора  $VT4$  оказывается недостаточным для его открывания.

Тип элемента	Логическая функция (операция)	Обозначение логической операции	Таблица истинности				Условное изображение	
			$x_1$	0	0	1		1
Элемент НЕ (инвертор)	Логическое отрицание, инверсия	$\bar{x}$	$x$	0	1	 $y = \bar{x}$		
		$\neg x$	$\bar{x}$	1	0			
Элемент И (конъюнктор)	Логическое умножение, конъюнкция	$x_1 \cdot x_2$ $x_1 \wedge x_2$ $x_1 \& x_2$	$x_1 \cdot x_2$	0	0	0	1	 $y = x_1 \cdot x_2$
Элемент ИЛИ (дизъюнктор)	Логическое сложение, дизъюнкция	$x_1 + x_2$ $x_1 \vee x_2$	$x_1 + x_2$	0	1	1	1	 $y = x_1 + x_2$
Элемент И-НЕ (элемент Шеффера)	Штрих Шеффера, отрицание конъюнкции	$\overline{x_1 \cdot x_2}$ $x_1   x_2$	$\overline{x_1 \cdot x_2}$	1	1	1	0	 $y = \overline{x_1 \cdot x_2}$
Элемент ИЛИ-НЕ (элемент Пирса)	Стрелка Пирса, отрицание дизъюнкции	$\overline{x_1 + x_2}$ $x_1 \downarrow x_2$	$\overline{x_1 + x_2}$	1	0	0	0	 $y = \overline{x_1 + x_2}$
Запрет $x_2$	Запрет	$\overline{x_1 \cdot x_2}$	$\overline{x_1 \cdot x_2}$	0	0	1	0	 $y = \overline{x_1 \cdot x_2}$
Импликация от $x_2$ к $x_1$	Импликация	$\overline{x_1 + x_2}$	$\overline{x_1 + x_2}$	1	0	1	1	 $y = \overline{x_1 + x_2}$
Исключающее ИЛИ (неравнозначность)	Исключающее ИЛИ	$x_1 \oplus x_2$ $\overline{x_1 x_2} + \overline{x_1} \overline{x_2}$	$x_1 \oplus x_2$	0	1	1	0	 $y = x_1 \oplus x_2$
Равнозначность (эквивалентность)	Равнозначность	$x_1 \sim x_2$ $x_1 x_2 + \overline{x_1} \overline{x_2}$	$x_1 \sim x_2$	1	0	0	1	 $y = x_1 \sim x_2$

ТАБЛИЦА 6.3

Аксиомы (тождества)	$1 + x = 1$ $0 + x = x$ $x + x = x$ $x + \bar{x} = 1$ $\overline{\bar{x}} = x$	$0 \cdot x = 0$ $1 \cdot x = x$ $x \cdot x = x$ $x \cdot \bar{x} = 0$
Законы коммутативности	$x_1 + x_2 = x_2 + x_1$	$x_1 \cdot x_2 = x_2 \cdot x_1$
Законы ассоциативности	$x_1 + x_2 + x_3 = x_1 + (x_2 + x_3)$ $x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 = x_1 \cdot (x_2 \cdot x_3)$	
Законы дистрибутивности	$x_1 \cdot (x_2 + x_3) = (x_1 \cdot x_2) + (x_1 \cdot x_3)$ $x_1 + (x_2 \cdot x_3) = (x_1 + x_2) \cdot (x_1 + x_3)$	
Законы дуальности (теоремы де Моргана)	$\overline{x_1 + x_2} = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2$	$\overline{x_1 \cdot x_2} = \bar{x}_1 + \bar{x}_2$
Законы поглощения	$x_1 + x_1 \cdot x_2 = x_1$	$x_1 \cdot (x_1 + x_2) = x_1$

Таким образом, напряжение на выходе ЛЭ не превышает напряжения насыщения транзистора  $VT3$  (примерно 0,2 ... 0,4 В), что соответствует логическому 0.

Если хотя бы на одном из входов ЛЭ оказывается низкий потенциал,  $U_{\text{вх}}^0 \leq 0,4 \text{ В}$ , то через открытый переход база-эмиттер  $VT1$  и резистор  $R1$  протекает входной ток  $I_{\text{вх}}^0 \leq 1,6 \text{ мА}$ , а в базу  $VT2$  попадает незначительный по величине обратный ток коллекторного перехода  $VT1$ . В этом случае транзисторы  $VT2$  и  $VT3$  заперты, а транзистор  $VT4$  открыт и насыщен, так как в его базу протекает ток через резистор  $R2$ . Выход ЛЭ от шины питания +5 В получает высокий потенциал (логический уровень 1) через переходы  $VT4$ , диод  $VD$  и резистор  $R4$ .

Данный ЛЭ производит логическое умножение двух входных сигналов с одновременным инвертированием выходной величины (2И-НЕ).

Если в базовом элементе (рис.6.1) отсоединить элементы  $R4$ ,  $VT4$ ,  $VD$ , а в коллектор транзистора  $VT3$  включить нагрузку, то вместо инвертирования обеспечивается повторение выходного сигнала.

В настоящее время применяется несколько разновидностей серий микросхем с элементами ТТЛ: стандартные (серии 133; К155), высокого быстродействия (серии 130; К131), микро мощные (серия 134), с диодами Шоттки (серии 530; К531) и микро мощные с диодами Шоттки (серия К555). Кроме расширения номенклатуры элементов серий К531 и К555 сейчас активно развиваются наиболее перспективные серии ТТЛШ - микро мощная К1533 и быстродействующая К1531, выполненные на основе последних достижений

технологии изготовления ИС - ионной имплантации и прецизионной фотолитографии.

Наибольшим быстродействием обладают ЛЭ, выполненные по технологии ЭСЛ (эмиттерно-связанная логика) и ТТЛШ (транзисторно-транзисторная логика с транзисторами Шоттки). Меньше потребляет мощности КМДПТЛ (комплементарная МДП-транзисторная логика). Она же лучшая по помехоустойчивости и нагрузочной способности. ЭСЛ и И<sup>2</sup>Л (интегральная инжекционная логика) меньше других генерируют помехи.

В последние годы получили развитие программируемые логические элементы, на которых с помощью программаторов можно построить многие цифровые устройства.

Любая сложная логическая функция может быть реализована с помощью ЛЭ, выполняющих элементарные функции И-НЕ, ИЛИ-НЕ. Пусть требуется составить комбинационную схему с четырьмя входами  $x_1, x_2, x_3, x_4$  и одним выходом  $y$ . Высокий уровень напряжения должен появляться на выходе только при наличии высоких уровней на трех входах, т.е.  $y = 1$  при  $x_1 = x_2 = x_3 = 1$  и  $x_4 = 0$ . Такую схему можно составить путем подбора элементов. Например, элемент 3И-НЕ при подаче на его входы  $x_1 = x_2 = x_3 = 1$  дает на выходе сигнал  $y_1 = 0$ . Подавая его и  $x_4 = 0$  на вход элемента 2ИЛИ-НЕ, получаем  $y = 1$ .

Другим способом является преобразование логической функции по правилам алгебры логики (см. табл. 6.3). Для данного примера  $y = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot \overline{x_4}$ . Используя тождество  $x = \overline{\overline{x}}$  и формулы де Моргана, эту функцию можно представить в виде:

$$y = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot \overline{x_4} = \overline{\overline{x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot \overline{x_4}}} = \overline{\overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \cdot \overline{x_3} \cdot x_4} = \overline{\overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \cdot \overline{x_3}} + x_4$$

Полученной логической функции соответствует схема рис.6.2.

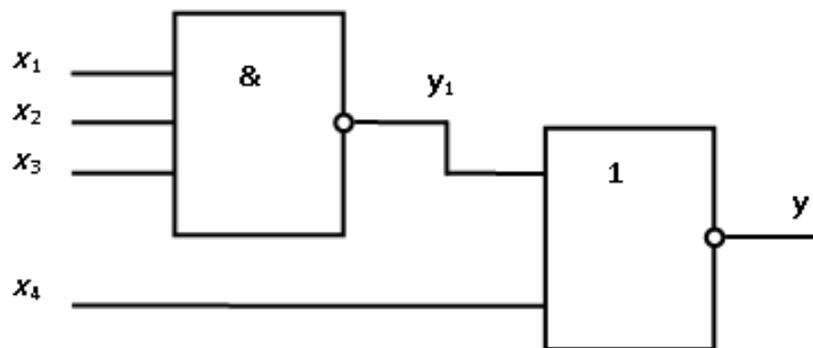


Рисунок 6.2 Схема на логических элементах

### Предварительное задание к эксперименту

Составить на логических элементах 2И-НЕ (3И-НЕ) и 2ИЛИ-НЕ комбинационную схему, на выходе которой высокий уровень напряжения (логическая 1) появляется только при значениях сигналов на входах, заданных табл. 6.4.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
$x_1$	0	0	0	1	0	1	0	1
$x_2$	0	0	0	1	0	1	1	0
$x_3$	0	1	1	1	0	1	0	1
$x_4$	0	0	1	1	-	-	-	-

### Порядок выполнения эксперимента

1. Изучить принцип работы логических элементов (табл.6.2).
2. Подавая сигналы с наборного поля на входы логических элементов и соединяя их выходы с элементами индикации, реализовать основные функции одного и двух аргументов. Привести таблицы истинности исследуемых элементов.
3. Собрать схему предварительного задания, проверить правильность работы, составить таблицу истинности.
4. Осуществить выборку с наборного поля следующих чисел (по указанию преподавателя):

- |                                  |                              |
|----------------------------------|------------------------------|
| а) всех четных                   | б) всех нечетных             |
| в) всех чисел $8 \leq N \leq 15$ | г) всех чисел $N \leq 7$     |
| д) всех чисел, кратных 4         | е) чисел 0, 1, 2, 3          |
| ж) чисел 4, 5, 6, 7              | з) чисел 8, 9, 10, 11        |
| и) 3, 7, 11, 15                  | к) 6, 7, 14, 15              |
| л) 4, 5, 12, 13                  | м) 2, 6, 10, 14              |
| н) 2, 3, 10, 11                  | о) 9, 11, 13, 15             |
| п) 8, 10, 12, 14                 | р) 1, 5, 9, 13               |
| с) 1, 3, 9, 11                   | т) 4, 6, 12, 14              |
| у) 10, 11, 14, 15                | ф) 1, 2, 5, 6, 9, 10, 13, 14 |
| х) 0, 3, 4, 7, 8, 11, 12, 15     | ц) 0-3, 8-11.                |

5. Собрать схему, реализующую мажоритарную логику (на выходе появляется 1, если на всех трех или на любых двух входах имеется 1).

### Содержание отчета

Цель работы; схема базового логического элемента; схема, составленная в предварительном задании; таблицы истинности исследуемых логических элементов; схемы по пп. 4, 5.

### Контрольные вопросы

1. Какие операции и тождества алгебры логики Вы знаете?
2. Перечислите логические функции одного и двух аргументов, покажите примеры реализации.
3. Что представляет собой серия цифровых (логических) ИС?
4. Приведите примеры простейших цифровых устройств на основе логических элементов.
5. Реализуйте несколько функций, заданных таблицей истинности.
6. Какой набор логических элементов называют функционально полным (базовым)?
7. Поясните работу базового логического элемента.

## Лабораторная работа № 7 КОМБИНАЦИОННЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ

**Ц е л ь р а б о т ы :** ознакомление с принципом действия и схемотехникой дешифраторов, мультиплексоров и сумматоров; изучение работы этих комбинационных логических схем; реализация на их основе простейших устройств автоматики.

### Общие сведения

**К о м б и н а ц и о н н ы м и** называются логические устройства, выходные сигналы которых однозначно определяются комбинацией входных сигналов в тот же момент времени. Они используются в информационно-измерительных системах и ЭВМ, в системах автоматического управления, в устройствах промышленной автоматики и т.п.

Построение комбинационного логического устройства осуществляется следующим образом. По требуемому алгоритму работы составляются таблица истинности и соответствующее ей логическое уравнение. Это уравнение минимизируется по правилам алгебры логики с целью упрощения и затем строится логическая схема на базе логических элементов (ЛЭ) И-НЕ, ИЛИ-НЕ. Наряду с построением устройств промышленность изготавливает наиболее часто встречающиеся комбинационные логические схемы (КЛС) в виде интегральных микросхем. Примерами КЛС являются шифраторы, дешифраторы, кодопреобразователи, устройства сравнения (компараторы), мультиплексоры, демультимплексоры, сумматоры, арифметико-логические устройства и др.

**Д е ш и ф р а т о р** (декодер) представляет собой комбинационное устройство, в котором при каждой комбинации входных переменных формируется сигнал высокого или низкого уровня только на одном выходе. Дешифратор называется полным, если число выходов  $n$  равно числу возможных наборов сигналов на  $m$  входах, т.е.  $n = 2^m$ . Неполный дешифратор имеет меньшее число выходов. Дешифратор может иметь стробирующий (управляющий) вход. Сигнал на этом входе разрешает или запрещает выполнение операции дешифрования.

Исследуемая ИМС К155ИДЗ (рис.7.1) представляет собой дешифратор-демультимплексор с 4 на 16. Основу этой микросхемы составляют 16 ЛЭ И-НЕ и 8 инверторов. Работа дешифратора определяется таблицей истинности (табл. 7.1). Дешифратор реализует логические функции:

$$F_0 = \overline{A_3} \overline{A_2} \overline{A_1} \overline{A_0}; F_1 = \overline{A_3} \overline{A_2} \overline{A_1} A_0; F_2 = \overline{A_3} \overline{A_2} A_1 \overline{A_0}; \dots; \\ F_{15} = A_3 A_2 A_1 A_0.$$

Он позволяет преобразовать четырехразрядный двоичный код, поступивший на входы  $A_0...A_3$ , в напряжение низкого уровня, появляющееся на одном из шестнадцати выходов  $\overline{0}...1\overline{5}$ . Если входные переменные представить как двоичную запись чисел, то логический нуль формируется на том выходе,

номер которого соответствует десятичной записи того же числа (см.табл.7.1). Кроме четырех входов  $A0...A3$  устройство имеет еще два входа  $\bar{W}1$  и  $\bar{W}2$  разрешения дешифрации. Они играют роль стробирующих входов, если на них подан низкий уровень напряжения. Если хотя бы на одном из входов  $\bar{W}1$  и  $\bar{W}2$  установить высокий уровень, то на всех выходах будет высокий уровень напряжения. Такой режим используется при наращивании числа разрядов дешифруемого кода.

ТАБЛИЦА 7.1

Входы						Выходы						
		$A3$	$A2$	$A1$	$A0$	$\bar{0}$	$\bar{1}$	$\bar{2}$	...	$\bar{13}$	$\bar{14}$	$\bar{15}$
0	0	0	0	0	0	0	1	1	...	1	1	1
0	0	0	0	0	1	1	0	1	...	1	1	1
0	0	0	0	1	0	1	1	0	...	1	1	1
									...			
0	0	1	1	0	1	1	1	1	...	0	1	1
0	0	1	1	1	0	1	1	1	...	1	0	1
0	0	1	1	1	1	1	1	1	...	1	1	0
0	1	x	x	x	x	1	1	1	...	1	1	1
1	0	x	x	x	x	1	1	1	...	1	1	1
1	1	x	x	x	x	1	1	1	...	1	1	1

*Примечание:* здесь и далее x — любое значение сигнала.

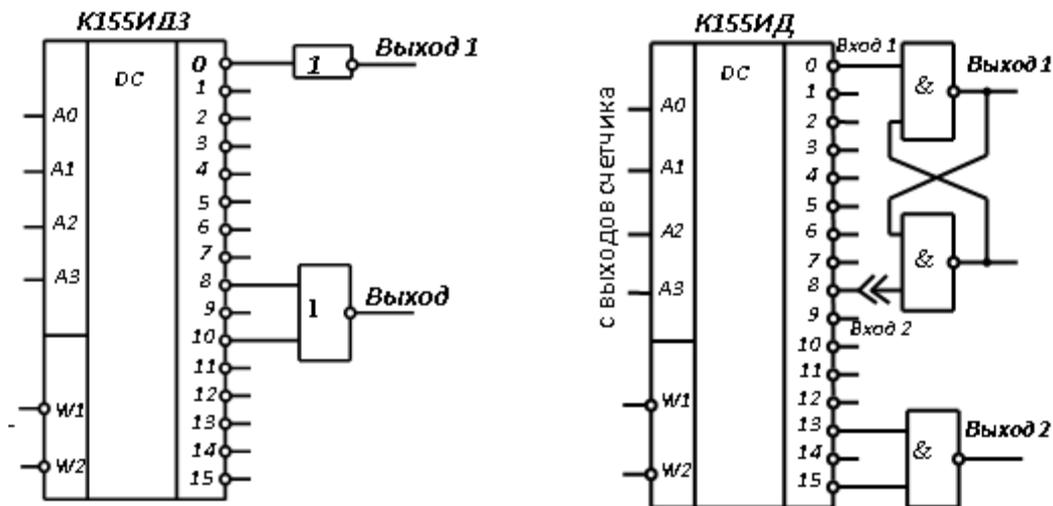


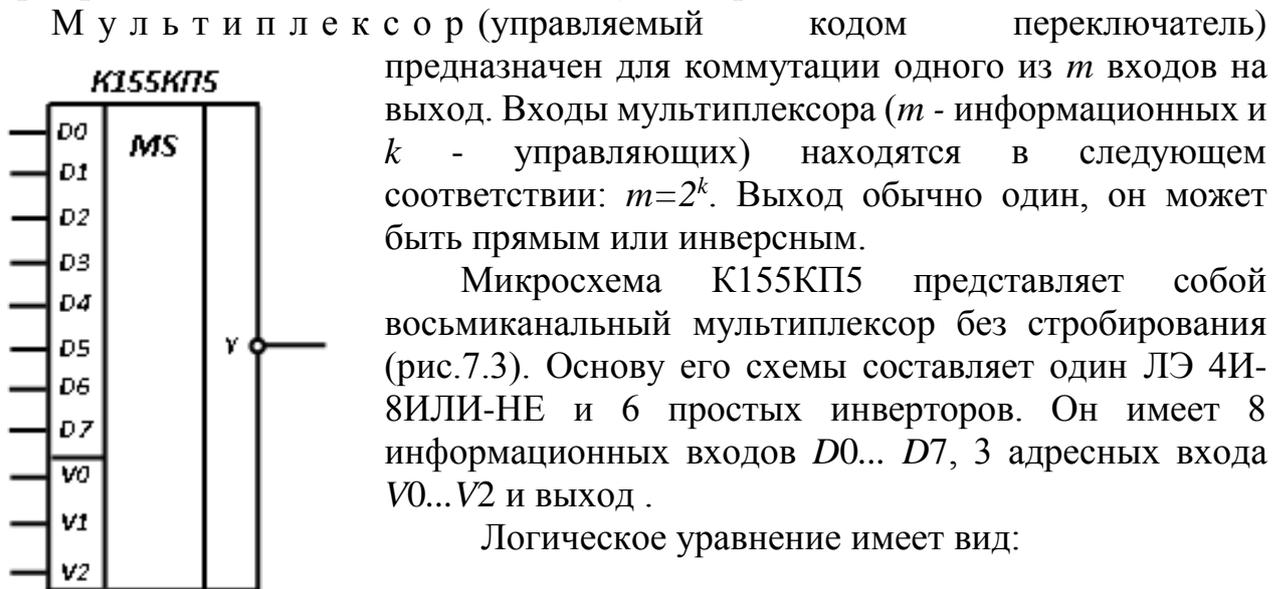
Рисунок 7.4

Входы  $\bar{W}1$  и  $\bar{W}2$  можно использовать как логические, тогда микросхема ИДЗ служит демультиплексором данных. Входы  $A0...A3$  в этом случае используются как адресные, чтобы направить поток данных, принимаемых входами  $\bar{W}1$  или  $\bar{W}2$ , на один из выходов. Подобные задачи возникают при дистанционном управлении, в преобразователях последовательного кода в параллельный и т.п.

Принцип выбора “1 из  $n$ ” используется для управления индикаторами в устройствах отображения информации, в различных схемах распределителей

импульсов по нескольким каналам (в данном случае - до 16). Как видно из рис.7.1, на выходе 1 высокий логический уровень появится только при кодовом наборе 0000, на выходе 2 - при наборах 1000 или 1010.

Если в системах управления применяется генератор тактовых импульсов и четырехразрядный счетчик, то дешифратор можно использовать в качестве делителя частоты (см. рис.7.1) или формирователя импульсов (рис.7.2), благодаря цикличности "перемещения" логических уровней по выходам. Формирование конечной последовательности импульсов может осуществляться различными способами (см. рис.7.2). Например, на выходе 1 длительность сформированного импульса равна половине цикла, т.к. переключение  $\overline{RS}$ -триггера происходит при прохождении нулевого сигнала на выходах 0 и 8 дешифратора. При выборе других точек подключения входа 2 скважность ( $q=T_{\text{цикла}}/t_{\text{имп}}$ ) можно изменять в широких пределах (от 1,1 до 16). В другом примере на рис.7.2 показан простой способ получения пакета из двух импульсов на выходе одного ЛЭ. Аналогичная схемотехника используется и для формирования последовательности импульсов различной длительности.



Логическое уравнение имеет вид:

Рис.7.3

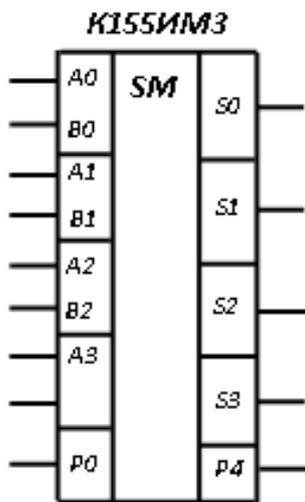
$$\bar{Y} = D_0\bar{V}_2\bar{V}_1\bar{V}_0 + D_1\bar{V}_2\bar{V}_1V_0 + D_2\bar{V}_2V_1\bar{V}_0 + D_3\bar{V}_2V_1V_0 + D_4V_2\bar{V}_1\bar{V}_0 + D_5V_2\bar{V}_1V_0 + D_6V_2V_1\bar{V}_0 + D_7V_2V_1V_0.$$

Состояние мультиплексора определяется таблицей истинности (табл. 7.2). Как видно из таблицы, мультиплексор выполняет функции простого инвертора только по тому каналу, номер которого соответствует двоичному коду адресных входов. Поэтому мультиплексор нашел широкое применение в качестве преобразователя параллельного кода в последовательный, для передачи информации по линиям связи и для последовательного опроса (контроля) при большом числе каналов или устройств.

ТАБЛИЦА 7.2

Адресные входы			Информационные входы								Выход
V2	V1	V0	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	д
0	0	0	0	x	x	x	x	x	x	x	1
0	0	0	1	x	x	x	x	x	x	x	0
0	0	1	x	0	x	x	x	x	x	x	1
0	0	1	x	1	x	x	x	x	x	x	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
1	1	1	x	x	x	x	x	x	x	0	1
1	1	1	x	x	x	x	x	x	x	1	0

ТАБЛИЦА 7.3

Рисунок 7.4  
Сумматор

Входы			Выходы	
$A_i$	$B_i$	$P_i$	$S_i$	$P_{i+1}$
0	0	0	0	0
0	0	1	1	0
0	1	0	1	0
0	1	1	0	1
1	0	0	1	0
1	0	1	0	1
1	1	0	0	1
1	1	1	1	1

Сумматор предназначен для сложения двух чисел, заданных в двоичном коде. Число входов и выходов сумматора определяется разрядностью слагаемых. Одноразрядный двоичный сумматор характеризуется таблицей истинности (табл.7.3). Такой сумматор называется полным, т.к. обрабатывает сигнал переноса с предыдущего разряда  $P_i$  и выдает сигнал переноса на последующий разряд  $P_{i+1}$ . Схемотехника сумматоров строится на ЛЭ "Исключающее ИЛИ" (функция "неравнозначность") для суммирования и ЛЭ И-НЕ для переноса:

$$P_{i+1} = A_i B_i + (A_i \oplus B_i) P_i; \quad S_i = (A_i \oplus B_i) \oplus P_i.$$

Микросхема K155ИМ3 (рис. 7.4) представляет собой четырехразрядный сумматор с параллельным поразрядным сложением и последовательным формированием сигнала переноса. Он имеет два четырехразрядных числа по входам данных  $A_0...A_3$  и  $B_0...B_3$ , а по входу  $P_0$  - сигнал переноса с предыдущего разряда. Сумма разрядов входных чисел появляется на выходах  $S_0...S_3$ . На выходе  $P_4$  выделяется сигнал переноса на последующий разряд.

Суммирование происходит по уравнению:

$$P_0 + 2^0(A_0 + B_0) + 2^1(A_1 + B_1) + 2^2(A_2 + B_2) + 2^3(A_3 + B_3) = 2^0S_0 + 2^1S_1 + 2^2S_2 + 2^3S_3 + 2^4P_4.$$

Сумматор можно использовать для вычитания чисел. Для этого вычитаемое представляют в дополнительном коде, который образуется из обратного (инверсного) кода добавлением к нему единицы. Так, четырехразрядное число  $B$ , записанное в прямом коде  $B_{\text{пр}} = B_3B_2B_1B_0$ , может быть представлено в обратном коде  $B_{\text{обр}} = \bar{B}_3\bar{B}_2\bar{B}_1\bar{B}_0$  и в дополнительном коде  $B_{\text{доп}} = B_{\text{обр}} + 1$ .

Операцию вычитания можно представить в виде

$$A_{\text{пр}} - B_{\text{пр}} = A_{\text{пр}} + B_{\text{доп}} - 10000.$$

Сумматор может работать и как компаратор чисел. Для этого второе сравниваемое число подают в обратном коде (например, через инверторы). Тогда при  $A = B$  на выходах  $S_0 = S_1 = S_2 = S_3 = 1$ ,  $P_4 = 0$ ; при  $A > B$  -  $P_4 = 1$ .

Разрабатываемые схемы будут проще, если учесть, что при использовании микросхем 155 серии на неподключенных входах генерируются 1, поэтому достаточно подключать с наборного поля только нулевые сигналы.

### Предварительное задание к эксперименту

ТАБЛИЦА 7.4

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
Количество импульсов в пакете	1	2	3	4	5	6	1	3
Длительность одиночного импульса, с	3	2	1	1	1	1	4	1
Период повторения пакета, с	8	16	8	16	16	16	16	16
$A$	3	5	7	9	10	12	13	15
$B$	15	14	13	12	7	10	8	4

1. Изучить принцип работы дешифратора К155ИДЗ, мультиплексора К155КП5 и сумматора К155ИМЗ.

2. Используя микросхемы К155ЛА3 (4 ЛЭ 2И-НЕ), К155ЛА4 (3 ЛЭ 3И-НЕ), К155ЛН1 (6 ЛЭ НЕ), К155ЛР1 (2 ЛЭ 2И-2ИЛИ-НЕ) составить схему включения дешифратора в качестве формирователя пакета импульсов с параметрами, заданными табл.7.4. Частота переключения генератора тактовых импульсов равна 1 Гц.

3. Составить схему включения мультиплексора, реализующую мажоритарную логику (на выходе появляется 1, если на всех трех или на любых двух адресных входах имеется 1).

4. Перевести в двоичный код и сложить два числа  $A$  и  $B$ , заданных табл.7.4.

### Порядок выполнения эксперимента

1. Исследовать работу дешифратора в качестве преобразователя кодов. Проверить таблицу соответствия между логическими уровнями на выходах и кодовыми наборами на входах (табл. 7.1).

2. Собрать схему включения дешифратора, составленную в предварительном задании и проверить ее работоспособность. Нарисовать временные диаграммы.

3. Исследовать работу мультиплексора, для этого подать сигналы на информационные входы  $D_0...D_7$  с выходов дешифратора  $\bar{0}...7$ , а адресные входы  $V_0...V_2$  соединить с шинами наборного поля. Проверить таблицу состояний (табл.7.2).

4. Собрать схему включения мультиплексора, реализующую мажоритарную логику, и проверить ее работоспособность. Нарисовать временные диаграммы.

5. Исследовать работу сумматора, набрав на входах двоичные числа  $A$  и  $B$ . Проверить результат суммирования, полученный в предварительном задании.

6. *Факультативно.* Использовать сумматор в качестве вычитателя и компаратора чисел  $A$  и  $B$ . Пояснить результаты.

7. Собрать схему сигнализации нулевого результата сложения ( $S_0=S_1=S_2=S_3=0$ ), используя имеющиеся на лабораторном стенде ЛЭ и один элемент индикации.

### Содержание отчета

Цель работы; таблицы истинности дешифратора и мультиплексора; составленные в предварительном задании схемы включения дешифратора с временными диаграммами; результаты сложения вычитания и сравнения заданных чисел  $A$  и  $B$ ; схема сигнализации нулевого результата сумматора.

### Контрольные вопросы

1. Чем отличаются КЛС от ЛЭ? Дайте сравнительный анализ на конкретных примерах. 2. Объясните назначение и области применения дешифратора. 3. Каков принцип работы исследуемого дешифратора? 4. Каким образом с помощью мультиплексора можно обеспечить постоянный обегаящий контроль 6 различных каналов или выходов ЛЭ? 5. Равноценны ли по своему функциональному назначению управляющие входы дешифратора и адресные входы мультиплексора? 6. Объясните принцип действия сумматора. 7. Как реализуется вычитание двоичных чисел?

## Лабораторная работа № 8 ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИГГЕРНЫХ СХЕМ

**Ц е л ь р а б о т ы:** изучение схем и функциональных возможностей основных типов триггеров; экспериментальное изучение триггеров и схем управления.

### Общие сведения

**Т р и г г е р а м и** называют электронные устройства, обладающие двумя состояниями устойчивого равновесия и способные под воздействием управляющего сигнала переходить скачком из одного состояния в другое. Каждому состоянию триггера соответствует определенный (высокий или низкий) уровень выходного напряжения, который может сохраняться как угодно долго. Поэтому триггеры относятся к цифровым автоматам с памятью. В настоящее время триггеры выполняются на основе логических элементов в виде интегральных микросхем (ИМС). Они включены почти во все серии ИМС.

Триггеры применяются как переключающие элементы самостоятельно или входят в состав более сложных цифровых устройств, таких как счетчики, делители частоты, регистры и др.

В общем случае триггер имеет два выхода: прямой ( $Q$ ) и инверсный ( $\bar{Q}$ ), сигналы на которых противоположны по уровню. Количество входов триггера зависит от его типа. Входы делятся на информационные и командные.

По способу записи информации триггеры делятся на **а с и н х р о н н ы е**, у которых информационные и командные входы совмещены, и **с и н х р о н н ы е** или **т а к т и р у е м ы е**. Последние срабатывают только при поступлении на один из командных входов (синхровход) разрешающего импульса.

По числу ступеней триггеры делятся на **о д н о т а к т н ы е** и **д в у т а к т н ы е**. В однотактных информация на выходах появляется практически одновременно с приходом информационного или синхроимпульса. Такие схемы срабатывают по перепаду сигнала 0-1 (по фронту синхроимпульса). В двухтактных триггерах переключение элементов происходит в два приема и сигнал на выходе появляется с задержкой. Они срабатывают по перепаду сигнала 1-0 (по спаду импульса).

В зависимости от логической структуры схемы управления различают *RS*-, *D*-, *T*-, *JK*-триггеры и др.

Работа триггера может быть описана логическим уравнением, связывающим состояние входов и выходов триггера до его срабатывания ( $t$ ) и после срабатывания ( $t+1$ ). Состояние триггера можно задать таблицей переходов или временной диаграммой его работы.

**А с и н х р о н н ы й RS - т р и г г е р** имеет два установочных входа  $R$  и  $S$ . Схема триггера на ЛЭ 2ИЛИ-НЕ и его условное обозначение показаны на рис.8.1. При  $S = R = 0$  схема устойчива. Это режим хранения информации.

Если  $Q = 1$ , то на входах  $DD2$  оказываются 1 и 0, при которых  $\bar{Q} = 0$ .

ТАБЛИЦА 8.1

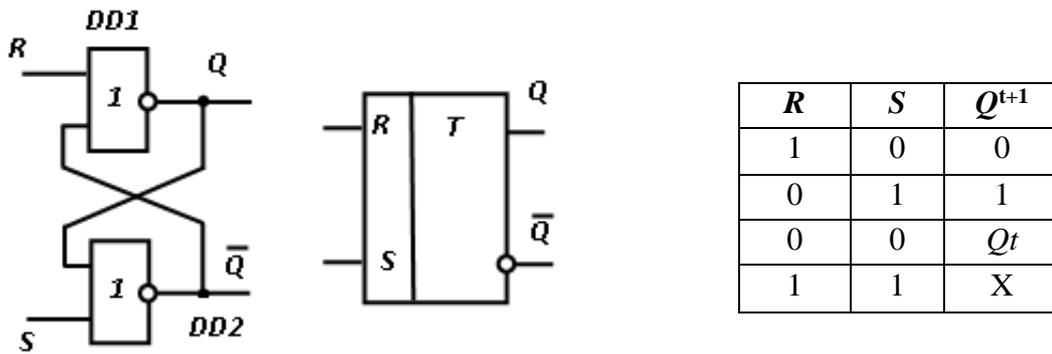


Рисунок 8.1 RS -триггер  
структура, обозначение, таблица состояний

На входах  $DD1 - 0,0$ , что сохраняет этот элемент в состоянии  $Q=1$ . Для изменения состояния триггера на его входы надо подать комбинацию сигналов  $R=1, S=0$ . Тогда на входе  $DD1$  появится высокий уровень и этот элемент перейдет в состояние  $Q=0$ . На входах  $DD2$  установятся сигналы 0, 0 и логический элемент перейдет в состояние  $Q = 1$ . Комбинация  $S=1, R=0$  возвратит триггер в состояние  $Q=1, \bar{Q}=0$ . При комбинации  $S=1, R=1$  состояние триггера неопределенно, эта комбинация запрещена. Работа триггера иллюстрируется таблицей переключений (табл.8.1). Триггер с таким же законом работы можно выполнить на логических элементах 2И-НЕ.

Синхронные RS - триггеры имеют два информационных входа  $R$  и  $S$  и синхровход  $C$ . Схема триггера и его условное обозначение показаны на рис.8.2. Асинхронный RS - триггер дополнен схемой управления на ЛЭ  $DD1-2$ , которая формирует сигналы  $q$  и  $\bar{q}$ , поступающие на его установочные входы. Управление осуществляется низким уровнем сигнала (0), поэтому на входах показан знак инверсии. При  $\bar{C}=1$  любая комбинация  $\bar{R}$  и  $\bar{S}$  дает на

выходах  $q = \bar{q} = 0$ , и асинхронный триггер на элементах  $DD3-4$  находятся в режиме хранения информации. Схема управления сработает только при поступлении низкого уровня на синхровход ( $\bar{C}=0$ ). Тогда  $\bar{R}=1$  и  $\bar{S}=0$  приведет к  $q = 0$  и  $\bar{q}=1$ . Триггер перейдет в состояние  $Q=1$ , а при  $\bar{R}=0, \bar{S}=1$  - в состояние  $Q=0$ .

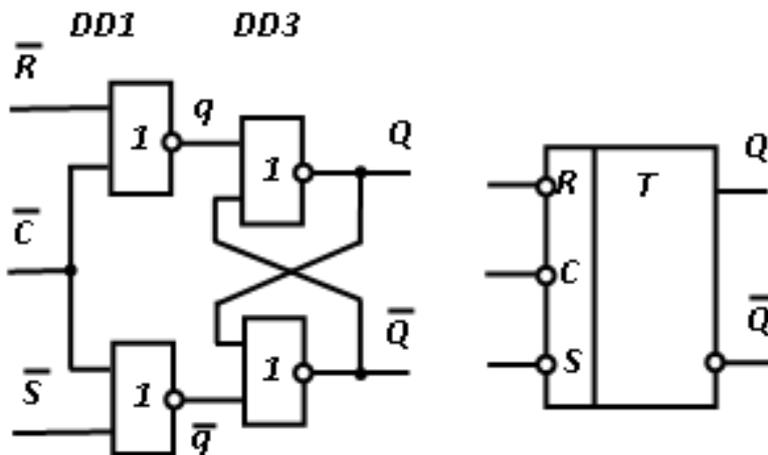


Рисунок 8.2  
Синхронный RS-триггер

Комбинация  $\bar{R} = \bar{S} = \bar{C} = 0$  запрещена. Так как при  $\bar{C} = 1$  любое изменение сигналов на входах игнорируется, синхронные триггеры защищены от воздействия помех.

Синхронный  $D$ -триггер состоит из асинхронного  $RS$ -триггера и схемы управления на ЛЭ. Он имеет информационный вход  $D$  и синхровход  $C$ . Его схема и условное обозначение показаны на рис.8.3. ЛЭ  $DD3-4$  представляют собой  $RS$ -триггер, управляемый инверсными сигналами.

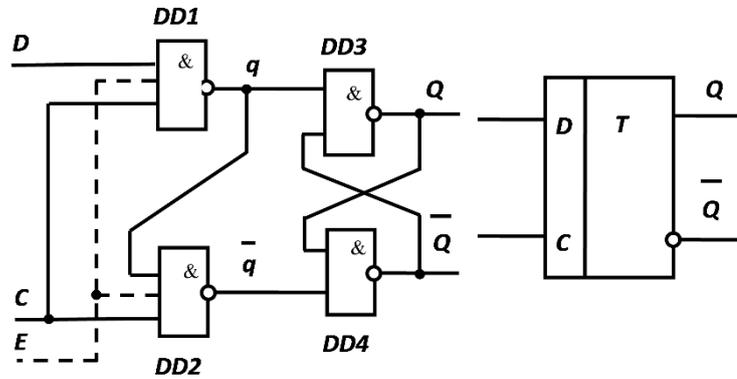


Рисунок 8.3  
Синхронный  $D$ -триггер

Его устойчивое состояние обеспечивается комбинацией  $q = \bar{q} = 1$ . При  $C=0$  на выходах обоих ЛЭ И-НЕ  $DD1-2$  независимо от значения сигнала на входе  $D$  будут поддерживаться высокие уровни и триггер сохраняет предыдущее состояние. С приходом синхроимпульса  $C=1$ , при  $D=1$   $q=0$ ,  $\bar{q}=1$ , и  $RS$ -триггер оказывается в состоянии  $Q=1$ . При  $D=0$   $q=1$ ,  $\bar{q}=0$ , и триггер переходит в состояние  $Q=0$ . Это значение не может измениться до прихода следующего синхроимпульса. Поэтому  $D$ -триггеры называют триггерами задержки - они задерживают информацию на такт. На схеме пунктиром показан вход  $E$ , объединяющий два дополнительных И-входа. Этот вход расширяет возможности схемы. Его называют разрешающим. При  $E=1$  триггер работает в нормальном режиме,  $E=0$  дает возможность сохранить информацию при изменении сигналов на  $D$ - и  $C$ -входах.

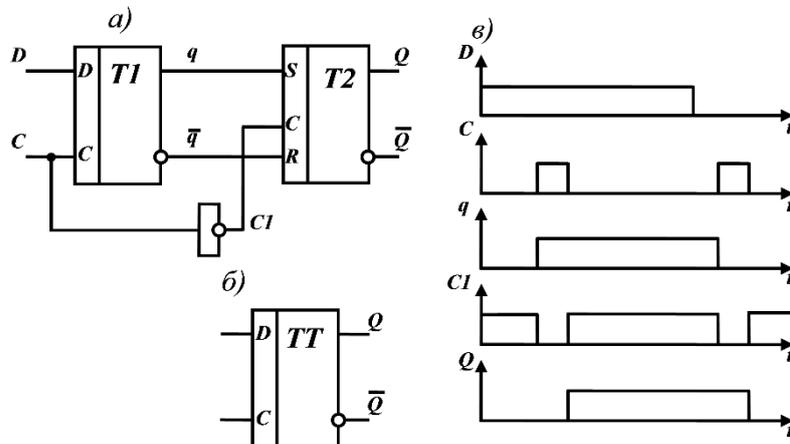


Рисунок 8.4  
Двухтактный  $D$ -триггер

Широкое применение получили д в у х т а к т н ы е  $D$ -т р и г г е р ы. Схема и условное обозначение приведены на рис.8.4 а, б. Он состоит из  $D$ -триггера и синхронного  $RS$ -триггера с объединенными через инвертор  $S$ -входами.

Принцип работы триггера можно проследить по временной диаграмме (рис.8.4в). Сигнал со входа  $D$  записывается в  $T1$  по фронту синхроимпульса. При этом  $C1 = 0$  и  $T2$  сохраняет прежнюю информацию. После окончания синхроимпульса  $C=0$ , и  $T1$  отключается от  $D$ -входа,  $C1 = 1$  и  $T2$  переписывает информацию из  $T1$ .

$JK$ -т р и г г е р является универсальным. Его условное обозначение приведено на рис.8.5а. Он имеет два установочных входа  $R$  и  $S$ , информационные входы  $J$  и  $K$  и синхровход  $C$ .

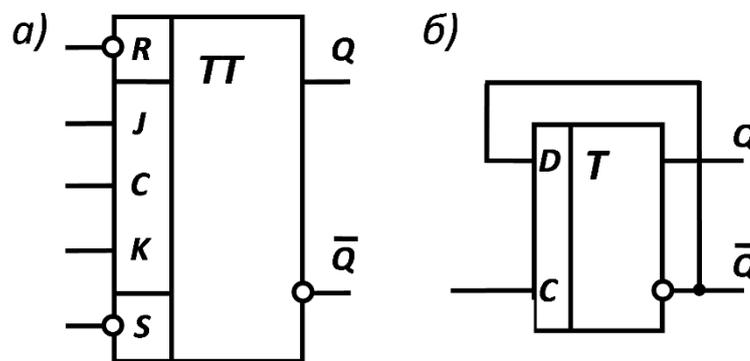


Рисунок 8.5

а)  $JK$ -триггерб) реализация  $T$ - на базе  $D$ - триггера

Установочные входы обладают приоритетом над другими. С их помощью триггер устанавливают в состояние  $Q=1$  или  $Q=0$  независимо от сигналов на всех других входах.  $J$ - и  $K$ -входы работают по разрешающему импульсу на  $C$ -входе. При комбинации  $J=1$  и  $K=0$  на выходе  $Q=1$ . При  $J=0$  и  $K=1$  триггер переходит в состояние  $Q=0$ , а если  $J=K=1$ , то с приходом каждого синхроимпульса он меняет состояние. Работу триггера можно описать логическим уравнением

$$Q_{t+1} = J_t \cdot \bar{Q}_t + \bar{K}_t \cdot Q_t$$

На основе  $JK$ -триггера можно построить любой другой тип триггера. Поэтому они массово производятся практически во всех сериях ИМС.

$T$ -т р и г г е р или с ч е т н ы й т р и г г е р имеет один информационный вход  $T$ . Каждый импульс на этом входе переводит его в новое состояние. Это соответствует работе  $JK$ -триггера при  $K=J=1$ .

Такой же триггер можно получить на основе  $D$ -триггера (рис.8.5б). Поэтому производить  $T$ -триггеры в виде самостоятельных изделий нет смысла и их нет в сериях ИМС.

$T$ -триггеры используются как делители частоты на 2 или счетчики по модулю 2.

### Предварительное задание к эксперименту

ТАБЛИЦА 8.2

Вариант	1	2	3	4
Тип триггера	Синхронный RS	Однотактный D	Двухтактный D	Двухтактный D
Тип ИМС	K155ЛА3	K155ЛА3	K155ЛА3 K155ТМ2	K155ТВ1
Вариант	5	6	7	8
Тип триггера	T	T	T	Асинхронный RS
Тип ИМС	K155ТВ1	K155ЛА3 K155ТМ2	K155ЛА3 K155ТВ1	K155ЛА3

Составить схему триггера, заполнить таблицу переключений, начертить временную диаграмму его работы. Тип триггера и ИМС, которые можно использовать, приведены в табл.8.2.

### Порядок выполнения эксперимента

1. Используя логические элементы K155ЛА3, собрать схему асинхронного RS-триггера. Подать с наборного поля сигналы на его входы, выходы подключить к светодиодам. Перебирая комбинации сигналов на входах, заполнить таблицу переключений.

2. Проверить работу D-триггера на ИМС K155ТМ2. Информационный вход D включить к наборному полю, а синхровход С к источнику импульсов (переключатель режима работы в положении «Ручное»). Заполнить таблицу переключений, отметив момент переключения триггера (0-1 или 1-0).

3. Проверить работу JK-триггера на ИМС K155ТВ1. Подключить установочные входы R, S и информационные J, K к наборному полю, а синхровход С к генератору импульсов (переключатель режима работы в положении - «Ручное»). Заполнить таблицу переключений, отметив моменты переключения триггера (0-1 или 1-0).

4. Собрать схему триггера согласно предварительного задания и проверить его работу. Сравнить с результатами, полученными в предварительном задании.

5. Исследовать работу триггера K155ТМ2 в режиме T-триггера. На информационный вход подать сигнал от генератора импульсов (переключатель режима работы в положении 1000 Гц). Включить осциллограф и зарисовать осциллограммы входного и выходного напряжений. Определить период входных и выходных импульсов и частоту их следования  $f_1$  и  $f_2$ .

6. Включить последовательно два T-триггера на ИМС K155ТМ2. Определить частоту следования выходных импульсов  $f_3$ . Проверить соотношения  $f_1/f_2$  и  $f_1/f_3$ .

### Содержание отчета

Цель работы; схема триггера, составленная по предварительному заданию, временные диаграммы, таблицы переходов; схема соединений входов и выходов  $D$ -триггера для получения  $T$ -триггера; схема соединений входов  $JK$ -триггера для получения  $D$ - и  $T$ -триггера; осциллограммы импульсов на входе и выходе  $T$ -триггера и делителя частоты с указанием масштаба напряжения и времени.

### Контрольные вопросы

1. Что называют триггером? 2. Как классифицируются триггеры по способу записи информации и по функциям? 3. Как работают  $RS$ -триггеры? 4. Чем отличаются двухтактные триггеры от одноктактных? 5. Зачем нужен разрешающий вход  $E$ ? 6. Почему  $JK$ -триггеры называют универсальными? 7. Для чего используют  $T$ -триггеры? 8. Как получить  $T$ -триггер на основе  $D$ - или  $JK$ -триггеров? 9. Начертите схему делителя частоты на 8. Поясните его работу на временной диаграмме.

## Лабораторная работа № 9 СЧЕТЧИКИ ИМПУЛЬСОВ И РЕГИСТРЫ

**Ц е л ь р а б о т ы :** изучение устройства и работы счетчиков импульсов и регистров.

### Общие сведения

**С ч е т ч и к** – это последовательностное устройство, которое может иметь не более чем  $2^n$  внутренних состояний, где  $n$  - число триггеров, входящих в состав счетчика. Счетчики используются для подсчета числа двоичных импульсов. В ЭВМ они применяются для формирования адресов, подсчета количества циклов и т.д.

Основным параметром счетчика является **к о э ф ф и ц и е н т** или **м о д у л ь с ч е т а**  $K$  - это наибольшее число импульсов, которое может быть подсчитано счетчиком и равное максимальному числу внутренних состояний  $2^n$ . В зависимости от модуля счета различают двоичные ( $K=2^n$ , где  $n$  - число триггеров), декадные или десятичные ( $K=10^m$ , где  $m$  - число десятичных разрядов), с произвольным постоянным и с переменным модулем.

По способу изменения выходного кода счетчики делятся на **с у м м и р у ю щ и е**, **в ы ч и т а ю щ и е** и **р е в е р с и в н ы е**. У суммирующего счетчика выходной код увеличивается на единицу для каждого нового состояния, а у вычитающего - уменьшается на единицу. Реверсивный счетчик может работать в обоих режимах.

По способу управления внутренними триггерами счетчики подразделяются на **а с и н х р о н н ы е** (последовательные) и **с и н х р о н н ы е** (параллельные).

В **а с и н х р о н н ы х** счетчиках переключение последующего триггера осуществляется выходным сигналом предыдущего, а входные счетные импульсы приходят на вход только младшего (нулевого) триггера.

Рассмотрим работу асинхронного суммирующего счетчика, выполненного на четырех *JK*-триггерах (рис.9.1, а). Работу счетчика однозначно определяет таблица состояний (табл.9.1) или временная диаграмма (рис.9.1, б).

В исходном состоянии на объединенные входы  $R$  всех триггеров подается низкий уровень сигнала ( $R=0$ ) для предварительного обнуления счетчика и установки на всех прямых выходах логического нуля:  $Q_1=Q_2=Q_3=Q_4=0$

Счетные импульсы приходят на вход первого триггера  $T_1$ . Выходами счетчика являются прямые выходы триггеров, с которых информация о состоянии предыдущего триггера передается на синхровход последующего. Значение переменной  $Q_i$  соответствующего разряда счетчика изменяется, когда переменная в соседнем младшем разряде  $Q_{i-1}$  переходит из состояния “1” в “0” (см. табл.9.1). Для реализации этого свойства последовательного счетчика *JK*-триггеры в схеме работают в режиме *T*-триггера с переключением в новое состояние по спаду входного синхроимпульса. Таким образом, частота выходного сигнала каждого триггера в два раза меньше, чем частота сигнала на его входе (см. рис.9.1, б). Счетчик на выходах формирует нарастающие кодовые

наборы от 0000 до 1111, являющиеся двоичными эквивалентами десятичных чисел от 0 до 15. Шестнадцатый импульс переводит все триггеры в исходное нулевое состояние ( $K=2^4=16$ ).

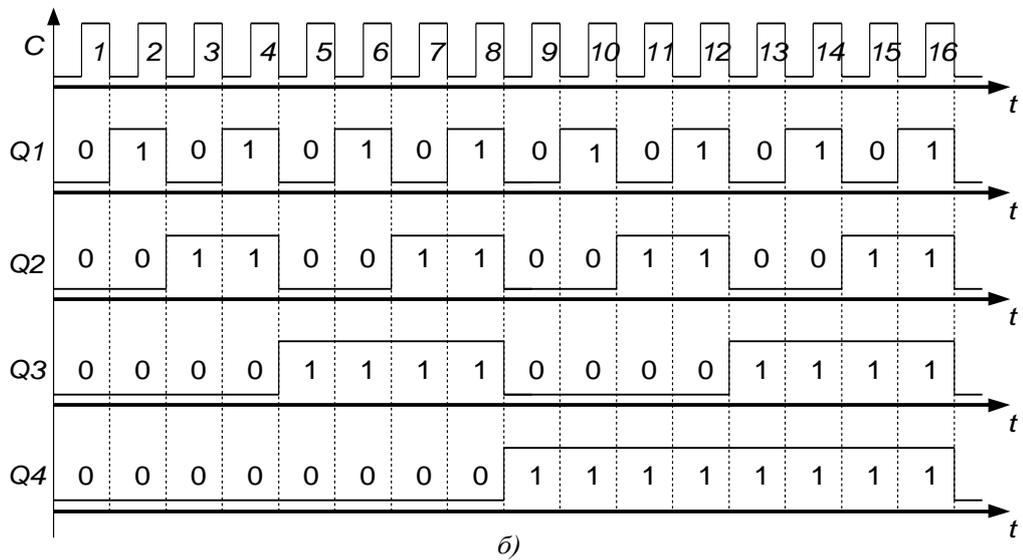
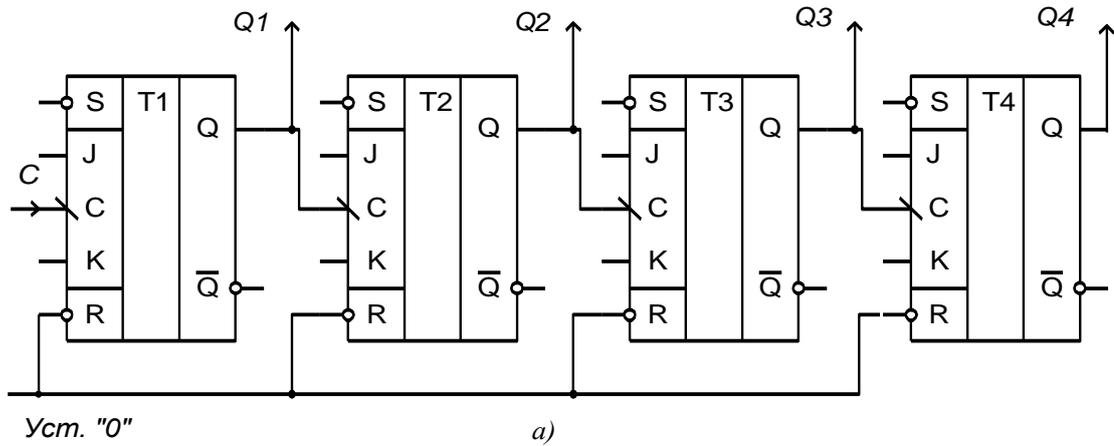


Рисунок 9.1  
Суммирующий счетчик, а) структура, б) временная диаграмма

ТАБЛИЦА 9.1

Число импульсов	Состояние прямых выходов			
	$Q_4$	$Q_3$	$Q_2$	$Q_1$
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
...	...	...	...	...
15	1	1	1	1
16	0	0	0	0

Если в качестве выходов счетчика использовать прямые выходы триггеров, а на синхровходы последующих триггеров подавать сигналы с инверсных выходов предыдущих триггеров, получим вычитающий счетчик. Перед началом счета должна быть предусмотрена установка всех его триггеров в исходное состояние "1". При счете импульсов вычитающий счетчик будет формировать на прямых выходах триггеров убывающие кодовые наборы от 1111 до 0000.

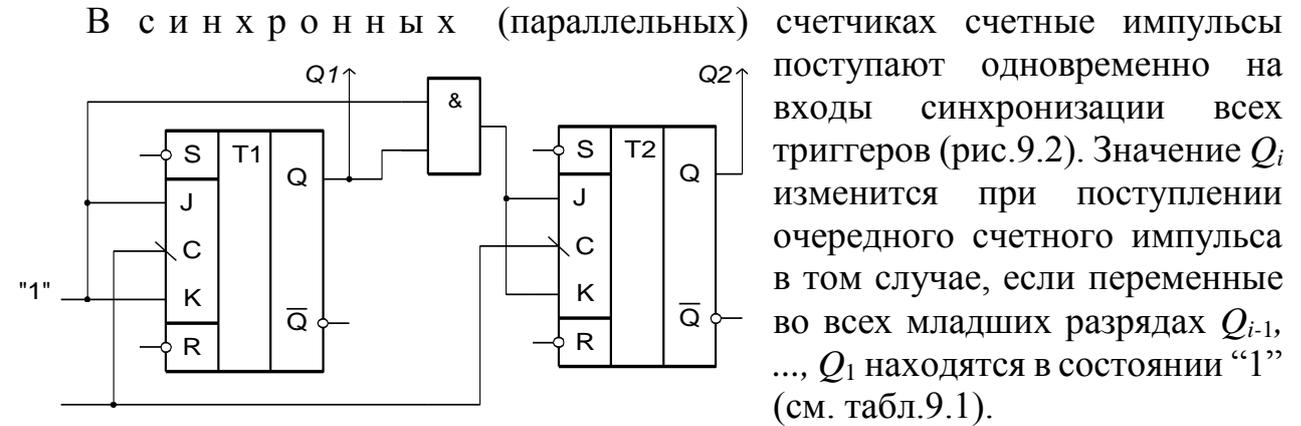


Рисунок 9.2  
Синхронный счетчик

Счетчики изготавливаются в виде готовых микросхем. Например, микросхема К155ИЕ2 - это двоично-десятичный счетчик, микросхема К155ИЕ4 имеет модуль счета 13, а К155ИЕ6 - реверсивный счетчик с предустановкой.

В тех случаях, когда требуется счетчик с модулем счета, меньшим, чем  $2^n$  состояний, избыточные состояния исключаются с помощью комбинационной

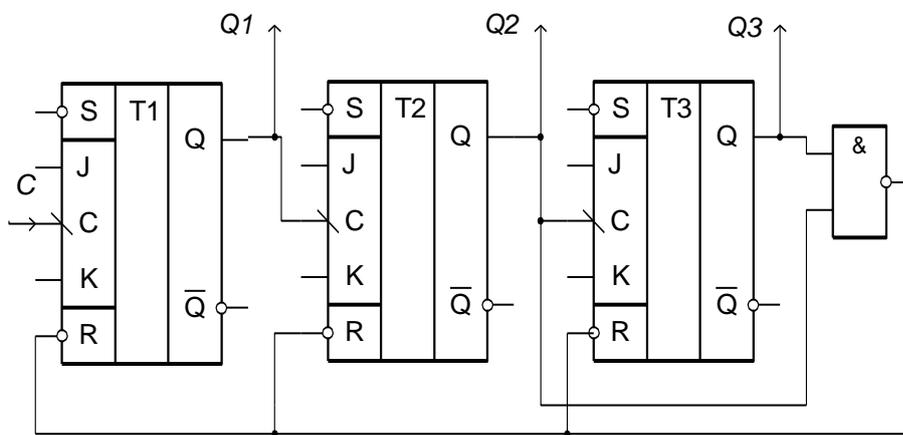


Рисунок 9.3  
Счетчик на шесть состояний

Логический элемент 2И-НЕ в данном случае играет роль комбинационной схемы, выявляющей значение выходного кода, при котором счетчик должен устанавливаться в начальное состояние.

Микросхема К155ИЕ7 представляет собой двоичный четырехразрядный реверсивный счетчик широкого применения. Его основу составляют четыре JK-триггера, а вспомогательные операции выполняются 18 логическими элементами. Счетчик имеет управляющий вход  $V$ , два счетных входа (прямого

счета  $C1$  и обратного счета  $C2$ ), четыре информационных входа предустановки  $D3, D2, D1, D0$ , соответствующие выходы  $Q3, Q2, Q1, Q0$ , а также два инверсных выхода переноса  $B$  и  $P$ . Условное обозначение приведено на рис. 9.4.

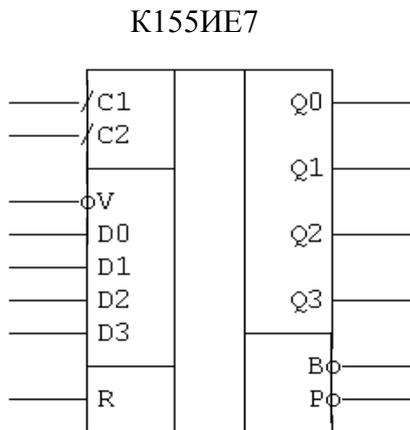


Рисунок 9.4  
Четырех разрядный  
реверсивный счетчик

В зависимости от состояний входов возможны три режима работы счетчика:

- режим счета реализуется, когда  $V = 1$ : при подаче счетных импульсов на вход  $C1$  происходит увеличение двоичного выходного кода, при подаче импульсов на вход  $C2$  – уменьшение;

- режим параллельной записи обеспечивается, когда  $V = 0$ , при этом кодовые наборы, установленные на информационных входах, повторяются на выходах соответствующих разрядов, независимо от состояния счетных входов;

- сброс счетчика осуществляется подачей высокого уровня напряжения на вход  $R$ , что приведет к отключению всех других входов и запрещению записи.

Регистры широко используются для передачи, хранения и преобразования двоичных кодов. В зависимости от функционального назначения различают регистры сдвига (последовательные) и регистры памяти (параллельные).

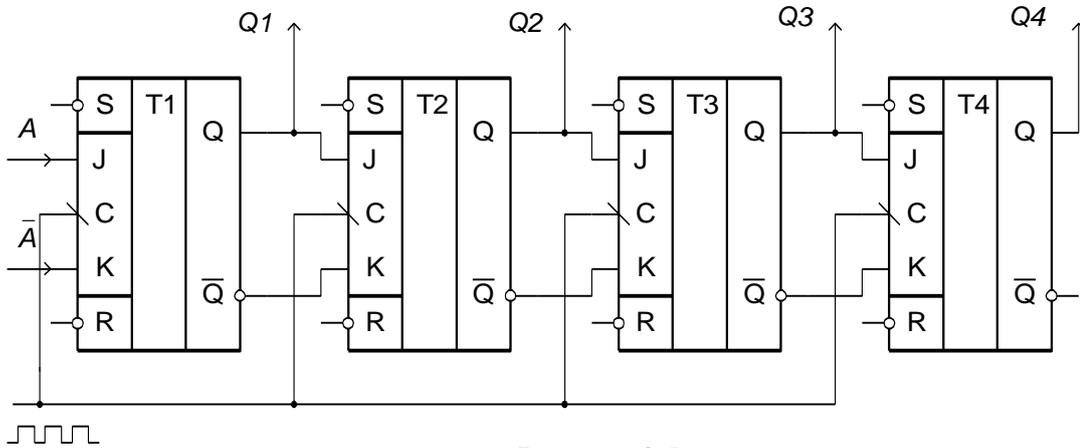


Рисунок 9.5  
Регистр сдвига

В четырехразрядном регистре сдвига, выполненном на  $JK$ -триггерах (рис.9.5), с приходом каждого тактового импульса на входы  $C$  происходит последовательная запись сигналов с прямых и инверсных выходов на информационные входы каждого последующего триггера, от младшего разряда к старшему.

Если на информационных входах триггера  $T1$   $J = 0$ ,  $K = 1$ , то в исходном состоянии на выходах  $Q1=0, \bar{Q}2=1$ . Эти же уровни сигналов последовательно передаются каждому триггеру после прихода тактовых импульсов, но не изменяют их состояния. Если же на входе первого триггера  $J = 1$ ,  $K = 0$ , то после первого тактового импульса на его выходах установятся новые логические уровни,  $Q1=1, \bar{Q}1=0$ ; вторым тактовым импульсом переключится второй триггер и т.д. (рис.9.6). Очевидно, что четвертый тактовый импульс сдвинет уровень логической 1 в четвертый триггер, и на выходах регистра появится кодовый набор 1111. В этом случае можно считать, что регистр работает в режиме преобразователя, с последовательным вводом и параллельным выводом информации объемом 4 бита.

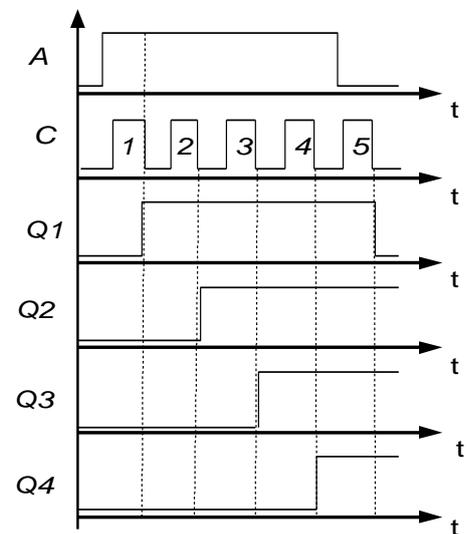


Рис.9.6

Микросхема К155ИР1 (рис.9.7) является универсальным

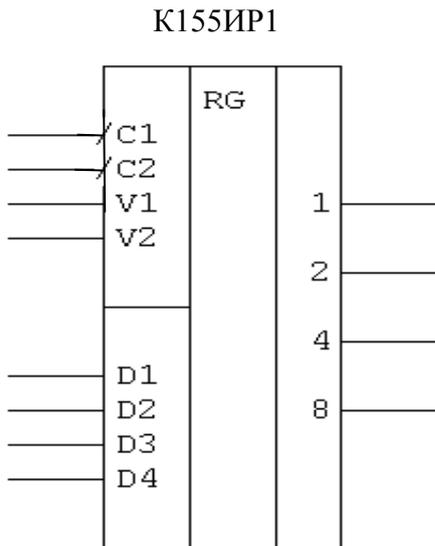


Рисунок 9.7  
Регистр сдвига

четырёхразрядным регистром сдвига. Основу этой ИС составляют четыре триггера и одиннадцать логических элементов. Регистр имеет тактовый вход сдвига *C1* и информационный вход *V1* для записи последовательных сигналов, четыре информационных входа *D1*, *D2*, *D3*, *D4* параллельной записи, тактовый вход *C2* ввода этой информации, а также вход *V2* выбора режима работы и выходы 1-2-4-8 всех четырех разрядов. Два основных режима работы “Сдвиг” и “Запись” выбираются по уровню сигнала на входе *V2*.

Если на вход *V2* подается логический 0, то регистр работает в режиме сдвига информации от младшего разряда к старшему. Любой последовательный кодовый набор на входе *V1* перемещается на выходы 1-2-4-8 отрицательными перепадами четырех тактовых импульсов по входу *C1*.

Если на вход *V2* подается сигнал 1, то обеспечивается режим параллельной записи в регистр любого кодового набора со входов *D1*, *D2*, *D3*, *D4* по срезу тактового импульса на входе *C2*.

Регистры памяти обычно выполняются на двухступенчатых *D*-триггерах и предназначаются для приема, хранения и передачи двоичной информации в виде параллельного кода. Входная информация одновременно подается на входы регистра и при поступлении синхронизирующего импульса записывается и хранится в разрядах регистра.

М и к р о с х е м а К155ТМ5 (рис.9.8) представляет собой

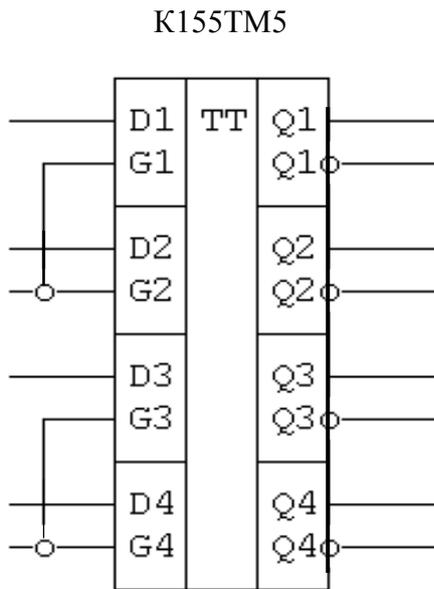


Рисунок 9.8  
Регистр памяти

четырёхразрядный регистр памяти. В одном корпусе этой ИС находится четыре независимых  $D$ -триггера, с информационными входами  $D4...D1$  и прямыми выходами  $Q4...Q1$ . Управление работой ИС осуществляется по объединенным попарно входам синхронизации  $G1-G2$  и  $G3-G4$ .

Использование двухступенчатых триггеров задержки обуславливает различные режимы работы данной схемы: запись в первую ступень и хранение информации производится непрерывно, однако передача сигнала во вторую ступень на выходы запрещается уровнем логического нуля на входах синхронизации. Если же на входы синхронизации поступают короткие стробирующие импульсы, то текущее значение входного сигнала передается во вторую ступень и сохраняется на выходах до прихода следующего импульса (режим ступенчатой передачи). При уровне логической 1 на входах синхронизации осуществляется сквозная передача информации по всем четырем каналам.

### Предварительное задание к эксперименту

1. Составить схему последовательного суммирующего счетчика на основе  $JK$ -триггеров с модулем счета, заданным в табл. 9.2. Для исключения избыточных состояний использовать комбинационные схемы на логических элементах 2И-НЕ и 3И-НЕ.

ТАБЛИЦА 9.2

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
Модуль счета	3	5	7	9	10	11	12	14

## 2. Составить таблицу переключений счетчика.

**Порядок выполнения эксперимента**

1 Ознакомиться с лабораторным стендом: найти на стенде источники логических сигналов(0 и 1) и импульсов (0-1, 1-0) индикаторы состояния выходов триггеров. Для получения параллельного четырехразрядного двоичного кода можно воспользоваться наборным полем на стенде «Логические элементы и комбинационные схемы»

2 Собрать схему четырехразрядного последовательного суммирующего счетчика на JK-триггерах ИС К155ТВ1 (рис.9.1, а). Для индикации состояний триггеров выходы  $Q_4, Q_3, Q_2, Q_1$  подключить к светодиодам. Установить счетчик в исходное состояние  $Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4 = 0$ , подав с наборного поля на  $\bar{R}$  -входы сигнал нуля. От источника импульсов подать на вход счетчика 15 импульсов и составить таблицу переключений.

3 Собрать схему вычитающего счетчика, подключив прямые выходы триггеров к индикаторам, а инверсные выходы триггеров младших разрядов – на синхровходы триггеров последующих старших разрядов. Предусмотреть установку всех триггеров счетчика в исходное состояние  $Q_1=Q_2=Q_3=Q_4=1$ . Проверить работу схемы, составить таблицу переключений вычитающего счетчика.

4. Собрать схему счетчика с заданным в предварительном задании модулем счета. Проверить работоспособность схемы и соответствие таблицы переключений.

5. Собрать схему двухразрядного параллельного счетчика на триггерах К155ТВ1 и ЛЭ К155ЛА4 (рис. 9.2). Проверить его работу.

6. Собрать схему четырехразрядного регистра сдвига на триггерах К155ТВ1 (рис.9.5). Подать на J-вход прямой, на K-вход инверсный логические сигналы. На синхровходы С подать сигналы от источника импульсов. Исследовать работу регистра. Начертить временную диаграмму.

7. Проверить работу счетчика К155ИЕ7. В режиме счета на суммирование или вычитание импульсы подавать на соответствующий вход счетчика от источника импульсов. В режиме предустановки параллельный код на информационные входы  $D_3, D_2, D_1, D_0$  подать с наборного поля лабораторного стенда «Логические элементы и комбинационные схемы».

8. Ознакомиться с работой регистра памяти К155ТМ5. С шин наборного поля подать информацию (любое число в двоичном коде) на информационные входы  $D$ , а на разрешающие входы  $C1-C2$  и  $C3-C4$  подать «1». На выходы регистра подключить светодиоды. Изменяя информацию на  $D$ -входах, убедитесь, что эта информация передается на выходы регистра. Поочередно подавая «0» на входы  $C1-C2$  и  $C3-C4$  определить, как будет работать регистр при изменении информации на  $D$ -входах.

9. Ознакомиться с работой регистра сдвига К155ИР1. В режиме параллельной записи ( $V2 = 1$ ) подать с наборного поля на параллельные входы двоичный код 1010. Убедиться, что по срезу тактового импульса на входе  $C2$

информация с параллельных входов запишется в регистр и появится на его выходах.

10. Установить режим последовательного сдвига информации в регистре К155ИР1 ( $V_2 = 0$ ). На последовательный вход  $V_1$  подать «1», на вход  $C_1$  подать нужное количество импульсов, чтобы в регистре записался код «1111». На вход  $V_1$  подать «0», и подать один импульс на вход  $C_1$ . На выходе регистра должен появиться код «1110». Подать «1» на вход  $V_1$  и три импульса на вход  $C_1$ . Записать какой код появится на выходе регистра?

### Содержание отчета

Цель работы; схема счетчика с заданным табл.9.1 модулем счета и таблица переключений его триггеров; схема четырехразрядного последовательного суммирующего счетчика на JK-триггерах (рис.9.1, а) и таблица его переключений; схема двухразрядного параллельного счетчика (рис.9.2); схема четырехразрядного регистра сдвига (рис.9.5) и временные диаграммы его работы; временные диаграммы работы регистра памяти К155ТМ5 и регистра сдвига К155ИР1 в режиме последовательно-параллельного преобразователя.

### Контрольные вопросы

1. Какие типы счетчиков Вы знаете? 2. Поясните работу суммирующего и вычитающего счетчиков. 3. Что такое реверсивный счетчик? 4. Как строятся параллельные счетчики? 5. Приведите примеры использования двоичных и декадных счетчиков. 6. Объясните принцип действия регистра памяти. 7. Какие способы используются для увеличения числа разрядов счетчиков и регистров?

**Лабораторная работа №10**  
**ИССЛЕДОВАНИЕ НА ПЭВМ КАСКАДА УСИЛЕНИЯ НА БИПОЛЯРНОМ**  
**ТРАНЗИСТОРЕ ПО СХЕМЕ ОЭ**

Ц е л ь р а б о т ы : изучить принцип работы усилительного каскада с ОЭ и исследовать влияние элементов схемы на параметры и характеристики усилителя.

**Общие сведения**

Каскад усиления переменного тока по схеме ОЭ построен на биполярном транзисторе *n-p-n* (рис.10.1). Расчет каскада сводится к выбору точки покоя на статической линии нагрузки, определению величин  $R_K$  и  $R_B$  по заданным параметрам нагрузки, например,  $U_{\text{вых.м}}$  и  $R_H$ , и напряжению источника питания  $E_K$ .

Выбранная точка покоя должна обеспечить требуемую величину тока в нагрузке, напряжения на нагрузке без нелинейных искажений и удовлетворять предельным параметрам транзистора. Поэтому ток покоя:

$$I_{\text{кп}} \geq I_{\text{нм}} = U_{\text{вых.м}} / R_H.$$

Напряжение покоя обычно выбирается  $U_{\text{кэп}} = E_K/2$ , чтобы обеспечить максимальное выходное напряжение без искажений.

Уравнение статической линии нагрузки

$$I_K = \frac{E_{\text{э}} - U_{\text{эу}}}{R_{\text{э}}}.$$

Линию нагрузки можно построить в координатах  $I_K, U_{\text{кэ}}$  по двум точкам. Одна из них - точка покоя **П**, координаты которой определены. Вторая может быть получена согласно уравнению - если принять  $I_K=0$ , то  $U_{\text{кэ}} = E_K$ . Построение статической линии нагрузки показано на рис. 10.2 (линия *ав*).

Чтобы обеспечить заданный режим покоя, надо рассчитать величины  $R_K$  и  $R_B$ :

$$R_K = \frac{E_{\text{э}} - U_{\text{эу}}}{I_{\text{эп}}};$$

$$R_B = \frac{E_{\text{э}} - U_{\text{бп}}}{I_{\text{бп}}}; I_{\text{бп}} = I_{\text{кп}}/h_{21}.$$

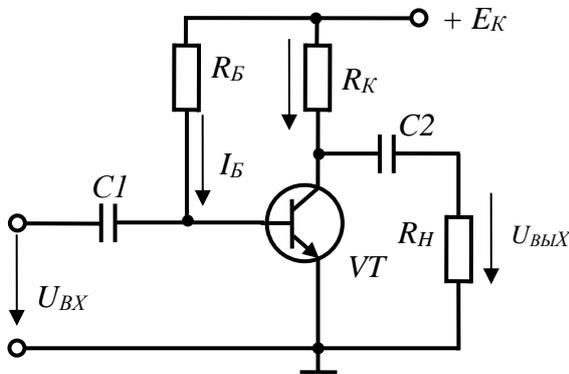


Рисунок 10.1  
Усилительный каскад

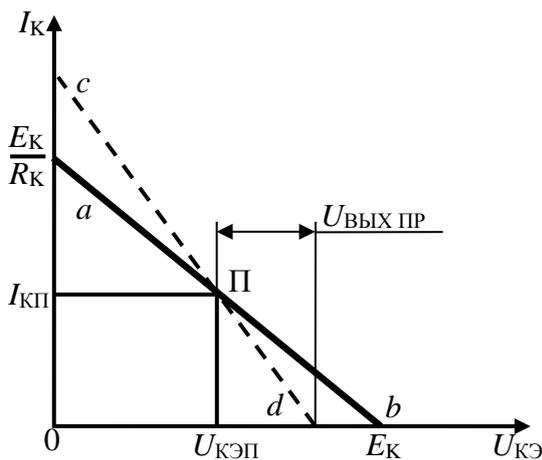


Рисунок 10.2.  
Линия нагрузки каскада

При работе каскада в режиме холостого хода и  $i_{\text{вх}} = I_{\text{вх.м}} \sin \omega t$  рабочая точка перемещается по статической линии нагрузки в обе стороны от точки покоя. Амплитуда переменной составляющей напряжения коллектор-эмиттер или равного ей выходного напряжения не может быть больше  $E_{\text{к}}/2$ .

При работе каскада на нагрузку в коллекторную цепь параллельно  $R_{\text{к}}$  включается  $R_{\text{н}}$ . Поэтому режим работы каскада меняется. Рабочая точка перемещается по динамической линии нагрузки, уравнение которой

$$\Delta u_{\text{эу}} = \Delta i_{\text{эу}} \frac{R_{\text{к}} R_{\text{н}}}{R_{\text{э}} + R_{\text{н}}};$$

Динамическая линия нагрузки должна проходить через точку покоя  $\Pi$  (частный случай -  $\Delta i_{\text{кэ}}=0$ ). Вторую точку можно получить, задавшись приращением  $\Delta i_{\text{к}}$  и подсчитав изменение напряжения  $\Delta U_{\text{кэ}}$  относительно координат точки покоя. Динамическая линия нагрузки показана на рис.10.2 (с-д). Очевидно, что угол между осью  $U_{\text{кэ}}$  и динамической линией нагрузки тем больше, чем меньше  $R_{\text{н}}$  (при  $R_{\text{н}} = 0$  он составит  $90^\circ$ ). В связи с этим предельная амплитуда выходного напряжения  $U_{\text{вых пр}}$  с уменьшением  $R_{\text{н}}$  становится меньше  $E_{\text{к}}/2$ . Это может вызвать появление нелинейных искажений. Если заданное значение  $U_{\text{вых.м}}$ , больше, чем  $U_{\text{вых пр}}$ , чтобы избежать нелинейных искажений, надо сместить точку покоя. Увеличивают  $I_{\text{кп}}$  и анализ повторяют.

Динамические параметры каскада:

$$k_u = \frac{h_{21}}{h_{11}} \frac{R_{\text{э}} R_{\text{н}}}{R_{\text{э}} + R_{\text{н}}};$$

$$k_i = h_{21} \frac{R_{\text{э}}}{R_{\text{э}} + R_{\text{н}}};$$

$$k_p = k_u k_i.$$

### Предварительное задание к эксперименту

Транзистор каскада имеет следующие параметры:

$$h_{11} = 0,5 \text{ кОм}; h_{21} = 25; h_{22} = 0,3 \text{ мкСм}; h_{12} = 0.$$

Напряжение база-эмиттер  $U_{\text{БЭ}}$  принять равным во всех режимах 0,6 В. Напряжением  $U_{\text{кэ}}$  в режиме насыщения пренебречь. Напряжение источника питания  $E_{\text{к}} = 12 \text{ В}$ .

1. Рассчитать величину  $R_{\text{к}}$ , которая обеспечит на холостом ходу ( $R_{\text{н}} = \infty$ ) заданный в таб.10.1. коэффициент усиления. Начертить в координатах  $I_{\text{к}}$ ,  $U_{\text{кэ}}$  линию нагрузки. Рассчитать сопротивление  $R_{\text{Б}}$ , которое позволит получить максимальную амплитуду выходного напряжения  $U_{\text{вых.м}}$ , без искажений. Показать положение точки покоя на линии нагрузки и определить предельную величину  $U_{\text{вых пр}}$ .

2. Определить амплитуду входного напряжения  $U_{\text{вх.м}}$ , соответствующего определенному в п.1 значению  $U_{\text{вых пр}}$ .

3. Рассчитать при заданном в табл. 10.1 сопротивлении нагрузки  $R_{\text{н}}$  значения коэффициентов усиления  $k_u$ ,  $k_p$ ,  $k_i$ . Построить динамическую линию

нагрузки и определить предельную величину  $U_{\text{вых.}m}$ , сравнить с предыдущими результатами.

4. Рассчитать амплитуду входного напряжения  $U_{\text{вх.}m}$ , позволяющего получить максимальное выходное напряжение без искажений.

5. Определить  $R_H$ , при котором  $k_p$  достигает максимального значения. Рассчитать это значение  $k_p$ .

ТАБЛИЦА 10.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
$k_u$	35	40	45	50	55	60	65	70
$R_H$ , кОм	0,5	1,0	1,5	2,02	2,5	3,0	3,5	4,0

### Порядок выполнения эксперимента

Математическая модель каскада усиления реализована в программе LAB\_UK.EXE. При запуске она иллюстрирует работу каскада при выбранных в качестве примера значениях  $R_K$ ,  $R_B$ ,  $R_H$  и  $U_{\text{вх.}m}$ , которые высвечиваются на экране монитора. На экран выводятся линии нагрузки с указанием положения точки покоя, осциллограммы входного и выходного напряжений, значения коэффициентов усиления и параметры точки покоя. После нажатия клавиши “Ввод” изображается амплитудная характеристика каскада, и программа переходит в диалоговый режим.

Ввод новых значений  $R_K$ ,  $R_B$ ,  $R_H$  и  $U_{\text{вх.}m}$  производится в рамку, которая высвечивается у соответствующей величины. Перемещение рамки с помощью клавиш “Вверх”, “Вниз”. После ввода данных нажать клавишу “Ввод”.

1. Ввести рассчитанные значения  $R_K$ ,  $R_B$  и  $R_H=1000$  кОм для режима холостого хода. Записать значение  $k_u$ , параметры режима покоя и начертить с экрана в масштабе амплитудную характеристику каскада. По характеристике определить  $U_{\text{вых пр}}$  и сравнить с результатом расчета предварительного задания.

2. Увеличить в 2 раза  $R_K$ . Записать значение  $k_u$  и нанести на предыдущий график амплитудную характеристику каскада в этом режиме. Объяснить изменения  $k_u$ .

3. Ввести рассчитанное значение  $R_K$  при заданном  $R_H$ . Записать значения  $k_u$ ,  $k_p$ ,  $k_i$  и сравнить с расчетными. На предыдущем графике нанести амплитудную характеристику. Определить  $U_{\text{вых пр}}$ . Сравнить с расчетным.

4. Ввести рассчитанную в п.4 предварительного задания величину  $U_{\text{вх.}m}$  и проверить отсутствие искажений. Перечертить с экрана осциллограммы входного и выходного напряжений.

5. Увеличить  $U_{\text{вх.}m}$  в два раза, обратить внимание на появление нелинейных искажений. Перечертить осциллограммы входного и выходного напряжений.

6. Изучить влияние  $R_B$  на форму  $U_{\text{вых}}$ , для чего ввести при первоначальном значении  $U_{\text{вх.}m}$  значения  $R_B$ , равные 0,6 и 2,0 от расчетного. Перечертить осциллограммы входного и выходного напряжений. Объяснить причины появления нелинейных искажений.

### Содержание отчета

Цель работы: схема исследуемого каскада; расчет предварительного задания; значения коэффициентов усиления, амплитудные характеристики и осциллограммы по каждому пункту выполненного эксперимента; краткие выводы.

### Контрольные вопросы

1. Объяснить принцип работ каскада усиления, назначение основных элементов схемы. 2. Какими параметрами характеризуется усилитель? 3. Какое влияние на параметры каскада оказывает  $R_k$ ? 4. Что такое нелинейные искажения и причина их появления? 5. Можно ли получить неискаженный выходной сигнал, если заданное  $U_{\text{вых.т}} > E_k/2$ ? 6. Какое влияние оказывает  $R_b$  на положение точки покоя? 7. Всегда ли нужно выбирать  $U_{\text{кэп}} \approx E_k/2$  ?

## Лабораторная работа № 11 ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Цель работы: Ознакомление с работой схем выпрямления трехфазного тока; экспериментальная проверка основных соотношений между токами и напряжениями в схемах; ознакомление с формой кривых тока и напряжения в различных цепях и с ходом внешних характеристик обеих схем выпрямления.

### Общие сведения

Трехфазная схема выпрямления с нулевым выводом. Трехфазная схема выпрямления с нулевым выводом (рис. 11.1, *a*) содержит трехфазный трансформатор и три вентиля ( $VD1, VD2, VD3$ ). Первичная обмотка трансформатора, в зависимости от величины питающего напряжения, может быть соединена в звезду или в треугольник, вторичная - только в звезду. Нагрузка включается между нулевой точкой вторичной обмотки трансформатора и общей точкой катодов вентиляей.

Схема выпрямления является однополупериодной.

Рассмотрим работу идеальной схемы (рис. 11.1, *a*) на активную нагрузку. В любой момент времени ток протекает только в той фазе, в которой на аноде вентиля имеется наибольший положительный потенциал (рис. 11.1, *b*).

Если предположить, что индуктивное сопротивление рассеяния обмоток трансформатора  $X_T$  равно нулю, и переход тока от одного вентиля к другому – коммутация – происходит мгновенно, то чередование работы вентиляей происходит в момент пересечения положительных полуволн фазных ЭДС, в так называемых точках естественного зажигания. На отрезке  $t_1 - t_2$  работает вентиль фазы *a*, на отрезке  $t_2 - t_3$  вентиль фазы *b*, и т.д. Выпрямленный ток, проходящий через нагрузку, складывается из чередующихся анодных токов  $i_{a1}, i_{a2}, i_{a3}$ , длительность протекания которых составляет одну треть периода (рис. 11.1, *в*),  $I_a = I_H/3$ .

Форма напряжения  $u_H$  на нагрузке представляет собой огибающую фазных напряжений вторичной обмотки трансформатора. Как известно, среднее значение выпрямленного напряжения определяется по формуле:

$$U_{i \text{ нд}} = \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{-\pi}{m}}^{+\frac{\pi}{m}} \sqrt{2} \cdot U_2 \cdot \cos \omega t \, d\omega t .$$

Для схемы с нулевым выводом ( $m = 3$ ) напряжение холостого хода  $U_{H \text{ ср}} = 1,17U_2$ . Пульсация выпрямленного напряжения частотой 150 Гц достигает значительной величины  $q = 0,25$ .

В непроводящую часть периода к каждому вентилю прикладывается разность двух фазных напряжений (собственной фазы и смежной работающей фазы, как это видно из заштрихованной области на рис. 11.1, *б*). Максимальное

обратное напряжение достигает амплитуды линейного напряжения вторичной обмотки трансформатора:

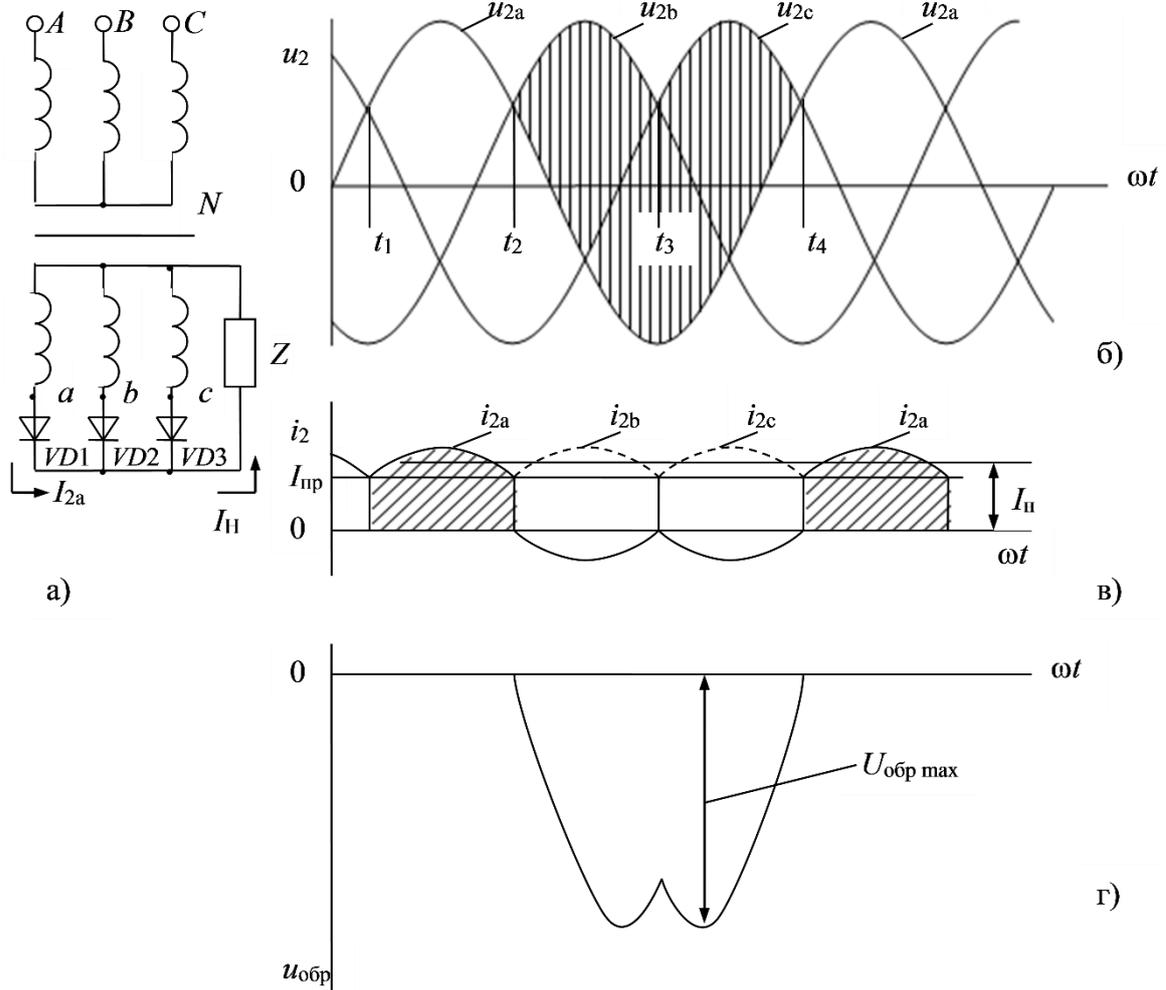


Рисунок 11.1 Трехфазный выпрямитель с нулевым выводом

$$U_{\hat{1}\hat{a}\hat{d}\max} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot U_2 = 2,09 \cdot U_{1\hat{a}\hat{b}}$$

Большим недостатком схемы с нулевым выводом является наличие потока вынужденного намагничивания трансформатора как результат протекания во вторичных обмотках токов одного направления. Эти потоки замыкаются через кожух и воздух. Они вызывают нагрев кожуха и увеличивают потери в трансформаторе. Во избежание насыщения и связанного с этим увеличения намагничивающего тока первичной обмотки трансформатора приходится увеличивать сечение сердечника или применять схему соединения обмоток «зигзаг».

Из-за большого спектра гармоник расчетная мощность трансформатора значительно превышает мощность нагрузки,  $S_T = 1,34 P_H$ .

На работу реальных схем выпрямления оказывают существенное влияние индуктивности рассеяния обмоток трансформатора и характер нагрузки.

Как видно из диаграммы рис. 11.2, б, в момент времени  $t_1$  ток фазы  $a$  не может мгновенно снизиться до нуля, а ток фазы  $b$  не может возрасти скачком до максимума, так как ЭДС самоиндукции, наводимая в индуктивности рассеяния трансформатора, препятствует быстрому изменению тока. Поэтому в течение времени коммутации  $\gamma$  обе смежные фазы работают параллельно. ЭДС самоиндукции, наводимая в индуктивности рассеяния обмоток, складывается с напряжением фазы  $a$  и вычитается из напряжения фазы  $b$ . Результирующие напряжения параллельно работающих фаз уравниваются, а их величина определяется полусуммой фазных напряжений. В этом случае мгновенные значения выпрямленного напряжения (на нагрузке) уменьшаются относительно огибающей трехфазной системы напряжений на величину ординат заштрихованных участков (рис. 11.2, а).

Уменьшение напряжения на нагрузке, вызванное влиянием реактивного сопротивления обмоток трансформатора, увеличивается с ростом тока  $I_H$ , сопротивления  $X_T$  и числа фаз выпрямителя  $m$ :

$$\Delta U_k = \frac{X_{\sigma} I_i}{2\pi / m}.$$

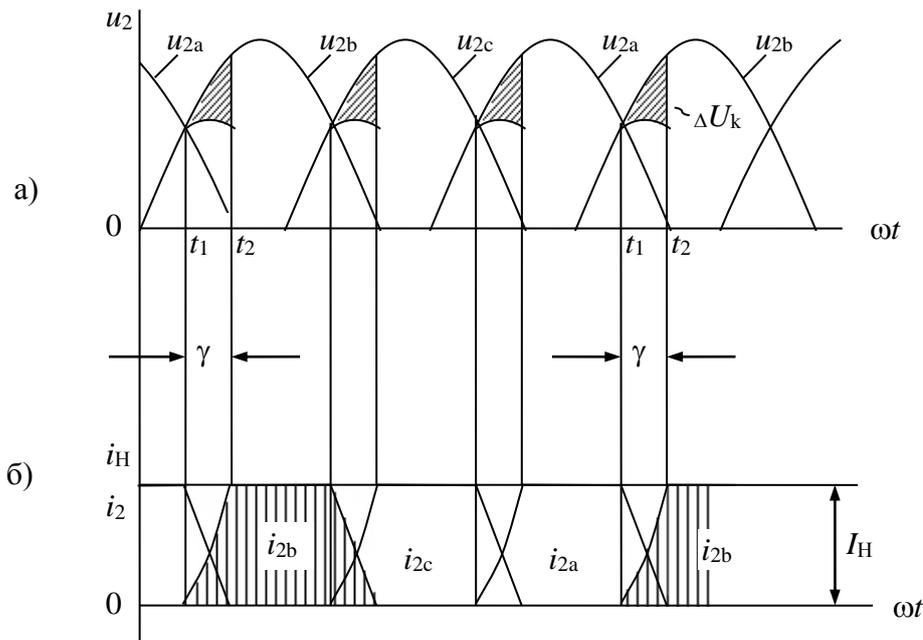


Рисунок 11.2 Влияние индуктивности

При работе выпрямителя на активно-индуктивную нагрузку, в отличие от активной, значительно сглаживаются пульсации выпрямленного тока  $I_H$ . В пределе при неограниченном увеличении индуктивности нагрузки ( $X_H \rightarrow \infty$ ) ток нагрузки спрямляется, а форма тока в фазах приближается к прямоугольной.

Мостовая схема выпрямления трехфазного тока. Мостовая схема выпрямления трехфазного тока (схема Ларионова) имеет две группы вентилей, катодную ( $VD1, VD3, VD5$ ) и анодную ( $VD2, VD4, VD6$ ). Общая точка катодной группы вентилей является положительным полюсом, анодной группы -

отрицательным полюсом. В отличие от предыдущей, мостовая схема является двухполупериодной.

В любой момент времени в этой схеме работают два вентиля: один - из катодной, другой - из анодной группы. В идеальной схеме, работающей на активную нагрузку (рис. 11.3, а), открытие вентиля катодной группы происходит в момент пересечения, соответствующих положительных и отрицательных участков синусоид фазных ЭДС. Последовательность работы отдельных вентилях в течение периода переменного напряжения можно проследить по диаграммам фазных ЭДС (рис. 11.3, б). Так, на участке  $t_1 - t_2$  работает вентиль  $VD1$  из катодной и  $VD4$  из анодной группы.

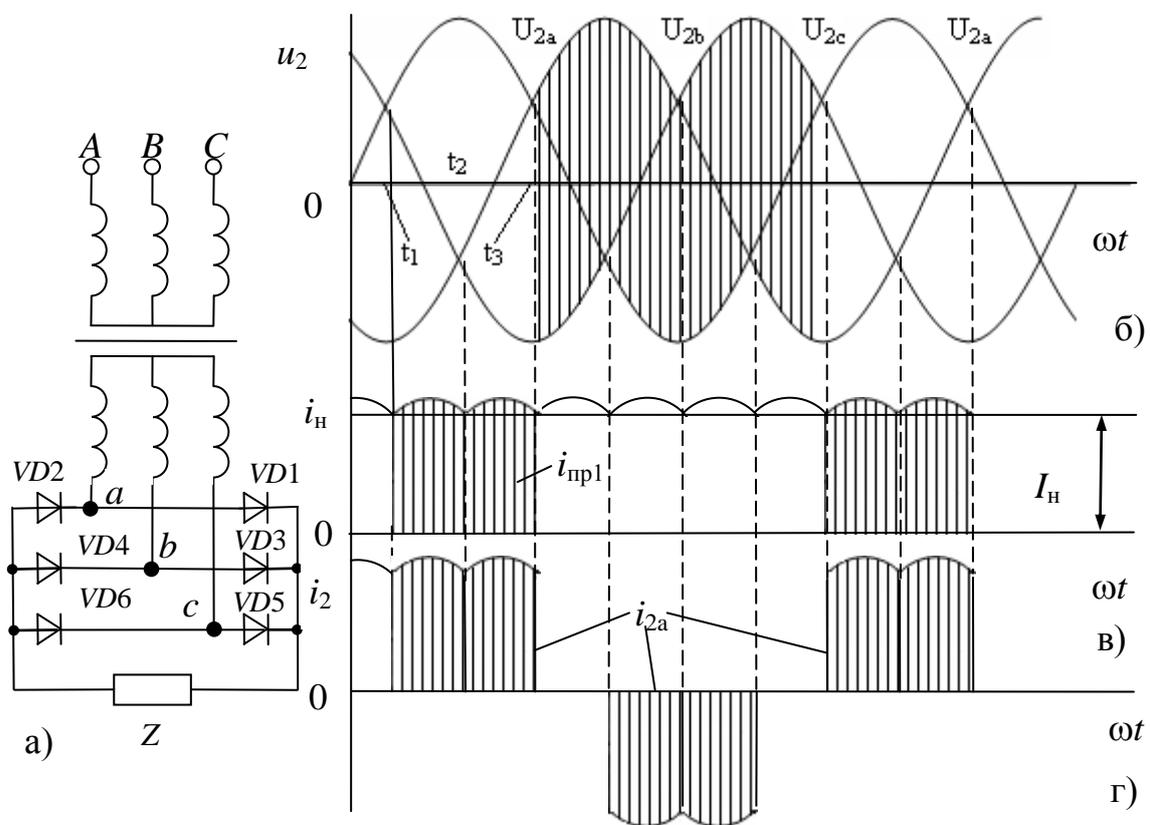


Рисунок 11.3 Трехфазный мостовой выпрямитель

С момента  $t_2$  вместо вентиля  $VD4$  вступает в работу вентиль  $VD6$ , в то время как  $VD1$  продолжает работать еще в течение одной шестой периода, т.е. от  $t_2$  до  $t_3$ . Затем, на смену  $VD1$  приходит вентиль  $VD3$  и т.д. Таким образом, каждый вентиль работает одну треть периода,  $I_a = I_1/3$ .

Форма тока вентиля показана на рис. 11.3, в, г. Форма тока в нагрузке  $I_H$  изображена на рис. 11.3, в. Ток  $i_2$  вторичной обмотки трансформатора протекает дважды за период в противоположных направлениях (рис. 11.3, г).

Коэффициент пульсации выпрямленного напряжения (рис. 11.3, в) составляет  $q = 0,057$ , а частота пульсаций - 300 Гц, т.е. в два раза выше, чем в

однополупериодной схеме. Поэтому мостовая схема выпрямления трехфазного тока эквивалентна шестифазной схеме выпрямления с нулевым выводом.

Среднее значение выпрямленного напряжения в мостовой схеме ( $m = 6$ ) на холостом ходу

$$U_{\text{н ср}} = 2,34 \cdot U_2.$$

Обратное напряжение на неработающих вентилях в каждый момент времени определяется геометрической разностью фазных ЭДС, а его максимум равен амплитуде линейного напряжения,

$$U_{\text{обр max}} = \sqrt{2}\sqrt{3} \cdot U_2 = 1,045 \cdot U_{\text{н ср}}.$$

Мостовая схема выгодно отличается от схемы с нулевым выводом благодаря хорошему использованию трансформатора ( $S_T = 1,045 \cdot P_H$ ), малому значению максимального обратного напряжения на вентилях  $U_{\text{обр max}} = 1,045 \cdot U_{\text{н ср}}$  и небольшой пульсации выпрямленного напряжения.

Внешняя характеристика выпрямителя. Внешняя (нагрузочная) характеристика  $U_{i \text{ нд}} = f(I_i)$  является основной электрической характеристикой выпрямителя.

При небольшой мощности выпрямителя коммутационные процессы, вызванные индуктивным сопротивлением рассеяния трансформатора, можно не учитывать. Приблизительный расчет выходного напряжения выпрямителя с учетом внутреннего падения напряжения на вторичной обмотке трансформатора, вентилях и элементах фильтра может быть выполнен по формуле:

$$U_{i \text{ нд}} = U_{i \text{ нд}}^{\text{оо}} - (R_{\text{о}} + R_{i \text{ в}} + R_{\text{ф}})I_i = U_{i \text{ нд}}^{\text{оо}} - R_{\text{а в о}} I_i,$$

где  $U_{i \text{ нд}}^{\text{оо}}$  – выходное напряжение выпрямителя в режиме холостого хода;

$R_T$  – сопротивление вторичной обмотки трансформатора;

$R_{\text{пр}}$  – суммарное сопротивление открытых вентилях;

$R_{\text{ф}}$  – суммарное сопротивление фильтра.

### Предварительное задание к эксперименту

Для указанного в таблице 11.1 типа выпрямителя по заданным току  $I_H$  и сопротивлению  $R_H$  нагрузки рассчитать напряжения  $U_{\text{н ср}}$ ,  $U_2$ , коэффициент трансформации  $n$ , амплитуду обратного напряжения  $U_{\text{обр max}}$  и прямой ток  $I_{\text{пр ср}}$  вентилях. Напряжение питающей сети  $U_1 = 220 \text{ В}$ , частота  $f = 50 \text{ Гц}$ .

ТАБЛИЦА 11.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
Тип выпрямителя	Рис. 11.1	Рис. 11.3						
$R_H, \text{ Ом}$	20	25	30	20	25	32	40	35
$I_H, \text{ А}$	0,6	1,2	1,1	0,5	0,8	1,7	0,8	1,0

### Содержание работы

Исследование трехфазных схем выпрямления переменного тока (с нулевым выводом и мостовой) производится на лабораторном стенде. На нем установлены силовой трехфазный трансформатор, измерительные приборы, полупроводниковые диоды и регулируемая активно-индуктивная нагрузка. Напряжение на схему подается автоматическим выключателем. Потребляемая схемой мощность измеряется трехфазным ваттметром, включенным на стороне первичной обмотки трансформатора.

В лабораторной работе исследуются основные характеристики обеих схем выпрямления, производятся необходимые измерения, а также снимаются осциллограммы напряжения и тока в контрольных точках. В последнем случае сигнал на вход осциллографа снимается с шунтов, встроенных в штепсельные вилки.

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с устройством стенда для исследования трехфазных схем выпрямления переменного тока (рис. 11.4).

2. Собрать схему с нулевым выводом (рис. 11.1, а) (установить на стенде электрические связи между контактными гнездами X14-X15 согласно рис. 11.4).

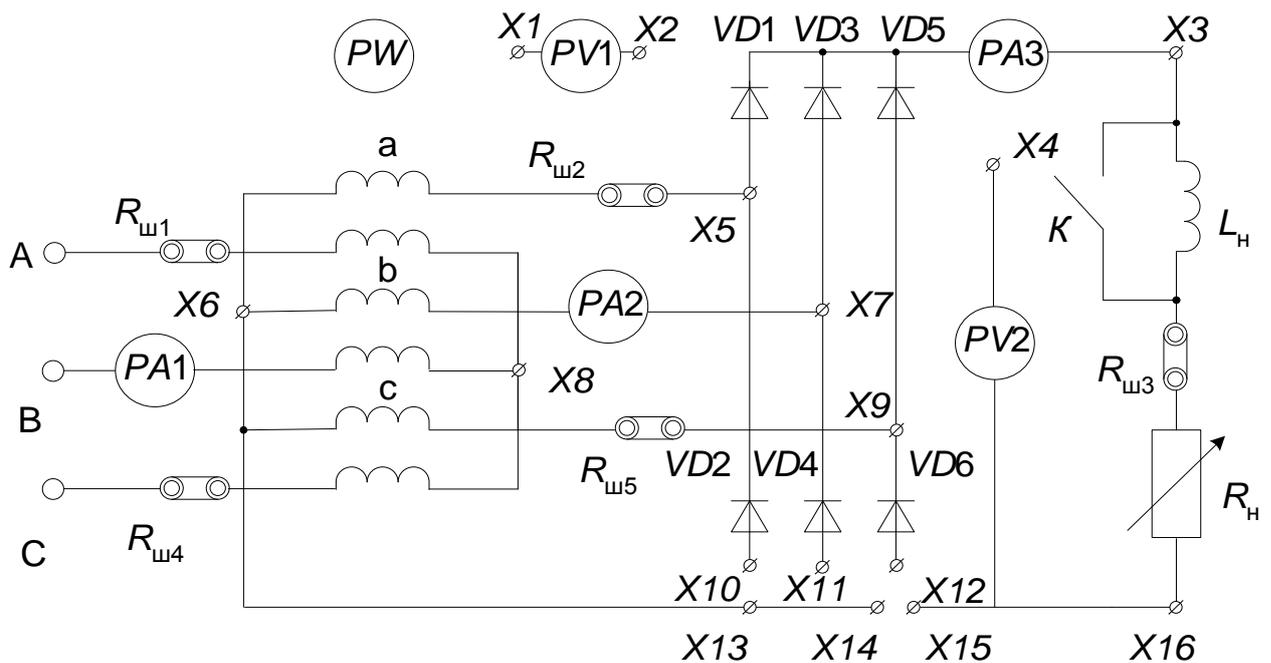


Рисунок 11.4 Схема экспериментальной установки

В соответствии с рис. 11.4 подключить к контактным гнездам X3, X16 осциллограф, подключить вольтметр PV1 (установить электрические связи между контактными гнездами X1-X5, X2-X7), подключить вольтметр PV2 (установить электрические связи между контактными гнездами X3-X4).

Повернуть рукоятку ступенчатого переключателя нагрузки  $R_H$  в крайнее левое положение (холостой ход). Включить рубильник на щите и автоматическим выключателем подать напряжение на схему.

3. Снять внешние (нагрузочные) характеристики выпрямителя при активной (ключ  $K$  замкнут) и активно-индуктивной нагрузке (ключ  $K$  разомкнут) (рис. 11.4). Показания измерительных приборов ( $PV2$ ,  $PA3$ ) записать в табл. 11.2.

ТАБЛИЦА 11.2

Схемы выпрямления							
Схема с нулевым выводом				Мостовая схема			
Активная нагрузка		Активно-индуктивная нагрузка		Активная нагрузка		Активно-индуктивная нагрузка	
$I_H$	$U_{H\text{ ср}}$	$I_H$	$U_{H\text{ ср}}$	$I_H$	$U_{H\text{ ср}}$	$I_H$	$U_{H\text{ ср}}$
0		0		0		0	
...	...	...	...	...	...	...	...

4. Записать показания измерительных приборов и проверить в схеме энергетические соотношения между напряжениями  $\frac{U_2}{U_H}$  и токами  $\frac{I_2}{I_H}$ . Данные эксперимента сравнить с теоретическими значениями. Соотношения для напряжений определить при холостом ходе ( $I_H = 0$ ), а соотношения для токов – при максимальном значении выпрямленного тока в активной и активно-индуктивной нагрузках.

Все расчетные соотношения записать в сводную табл. 11.3.

ТАБЛИЦА 11.3

Схемы выпрямления	Характер нагрузки	$I_2$ , А	$I_H$ , А	$U_2$ , В	$U_{H\text{ ср}}$ , В	Соотношения				$\lambda$
						Расчетные		Теоретические		
						$\frac{I_2}{I_H}$	$\frac{U_2}{U_{i\text{ нб}}}$	$\frac{I_2}{I_H}$	$\frac{U_2}{U_{i\text{ нб}}}$	
Схема с нулевым выводом	Активная нагрузка $L_H = 0$							0,587	0,855	–
	Активно-индуктивная нагрузка $L_H = \infty$							0,577	0,855	–
Мостовая схема	Активная нагрузка $L_H = 0$							0,815	0,427	
	Активно-индуктивная нагрузка $L_H = \infty$							0,815	0,427	

5. Установив переключатель "Ослабление" (на передней панели осциллографа) в положение "1:100", зарисовать формы кривых обратного напряжения на диодах, напряжения на активной и активно-индуктивной нагрузке при максимальном токе в ней. Все осциллограммы снимать при

неизменном положении ручек потенциометров на передней панели осциллографа.

6. Переведя переключатель "Ослабление" в положение "1:1" и установив шунты, зарисовать форму кривых токов  $i_n, i_2, i_1$  при максимальном значении тока в активной и активно-индуктивной нагрузке. Сигнал на вход осциллографа снимается с шунтов  $R_{ш1}, R_{ш2}, R_{ш3}$ , встроенных в штепсельные вилки (рис. 11.4).

После окончания опытов привести схему в исходное положение.

7. Собрать мостовую схему (рис. 11.3, а). В соответствии с рис. 11.4 на стенде установить электрические связи между контактными гнездами X10-X11-X12-X15, соединив их в одну точку специальным проводом - разветвителем на 4 входа.

Подключить согласно рис. 11.4 к контактным гнездам X3, X16 осциллограф, подключить вольтметр PV1 (установить электрические связи между контактными гнездами X1-X5, X2-X7), подключить вольтметр PV2 (установить электрические связи между контактными гнездами X3-X4).

Установить переключатель нагрузки  $R_n$  в положение «холостой ход». Автоматическим выключателем подать напряжение на схему.

8. Снять внешние характеристики выпрямителя при активной и активно-индуктивной нагрузке. Показания приборов записать в таблицу 11.2.

9. Определить в схеме соотношения напряжений  $\frac{U_2}{U_{i \text{ нд}}}$  и токов  $\frac{I_2}{I_n}$  и

сравнить их с теоретическими значениями.

10. Определить при максимальном значении тока нагрузки коэффициент мощности выпрямителя  $\lambda = \frac{P}{3U_1 I_1}$ ,

где  $P$  - показания ваттметра, Вт;

$U_1$  - фазное напряжение первичной обмотки трансформатора, В;

$I_1$  - ток фазы первичной обмотки трансформатора, А.

Результаты расчетов пунктов 10 и 11 записать в сводную табл. 11.3.

11. По аналогии с пунктами 5 и 6 зарисовать форму кривых  $u_{\text{обр max}}, u_n, i_n, i_2, i_1$ .

12. После выполнения исследований мостовой схемы привести ее в исходное состояние.

### Содержание отчета

В отчете должны быть представлены:

Цель работы. Рабочие схемы выпрямления. Таблицы измерений и вычислений, осциллограммы. Внешние характеристики  $U_{i \text{ нд}} = f(I_i)$  для обеих схем.

### Контрольные вопросы

1. Принцип работы трехфазной схемы выпрямления с выводом нулевой точки.
2. Принцип работы мостовой схемы выпрямления.
3. Как происходит коммутация тока в вентилях исследуемых реальных схем?
4. Чем объясняется плохое использование трансформатора по нагрузке в нулевой схеме?
5. Поясните вид кривых токов и напряжений  $i_2, i_n, u_2, u_n$  в обеих схемах.
6. Перечислите достоинства мостовой схемы.

## Лабораторная работа №12 УПРАВЛЯЕМЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Цель работы: изучить работу однофазного управляемого выпрямителя на активную и активно-индуктивную нагрузку; исследовать работу инвертора, ведомого сетью; снять основные характеристики управляемого выпрямителя и инвертора.

### Общие сведения

Для плавного и бесконтактного регулирования напряжения в различных отраслях промышленности широко применяются управляемые выпрямители (УВ), в вентильном звене которых устанавливаются тиристоры вместо диодов. Регулирование тока и напряжения нагрузки в широком диапазоне осуществляется путем изменения момента включения тиристоров с помощью системы импульсно-фазового управления (СИФУ).

Дополнительным преимуществом управляемых выпрямителей является возможность работы в режиме инвертирования, т.е. преобразования постоянного тока в переменный. Установки, совмещающие оба режима работы, получили название управляемых преобразователей.

### Управляемый выпрямитель

Рассмотрим работу однофазного двухполупериодного выпрямителя с нулевым выводом на активную нагрузку (рис. 12.1, а). Для простоты предположим, что тиристоры, подобно диодам, включаются в точках естественного открывания, в данном случае, после прохождения положительных полусинусоид вторичного напряжения  $U_2$  через нуль.

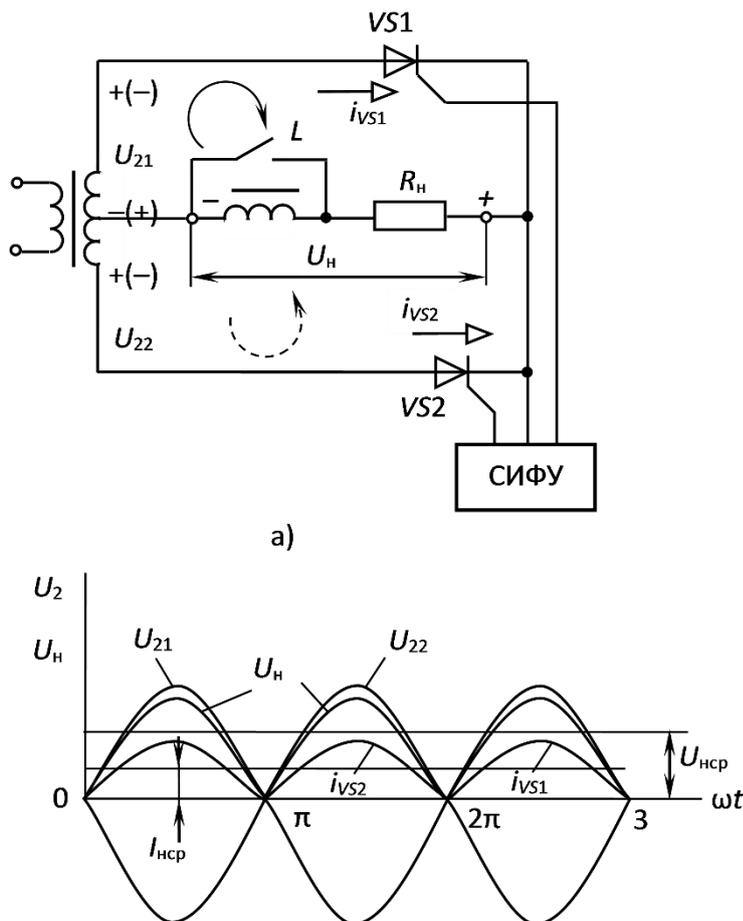


Рисунок 12.1 Однофазный управляемый выпрямитель (а), временные диаграммы (б)

По отношению к средней точке напряжения обеих вторичных полуобмоток сдвинуты по фазе на  $180^\circ$  (рис. 12.1, б). В первый полупериод, когда на аноде тиристора  $VS1$  появляется положительный потенциал по отношению к катоду, в верхнем контуре трансформатора через открытый

тиристор в нагрузку (направление тока выделено жирной стрелкой при полярности напряжения, указанной на рис. 12.1, а). В этом интервале времени тиристор  $VS2$  закрыт отрицательным анодным напряжением.

В следующий полупериод полярность напряжения на полуобмотках трансформатора изменяется, и через открывшийся тиристор  $VS2$  в нижнем контуре протекает ток по направлению штриховой стрелки. В этом интервале времени тиристор  $VS1$  закрыт и не пропускает тока (рис. 12.1, б).

Таким образом в двухполупериодной схеме выпрямления оба тиристора работают поочередно, а в нагрузке протекает пульсирующий ток одного и того же направления.

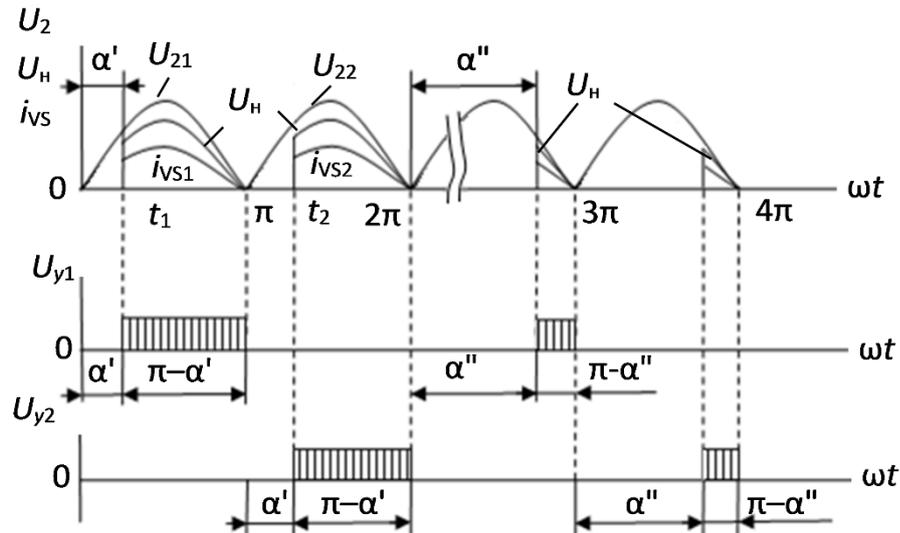


Рисунок 12.2 Регулирование тока в нагрузке

Форма этого тока повторяет огибающую положительных полусинусоид напряжения вторичных полуобмоток трансформатора (рис. 12.1, б), а величина зависит от сопротивления нагрузки и мгновенных значений напряжения. Форма выпрямленного напряжения на нагрузке в идеальном случае приближается к огибающей положительных полусинусоид напряжения вторичных полуобмоток трансформатора.

Для регулирования тока в нагрузке каждый тиристор необходимо включать с некоторым запаздыванием по отношению к точке естественного открывания. Такое включение производится положительными импульсами, подаваемыми поочередно от СИФУ на управляющие электроды тиристорov с фазовым сдвигом  $\omega t_1, \omega t_2, \dots$  (рис. 12.2). Соответствующие этому сдвигу по фазе углы запаздывания в электрических градусах называются углами регулирования и обозначаются буквами  $\alpha', \alpha''$  и т.д.

В данной схеме УВ углы регулирования можно изменять в пределах от 0 до  $180^\circ$ . Рассмотренный ранее граничный случай соответствовал условию  $\alpha=0$ . При втором граничном случае,  $\alpha = 180^\circ$ , ни один из тиристорov не сможет включиться, поскольку моменты подачи управляющих импульсов совпадают с нулевыми значениями напряжений на полуобмотках трансформатора.

Для промежуточных значений  $0 < \alpha < 180^\circ$  (рис. 12.2) в течение части положительного полупериода  $\omega t = \alpha$  каждый тиристор остается закрытым, а включается только в момент подачи управляющего импульса. При этом ток в нагрузке возрастает скачком и в интервале  $\omega t = (\pi - \alpha)$  оставшейся части полупериода изменяется по синусоидальному закону. С увеличением угла  $\alpha$  сокращается время работы каждого вентиля и, естественно, снижается среднее значение выпрямленного тока и напряжения (рис. 12.2). Таким образом, при изменении угла регулирования в диапазоне  $0 \dots 180^\circ$  эти величины уменьшаются от своих предельных значений  $U_{\text{но}}$  (при  $\alpha = 0$ ) до нуля (при  $\alpha = 180^\circ$ ).

Среднее значение выпрямленного напряжения на активной нагрузке (без учета потерь) определяется выражением

$$U_{\text{н}} = U_{\text{но}}(1 + \cos \alpha)/2.$$

Зависимость  $U_{\text{н}} = f(\alpha)$  является регулировочной характеристикой управляемого выпрямителя.

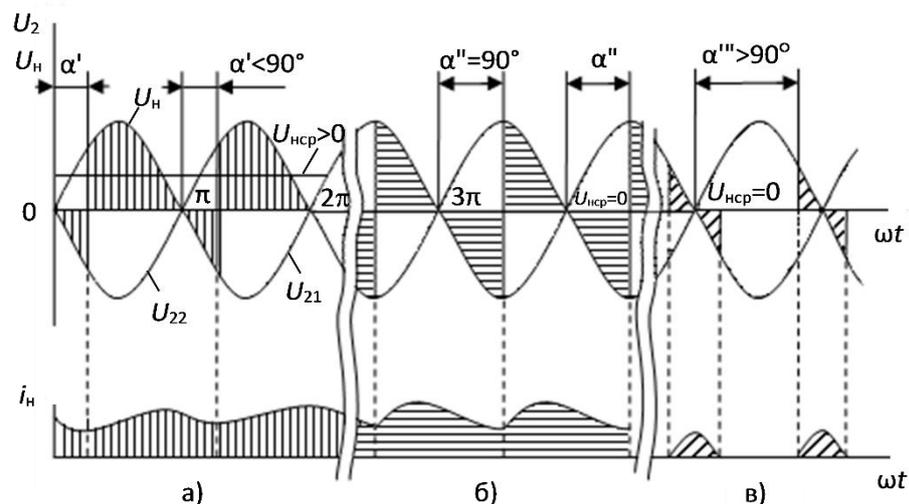


Рисунок 12.3 Временные диаграммы при индуктивной нагрузке

При работе на активно-индуктивную нагрузку кривая тока остается непрерывной (рис. 12.3, а), поскольку энергия, запасенная в дросселе в проводящую часть полупериода, расходуется на поддержание тока до момента включения следующего тиристора. Теоретически, при  $L \rightarrow \infty$ , форма тока в нагрузке должна представлять собой прямую линию, а в каждом плече выпрямителя – прямоугольник.

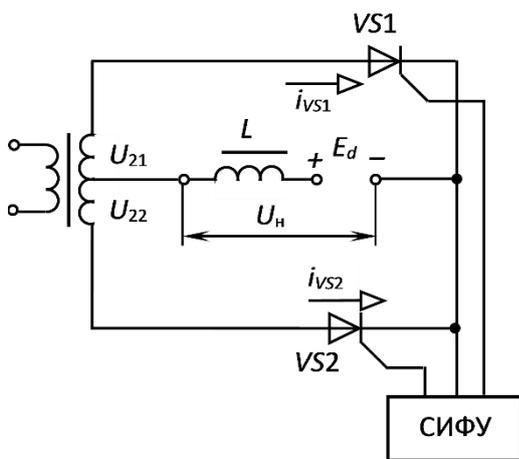
Нельзя не отметить, что при индуктивном характере нагрузки тиристоры могут оставаться открытыми даже при отрицательном уровне напряжения каждой полуобмотки, пока ЭДС самоиндукции способствует протеканию непрерывного тока (рис. 12.3). Такие условия работы сохраняются только до значений  $\alpha < 90^\circ$ , случаю  $\alpha = 90^\circ$  соответствуют равновеликие площади положительных и отрицательных участков полусинусоид (сравните

заштрихованные площадки на рис. 12.3, б). При этом среднее значение выпрямленного напряжения равно нулю.

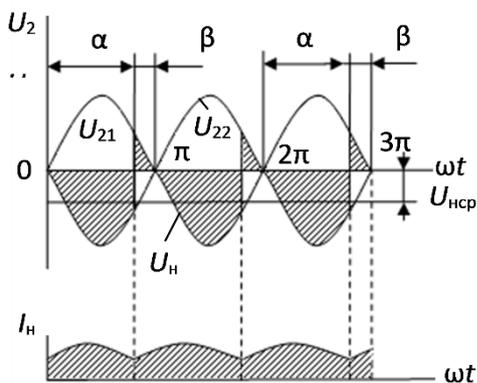
Для чисто индуктивной нагрузки регулировочная характеристика подчиняется косинусоидальному закону,  $U_H = U_{HO} \cos \alpha$ . При конечных значениях индуктивности в нагрузочной цепи эта кривая отклоняется от косинусоиды в сторону больших предельных углов регулирования.

Внешние характеристики управляемого выпрямителя  $U_H = f(I_H)$  при фиксированных значениях угла регулирования ( $\alpha = \text{const}$ ) образуют семейство прямых линий с постоянным наклоном, поскольку величина падения напряжения в элементах схемы УВ не зависит от угла  $\alpha$ .

### Инвертор



а)



б)

Рисунок 12.4 Инвертор (а),  
временные диаграммы (б)

Инвертированием называется преобразование постоянного тока в переменный ток определенной величины и частоты. В связи с изменением направления потока энергии выходным звеном инвертора становится трансформатор, а на входные зажимы подключается независимый источник постоянного тока. Полярность его выбирается противоположной (по отношению к режиму выпрямления), чтобы обеспечить прямую проводимость вентилей. Для получения переменного напряжения необходимо периодически прерывать постоянный ток и распределять его по обмоткам (фазам) трансформатора тем или иным способом. В управляемых преобразователях функции ключей-распределителей выполняют тиристоры.

В зависимости от того, какими средствами осуществляется переход тока от вентиля к вентилю (коммутация тока), различают:

автономные (независимые) инверторы (с принудительной емкостной коммутацией при любой задаваемой частоте);

инверторы, ведомые сетью (с коммутацией напряжением сети при частоте сети).

В данной работе исследуется инвертор второй группы, в котором активная мощность передается от источника  $\pm 120$  В в сеть переменного тока при одновременном потреблении реактивной из сети.

В инверторном режиме тиристоры должны пропускать ток преимущественно при отрицательных полупериодах напряжения в каждой полуобмотке.

Их переключение происходит благодаря тому, что напряжение на аноде открываемого тиристора оказывается положительным и более высоким, чем у работающего за счет источника постоянного тока, а также возникающей ЭДС самоиндукции. В этом случае дроссель способствует поддержанию непрерывного тока в каждом контуре, улучшает форму кривой переменного напряжения и фильтрует высшие гармоники.

Из сказанного выше можно сделать вывод, что протекание токов в вентильных полуобмотках трансформатора при изменении полярности ЭДС свидетельствует об изменении направления потока энергии – от источника постоянного тока в сеть переменного тока (рис. 12.4, а).

Переход преобразователя от выпрямительного к инверторному режиму показывают временные диаграммы напряжения и тока (сравните рисунки 12.3 и 12.4).

При углах регулирования  $\alpha < 90^\circ$  преобразователь отдает непрерывный ток в активно-индуктивную нагрузку (рис. 12.3, а), и напряжение на ее зажимах положительно ( $U_n > 0$ ).

При установке  $\alpha = 90^\circ$  ЭДС самоиндукции дросселя еще поддерживает непрерывный ток, однако напряжение на нагрузке равно нулю. В этом случае трансформатор выпрямителя обменивается с сетью реактивной мощностью (рис. 12.3, б).

При дальнейшем увеличении углов регулирования,  $\alpha > 90^\circ$ , наступает режим прерывистых токов, поскольку отдаваемая в контур энергия индуктивности дросселя не может превысить запасенную им в проводящую часть периода (рис. 12.3, в).

Если же при  $\alpha > 90^\circ$  источник постоянного тока с полярностью, указанной на рис. 12.4, а обеспечивает непрерывный ток, то преобразователь переходит в инверторный режим с изменением знака напряжения

$$U_n = U_{но} \cos \alpha = U_{но} \cos(\pi - \beta) = - U_{но} \cos \beta .$$

Здесь угол  $\beta$ , вводимый по аналогии с выпрямительным режимом, называется углом опережения включения. Этот угол отсчитывается от точек  $\omega t = k\pi$  в сторону нуля (рис. 12.4, б),  $k = 1, 2, \dots$ .

С увеличением угла регулирования  $\alpha$  до  $180^\circ$  среднее значение напряжения преобразователя увеличивается. Теоретически, при  $\beta = 0$  напряжение холостого хода инвертора соответствует этой же величине при  $\alpha = 0$  для управляемого выпрямителя. Однако в реальных условиях необходимо вводить запас по углу  $\beta_{\min} \approx 10 \dots 15^\circ$ , с тем, чтобы завершить процесс коммутации переключаемых фаз и восстановить управляющие свойства тиристорov до момента их естественного открывания.

Входные характеристики инвертора  $U_n = f(I_n)$  при фиксированных значениях углов опережения ( $\beta = \text{const}$ ) подобны внешним характеристикам управляемого выпрямителя.

### Предварительное задание к эксперименту

В экспериментальной части данной работы предусмотрено исследование основных характеристик для схемы однофазного преобразователя с выводом нулевой точки трансформатора. Предварительно необходимо для преобразователя, работающего в режиме выпрямителя на чисто активную нагрузку:

1. Рассчитать и построить регулировочную характеристику  $U_H = f(\alpha)$  для  $\alpha$  в диапазоне от  $0^\circ$  до  $180^\circ$ . При этом принять, что напряжение  $U_2 = 127$  В.

2. Для значений  $\alpha$ , приведенных в таблице 12.1, рассчитать внешнюю характеристику  $U_H = f(I_H)$ , приняв  $x_a = 60$  Ом.

ТАБЛИЦА 12.1

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8
$\alpha$ , град.	20	40	50	70	80	100	120	150

3. Построить совмещенные временные диаграммы  $u_2(\omega t)$ ,  $u_H(\omega t)$  и  $i_H(\omega t)$  для  $\alpha$ , заданного вариантом таблицы 12.1.

### Порядок выполнения эксперимента

1. Ознакомиться с назначением всех элементов на передней панели стенда и после разрешения преподавателя подать питание от сети 220 В. Переключатель режима работы поставить в положение “ВЫПРЯМИТЕЛЬ”.

2. Включить осциллограф, подключить его входы к гнездам “управляющий электрод” и “катод” тиристоров и зарисовать форму управляющих импульсов, обратив внимание на изменение их длительности в диапазоне  $\alpha=0\dots180^\circ$ . Отсчет углов регулирования – по фазоуказателю.

3. Снять регулировочные характеристики управляемого выпрямителя  $U_H=f(\alpha)$  для активной (при замкнутом дросселе) и активно-индуктивной нагрузки ( $R_{H \max}$ ). Результаты эксперимента занести в табл. 12.2 и сопоставить с рассчитанной в предварительном задании характеристикой  $U_H=f(\alpha)$ .

ТАБЛИЦА 12.2

Угол регулирования, $\alpha$		$0^\circ$	$30^\circ$	$60^\circ$	$90^\circ$	$120^\circ$	$150^\circ$	Прим.
$U_H$	Активная нагрузка							
	Активно-индуктивная нагрузка							

4. На экране осциллографа просмотреть форму выпрямленного напряжения на нагрузке при включенном дросселе и без него, для разных углов регулирования. Зарисовать осциллограммы при  $\alpha=0$  и  $\alpha=60^\circ$  при минимальном значении тока нагрузки.

5. Изменяя ступенями сопротивление резистора  $R_H$ , снять семейство внешних характеристик выпрямителя  $U_H=f(I_H)$  для активной и активно-индуктивной нагрузки при фиксированных значениях  $\alpha=30^\circ$ ,  $60^\circ$  и  $\alpha$ , заданного табл. 12.1. Результаты эксперимента занести в табл. 12.3 и сопоставить с результатами предварительного расчета.

ТАБЛИЦА 12.3

Активная нагрузка	$\alpha=30^\circ$	$U_H(\text{В})$						
		$I_H(\text{мА})$						
	$\alpha=60^\circ$	$U_H(\text{В})$						
		$I_H(\text{мА})$						
	$\alpha=$	$U_H(\text{В})$						
		$I_H(\text{мА})$						
Активно-индуктивная нагрузка	$\alpha=30^\circ$	$U_H(\text{В})$						
		$I_H(\text{мА})$						
	$\alpha=60^\circ$	$U_H(\text{В})$						
		$I_H(\text{мА})$						
	$\alpha=$	$U_H(\text{В})$						
		$I_H(\text{мА})$						

6. Перевести преобразователь в режим инвертирования. Для этого установить по фазоуказателю максимальный угол, подать от стабилизированного источника питания постоянное напряжение  $\pm 120 \text{ В}$  на стенд и установить переключатель режима работы преобразователя в положение “ИНВЕРТОР”.

*Примечание:* при этом переключении реле блока защиты замыкает цепь нагрузки и включает реостат последовательно с источником постоянного тока. О нормальной работе лабораторного стенда сигнализирует красная лампочка.

7. Изменяя сопротивление резистора  $R_H$  снять семейство входных характеристик инвертора  $U_H=f(I_H)$  для фиксированных значений углов регулирования,  $\alpha=120^\circ$ ,  $\alpha=150^\circ$  (соответственно  $\beta=60^\circ$  и  $\beta=30^\circ$ ). Данные эксперимента внести в табл. 12.4.

ТАБЛИЦА 12.4

$\beta = 30^\circ$ ( $\alpha = 150^\circ$ )	$I_H(\text{мА})$					
	$U_H(\text{В})$					
$\beta = 60^\circ$ ( $\alpha = 120^\circ$ )	$I_H(\text{мА})$					
	$U_H(\text{В})$					

После окончания эксперимента переключатель режима работы поставить в положение “ВЫПРЯМИТЕЛЬ”. Снять питание постоянного тока, отключить напряжение сети, схему привести в исходное состояние.

### Содержание отчета

Схема лабораторной установки. Результаты предварительного расчета. Временные диаграммы управляющих импульсов СИФУ. Регулировочные характеристики УВ для активной и активно-индуктивной нагрузки (на одном графике). Семейства внешних характеристик управляемого выпрямителя и входных характеристик инвертора (на одном графике). Осциллограммы выпрямленного напряжения для активной и активно-индуктивной нагрузки при  $\alpha = 0^\circ$  и  $\alpha = 60^\circ$ .

### Контрольные вопросы

1. Опишите работу УВ и назовите область его применения.
2. Объясните различие между режимом выпрямления и инвертирования.
3. Перечислите достоинства и недостатки управляемых преобразователей.
4. Что представляют собой регулировочные характеристики УВ?
5. Какие функции выполняет дроссель в схеме УВ?
6. Объясните ход внешних характеристик управляемого выпрямителя и входных характеристик инвертора.
7. Как изменяется величина пульсации выпрямленного напряжения при изменении углов регулирования и при изменении величины тока?

## Лабораторная работа № 13 ФОТО- И ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

Цель работы: изучение структуры, основных характеристик фотодиода и фоторезистора, принципа функционирования простейших устройств на оптронах.

### Общие сведения

Оптоэлектроникой называют научно-техническое направление, в котором для передачи, обработки и хранения информации используются электрические и оптические средства и методы. В оптоэлектронике световой луч выполняет те же функции управления, преобразования и связи, что и электрический сигнал в электрических цепях.

Устройства оптоэлектроники обладают некоторыми существенными преимуществами по сравнению с чисто электронными устройствами. В них обеспечивается полная гальваническая развязка между входными и выходными цепями. Отсутствует обратное влияние приемника сигнала на его источник. Облегчается согласование между собой электрических цепей с разными входными и выходными сопротивлениями. Оптоэлектронные приборы имеют широкую полосу пропускания и преобразования сигналов, высокое быстродействие и большую информационную емкость оптических каналов связи ( $10^{13} \dots 10^{15}$  Гц). На оптические цепи не оказывают влияние различные помехи, вызванные электрическими и магнитными полями.

К недостаткам оптоэлектронных компонентов относятся: низкая температурная и временная стабильность характеристик; сравнительно большая потребляемая мощность; сложность изготовления универсальных устройств для обработки информации; меньшие функциональные возможности по сравнению с ИМС, необходимость жестких требований к технологии изготовления.

Оптоэлектронные приборы излучают и преобразуют излучение в инфракрасной, видимой или ультрафиолетовой областях спектра. Основным компонентом оптоэлектроники является пара с фотонной связью, называемая

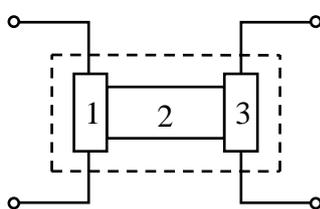


Рисунок 13.1  
Структура оптрона

оптроном. Простейший оптрон можно представить четырехполюсником, состоящим из трех элементов: источник света – 1, световод – 2 и приемник света – 3 (рис. 13.1).

Входной сигнал в виде импульса или перепада входного тока возбуждает фотоизлучатель и вызывает световое излучение. Световой сигнал по световоду попадает в фотоприемник, на выходе которого образуется электрический импульс или перепад выходного тока. В оптронных устройствах в качестве источников света применяются обычно лампы накаливания, электролюминесцентные конденсаторы или светодиоды. В качестве приемников света используют фоторезисторы, фотодиоды, фототиристоры,

фототранзисторы и различные комбинации этих приборов. Условные обозначения некоторых типов оптронов показаны на рис. 13.2.

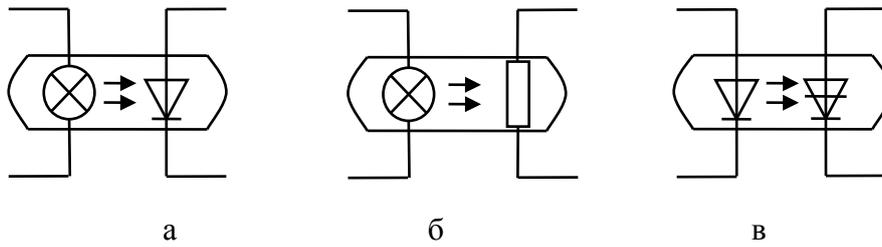


Рисунок 13.2 Оптроны  
(а – диодный, б – резисторный, в – динисторный)

Работа фоторезисторов основана на явлении изменения сопротивления вещества под воздействием внешнего светового излучения. Конструктивно фоторезистор представляет собой пластину полупроводника, на поверхности которой нанесены электроды. Структура фоторезистора и условное обозначение показаны на рис. 13.3, где 1 – диэлектрическая пластина; 2 – полупроводник; 3 – контакты фоторезистора.

Основными характеристиками фоторезистора являются:

1. Вольтамперная характеристика – зависимость тока  $I$  через фоторезистор от напряжения  $U$ , приложенного к его выводам, при различных значениях светового потока  $\Phi$ ,

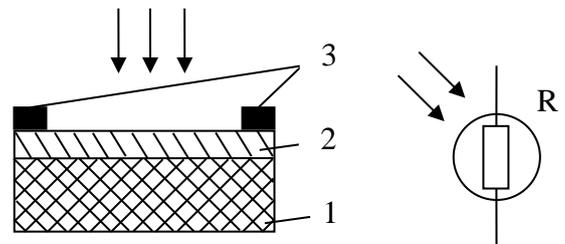


Рисунок 13.3  
Структура фоторезистора

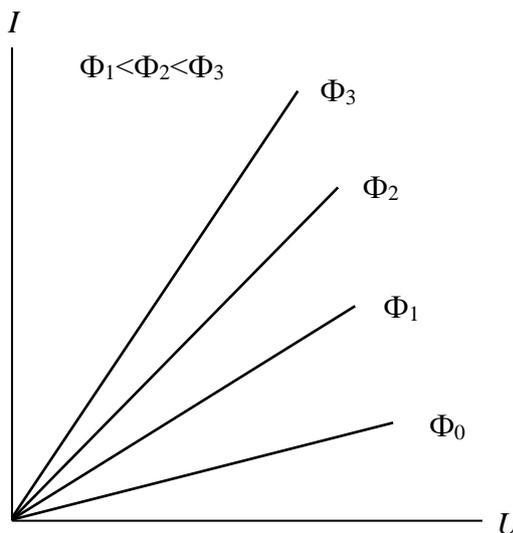


Рисунок 13.4  
ВАХ фоторезистора

либо освещенности  $E$  (рис. 13.4). Ток при  $\Phi = 0$  называется темновым током  $I_T$ , при  $\Phi > 0$  – общим током  $I_{общ}$ . Их разность равна фототоку  $I_\Phi = I_{общ} - I_T$ .

Энергетическая характеристика – это зависимость фототока от светового потока, либо освещенности при  $U = const$ . В области малых  $\Phi$  она линейна, а при увеличении светового потока рост фототока замедляется из-за возрастания вероятности рекомбинации носителей заряда (рис. 13.5). Энергетическая характеристика иногда называется люксамперной, в том случае, если по оси абсцисс откладывают освещенность  $E$  в люксах.

3. Чувствительность – это отношение выходной величины ко входной. В зависимости от того, какой величиной характеризуется излучение, различают токовую чувствительность к потоку

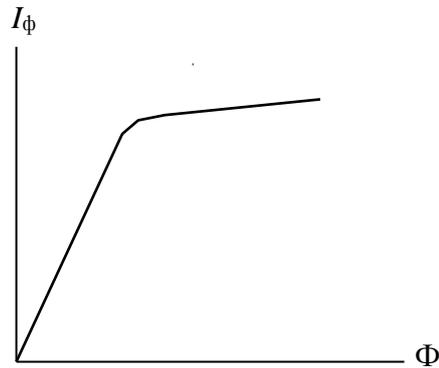


Рисунок 13.5  
Энергетическая  
характеристика

$$S_{\Phi} = \frac{I_{\Phi}}{\Phi}$$

итокową чувствительность к освещенности  $E$

$$S_E = \frac{I_{\Phi}}{E}$$

В качестве одного из основных параметров фоторезистора используют величину удельной интегральной чувствительности, которая характеризует интегральную чувствительность, когда к фоторезистору приложено напряжение 1 В:

$$S_{\Phi \text{ эф } \Phi \text{ ä}} = \frac{I_{\Phi}}{\Phi U}$$

У промышленных фоторезисторов удельная интегральная чувствительность  $\frac{i \text{ Ä}}{\text{Ä} \cdot \text{ëi}}$  имеет пределы десятые, сотые доли при освещенности  $E=200$  лк.

Важными характеристиками фоторезистора являются также: спектральная характеристика; граничная частота сигнала, модулирующая световой поток; температурный коэффициент фототока и пороговый поток.

Фотодиоды имеют структуру обычного  $p-n$ -перехода (рис. 13.6, а, б), где а – условное обозначение фотодиода, б – структура фотодиода. Вследствие оптического возбуждения в  $p$  и  $n$  областях возникает неравновесная концентрация носителей заряда.

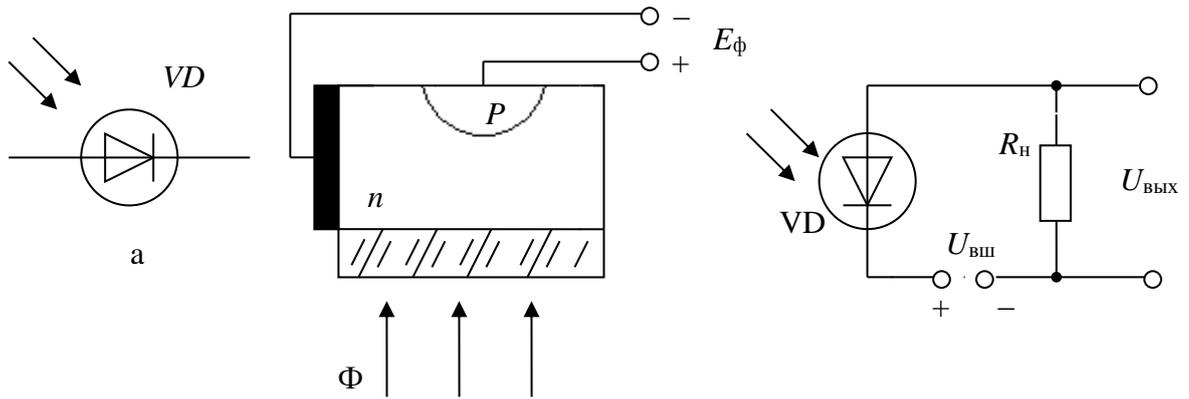


Рисунок 13.6 Фотодиод

На границе перехода неосновные носители заряда под влиянием электрического поля, перебрасываются через переход в область, где они являются основными носителями. Электрический ток, созданный ими, есть полный фототок. Если  $p$ - $n$ -переход разомкнут, то перенос носителей заряда, генерируемых светом, приводит к накоплению отрицательного в  $n$ -области и положительного в  $p$ -области зарядов. Новое равновесное состояние соответствует меньшей высоте потенциального барьера, равной  $(U_k - E_\phi)$ . ЭДС  $E_\phi$ , возникающую при этих процессах, на значение которой снижается потенциальный барьер  $U_k$  в  $p$ - $n$ -переходе, называют ф о т о э л е к т р о д в и ж у щ е й с и л о й (фото-ЭДС). В данной ситуации фотодиод работает в режиме фотогенератора, преобразуя световую энергию в электрическую.

Фотодиод может работать совместно с внешним источником (рис. 13.6, в). При освещении фотодиода поток неосновных носителей заряда через  $p$ - $n$ -переход возрастает. Увеличивается ток во внешней цепи, определяемый напряжением источника и световым потоком. Значение фототока можно найти из выражения  $I_\phi = S_{\text{инт}} \Phi$ , где  $S_{\text{инт}}$  – интегральная чувствительность. Вольтамперные характеристики освещенного  $p$ - $n$ -перехода показаны на рис. 13.9, б. Фототок суммируется с обратным током теплового происхождения.

К о с н о в н ы м характеристикам фотодиода относят:

1. Э н е р г е т и ч е с к и е характеристики, которые связывают фототок со световым потоком. Причем фотодиод может быть включен без внешнего источника ЭДС (генераторный режим), так и с внешним источником (рис. 13.7).

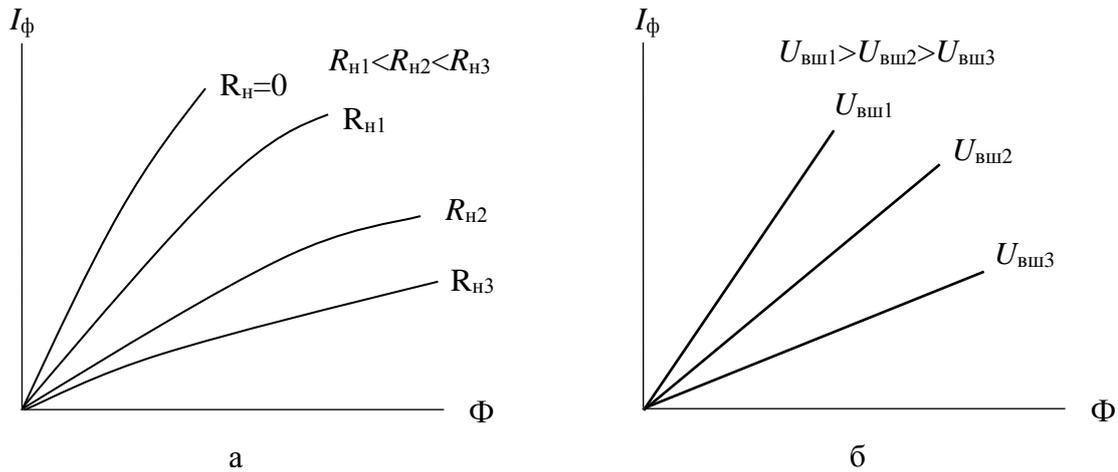


Рисунок 13.7

а – генераторный режим; б – при работе с внешним источником

2. **А б с о л ю т н ы е** и **о т н о с и т е л ь н ы е** **с п е к т р а л ь н ы е** характеристики – это зависимости абсолютной либо относительной чувствительности от длины волны регистрируемого потока излучения. Они аналогичны соответствующим характеристикам фоторезистора и зависят от материала полупроводника и введенных примесей.

В качестве фотоприемников в оптронных устройствах также используются **ф о т о т и р и с т о р ы** и **ф о т о т р а н з и с т о р ы**.

У **ф о т о т р а н з и с т о р о в** интегральная чувствительность значительно выше, чем у диода и составляет сотни миллиампер на люмен.

Биполярный фототранзистор представляет собой обычный транзистор, но в корпусе его сделано прозрачное окно, через которое световой поток воздействует на область базы, вызывая в ней генерацию носителей зарядов. Они диффундируют к коллекторному переходу, где происходит их разделение. Дырки под воздействием поля коллектора идут из базы в коллектор и увеличивают ток коллектора, а электроны, оставаясь в базе, повышают прямое напряжение эмиттерного перехода, что усиливает инжекцию дырок в этом переходе. Если базовый вывод транзистора не подключается к схеме, то такое включение называют с “плавающей” базой. В этом случае режим работы транзистора будет сильно зависеть от температуры. Вывод базы используют для задания оптимального режима работы фототранзистора, при котором достигается максимальная чувствительность к световому потоку.

Фототиристоры имеют четырехслойную структуру (рис. 13.8, а) и управляются световым потоком, подобно тому, как триодные тиристоры управляются током, подаваемым в цепь управляющего электрода. При действии света на область базы  $p_1$  в этой области генерируются электроны и дырки.

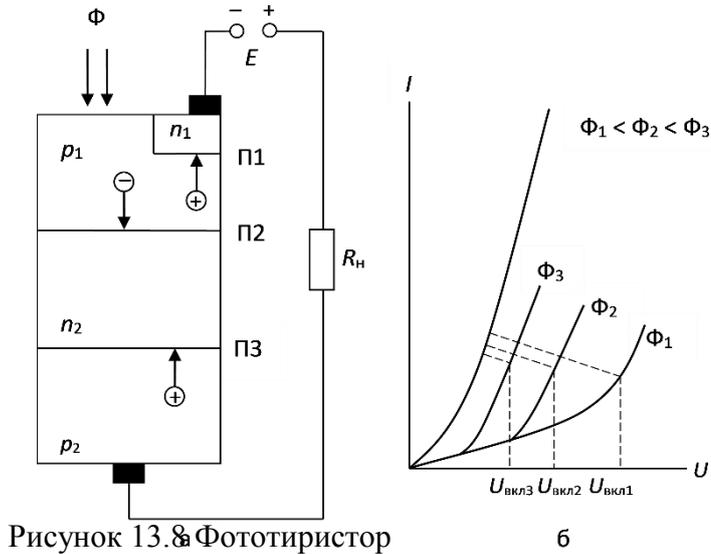


Рисунок 13.8 Фототиристор

Электронны, попадая в область перехода П2, находящегося под обратным напряжением, уменьшают его сопротивление. В результате происходит увеличение инжекции носителей из переходов П1 и П3. Ток через структуру прибора лавинообразно нарастает, т.е. тиристор отпирается. Чем больше световой поток, действующий на тиристор, тем при меньшем напряжении включается тиристор (рис. 13.8, б).

Фототиристоры могут успешно применяться в различных автоматических устройствах в качестве бесконтактных ключей для включения значительных напряжений и мощностей. Важные достоинства тиристоров: малое потребление мощности во включенном состоянии, малые габариты, отсутствие искрения, малое время включения.

### Предварительное задание к эксперименту

Используя вольтамперные характеристики (рис. 13.9: а – фоторезистора, б – фотодиода), а также данные таблицы 13.1, для заданного вариантом  $U$  найти значения фототока  $I_\Phi$ , и по полученным значениям построить энергетическую характеристику фотоэлектронного прибора. Определить величину токовой чувствительности к освещенности  $S_E$  при  $E=200$  лк.

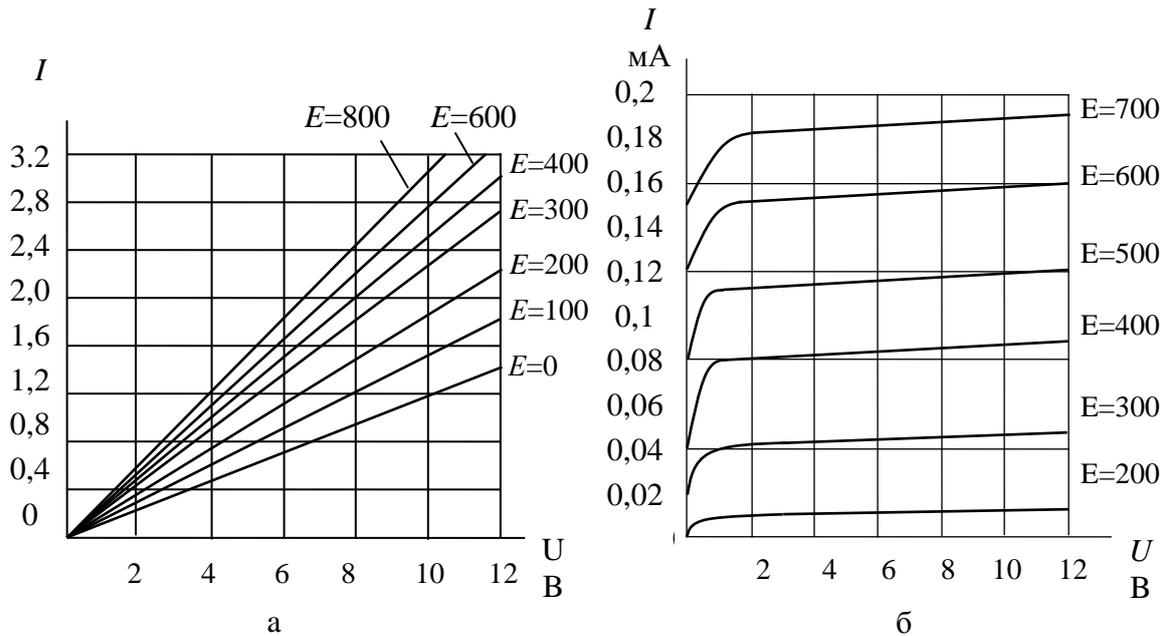


Рисунок 13.9

ТАБЛИЦА 13.1

Тип прибора	Фоторезистор				Фотодиод			
	1	2	3	4	5	6	7	8
Напряжение на приборе	10	8	6	4	2	4	8	12

### Порядок выполнения эксперимента

1. Перед началом выполнения работы привести стенд в исходное состояние. Для этого ручки регуляторов Р1 и Р2 повернуть влево до упора, выключатели В1, В2, В3, В5 установить в нижнее положение. Ручку управления Р3 установить в положение А. Соединить с помощью перемычки гнезда Г1 и Г2. Подключить к гнездам Г1 и Г6 цифровой вольтметр. Переключатель пределов измерения микроамперметра В4 установить в положение наименьшей чувствительности  $\times 100$  и в дальнейшем, перед проведением очередного эксперимента, возвращать его в это положение. Подключить стенд к сети. Тумблер В5 установить в верхнее положение.

**Примечание:** в процессе измерений не допускать «зашкаливания» прибора!

1. Снять вольтамперную характеристику  $I_{\phi}(U)$  фоторезистора. Для этого ручку переключателя Р3 установить в положение А, а тумблер В1 перевести в верхнее положение. Данные эксперимента занести в таблицу 13.2.

ТАБЛИЦА 13.2

$U, \text{В}$		2	4	6	8	10	12
$I_{\Phi}, \text{мкА}$	$E = 0 \text{ лк}$						
	$E = 200 \text{ лк}$						
	$E = 400 \text{ лк}$						
	$E = 1000 \text{ лк}$						

2. Вернуть в левое положение ручки регуляторов Р1 и Р2. Установить ручкой регулятора Р1 напряжение на фоторезисторе  $U = 3 \text{ В}$  и снять зависимость фототока от освещенности  $I_{\Phi}(E)$ , задавая значение  $E$  регулятором Р2, поддерживая постоянным напряжение на фоторезисторе ручкой Р1. Полученные значения занести в таблицу 13.3.

ТАБЛИЦА 13.3

$E, \text{лк}$	0	100	200	400	1000	1200	1500	2000
$I_{\Phi}, \text{мкА}$								

Соединить перемычкой гнезда Г1 и Г3, тумблер В1 должен находиться в верхнем положении. Снять вольтамперные характеристики фотодиода для различных значений освещенности  $E$ . Напряжение на фотодиоде устанавливать регулятором Р1. Полученные данные занести в таблицу 13.4.

ТАБЛИЦА 13.4

$U, \text{В}$		2	4	6	8	10	12
$I_{\Phi}, \text{мкА}$	$E = 200 \text{ лк}$						
	$E = 400 \text{ лк}$						
	$E = 1000 \text{ лк}$						

Для снятия энергетических характеристик фотодиода в генераторном режиме установить тумблер В1 в нижнее положение, ручки регуляторов Р1 и Р2 в крайнее левое положение. Соединить перемычкой гнезда Г1 с Г3 (в режиме  $R_{\text{н}} = 0$ ), с Г4 ( $R_{\text{н}} = 200 \text{ Ом}$ ), с Г5 ( $R_{\text{н}} = 500 \text{ Ом}$ ). Снять зависимость фототока  $I_{\Phi}$  от освещенности  $E$ . Данные занести в таблицу 13.5.

ТАБЛИЦА 13.5

$E, \text{лк}$		200	400	1000	1200	1500	2000
$I_{\Phi}, \text{мкА}$	$R_{\text{н}}=0$						
	$R_{\text{н}}=200 \text{ Ом}$						
	$R_{\text{н}}=500 \text{ Ом}$						

Перевести тумблер В1 в верхнее положение и снять энергетические характеристики фотодиода для случая, когда напряжение внешнего источника  $U_{\text{вн}}$  отлично от нуля. Полученные значения занести в таблицу 13.6.

ТАБЛИЦА 13.6

$E, \text{лк}$		200	400	1000	1200	1500	2000
$I_{\Phi}, \text{мкА}$	$U_{\text{вн}}=2 \text{ В}$						
	$U_{\text{вн}}=4 \text{ В}$						

6. Исследовать работу порогового устройства, состоящего из диносторного оптрона и элемента, выполняющего функцию логического И. При подаче на вход элемента И двух логических единиц (тумблеры В1 и В2 в верхнем положении), на выходе формируется сигнал высокого уровня, о чем сигнализирует зажигающийся светодиод VD1. В результате этого загорается и светодиод оптрона VD2, освещающий диностор оптрона и вызывающий его включение, о чем сигнализирует лампочка Л1.

По окончании работы тумблер В5 перевести в нижнее положение, отключить стенд от сети.

### **Содержание отчета**

Расчет предварительного задания к эксперименту. Таблицы экспериментальных значений. Энергетическая характеристика, построенная по данным предварительного задания и сравнительный анализ ее вида с аналогичной характеристикой, построенной по экспериментальным данным. Вольтамперные и энергетические характеристики фоторезистора, построенные по снятым значениям. Вольтамперные и энергетические характеристики фотодиода в генераторном режиме и режиме с внешним источником напряжения.

### **Контрольные вопросы**

1. Перечислите достоинства и недостатки оптоэлектронных приборов.
2. Назовите основные характеристики фоторезисторов.
3. Почему световые характеристики фоторезисторов нелинейны?
4. Что такое удельная чувствительность фоторезистора?
5. Назовите возможные режимы работы фотодиодов.
6. Опишите механизм образования фото-ЭДС при освещении светом *p-n*-перехода.
7. Перечислите основные параметры фотодиода.

## Лабораторная работа № 14

### ИССЛЕДОВАНИЕ АРИФМЕТИКО-ЛОГИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА

Цель работы: изучить принцип действия регистров и АЛУ; освоить методику вычислений и простейшие математические операции.

#### Общие сведения

Арифметико-логическое устройство (АЛУ) является основным функциональным узлом микропроцессора, предназначенным для обработки данных. АЛУ представляет собой комбинационную логическую схему, выполняющую логические и арифметические действия.

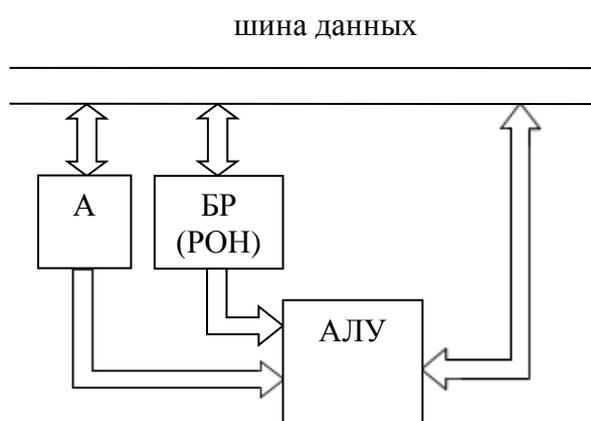


Рисунок 14.1  
Структура АЛУ

*К155ИП3*

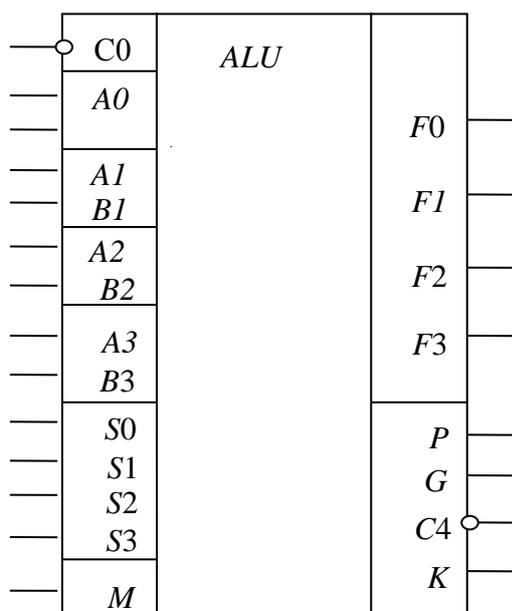


Рисунок 14.2  
АЛУ четырехразрядное

Для ввода, вывода и оперативного хранения информации, а также ее пошаговой загрузки по тактовому импульсу в АЛУ предназначен блок регистров: аккумулятор (А), буферные регистры (БР) или регистры общего назначения (РОН) (рис. 14.1).

Совместная работа АЛУ и аккумулятора позволяет реализовать ряд арифметических и логических операций, в том числе сложение, вычитание, инверсию, сравнение, положительное или отрицательное приращение, сдвиг влево или вправо, логическое И, ИЛИ, исключающее ИЛИ и т.п. Из перечисленных элементарных операций набираются сложные задачи современной микропроцессорной техники.

Для изучения возможностей и имитации работы простого микропроцессора предназначена группа интегральных схем повышенной степени интеграции, входящих в состав лабораторного стенда.

Универсальная микросхема К155ИП3 (рис. 14.2) представляет собой четырехразрядное АЛУ. Основу этой микросхемы составляют 30 простых логических элементов типа И-НЕ, И-ИЛИ-НЕ, исключающие ИЛИ и инверторов.

АЛУ может формировать 16

логических операций и выполнять 16 арифметических действий, включая суммирование и вычитание, увеличение и уменьшение, удвоение и инверсию. Все операции производятся над четырехразрядными числами в двоичных кодах, причем одно из чисел подается на входы  $A3...A0$ , второе - на входы  $B3...B0$ , а результат вычислений появляется на выходах  $F3...F0$ . Характер операций АЛУ зависит от уровня сигнала на входе режима  $M$ : при  $M=0$  выполняются арифметические, а при  $M = 1$  - логические операции. Причем последние выполняются поразрядно. Вид выполняемых операций зависит от кода операции, подаваемого на управляющие входы  $S3...S0$ , в соответствии с табл. 14.1.

ТАБЛИЦА 14.1

Код операции				Вид операции	
$S3$	$S2$	$S1$	$S0$	Арифметические ( $M = 0$ )	Логические ( $M = 1$ )
0	0	0	0	$F=A+C_0$	$F=\bar{A}$
0	0	0	1	$F=A \vee B+C_0$	$F=\overline{A \vee B}$
0	0	1	0	$F=A \vee \bar{B}+C_0$	$F=\bar{A} \cdot B$
0	0	1	1	$F=-I+C_0$	$F=0$
0	1	0	0	$F=A+A \cdot \bar{B} +C_0$	$F=\bar{A} \cdot B$
0	1	0	1	$F=A \cdot \bar{B} +(A \vee B)+C_0$	$F=\bar{B}$
0	1	1	0	$F=A-B-I+C_0$	$F=A \oplus B$
0	1	1	1	$F=A \cdot \bar{B}-I+C_0$	$F=A \cdot \bar{B}$
1	0	0	0	$F=A+A \cdot B+C_0$	$F=\bar{A} \vee B$
1	0	0	1	$F=A+B+C_0$	$F=\overline{A \oplus B}$
1	0	1	0	$F=A \cdot B+(A \vee \bar{B})+C_0$	$F=B$
1	0	1	1	$F=A \cdot B-I+C_0$	$F=A \cdot B$
1	1	0	0	$F=A+A+C_0$	$F=I$
1	1	0	1	$F=A+(A \vee B)+C_0$	$F=A \vee \bar{B}$
1	1	1	0	$F=A+(A \vee \bar{B})+C_0$	$F=A \vee B$
1	1	1	1	$F=A-I+C_0$	$F=A$

Обозначения:  $\vee$  - логическое сложение;  $\cdot$  - логическое умножение;

$\oplus$  - сложение по модулю 2 (исключающее ИЛИ);  $+$  - арифметическое сложение;  $-$  - арифметическое вычитание;  $F=A+A$  - сдвиг влево на один разряд.

Ряд арифметических операций можно использовать либо для загрузки операндов (например,  $F=A$  или  $F=B$  для  $A=0$  при  $S=0000$  или  $S=1001$  соответственно), либо для сложения в прямом коде  $F=A+B$ , или вычитания в дополнительном коде  $F=A-B$ , либо для более сложных действий.

При выполнении арифметических операций учитывается признак переноса с предыдущего разряда, подаваемый на вход  $\bar{C}_0$ . При этом

формируется признак переноса четвертого разряда  $\overline{C4}$ . Для удобства наращивания разрядности АЛУ при объединении нескольких микросхем вход и выход признаков переноса выполнены инверсными. При выполнении логических операций (логическое И, ИЛИ, исключающее ИЛИ и т.п.) с использованием прямых или инверсных кодов состояние входа переноса  $\overline{C0}$  не влияет на полученные результаты.

Для расширения функциональных возможностей АЛУ предусмотрены выходы образования переноса  $G$  и распространения переноса  $P$ : первый переключается при достижении  $1111_2=15_{10}$ , а второй - при появлении переноса в любом из четырех разрядов.

В схеме АЛУ предусмотрена также возможность сравнения операндов: если  $A=B$ , то на выходе  $K$  появляется уровень логической единицы.

Микросхема K155ИР13 (рис. 14.3) представляет собой восьмиразрядный сдвигающий регистр, предназначенный для записи информации в параллельном

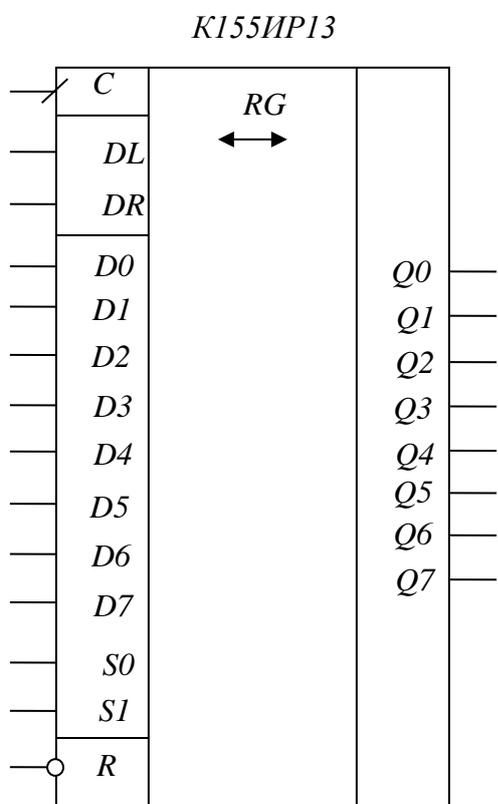


Рисунок 14.3  
Реверсивный регистр

или последовательном коде, ее хранения или сдвига влево и вправо. Основу этой микросхемы составляет 8 синхронизируемых триггеров в сочетании с логическими элементами И-НЕ, И-ИЛИ-НЕ и инверторами.

Схема имеет восемь входов  $D7...D0$  параллельной записи, два входа последовательной записи  $DL$  - со сдвигом влево и  $DR$  - со сдвигом вправо, управляющие входы  $S0$  и  $S1$  для выбора режима работы, тактовый вход  $C$  и установочный вход  $\overline{R}$ , а также восемь выходов  $Q7...Q0$ .

В зависимости от состояний установочного входа и управляющих входов  $S0$  и  $S1$  схема может работать в различных режимах (табл. 14.2).

Как видно из табл. 14.2, параллельная запись информации осуществляется через входы  $D7...D0$  при  $S0 = S1 = 1$ , и ее появление на выходах  $Q7...Q0$  обеспечивается синхронно по положительному фронту тактового импульса.

Примечание: при переключении регистра сдвига в режим «хранение» необходимо кнопку «такт» держать в нажатом состоянии.

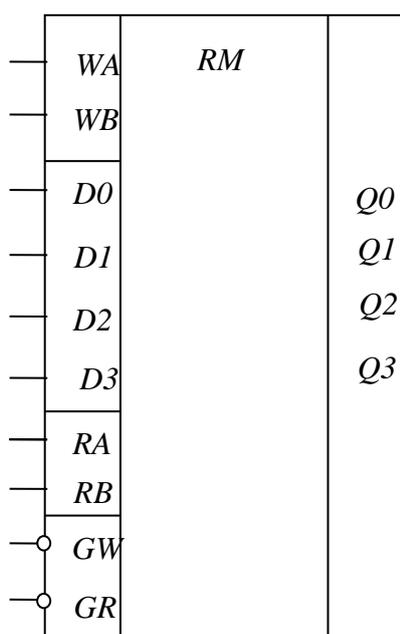
Если сигнал подавать на вход  $DL$ , то при  $S1=1$  и  $S0=0$  каждый тактовый импульс будет осуществлять ее последовательную запись с одновременным сдвигом влево. Как известно, такая операция эквивалентна умножению двоичного числа на два. При  $S1=0$  и  $S0=1$  по входу осуществляется последовательная запись со сдвигом вправо, что эквивалентно делению двоичного числа на два.

ТАБЛИЦА 14.2

Режим работы	Состояние входов					Такт С
	уст.	код режима		посл. зап.		
	$\bar{R}$	S1	S0	DL	DR	
Установка в "0" (сброс)	0	x	x	x	x	x
Параллельная запись	1	1	1	0	0	┌
Последовательная запись со сдвигом влево	1	1	0	0/1	0	└
Последовательная запись со сдвигом вправо	1	0	1	0	0/1	└
Хранение	1	0	0	0	0	└

Естественно, что при отсутствии тактового импульса записанная информация будет храниться в регистре до прихода нового импульса, точнее перепада 0/1. Вместе с тем, режим хранения обеспечивается и при установке  $S2=S1=0$  как результат запрета на переключение триггеров.

K155ПП1

Рисунок 14.4  
Регистр памяти

Микросхема K155ПП1 (рис. 14.4), представляет собой четырехразрядный регистр памяти, предназначенный для записи и хранения информации емкостью 16 бит, и обычно используется в качестве оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) или буферного регистра (БР). Основу схемы составляют 16 триггеров DV-типа, управляемых с помощью логических элементов И-НЕ, И-ИЛИ-НЕ. В структурном отношении регистровая память состоит из матрицы 4x4 элемента, коммутируемой с помощью входного дешифратора и 4 выходных мультиплексоров.

Схема имеет четыре информационных входа  $D3...D0$ , по два адресных входа записи  $WB$ ,  $WA$  и считывания  $RB$ ,  $RA$  соответственно, отдельные стробирующие входы  $\overline{GW}$  и  $\overline{GR}$ , а также четыре выхода  $Q3...Q0$ .

Если на вход  $\overline{GR}$  подать стробирующий импульс  $\overline{GR}=0$ , то, в зависимости от выбранного кода адреса 00...11 на входах  $WB$  и  $WA$ , производится одновременная запись информации со входов  $D3...D0$  только в четыре "вертикальные" ячейки матрицы, соответственно от №№ 1,5,9,11 до №№ 4,8,12,16. При этом каждый триггер в своей ячейке может переключиться при условии  $V=1$ , которое выполняется только при определенной комбинации сигналов на адресных входах.

Считывание записанной информации из соответствующих "вертикальных" ячеек производится при условии установки необходимого адреса и разрешается стробом  $\overline{GR}=0$ . Поскольку выходные логические элементы этой микросхемы выполняются с открытым коллектором, то возможно наращивание емкости памяти при объединении выходов с помощью "Монтажного ИЛИ".

При считывании информации из ячеек памяти не происходит ее разрушения, даже при многократном обращении к памяти.

### Предварительное задание к эксперименту

Выполнить арифметические и логические операции (табл. 14.1) над данными в табл. 14.3 числами, переведя их в двоичный код.

ТАБЛИЦА 14.3

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
<i>A</i>	9	10	11	12	11	14	5	6
<i>B</i>	6	5	4	3	2	1	11	10
<i>C<sub>0</sub></i>	0	0	1	1	0	0	1	1

### Порядок выполнения эксперимента

1. Ознакомиться со схемотехникой исследуемых ИС и органов управления на лабораторном стенде. Коды режима, операции и адреса на соответствующих входах, исследуемых ИС задаются с помощью микротумблеров на передней панели стенда (в нижнем положении - уровень логического нуля, в верхнем - уровень логической единицы). Получить разрешение преподавателя на включение питания.

2. Для исследования сдвигающего регистра К155ИР13 необходимо подавать на информационные входы его младших и старших разрядов сигналы с наборного поля И-ИЛИ, константы с гнезд "лог.0" и "лог.1", а состояние выходов определять с помощью светодиодных индикаторов.

Устанавливая различные коды режима в соответствии с табл. 17.2 и манипулируя кнопками "набор", "такт" и "сброс", реализовать последовательную и параллельную запись, а также сдвиг вправо и влево нескольких слов данных. Одно из слов сохранить в регистре для последующего использования.

3. Для исследования регистра К155РП1 задать поочередно коды адреса 00...11 и записать с наборного поля в регистровую память четыре слова данных, а затем, подав  $\overline{GR}=0$ , прочитайте их с помощью светодиодных индикаторов. Отметить эти результаты в таблице истинности.

4. При исследовании АЛУ К155ИП3 выполнить все операции табл. 17.1 согласно предварительному заданию. При этом на информационные входы *A3...A0* и *B3...B0* необходимо подавать отдельно различные сигналы с наборного поля и с выхода любого регистра; результат операций также отметить в отчете.

5. Используя регистр сдвига и АЛУ по своему прямому назначению, а регистр памяти - в качестве ОЗУ, запишите в последнем результаты ваших вычислений.

6. Используя регистр памяти в качестве буферного регистра, а регистр

сдвига - в качестве аккумулятора, подготовить схему соединений ИС для реализации простой программы микропроцессора: очистка; загрузка; сложение (вычитание); хранение.

При выполнении этой программы необходимо:

- записать один операнд в аккумулятор,
- запомнить второй операнд в буферном регистре,
- получить результат их сложения (вычитания) в АЛУ,
- переслать сумму (разность) в аккумулятор и сохранить ее.

7. В предыдущей схеме реализовать следующие операции:

- приращение на единицу;
- инвертирование (дополнение до 1);
- запись в память.

8. Факультативно. Проверить результаты сложения функций  $S = A + \bar{A}$  и  $F = A + D$ , где  $D = \bar{A} + 0001$ ; и объяснить их. Доказать, что эти результаты будут всегда постоянными.

9. Факультативно. Подготовить схему соединений регистров и АЛУ для умножения двух операндов (по заданию преподавателя).

Для реализации этой задачи (по аналогии с умножением десятичных чисел) необходимо разместить множимое в регистре сдвига, а множитель - в регистре памяти, а с помощью АЛУ обеспечить сложение частичных произведений.

### Содержание отчета

Цель работы; условное изображение исследуемых микросхем (рис. 14.2-14.4); рассчитанная в предварительном задании табл. 14.1 с результатами операций по п.4; таблица истинности по п.3; структурная схема соединений по п.6 и п.7.

### Контрольные вопросы

1. Поясните смысл используемых в работе терминов: операнд, слово данных, аккумулятор, запись в память, код операции и т.д. 2. Объясните назначение и перечислите функциональные возможности каждой из исследуемых микросхем. 3. Какие основные задачи выполняют регистры и АЛУ в микропроцессорных системах? 4. Чем отличается дополнительный код от прямого и инверсного? 5. С какой целью в микропроцессорах предусматриваются операции инкремента и декремента? 6. Для каких целей в АЛУ предусматриваются выводы образования и распространения переноса? Какая информация появляется на выходе сравнения АЛУ? 7. Каким образом и с какой целью используется проверка содержимого АЛУ на нуль? 8. Предложите методику и способ вычисления задач типа  $F = 2(A + B)$ ;  $F = A + B + 1$  (или других по заданию преподавателя). 9. Предложите схемную реализацию устройства для сравнения двух операндов, если  $A = \text{const}$ , а  $B = \text{var}$ . 10. Выделите на принципиальных электрических схемах АЛУ и регистров шины данных, адреса и управления. Дайте необходимые пояснения.

## Лабораторная работа №15

### ИССЛЕДОВАНИЕ АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ И ЦИФРО-АНАЛОГОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Цель работы: изучение принципа действия аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразователей; практическое исследование преобразования напряжений в цифровой код методом поразрядного уравнивания на основе параллельного цифро-аналогового преобразователя с матрицей на весовых резисторах.

#### Общие сведения

Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) преобразуют аналоговые величины в цифровой код и обеспечивают связь различных аналоговых измерителей с цифровыми устройствами. Цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП) осуществляют преобразование цифровых величин в аналоговые.

Из многообразия серийно изготавливаемых промышленностью преобразователей по быстродействию, точности и надежности выделяются параллельный ЦАП и АЦП поразрядного уравнивания.

Основным элементом параллельного ЦАП с матрицей на резисторах является операционный усилитель (ОУ)  $DA$ , работающий в режиме суммирования входных токов  $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$ , количество которых равно числу разрядов кода (рис. 18.1).

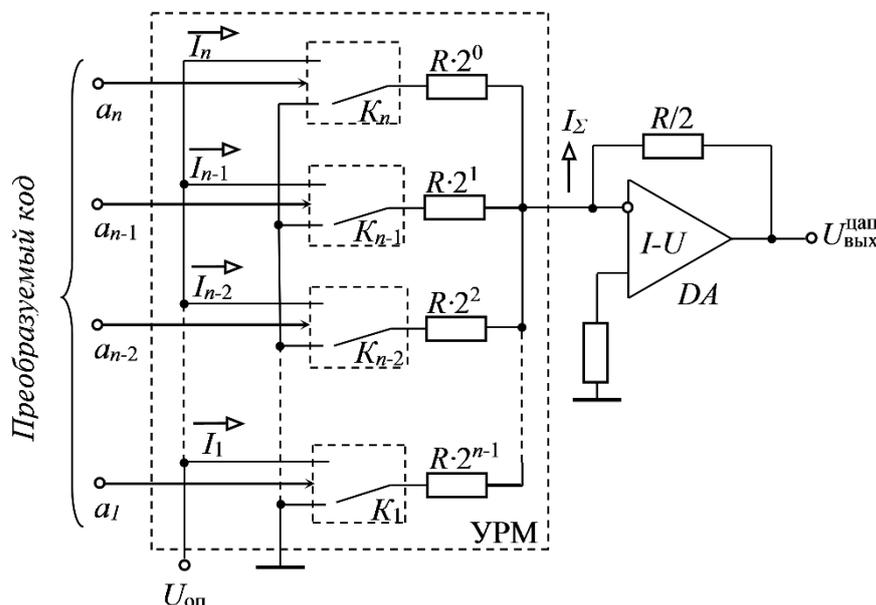


Рис 15.1. Параллельный ЦАП с управляемой резистивной матрицей

Преобразуемый код поступает на входы ключей  $K_1, K_2, K_3, \dots, K_n$ , и в зависимости от цифры в данном разряде  $a_i$  (0 или 1), резисторы подключаются либо к шине “земля”, либо к источнику опорного напряжения  $U_{оп}$ . Сопротивления резисторов управляемой резистивной матрицы (УРМ) набираются по двоичному коду  $R_i = 2^{n-i} \cdot R$ . При таких условиях ток

младшего разряда  $I_1 = U_{\text{ОП}} / (R \cdot 2^{n-1})$ , а суммарный ток усилителя равен сумме всех токов, протекающих от источника  $U_{\text{ОП}}$  через ветви с замкнутыми ключами  $I_{\Sigma} = (2^{n-1} a_n + 2^{n-2} a_{n-1} + \dots + 2^1 a_2 + 2^0 a_1) I_1$ . Ток  $I_{\Sigma}$  и информационная составляющая выходного напряжения ЦАП на выходе преобразователя  $DA$  «ток – напряжение» ( $I-U$ ) пропорциональны входному коду

$$U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦАП}} = I_{\Sigma} \cdot R/2 = \left( \frac{U_{\text{оп}}}{2} a_n + \frac{U_{\text{оп}}}{4} a_{n-1} + \dots + \frac{U_{\text{оп}}}{2^{n-1}} a_2 + \frac{U_{\text{оп}}}{2^n} a_1 \right). \quad (1)$$

При этом, если все значения разрядов кода  $a_1, a_2, \dots, a_n$  равны единицам, то  $U_{\text{АЦП}}^{\text{АИ}} = U_{\text{он}} = U_{i\delta}$ . Приняв  $U_{\text{он}} = 10,24$  В при  $n = 12$ , величина минимального уровня квантования или шага будет равна цене деления цифрового измерительного прибора  $\Delta U = U_{\text{он}} / 2^n = 2,5$  мВ. В этом случае при единичных значениях всех 12 разрядов кода набор образцовых напряжений в соответствии с (1) составит:

$$U_{\text{АЦП}}^{\text{АИ}} = U_{\text{он}} = U_{i\delta} = 5120 \hat{A} + 2560 \hat{A} + 1280 \hat{A} + 640 \hat{A} + 320 \hat{A} + 160 \hat{A} + 80 \hat{A} + 40 \hat{A} + 20 \hat{A} + 10 \hat{A} + 5 \hat{A} + 2,5 \hat{A} = 10,24 \hat{A}.$$

С позиций оптимального сочетания быстродействия, точности и надежности для построения АЦП может быть использован метод поразрядного уравнивания. Структурная схема АЦП с поразрядным уравниванием представлена на рис. 15.2.

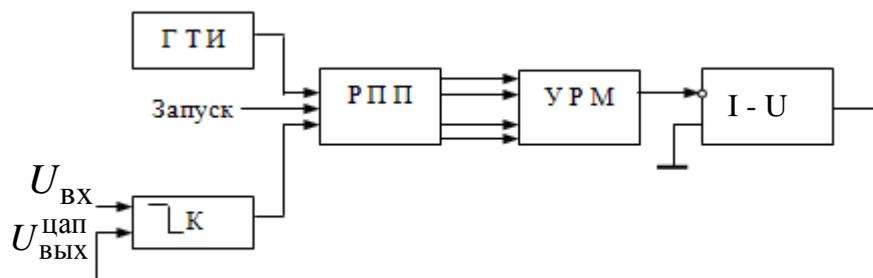


Рисунок 15.2. Структурная схема АЦП с поразрядным уравниванием

После запуска АЦП под действием сигналов генератора тактовых импульсов (ГТИ) в регистре последовательного приближения (РПП) вырабатывается испытательный код, который, начиная от старшего 12-го разряда и кончая первым младшим разрядом, с помощью УРМ и преобразователя  $I-U$  преобразуется в уровни испытательного напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦАП}}$ . Входное напряжение  $U_{\text{ВХ}}$  сравнивается с испытательным напряжением  $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦАП}}$  компаратором К, и в зависимости от результата сравнения соответствующее

значение (0 или 1) разряда заносится в РПП и учитывается при последующих тактах сравнения. Выходной код РПП является цифровым аналогом  $U_{\text{ВХ}}$ .

Очевидно, что набор образцовых напряжений не может быть осуществлен с большей точностью, чем шаг дискретизации  $\Delta U$ . Поэтому значение  $\Delta U$  определяет основную методическую составляющую погрешность АЦП, и после преобразования (завершения всех 12-ти тактов при  $n=12$ ), установится приблизительное равенство двух сравниваемых напряжений  $U_{\text{ВХ}} \approx U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦАП}}$ .

Рассмотрим численный пример (см. табл. 15.1).

ТАБЛИЦА 15.1

№ такта	№ разряда	$U_{\text{ВХ}}$ , мВ	$U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦАП}}$ , мВ	$a_i$
1	12	2720	5120	0
2	11	2720	2560	1
3	10	2720	2560+1280	0
4	9	2720	2560+640	0
5	8	2720	2560+320	0
6	7	2720	2560+160	1
7	6	2720	2560+160+80	0
8	5	2720	2560+160+40	0
9	4	2720	2560+160+20	0
10	3	2720	2560+160+10	0
11	2	2720	2560+160+5	0
12	1	2720	2560+160+2,5	0

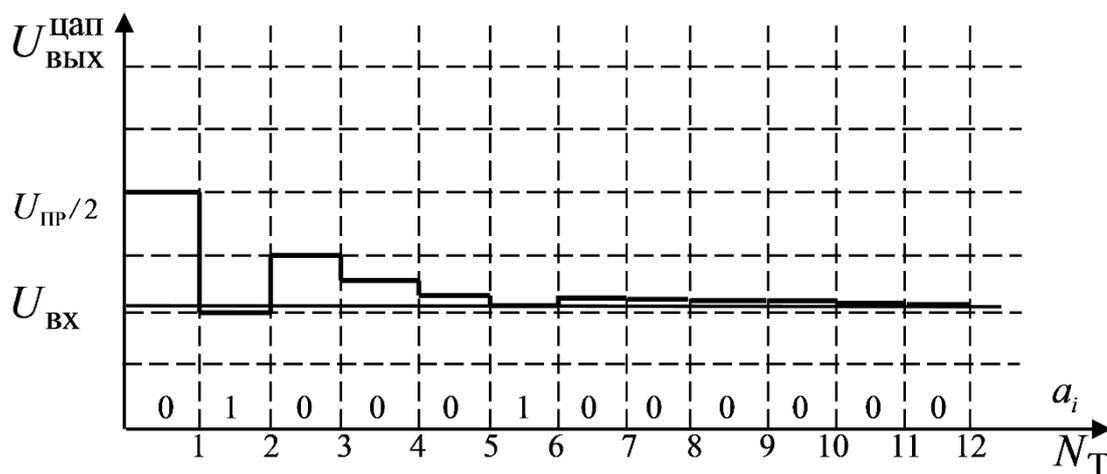


Рисунок 15.3

Пусть.  $U_{\text{ВХ}} = 2720$  мВ. Так как уровень напряжения старшего разряда равен  $U_{\text{ИР}}/2 = 10240/2 = 5120$  мВ, то значение  $a_i = a_{12}$  старшего  $n$ -го разряда, зарегистрированное компаратором, будет равно «0» ( $U_{\text{ВХ}} = 2720 < U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦАП}} = 5120$  мВ). Поэтому для первого такта уравновешивания

будет получено значение  $a_i = a_{12} = 0$ . Уровень  $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{АЦП}}$  следующего  $n-1$  разряда будет в два раза меньше старшего  $n$ -го разряда, и компаратор регистрирует значение  $a_{11} = 1$  ( $U_{\text{ВХ}} = 2720 > U_{\text{ВЫХ}}^{\text{АЦП}} = 2560$  мВ). На третьем такте уравнивания  $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{АЦП}} = 2560 + 2560/2 = 3840$  мВ, и будет зарегистрировано значение  $a_{01} = 0$ ; и т. д. до 12-го последнего такта уравнивания. Значения  $a_i$  для всех 12-ти тактов (разрядов) приведены в табл. 15.1. На рис. 15.3 представлена зависимость  $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{АЦП}}$  и  $a_i$  в функции от тактов уравнивания  $N_T$ . АЦП поразрядного уравнивания исследуется в настоящей работе. Схема установки представлена на рис. 15.4.

АЦП содержит: БИС DA1 типа KP572PB1A в специальном включении, выполняющую функции РПП и УРМ; ОУ DA2 типа KP544УД1А (преобразователь I-U); компаратор DA3 типа K554CA3; источник опорного напряжения ИОН; одновибратор ОВ на ИС K561ЛА7; ГТИ; счетчик циклов уравнивания разрядов в одном преобразовании на ИС DD1 типа K155IE5; дешифратор количества импульсов циклов уравнивания на ИС DD3 типа K155ИД3 и инверторе DD2; переключатель количества циклов уравнивания разрядов в одном преобразовании SA4; регулятор входного напряжения  $U_{\text{ВХ}}$  на резисторе R1; переключатели SA1, SA2 для перевода режима работы схемы из непрерывного в ждущий; переключатель длительности тактовых импульсов (2 сек - 2 мс) SA3; кнопку запуска в ждущем режиме SB1 “запуск”; R-S триггер DD6 конца цикла преобразования; согласующие инверторы DD4, DD5; светодиоды HL1... HL12 для отображения двоичного выходного кода АЦП; светодиод HL13, индицирующий конец цикла преобразования АЦП; диоды VD1, VD2 для защиты микросхемы от неправильного подключения питающих напряжений; диод VD3 для защиты DA1 при пробое ОУ DA2; клеммы для измерения входного  $U_{\text{ВХ}}$  и выходного  $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ}}^{\text{АЦП}}$  напряжений АЦП.

Изучаемый АЦП может работать в трех режимах преобразования:

1. *Ждущий с регулировкой переключателем SA4 количества разрядов и одноразовым запуском цикла преобразования кнопкой SB1.* Переключатели SA1 и SA2 должны быть выключены (в нижнем положении).
2. *Непрерывный или периодический с регулировкой количества разрядов и переключателем SA4 и периодическим автозапуском после каждого преобразования.* Переключатель SA1 находится в безразличном положении (включен или выключен), а SA2 включен (в верхнем положении).
3. *Непрерывный или периодический без регулирования количества  $n$  разрядов ( $n = 12$ ).* Переключатель SA1 включен, SA2 выключен.

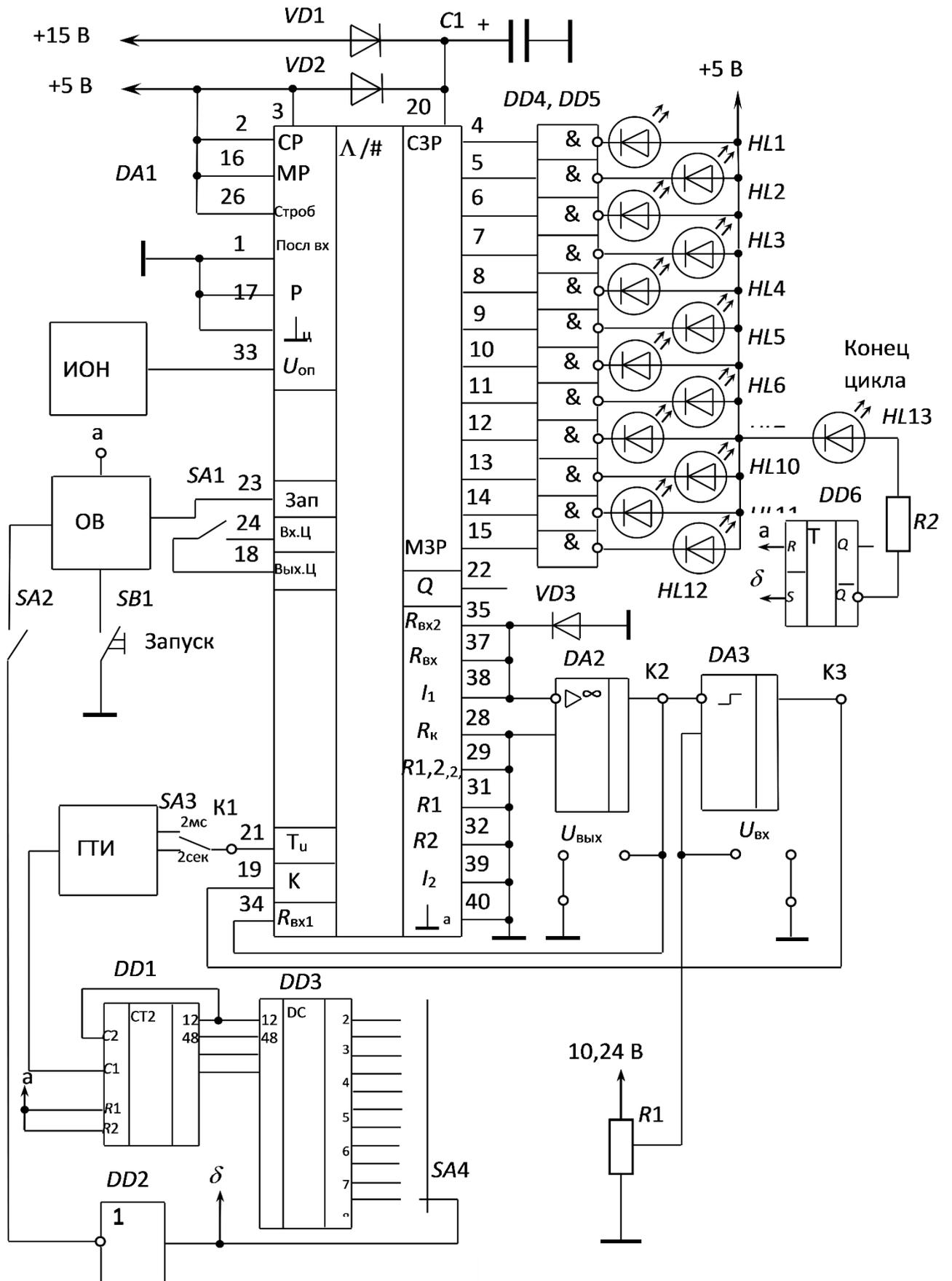


Рисунок 15.3 Схема установки

В одноразовом, *ждущем* режиме запуск АЦП осуществляется выходным импульсом ОВ, поступающим на вход 23  $DA1$  при каждом нажатии кнопки  $SB1$  после загорания светодиода  $HL13$ . Преобразование в каждом цикле (поразрядное) осуществляется под действием выходных импульсов ГТИ, поступающих на вход 21  $DA1$  (на один разряд используется два импульса ГТИ). Период повторения ГТИ (2 с или 2 мс) изменяется переключателем  $SA3$  при всех режимах работы. С выхода 38  $DA1$  выходной ток управляемой матрицы поступает в преобразователь на микросхеме  $DA2$  «ток – напряжение» ( $I-U$ ), преобразуется в напряжение и поступает на вход компаратора  $DA3$ . В компараторе это напряжение ( $U_{\text{ЦАП}}^{\text{ВЫХ}}$ ) сравнивается с входным  $U_{\text{ВХ}}$ . Информация результата сравнения (0 или 1) поступает на вход 19  $DA1$  и запоминается в РПП. После квантования 12 разрядов и сброса всех элементов в исходное состояние включается новый цикл преобразования кнопкой  $SB1$ . Информация каждого цикла преобразования выводится через согласующие каскады  $DD4$ ,  $DD5$  на светодиоды  $HL1...HL12$ . Светодиод  $HL13$  служит для индикации конца цикла преобразования.

Так как уравнивание осуществляется от старшего разряда к младшему, то и нумерация светодиодов  $HL$  для индикации значений  $a_i$  разрядов осуществляется от старшего разряда к младшему ( $HL1$  – старший, 12-й разряд, а  $HL12$  – младший).

При режиме *непрерывной работы с регулировкой количества  $n$  разрядов*, независимо от положения переключателя  $SA1$ , запуск АЦП осуществляется выходным импульсом ОВ по входу “запуск” (23 ножка  $DA1$ ). При этом ОВ запускается через замкнутый переключатель  $SA2$  перепадом напряжения с выхода инвертора  $DD2$  блока ограничения количества разрядов в цикле преобразования ( $DD1$ ,  $DD2$ ,  $DD3$ ). Количество  $n$  разрядов в каждом цикле преобразования при этом определяется положением переключателя  $SA4$ . Ограничиваются младшие, начиная с первого, разряды.

Режим *непрерывной работы без ограничения разрядности* обеспечивается за счет запуска АЦП после окончания преобразования всех 12-ти разрядов цикла и подачи импульсов с 18-го вывода микросхемы  $DA1$  «Выход Цикла» через замкнутый переключатель  $SA1$  на 24-й вывод “Вход цикла”. Так как на преобразование одного разряда используется 2 импульса ГТИ, то при периоде повторения  $T$  напряжения ГТИ для всех 12-ти разрядов с учетом потери такта “конец цикла” и такта на восстановление исходного состояния время полного преобразования (быстродействие АЦП) составит  $T_n = 26T$ .

Основными параметрами ЦАП и АЦП являются разрешающая способность, точность и быстродействие (время одного преобразования). Разрешающая способность ЦАП и АЦП равна шагу квантования  $\Delta U$ . Точность АЦП, в основном, определяется погрешностями ЦАП и компаратора. Погрешность АЦП состоит из методической и инструментальной. Методическая погрешность определяется величиной шага  $\Delta U$  и численно ее значения не выходят за пределы  $\pm \Delta U/2$ . Инструментальная погрешность содержит: основную составляющую -

погрешность дрейфа нуля (аддитивную составляющую), и погрешность нестабильности чувствительности или нестабильности коэффициента передачи элементов АЦП, в основном, УРМ (мультипликативную составляющую). В большинстве случаев инструментальная погрешность цифровых измерителей значительно меньше методической, и поэтому точность цифровых измерителей часто оценивается величиной относительной приведенной методической погрешности  $\gamma \cong 1/2^n$ .

Точность ЦАП оценивается погрешностью преобразования входного кода при единичных значениях все разрядных коэффициентов в аналог

$$\gamma_{\text{ЦАП}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦАП}} - U_{\text{ПР}}}{U_{\text{ПР}}} \cdot 100\% .$$

При экспериментальном исследовании погрешность АЦП определяется из выражения:

$$\gamma_{\text{АЦП}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}^{\text{АЦП}} - U_{\text{ПР}}}{U_{\text{ПР}}} \cdot 100\% ,$$

где  $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{АЦП}}$  определяется по выходному коду АЦП и выражению (1) при  $U_{\text{ВХ}} = U_{\text{ПР}}$ .

Очевидно, экспериментальное значение  $\gamma_{\text{АЦП}} > \gamma = 1/2^n$ , так как оно содержит также и другие составляющие инструментальной погрешности.

Погрешность преобразования входных напряжений  $U_{\text{ВХ}}$  в код АЦП (погрешность преобразования  $U_{\text{ВХ}}$ ) определяется по формуле

$$\gamma_{n\text{АЦП}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}^{\text{АЦП}} - U_{\text{ВХ.Э.}}}{U_{\text{ВХ.Э.}}} \cdot 100\% ,$$

где  $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{АЦП}}$  определяется по выходному коду АЦП и выражению (1) при входном напряжении  $U_{\text{ВХ}}$ ;  $U_{\text{ВХ.Э.}}$  – напряжение  $U_{\text{ВХ}}$ , измеренное эталонным вольтметром.

Аналогично определяется и погрешность преобразования входного кода  $U_{\text{ВХ}}$  в аналог ЦАП:

$$\gamma_{n\text{ЦАП}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦАП}} - U_{\text{ВЫХ}}^{\text{АЦП}}}{U_{\text{ВЫХ}}^{\text{АЦП}}} \cdot 100\% ,$$

где  $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦАП}}$  – выходное напряжение ЦАП, соответствующее входному коду от исследуемого напряжения  $U_{\text{ВХ}}$ ;  $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{АЦП}}$  определяется по коду АЦП (входному коду ЦАП) и выражению (1) при исследуемом напряжении  $U_{\text{ВХ}}$ .

Как отмечалось, быстродействие АЦП определяется временем одного преобразования  $U_{ВХ}$  в цифровой код.

### Предварительное задание к эксперименту

1. Изучить метод поразрядного уравнивания.
2. Построить зависимость выходного напряжения ЦАП  $U_{ВЫХ}^{ЦАП}$  и разрядных коэффициентов  $a_i$  в функции от номера такта  $N_T$  (разряда) уравнивания  $U_{ВХ}$  при  $U_{ВХ} = 0$  и  $U_{ВХ} \geq U_{пр} = 10,24$  В для двух значений разрядов преобразования  $n_1$  и  $n_2$ , указанных в табл. 15.2. Результаты расчетов свести в таблицу 15.3.
3. Определить для заданных в табл. 15.2 двух значений разрядов основную приведенную методическую погрешность измерения  $\gamma$ .
4. Для тех же двух значений разрядов определить разрешающую способность АЦП  $\Delta U = \frac{U_{пр}}{2^n}$ .

ТАБЛИЦА 15.2

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
$n_1$	5	6	7	8	5	6	7	5
$n_2$	12	11	10	12	11	10	12	10

ТАБЛИЦА 15.3

$U_{ВХ} = 0$				$U_{ВХ} \geq 10,24$ В							
№ такта	№ разр.	$U_{ВЫХ}^{ЦАП}$		$a_i$		№ такта	№ разр.	$U_{ВЫХ}^{ЦАП}$		$a_i$	
1	12					1	12				
2	11					2	11				
...	...					...	...				
...	...					...	...				
12	1					12	1				

### Порядок выполнения эксперимента

1. Подключить к клеммам стенда  $U_{ВХ}$  и  $U_{ВЫХ}^{ЦАП}$  цифровые вольтметры, к контрольной точке  $K_2$  – вход осциллографа. Установить ждущий режим работы (переключатели  $SA1$  и  $SA2$  выключены – в нижнем положении). Включить тумблеры напряжения сети макета, осциллографа и вольтметров – в положение “Вкл.”.
2. После 5 минутного прогрева установить потенциометр  $R1$  в крайнее левое положение ( $U_{ВХ} = 0$ ) и при  $n = 12$  (переключатель  $SA4$  – в положение “12”) и длительности такта ГТИ 2 с (переключатель  $SA3$  – в положении “2 сек”), после неоднократного нажатия кнопки  $SB1$  “запуск” цикла преобразования по повторяемости выходного кода убедиться в стабильности работы АЦП.

3. Включить непрерывный режим без регулирования количества  $n$  разрядов (при  $n = 12$ , включенном SA1 и выключенном SA2) и проанализировать работу АЦП по осциллограммам  $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦАП}}$  для напряжений  $U_{\text{ВХ}} = 0$  и  $U_{\text{ВХ}} > 10,24 \text{ В}$  при периоде тактовой частоты ГТИ 2 мс (SA3 в положении 2 мс). Зарисовать осциллограммы  $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦАП}}$  с экрана осциллографа. Отметить на осциллограммах уровни  $U_{\text{ВХ}} = 0$  и  $U_{\text{ВХ}} \geq 10,24 \text{ В}$ .

4. В непрерывном режиме с регулировкой количества  $n$  разрядов переключателем SA4 (SA1 - в безразличном, включенном или выключенном положении, SA2 - включен, в верхнем положении) для двух значений  $U_{\text{ВХ}} = 0$  и  $U_{\text{ВХ}} \geq 10,24 \text{ В}$ , двух заданных значений разрядов и при длительности такта ГТИ 2 мс (SA3 в положении 2 мс) зарисовать осциллограммы  $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦАП}}$  с экрана осциллографа. Отметить на осциллограммах уровни  $U_{\text{ВХ}} = 0$  и  $U_{\text{ВХ}} \geq 10,24 \text{ В}$ . Сравнить полученные осциллограммы с расчетными для  $U_{\text{ВХ}} = 0$  и  $U_{\text{ВХ}} \geq 10,24 \text{ В}$  и с осциллограммами п. 3.

5. В ждущем режиме (переключатели SA1 и SA2 выключены) при заданных в предварительном задании двух значениях разрядов  $n_1$  и  $n_2$  и длительности такта ГТИ 2 с определить значения кодов при  $U_{\text{ВХ}} = 0$ ,  $U_{\text{ВХ}} \geq 10,24 \text{ В}$ , а также при трех промежуточных значениях  $U_{\text{ВХ}}$ , находящихся, соответственно, в пределах: (0 ... 3) В; (3 ... 7) В; (7 ... 10,24) В. Проследить на осциллографе за изменениями уровня  $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦАП}} = U_{\text{ВЫХ}}$  в процессе уравнивания всех значений  $U_{\text{ВХ}}$ , записав при этом в табл.8.4 значения  $U_{\text{ВХ.Э}}$ , код при разрядности  $n_1$ , код при разрядности  $n_2$  и  $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦАП}}$  после уравнивания, зарегистрированные цифровым вольтметром.

ТАБЛИЦА 18.4

Измерено				Вычислено			
$U_{\text{ВХ.Э}}, \text{ В}$	код $U_{\text{ВХ.Э}}$ при $n_1$	код $U_{\text{ВХ.Э}}$ , при $n_2$	$U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦАП}}, \text{ В}$	$\gamma_{\text{нАЦП}}$		$\gamma_{\text{нЦАП}}$	
				$n_1 =$	$n_2 =$	$n_1 =$	$n_2 =$
0							
10,24							
$U_1$							
$U_2$							
$U_3$							

6. По полученным в п. 5 результатам определить расчетным путем для каждого из входных напряжений  $U_{\text{ВХ.Э}}$  (кроме  $U_{\text{ВХ.Э}} = 0$  и  $U_{\text{ВХ.Э}} \geq 10,24 \text{ В}$ ) при заданной разрядности  $n_1$  и  $n_2$  погрешность  $\gamma_{\text{нАЦП}}$  преобразования  $U_{\text{ВХ.Э}}$  в код и погрешность  $\gamma_{\text{нЦАП}}$  преобразования кода напряжений  $U_{\text{ВХ.Э}}$  в аналог ЦАП.

Результаты расчетов внести в табл. 15.4. Как изменяются погрешности  $\gamma_{\text{нАЦП}}$  и  $\gamma_{\text{нЦАП}}$  с изменением значений  $U_{\text{ВХ.Э}}$  и разрядности преобразования  $n$ ?

### Содержание отчета

Цель работы; схема лабораторной установки (рис. 15.4); таблица результатов измерений и расчетов; расчетные и снятые экспериментально осциллограммы зависимости  $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦАП}}$  в функции от тактов уравнивания напряжений  $U_{\text{ВХ}} = 0$  и  $U_{\text{ВХ}} \geq 10,24 \text{ В}$  при  $n_1$  и  $n_2$  разрядах преобразования.

### Контрольные вопросы

1. Для каких целей применяется ЦАП и АЦП?
2. Какие функции выполняет РПП?
3. Как осуществляется процесс поразрядного уравнивания?
4. Как работает ЦАП параллельного преобразования?
5. Какие причины ограничивают разрядность ЦАП?
6. Почему в АЦП используется двоичная система счисления?
7. Как оценивается точность и разрешающая способность АЦП и ЦАП?
8. Как оценивается точность преобразования напряжений в код АЦП и точность преобразования входного кода в аналог ЦАП?

## Лабораторная работа № 1.16 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И АВТОМАТИКИ

**Цель работы:** Изучение работы некоторых электронных элементов и узлов, конструирование на их основе устройств автоматики.

### Общие сведения

В лабораторной работе рассматриваются следующие электронные элементы и узлы.

$\overline{RS}$  - т р и г г е р на двух логических элементах 2И-НЕ (рис 19.1). Триггер имеет входы  $\overline{S}$ ,  $\overline{R}$  и выходы  $Q$  (прямой) и  $\overline{Q}$  (инверсный), напряжение которых может иметь два уровня: низкий  $U^0 = 0.1...0.4$  В (логический ноль) или высокий  $U^1 = 2.5...5$  В (логическая 1).

Входы  $\overline{S}$  и  $\overline{R}$  обозначаются как инверсные в связи с тем, что для данного триггера управляющими являются сигналы низкого (нулевого) уровня.

При неизменных входных сигналах триггер находится в одном из двух устойчивых состояний:  $Q = 1$  или  $Q = 0$ . Перевод триггера из одного состояния в другое производится подачей на входы  $\overline{S}$  или  $\overline{R}$  кратковременного нулевого сигнала: при  $\overline{S} = 0$  триггер устанавливается в состояние  $Q = 1$ , при  $\overline{R} = 0$  – переходит в состояние  $Q = 0$ . Комбинация  $\overline{S} = 0$  и  $\overline{R} = 0$  несущая противоречивые команды – «установить 1» и «установить 0» - является запрещенной (неопределенной). Триггер - это простейший элемент памяти, так как сохраняет информацию о последней из входных команд.

М у л ь т и в и б р а т о р на двух логических элементах (ЛЭ) 2И-НЕ (рис. 16.2) предназначен для выработки прямоугольных импульсов на выходе  $Q_2$  при сигнале на входе  $X_1 = 1$ . Если  $X_1 = 0$ , то  $Q_1 = 1$ ,  $Q_2 = 0$ , конденсатор  $C$  заряжен, и,

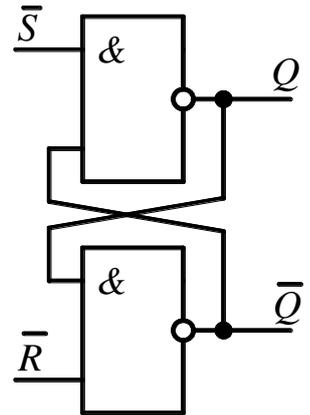


Рисунок 16.1  
 $RS$  - триггер

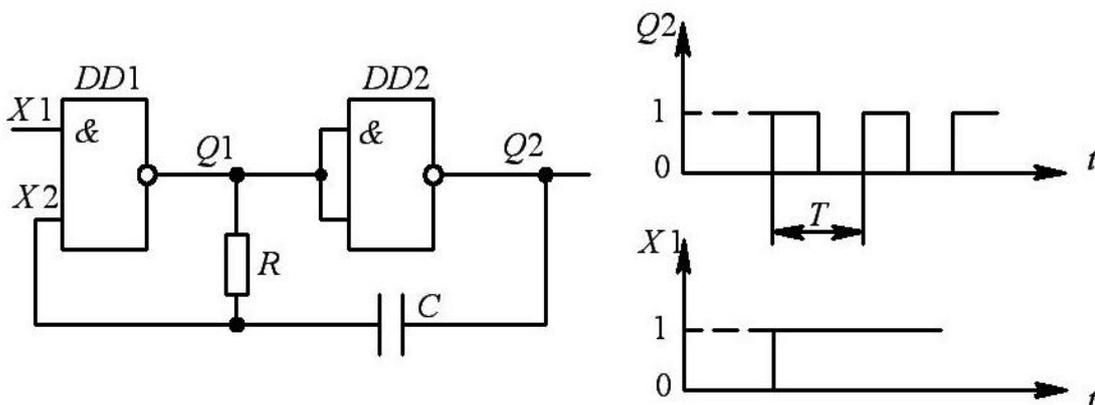


Рисунок 16.2 Мультивибратор

поскольку вход  $X_2$  соединен с конденсатором,  $X_2 = 1$ . Состояние схемы устойчиво, генерации импульсов нет.

При подаче сигнала  $X_1 = 1$  сигналы на выходах ЛЭ изменятся на  $Q_1 = 0$ ,  $Q_2 = 1$ ; начнется перезаряд конденсатора  $C$  по цепи: выход  $DD2$  – конденсатор  $C$  – резистор  $R$  – выход  $DD1$ . Напряжение на входе  $X_2$  будет понижаться, и когда оно достигнет порогового значения (напряжения перехода ЛЭ из одного состояния в другое  $U_{\text{итд}} = 1.3$  В), сигналы на выходах опять изменятся:  $Q_1 = 1$ ,  $Q_2 = 0$ . Далее начинается новый перезаряд конденсатора  $C$  (по цепи выход  $DD1$  – резистор  $R$  – конденсатор  $C$  – выход  $DD2$ ), в результате которого напряжение на входе  $X_2$  снова будет повышаться, и при  $X_2 \geq U_{\text{итд}}$  произойдет новое переключение ЛЭ в противоположное состояние ( $Q_1 = 0$ ,  $Q_2 = 1$ ). Так работает генератор прямоугольных сигналов.

**Т и р и с т о р** – четырехслойный полупроводниковый прибор с тремя  $p$ - $n$ -переходами. Тиристор обладает двумя устойчивыми состояниями: состояние низкой проводимости (тиристор закрыт) и состояние высокой проводимости (тиристор открыт). Перевод тиристора в открытое состояние осуществляется подачей на управляющий электрод положительного по отношению к катоду напряжения. Запирание тиристора осуществляется в цепях переменного тока или пульсирующего напряжения – при снижении тока ниже тока удержания, в цепях постоянного тока – за счет принудительной коммутации.

Тиристоры широко применяются в качестве коммутирующих бесконтактных элементов (например, в бесконтактных пускателях) и для регулирования в широких пределах напряжения на нагрузке за счет регулирования момента открывания тиристора.

**Т и р и с т о р н ы й о п т р о н** имеет излучающий оптрон и фотоприемный элемент, между которыми осуществляется оптическая связь. В тиристорной оптопаре излучателем является светодиод инфракрасного излучения, а приемным элементом – кремниевый фототиристор. Фототиристор открывается при наличии напряжения между его анодом и катодом, как только происходит освещение светодиодом базы фототиристора. Включенное состояние фототиристора сохраняется и с прекращением излучения светодиодом при снятии входного напряжения. Чтобы запереть фототиристор, с него нужно снять внешнее анодное напряжение. Если фототиристор включен в цепь переменного или пульсирующего напряжения, его выключение происходит в каждый из периодов при снижении тока до значения ниже тока удержания (близкого к нулю).

Тиристорные оптроны целесообразно использовать для гальванической развязки цепей управления и более мощных (силовых) цепей, - например, для дистанционного управления двигателем, осветительными установками и т.д.

**Б л о к с ч е т а и ц и ф р о в о й и н д и к а ц и и** числа импульсов (рис. 16.3) состоит из десятичного счетчика импульсов  $CT10$ , дешифратора  $DC$ , и цифрового газоразрядного индикатора  $HG1$ .

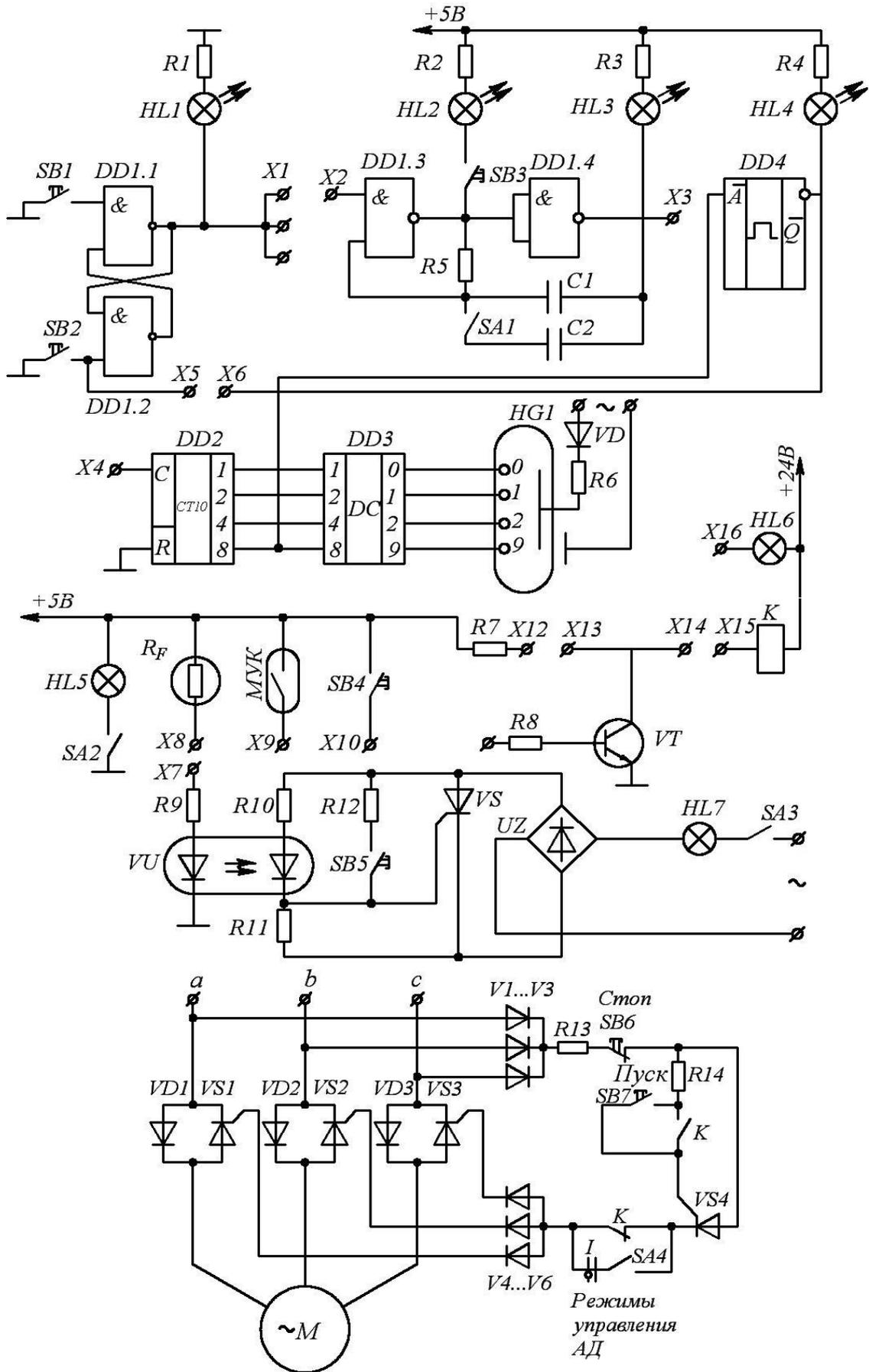


Рисунок 16.3. Блок счета и цифровой индикации числа импульсов

Десятичный счетчик *CT10* суммирует импульсы, поступившие на его вход *C*, и представляет их число (от 0 до 9) в двоичном коде 8-4-2-1. Каждый из этих выводов отображает разряд двоичного числа с соответствующим (8, 4, 2 или 1) числовым «весом», а комбинация сигналов (нулей и единиц) на выходах выражает в двоичной системе число импульсов. Например, комбинация 0110 («1» - на выходах 4 и 2, «0» - на выходах 8 и 1) означает, что на счетчик  $4+2=6$  импульсов. Счет ведется до 10 импульсов; 10-й импульс устанавливает все выходы в исходное состояние – «0».

Дешифратор *DC* преобразует число в двоичном коде, поданное на его входы 8-4-2-1, в десятичное число – сигнал «0» на том из 10 выходов *DC*, номер которого соответствует поданному числу (на остальных 9 выходах будет сигнал «1»). Так, если на вход дешифратора поступает число 0101 (сигнал «1» на входах 4 и 1), то сигнал «0» появится на выходе 5, так как двоичному числу 0101 соответствует десятичное 5.

Цифровой газоразрядный индикатор *HG1* представляет собой стеклянный баллон, наполненный инертным газом, в который помещены 10 катодов, имеющих форму цифр от 1 до 9 и один сетчатый анод. При появлении на одном из катодов «нулевого» потенциала напряжение между анодом и заданным катодом оказывается достаточным для возникновения тлеющего разряда в газе, который высвечивает цифру, изображаемую катодом.

### **Бесконтактное управление асинхронным двигателем**

Управление асинхронным двигателем с помощью контактной аппаратуры при большой частоте включения приводит к подгоранию и износу контактов. Бесконтактные тиристорные пускатели лишены этого недостатка, обладают большим быстродействием и обеспечивают надежную работу электропривода в целом.

На рис. 16.3 приведена схема тиристорного пускателя, силовая часть которого состоит из трех тиристорно-диодных элементов, включенных по встречно-параллельной схеме между сетью и статором асинхронного двигателя. Здесь тиристор и диод в каждой фазе является аналогом контакта контактора. Из сети в обмотку статора ток идет через диоды, а возвращается в сеть через тиристоры, обеспечивая тем самым протекание по статорной обмотке трехфазного переменного тока. Управление силовыми тиристорами *VS1...VS3* осуществляется трехфазным диодным мостом, в плечи которого *V4...V6* включены управляющие переходы силовых тиристоров. Между выходными зажимами трехфазного диодного моста включен вспомогательный тиристор *VS4*, который включается от кнопки *SB7* «Пуск» или от контакта реле *K*. Тиристор *VS4* поддерживается в открытом состоянии своим анодным током. Управляющие сигналы от *VS4* через *V4...V6* открывают тот силовой тиристор, катод которого в этот момент имеет наиболее отрицательный потенциал.

Схема позволяет осуществлять два режима дистанционного управления двигателем с помощью реле *K*. Если тумблер *SA4* стоит в положении «Режим 1», реле *K* своим замыкающим контактом запускает двигатель (остановка – кнопкой

*SB6* «Стоп»); если тумблер *SA4* стоит в положении «Режим 2», двигатель запускается кнопкой *SB7* «Пуск», а отключается размыкающим контактом реле *K* (например, под воздействием каких-то внешних защитных блокировок). Аварийное отключение двигателя в любом режиме осуществляется кнопкой *SB6* «Стоп».

### Предварительное задание к эксперименту

В зависимости от варианта выполнить задание, указанное в табл. 16.1

ТАБЛИЦА 16.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
Номер задания	1	2	3	4	1	2	3	4

#### Задание 1

Начертить схему и объяснить работу реле времени на элементах *DD1...DD4* (рис. 19.3), используя приведенные схемы электронных узлов, которые необходимо дополнить электрическими связями между контактными гнездами *X1-X2*, *X3-X4*, *X5-X6*.

#### Задание 2

Начертить и объяснить работу схемы устройства автоматического отключения электрической лампы (*HL6*) через заданный интервал времени. Для этого использовать показанные на рис. 19.3 схемы электронных элементов *DD1...DD4*, *VT*, которые должны быть дополнены электрическими связями между контактными гнездами *X1-X2*, *X3-X4*, *X5-X6*, *X1-X11*, *X14-X16*.

#### Задание 3

Начертить схему и объяснить принцип работы автоматического управления наружным электроосвещением (лампа *HL7*). Для этого использовать показанные на рис. 19.3 фоторезистор *R<sub>F</sub>*, транзистор *VT*, узел управления лампой *HL7* через однофазный мост *UZ*, тиристор *VS* и оптрон *VU*. Для получения схемы устройства необходимо выполнить электрические связи между этими элементами, соединив контактные гнезда *X8-X11*, *X12-X13*, *X7-X14*.

*Пояснение.* При достаточной освещенности фоторезистора его сопротивление резко снижается, открывается транзистор, который шунтирует входную цепь оптрона, что приведет к разрыву его входной цепи и погасанию лампы *HL7*.

#### Задание 4

Начертить и объяснить работу схемы бесконтактного управления асинхронным двигателем (рис. 16.3).

### Порядок выполнения эксперимента

Испытание электронных элементов и узлов

1. Опробовать работу  $\overline{RS}$ -триггера на элементах  $DD1.1 - DD1.2$ , переключая его кнопками  $SB1, SB2$  и наблюдая за светодиодом  $HL1$ . Составить таблицу истинности.

2. Испытать работу мультивибратора, собранного на элементах  $DD1.3 - DD1.4$ . Для этого соединить выход  $X1$  элемента  $DD1.1$  с входом  $X2$  элемента  $DD1.3$ . Запустить мультивибратор кнопкой  $SB1$ , наблюдать за миганием светодиода  $HL3$ , а при включении кнопки  $SB3$  – за «перемигиванием»  $HL2-HL3$ . Убедиться, что частота импульсов мультивибратора уменьшается при возрастании емкости  $C$  (для этого подключить тумблером  $SA1$  параллельно емкости  $C1$  емкость  $C2$ ). Остановить мультивибратор кнопкой  $SB2$ . Вычислить частоту (число импульсов в одну секунду) при емкостях  $C1$  и  $C1+C2$ .

3. Испытать работу десятичного счетчика  $DD2$  в качестве делителя частоты, соединив выход  $X3$  мультивибратора с входом «C» ( $X4$ ) счетчика  $DD2$ . Наблюдая за частотой импульсов на входе счетчика с помощью светодиода  $HL3$  и газоразрядного индикатора  $HG1$ , убедиться, что на выходе счетчика (вывод «8»  $DD2$ , светодиод  $HL4$ ) частота импульсов в 10 раз меньше, чем на входе (на каждые 10 входных импульсов – индикаторы  $HL3, HG1$  – получаем 1 выходной импульс  $HL4$ ).

4. Собрать и испытать схему реле времени на элементах  $DD1...DD4$ , соединив контактные гнезда  $X1-X2, X3-X4, X5-X6$ . Кнопкой  $SB1$  включить светодиод  $HL1$ , который должен погаснуть после отсчета десяти импульсов  $HL3$  ( $HG1$ ). Измерить и записать выдержку реле времени для двух значений емкости ( $C1$  и  $C1+C2$ ).

5. Испытать работу транзистора  $VT$ . Соединить вывод  $X10$  кнопки  $SB4$  с выводом  $X11$  базы транзистора, вывод коллектора  $X14$  – с выводом  $X16$  лампы  $HL6$ . При нажатии кнопки  $SB4$  транзистор  $VT$  открывается, и лампа  $HL6$  загорается.

6. Испытать работу тиристора  $VS$ . Включить тумблер  $SA3$ , тогда при нажатии кнопки  $SB5$ , падающей напряжением на управляющий электрод тиристора, тиристор  $VS$  открывается, и лампа  $HL7$  загорается.

7. Испытать работу оптрона  $VU$ . Соединить вывод  $X10$  кнопки  $SB4$  с входом  $X7$  оптрона  $VU$ . При нажатии кнопки  $SB4$  срабатывает оптрон  $VU$ , тиристор  $VS$  открывается, и лампа  $HL7$  загорается.

Сборка и испытание устройств автоматики

1. Устройство автоматического отключения через заданный интервал времени электрической лампы, например, в подъезде жилого дома. Собрать схему устройства, соединив контактные гнезда  $X1-X2, X3-X4, X5-X6, X1-X11, X14-X16$ . При нажатии кнопки  $SB1$  загорается лампа «коридорного освещения»  $HL6$  и будет гореть, пока реле времени (индикация по  $HG1$ ) отсчитывает

выдержку от 0 до 10. Выдержка реле времени (частота импульсов мультивибратора) может изменяться с помощью тумблера SA1.

2. Устройство автоматического управления электрической лампой в функции освещенности, например, управления наружным электроосвещением. Собрать схему устройства, соединив контактные гнезда X8-X11, X12-X13, X7-X14. Включить тумблеры SA2 и SA3. При повороте зеркальца, прикрывающего фоторезистор, под таким углом, чтобы световой поток лампы HL5 падал на фоторезистор  $R_F$  (имитация наступления рассвета), лампа HL7 (наружное освещение) погасает. Это обусловлено тем, что при наступлении «рассвета» сопротивление фоторезистора  $R_F$  резко понижается и шунтирует светодиод оптрона VU; оптрон разрывает свою выходную цепь.

3. Устройство управления мигающим светофором. Соединить контактные гнезда X1-X2, X3-X11, X14-X16. При нажатии кнопки SB1 лампа HL6 горит «мигающим светом», частоту которого можно изменять частотой импульсов мультивибратора (тумблером SA1).

4. Управление асинхронным двигателем с помощью бесконтактного тиристорного пускателя. Включить трехполюсный автомат на питающем щитке. При нажатии кнопки SB7 «Пуск» открывается тиристор VS4, который в свою очередь, открывает тиристоры VS1...VS3 бесконтактного пускателя; двигатель запускается.

5. Включение асинхронного двигателя в функции освещенности, например, автоматическое включение вентилятора в цехе с наступлением дня. Собрать схему, соединив контактные гнезда X8-X11, X14-X15. Фоторезистор  $R_F$  прикрыть зеркальцем, включить лампу HL5 тумблером SA2. При открывании зеркальца часть светового потока лампы HL5 падает на фоторезистор  $R_F$  (имитация наступления дня), что приводит к срабатыванию реле K, которое включает бесконтактный пускатель; двигатель запускается.

### Содержание отчета

Цель работы; схема автоматического устройства, заданного в предварительном задании; описание работы этой схемы; результаты испытаний электронных элементов и узлов в соответствии с указаниями в разделе «Порядок выполнения эксперимента».

### Контрольные вопросы

1. Какую из кнопок SB1 и SB2 (рис. 16.3) нужно замкнуть, чтобы загорелся светодиод HL1? Как погасить HL1? Ответ обосновать.

2. Для чего предназначен мультивибратор? От чего и как зависит частота вырабатываемых мультивибратором импульсов?

3. Какое число импульсов поступило на вход десятичного счетчика CT10 (рис. 16.3), если на его выходах 1 и 4 имеется «логическая 1», а на выходах 2 и 8 – «логический 0»?

4. Какая цифра будет светиться на газоразрядной индикаторной лампе  $HG1$ , катоды которой подключены к дешифратору  $DC$  (рис. 19.3), если на входы 1 и 4 дешифратора  $DC$  подана «логическая 1», а на входы 2 и 8 – «логический 0»?

5. В каком состоянии (горит или погашена) будет лампа  $HL7$  (рис. 16.3), если тумблер  $SA3$  замкнут, а тиристор  $VS$ : а) открыт; б) заперт?

6. Как воздействовать на оптрон  $VU$  (рис. 16.3), чтобы открылся тиристор  $VS$ ?

7. Почему в каждую фазу силовой цепи двигателя  $M$  (рис. 16.3) параллельно тиристорному включен диод во встречном направлении?

**Лабораторная работа № 2.1**  
ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЩИХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ  
ВОЛЬТМЕТРОВ

ЗАДАЧИ РАБОТЫ

1. Определение погрешности вольтметра способом сличения.
2. Исследование влияния частоты и формы кривой измеряемого напряжения на показания электромеханических вольтметров.
3. Определение собственного потребления мощности вольтметром.

ФОРМУЛЫ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И ТЕРМИНЫ

Пределы допускаемых абсолютной ( $\Delta_{\text{доп}}$ ), относительной ( $\delta_{\text{доп}}$ ) и приведенной ( $\gamma_{\text{доп}}$ ) основных погрешностей электромеханических вольтметров:

$$\Delta_{\text{доп}} = \pm \frac{k \cdot U_k}{100}; \quad \delta_{\text{доп}} = \pm k \frac{U_k}{U}; \quad \gamma_{\text{доп}} = \pm k, \quad (1.1)$$

где  $k$  – класс точности вольтметра, %;

$U_k$  – верхний предел измерений вольтметра, В;

$U$  – числовые отметки поверяемого вольтметра, В,  
( $U = 30, 60, 90, 120$  и  $150$  В).

Абсолютная погрешность вольтметра ( $\Delta$ ), В:

$$\Delta = U_X - U_D,$$

где  $U_X$  – показания поверяемого вольтметра, В;

$U_D$  – действительное значение измеряемого напряжения, за которое принимают показания эталонного вольтметра, В.

Относительная погрешность вольтметра ( $\delta$ ), %:

$$\delta = \frac{U_X - U_D}{U_D} \cdot 100,$$

приведенная погрешность вольтметра ( $\gamma$ ), %:

$$\gamma = \frac{U_X - U_D}{U_k} \cdot 100.$$

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Рассчитать по формулам (1.1) пределы (положительный и отрицательный) допускаемых абсолютной  $\Delta_{\text{доп}}$  и относительной  $\delta_{\text{доп}}$  основных погрешностей вольтметра класса точности  $k = 1,0$  с верхним пределом измерения  $U_k = 150$  В. По рассчитанным значениям построить диаграмму  $\Delta_{\text{доп}}(U)$  и диаграмму  $\delta_{\text{доп}}(U)$  и  $\gamma_{\text{доп}}$ . Общий вид диаграмм приведен на рис. 1.1.

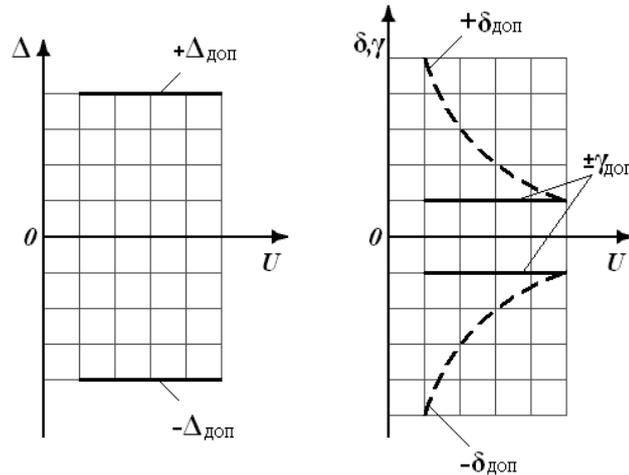


Рис. 1.1

Привести условные обозначения, отражающие принцип действия, уравнения шкал ( $\alpha = F(A_X)$ ) магнитоэлектрических, детекторных, электромагнитных, электродинамических и электростатических приборов.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

По методике, изложенной в рабочей инструкции, определяют способом сличения основную погрешность электромагнитного вольтметра (рис. 1.2), исследуют влияние формы кривой измеряемого напряжения (рис. 1.3 и рис. 1.4) и его частоты (рис. 1.5) на показания электромеханических приборов, а также определяют сопротивление и потребляемую мощность одного из вольтметров (рис. 1.6).

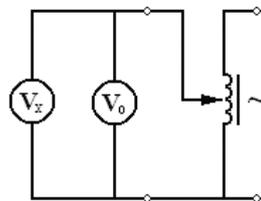


Рис. 1.2

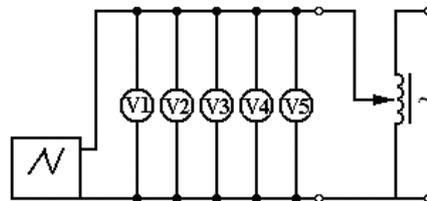


Рис. 1.3

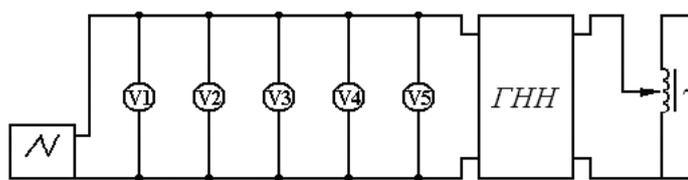


Рис. 1.4

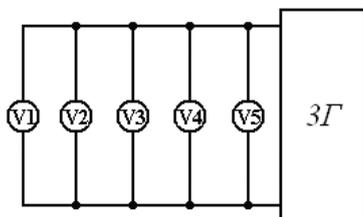


Рис. 1.5

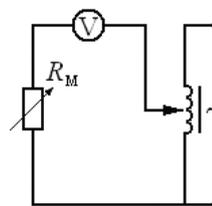


Рис. 1.6

По результатам поверки электромагнитного вольтметра (см. рис. 1.2) на диаграммы рис. 1.1 наносят значения абсолютной, относительной и приведенной погрешностей вольтметра, соединенные между собой отрезками прямых.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мотивированной заключение о соответствии погрешности поверяемого вольтметра своему классу точности.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Устройство, принцип действия, достоинства и недостатки, область применения магнитоэлектрических, детекторных, электронных амплитудных, электромагнитных, электродинамических, ферродинамических и электростатических приборов.

2. Как осуществляется изменение пределов измерения электромеханических амперметров и вольтметров?

3. Как осуществляется частотная компенсация в электромеханических приборах?

4. Что такое постоянная и чувствительность прибора?

5. Чем отличается диапазон показаний от диапазона измерений прибора?

6. Как влияет изменение температуры окружающей среды на показания магнитоэлектрических, детекторных и термоэлектрических приборов?

7. Что измеряет амплитудный вольтметр при открытом и закрытом входах?

## Лабораторная работа № 2.2 ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ

### ЗАДАЧИ РАБОТЫ

1. Ознакомление с методами измерения сопротивлений на постоянном токе.
2. Приобретение навыков в работе с омметрами и неавтоматическими мостами.

### ФОРМУЛЫ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И ТЕРМИНЫ

Приведенная погрешность мегаомметра ( $\gamma$ ), выраженная в процентах от его длины шкалы:

$$\gamma = S \frac{R - R_{\text{д}}}{L} \cdot 100,$$

где  $S$  – чувствительность мегаомметра в данной точке шкалы, мм/Ом;

$L$  – длина шкалы мегаомметра, мм;

$R$  – показания проверяемого прибора, Ом;

$R_{\text{д}}$  – действительное значение измеряемой величины, отсчитанное по магазину резисторов, Ом.

Относительная чувствительность моста ( $S_0$ ), в делениях на относительное (в процентах) изменение сопротивления плеча сравнения:

$$S_0 = \frac{\Delta\alpha}{(\Delta R/R) \cdot 100},$$

где  $\Delta\alpha$  – отклонение указателя автокомпенсатора, дел.;

$\Delta R$  – изменение сопротивления плеча сравнения, Ом;

$R$  – сопротивление плеча сравнения моста, Ом.

Предел допускаемой абсолютной погрешности результата измерения ( $\Delta$ ) мостом, Ом:

$$\Delta = \pm \frac{kR_{\text{х}}}{100},$$

где  $k$  – класс точности моста, %;

$R_{\text{х}}$  – показания моста, Ом.

### КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Привести в отчете принципиальные схемы четырех измерительных приборов: омметра с однорабочным измерительным механизмом (рис. 2.1, а), омметра-

логометра (рис. 2.1, б), одинарного (четырёхплечего) и двойного (шестиплечего) мостов.

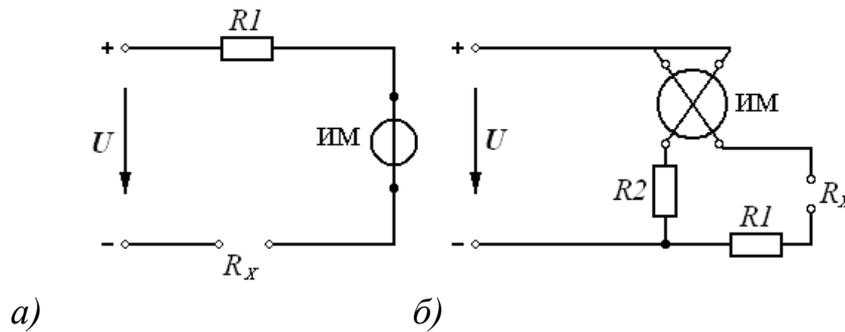


Рис. 2.1

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

По методике, изложенной в рабочей инструкции, измеряют мегомметр-логометром сопротивление изоляции ЛАТРа, измеряют одинарным и двойным мостами сопротивление резисторов, а также определяют основную погрешность омметра с однорамочным измерительным механизмом на одном из поддиапазонов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мотивированное заключение о соответствии погрешности проверяемого омметра своему классу точности.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему сопротивление измеряют, как правило, на постоянном токе?
2. Каков диапазон измерений одинарных мостов? Почему одинарными мостами не измеряют малые сопротивления?
3. Какие особенности двойных мостов позволяют измерять малые сопротивления?
4. От чего зависит показание магнитоэлектрического логометра?
5. Почему питания мегомметров применяют относительно большое напряжение (от 100 до 2500 В) ?
6. Чем объясняется высокая точность одинарных мостов постоянного тока?
7. От чего зависит чувствительность мостов?
8. Для чего в двойном мосте переключатели двух плеч механически связаны друг с другом?

**Лабораторная работа № 2.3**  
ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГАЛЬВАНОМЕТРА

ЗАДАЧИ РАБОТЫ

1. Ознакомление с конструкциями и принципом действия гальванометров.
2. Измерение основных параметров гальванометра.
3. Исследование влияния сопротивления внешней цепи на характер режима движения подвижной части гальванометра.

ФОРМУЛЫ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И ТЕРМИНЫ

Степень успокоения свободных ( $\beta_{\text{СВ}}$ ) и затухающих ( $\beta$ ) колебаний подвижной части гальванометра

$$\beta_{\text{СВ}} = \frac{\ln \alpha_1 / \alpha_2}{\sqrt{(\ln \alpha_1 / \alpha_2)^2 + 4\pi^2}}; \quad \beta = \frac{\ln \alpha_1 / \alpha_3}{\sqrt{(\ln \alpha_1 / \alpha_3)^2 + 4\pi^2}},$$

где  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  – амплитуды колебаний, мм.

Период собственных ( $T_0$ ), свободных ( $T_{\text{СВ}}$ ) и затухающих ( $T$ ) колебаний подвижной части гальванометра, в секундах

$$T_0 = \sqrt{1 - \beta_{\text{СВ}}^2} \cdot T_{\text{СВ}} \approx T_{\text{СВ}}; \quad T = \frac{T_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

Постоянная гальванометра по току ( $C_I$ ) и напряжению ( $C_U$ ), в амперах на миллиметр и в вольтах на миллиметр:

$$C_I = \frac{2R_1 I}{(R_{\Gamma} + R_k)(\alpha_1 + \alpha_2)}; \quad C_U = (R_{\Gamma} + R_k) C_I,$$

где  $R_1 = 0,01$  Ом – сопротивления шунта;

$I$  – показания миллиамперметра, А;

$R_{\Gamma}$  – внутреннее сопротивление гальванометра, Ом;

$R_k$  – внешнее критическое сопротивление гальванометра, Ом.

Баллистическая постоянная гальванометра по заряду ( $C_Q$ ), в кулонах на миллиметр:

$$C_Q = \frac{CU}{\alpha_{\text{Балл}}},$$

где  $C = 0,1 \cdot 10^{-6}$  Ф – емкость конденсатора;

$U$  – показания вольтметра, В;

$\alpha_{\text{Балл}}$  – первый максимальный (баллистический) отброс указателя гальванометра, мм.

Постоянная гальванометра по току ( $C_I$ ), полное критическое сопротивление гальванометра ( $R_{\Gamma} + R_k$ ) и период собственных колебаний ( $T_0$ ) подвижной части гальванометра связаны с конструктивными параметрами гальванометра системой уравнений

$$C_I = \frac{W}{\psi_0}; \quad (R_{\Gamma} + R_k) = \frac{\psi_0^2}{2\sqrt{Wj}}; \quad T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{j}{W}}, \quad (3.1)$$

где  $W$  – удельный противодействующий момент подвеса, Н·м/мм;

$\psi_0$  – конструктивная постоянная гальванометра, Вб;

$j$  – момент инерции подвижной части гальванометра, Дж·с<sup>2</sup>.

### КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Вывести формулы для расчета конструктивных параметров гальванометра  $\psi_0$ ,  $W$  и  $j$  через  $C_I$ ,  $(R_{\Gamma} + R_k)$  и  $T_0$  (используя систему уравнений 3.1).

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

По методике, изложенной в рабочей инструкции, определяют следующие основные параметры гальванометра:

- внутреннее сопротивление гальванометра  $R_{\Gamma}$ ;
- период свободных  $T_{\text{СВ}}$  и собственных  $T_0$  колебаний подвижной части гальванометра;
- внешнее критическое сопротивление  $R_k$  гальванометра и время установления показаний;
- постоянная гальванометра по току  $C_I$  и по напряжению  $C_U$ ;
- баллистическая постоянная гальванометра по заряду  $C_Q$ .

Принципиальные схемы установки для определения параметров гальванометра приведены на рис. 3.1 и рис. 3.2.

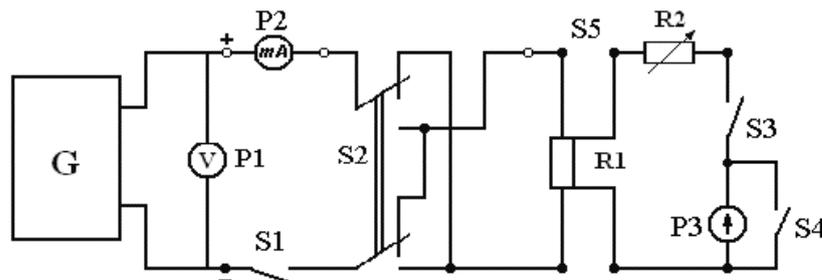


Рис. 3.1

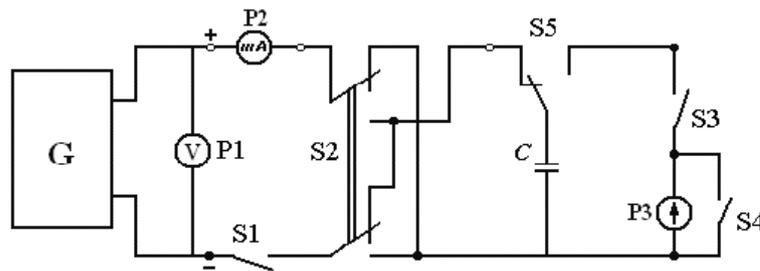


Рис. 3.2

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проверка точности определения некоторых основных параметров гальванометра выражением

$$C_Q = C_I \frac{T_0 e}{2\pi} .$$

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чему равна чувствительность по току используемого в работе гальванометра? Как достигается такая большая чувствительность?
2. Как получена формула для определения внутреннего сопротивления гальванометра?
3. Как достигается электромагнитное успокоение подвижной части гальванометра?
4. Почему рамка гальванометра, в отличие от магнитоэлектрических амперметров и вольтметров, не имеет металлического каркаса?
5. Для чего необходимо знать период свободных колебаний гальванометра?
6. При каком условии можно использовать обычный гальванометр для баллистических измерений?
7. Чем отличается баллистический гальванометр от обычного?
8. Каковы области применения магнитоэлектрических гальванометров?

**Лабораторная работа № 2.4**  
**КОМПЕНСАТОР (ПОТЕНЦИОМЕТР) ПОСТОЯННОГО ТОКА**

**ЗАДАЧИ РАБОТЫ**

1. Ознакомление с компенсатором постоянного тока ручного уравнивания.
2. Приобретение навыков в работе с компенсатором и ознакомление с методикой поверки ваттметров класса точности 0,1 и 0,2.

**ФОРМУЛЫ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И ТЕРМИНЫ**

Напряжение ( $U$ ) на параллельной обмотке ваттметра, В:

$$U = k_D U_{\text{ДЕЛ}} ,$$

где  $k_D = 1000$  – коэффициент деления делителя напряжения;

$U_{\text{ДЕЛ}}$  – напряжение на выходе делителя, измеренное компенсатором, В.

Ток ( $I$ ), А, в последовательной обмотке ваттметра

$$I = \frac{U_{R_0}}{R_0} ,$$

где  $U_{R_0}$  – напряжение на образцовом резисторе, измеренное компенсатором, В;

$R_0 = 1$  Ом – сопротивление образцового резистора.

Действительное значение мощности ( $P_D$ ), Вт:

$$P_D = UI .$$

Относительная погрешность ваттметра ( $\delta$ ), %:

$$\delta = \frac{P_W - P_D}{P_D} \cdot 100 ,$$

где  $P_W$  – показание ваттметра, Вт.

Приведенная погрешность ваттметра ( $\gamma$ ), %:

$$\gamma = \frac{P_W - P_D}{P_{\text{MAX}}} \cdot 100 ,$$

где  $P_{\text{MAX}}$  – верхний предел измерения ваттметра, Вт.

## КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Привести в отчете принципиальную схему компенсатора (потенциометра) постоянного тока (рис. 4.1).

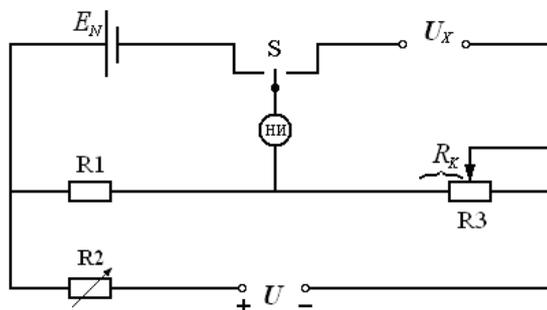


Рис. 4.1

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. По методике, изложенной в рабочей инструкции, подготавливают компенсатор к работе и производят проверку ваттметра.
2. Принципиальная схема поверки ваттметра.
3. По результатам измерений строят диаграмму  $\delta$  ( $P_W$ ) и  $\gamma$  ( $P_W$ ).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мотивированное заключение о соответствии погрешности поверяемого ваттметра своему классу точности.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы основные преимущества компенсаторов перед вольтметрами прямого действия?
2. Чем объясняется высокая точность компенсаторов постоянного тока?
3. По каким схемам выполняются компенсационные многодекадные магазины резисторов?
4. Как осуществить поверку амперметра компенсатором постоянного тока?
5. К какой группе средств измерений относят нормальный элемент?
6. Каково назначение делителя напряжения, используемого при поверке ваттметра?
7. Как можно косвенно измерить компенсатором сопротивление?

**Лабораторная работа № 2.5**  
**ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ИНДУКЦИОННОГО СЧЕТЧИКА**  
**АКТИВНОЙ ЭНЕРГИИ**

**ЗАДАЧИ РАБОТЫ**

1. Изучение принципа действия, устройства и основных характеристик индукционного счетчика активной энергии.
2. Ознакомление с методикой поверки электрического счетчика.

**ФОРМУЛЫ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И ТЕРМИНЫ**

Порог чувствительности счетчика ( $S$ ), %:

$$S = \frac{P_{\text{MIN}}}{U_{\text{НОМ}} I_{\text{НОМ}}} \cdot 100 ,$$

где  $P_{\text{MIN}}$  – минимальная мощность нагрузки, при которой диск счетчика начинает вращаться без остановки, Вт;

$U_{\text{НОМ}}$  – номинальное напряжение счетчика, В;

$I_{\text{НОМ}}$  – номинальный ток счетчика, А.

Систематическая составляющая относительной погрешности счетчика ( $\delta_C$ ), %:

$$\delta_C = \frac{W_{\text{СЧ}} - W_{\text{Д}}}{W_{\text{Д}}} \cdot 100 = \frac{CN - Pt}{Pt} \cdot 100 ,$$

где  $W_{\text{СЧ}}$  – электрическая энергия, измеренная счетчиком, Дж;

$W_{\text{Д}}$  – действительное значение электрической энергии, рассчитанное по показаниям ваттметра и секундомера, Дж;

$C = 3,6 \cdot 10^6 / A$  – номинальная постоянная счетчика, Дж/об;

$A$  – передаточное число счетчика, об/кВт·ч;

$N$  – число оборотов диска счетчика, об;

$t$  – показание секундомера, с.

Активная мощность цепи ( $P$ ), Вт:

$$P = K_I P_W ,$$

где  $K_I$  – номинальный коэффициент трансформации трансформатора тока;

$P_W$  – показание ваттметра, Вт.

Дополнительные погрешности счетчика ( $\delta_{+10\%}$ ) и ( $\delta_{-10\%}$ ), обусловленные изменением напряжения питания соответственно на плюс 10 и минус 10 %, %:

$$\delta_{+10\%} = \delta_{(U_{\text{НОМ}}+10\%)} - \delta_{\text{С}}, \quad \delta_{-10\%} = \delta_{(U_{\text{НОМ}}-10\%)} - \delta_{\text{С}},$$

где  $\delta_{(U_{\text{НОМ}}+10\%)}$  и  $\delta_{(U_{\text{НОМ}}-10\%)}$  – погрешность счетчика при напряжении 242 и 196 В, %.

### КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Принципиальная схема включения и основные элементы конструкции однофазного индукционного счетчика электрической энергии показаны на рис. 5.1, на рис. 5.2 показана его векторная диаграмма. При оформлении отчета эти рисунки необходимо дополнить кратким описанием принципа действия счетчика.

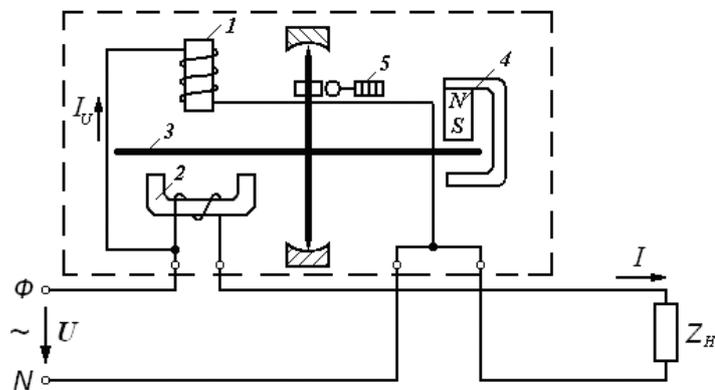


Рис. 5.1:

1 – электромагнит напряжения; 2 – токовый электромагнит;  
3 – алюминиевый диск на опорах; 4 – постоянный магнит;  
5 – счетный механизм

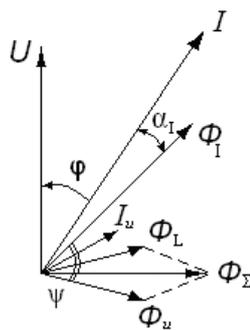


Рис. 5.2

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. По методике, изложенной в рабочей инструкции, производят поверку счетчика методом ваттметра и секундомера.

2. Протокол поверки счетчика с таблицей.
3. По результатам поверки строят диаграмму  $\delta_C \left( \frac{P}{P_{\text{НОМ}}} \cdot 100 \right)$  при номинальном напряжении и  $\cos\varphi = 1$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мотивированное заключение о пригодности к работе проверяемого счетчика.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы достоинства и недостатки индукционных счетчиков?
2. Как создаются компенсационный и противосамоходный моменты счетчиков?
3. Чем объясняется отрицательная погрешность счетчика при перегрузках?
4. Как влияет изменение частоты сети на показания индукционных счетчиков?
5. Можно ли расширить пределы изменения индукционного счетчика с помощью активных добавочных резисторов и шунтов?
6. Что такое фазное условие счетчика?
7. Какие регулировки применяются в индукционных счетчиках?

### Лабораторная работа № 2.6

## ИЗМЕРЕНИЕ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ И ЭНЕРГИИ В ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЯХ

### ЗАДАЧИ РАБОТЫ

1. Изучение методов измерения активной мощности и энергии в трехфазных цепях.
2. Ознакомление со схемами и конструкциями трехфазных счетчиков активной энергии.

### ФОРМУЛЫ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И ТЕРМИНЫ

Активная мощность ( $P$ ) трехфазной трехпроводной цепи, Вт:

$$P = P_{W1} + P_{W2},$$

где  $P_{W1}$  и  $P_{W2}$  – показания ваттметров в методе двух приборов, Вт.

Угол сдвига фаз ( $\varphi$ ) при симметричной нагрузке определяется из выражения

$$\operatorname{tg}\varphi = \sqrt{3} \frac{P_{W2} - P_{W1}}{P_{W1} + P_{W2}}.$$

Активная мощность ( $P$ ) трехфазной четырехпроводной цепи, Вт:

$$P = P_{W1} + P_{W2} + P_{W3},$$

где  $P_{W1}, P_{W2}, P_{W3}$  – показания ваттметров в методе трех приборов, Вт.

Действительная энергия ( $W_{\text{д}}$ ) цепи, Дж:

$$W_{\text{д}} = P_{\text{О}} \cdot t \text{ или } W_{\text{д}} = P \cdot t,$$

где  $P_{\text{О}}$  – показания трехфазного двухэлементного образцового ваттметра, Вт;

$t$  – показания секундомера, с;

$P$  – активная мощность трехфазной четырехпроводной цепи, Вт.

Активная энергия ( $W_{\text{сч}}$ ), зарегистрированная счетчиком, Дж:

$$W_{\text{сч}} = CN = \frac{3,6 \cdot 10^6}{A} \cdot N,$$

где  $C$  – номинальная постоянная счетчика, Дж/об;

$A$  – передаточное число счетчика, об/кВт·ч;

$N$  – число оборотов диска счетчика, об.

Относительная погрешность счетчика ( $\delta$ ), %:

$$\delta = \frac{W_{\text{сч}} - W_{\text{д}}}{W_{\text{д}}} \cdot 100.$$

### КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Привести в отчете схемы измерения активной мощности трехфазной цепи методом двух и трех приборов.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. По методике, изложенной в рабочей инструкции, производят измерения активной мощности и энергии трехфазных цепей и определяют погрешность счетчиков.
2. По результатам измерений строят диаграмму напряжений и токов трехфазной цепи для всех симметричных режимов.
3. Схемы двухэлементного и трехэлементного счетчиков активной энергии.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какими достоинствами обладают ферродинамические ваттметры по сравнению с электродинамическими?
2. Что такое фазовая погрешность ваттметра?
3. Учитывает ли ваттметр мощность, потребляемую им самим?
4. Пригоден ли метод двух приборов для измерения активной мощности при несимметрии системы линейных напряжений?
5. В каком случае и как можно измерить активную мощность трехфазной цепи однофазным ваттметром?
6. Можно ли измерить трехфазным ваттметром активную мощность однофазной цепи? Нарисуйте схему.

**Лабораторная работа № 2.7**  
**ИЗМЕРЕНИЕ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ И ЭНЕРГИИ В ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЯХ**

**ЗАДАЧИ РАБОТЫ**

1. Изучение методов измерения реактивной мощности и энергии в трехфазных цепях.
2. Ознакомление со схемой и конструкцией трехфазного счетчика реактивной энергии.

**ФОРМУЛЫ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И ТЕРМИНЫ**

Реактивная мощность ( $Q$ ) трехфазной трехпроводной цепи, вар:

$$Q = \sqrt{3}(P_{W1} + P_{W2}),$$

где  $P_{W1}$  и  $P_{W2}$  – показания ваттметров в методе двух приборов с искусственной нулевой точкой, Вт.

Реактивная мощность ( $Q$ ) трехфазной четырехпроводной цепи, вар:

$$Q = \frac{P_{W1} + P_{W2} + P_{W3}}{\sqrt{3}},$$

где  $P_{W1}$ ,  $P_{W2}$  и  $P_{W3}$  – показания ваттметров в методе трех приборов с включением параллельных цепей на чужие фазы, Вт.

Действительная реактивная энергия ( $W_D$ ) цепи

$$W_D = Q_0 t \quad \text{или} \quad W_D = Q t,$$

где  $Q_0$  – показание трехфазного образцового ваттметра, вар;

$t$  – показание секундомера, с;

$Q$  – реактивная мощность трехфазной четырехпроводной цепи, вар.

Реактивная энергия ( $W_{СЧ}$ ) зарегистрированная счетчиком

$$W_{СЧ} = CN = \frac{3,6 \cdot 10^6}{A} \cdot N,$$

где  $C$  – номинальная постоянная счетчика, вар·с/об;

$A$  – передаточное число счетчика, об/квар·ч;

$N$  – число оборотов диска счетчика, об.

Относительная погрешность счетчика ( $\delta$ ), %:

$$\delta = \frac{W_{\text{сч}} - W_{\text{д}}}{W_{\text{д}}} \cdot 100.$$

### КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Привести в отчете схемы измерения реактивной мощности трехфазной цепи методом двух приборов с искусственной нулевой точкой и методом трех приборов с включением параллельных цепей на чужие фазы, а также схему рис. 7.1.

Для измерения реактивной энергии в четырехпроводных и трехпроводных цепях при несимметричной нагрузке применяют два типа счетчиков: индукционный трехэлементный, схема включения которого соответствует схеме трех приборов с включением параллельных цепей на чужие фазы, и дифференциальный двухэлементный счетчик, схема включения которого приведена на рис. 7.1.

Последовательные электромагниты каждого из двух элементов содержат по две обмотки – основную и дополнительную. Они имеют одинаковое число витков, но разную полярность, поэтому магнитный поток последовательного электромагнита первого элемента пропорционален геометрической разности токов ( $I_A - I_B$ ), а магнитный поток второго элемента определяется разностью токов ( $I_C - I_B$ ).

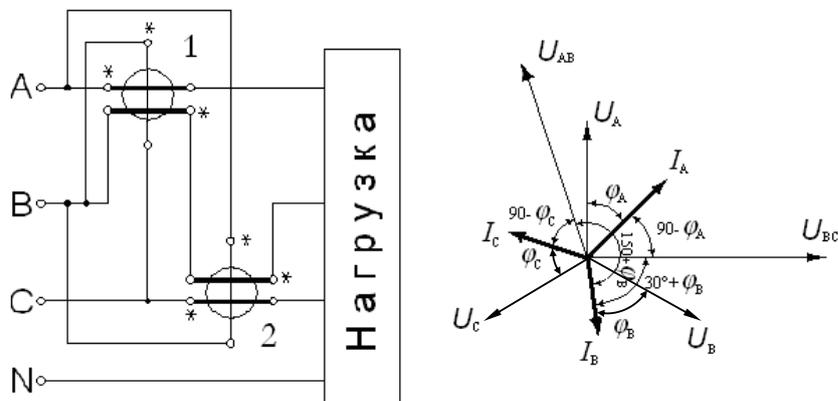


Рис. 7.1

Таким образом, вращающий момент, создаваемый первым элементом, равен

$$M_1 = k \cdot U_{\text{BC}} \cdot I_A \cdot \cos(90^\circ - \varphi_A) - k \cdot U_{\text{BC}} \cdot I_B \cdot \cos(30^\circ + \varphi_B),$$

Вращающий момент второго элемента

$$M_2 = k \cdot U_{\text{AB}} \cdot I_C \cdot \cos(90^\circ - \varphi_C) - k \cdot U_{\text{AB}} \cdot I_B \cdot \cos(150^\circ + \varphi_B),$$

Общий вращающий момент счетчика

$$M = M_1 + M_2 = kUI_A \sin\varphi_A - kUI_B \left[ 2\cos(90^\circ + \varphi_B) \cdot \cos(-60^\circ) \right] + kUI_C \sin\varphi_C = k\sqrt{3}(U_\Phi I_A \sin\varphi_A + U_\Phi I_B \sin\varphi_B + U_\Phi I_C \sin\varphi_C) = k\sqrt{3}Q.$$

Значит, вращающий момент счетчика пропорционален реактивной мощности цепи при любой асимметрии нагрузки, но лишь при симметричной системе напряжений источника.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

По методике, изложенной в рабочей инструкции, проводят измерения реактивной мощности и энергии трехфазных цепей и определяют погрешность счетчика реактивной энергии.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. При каком условии показания электродинамического (ферродинамического) прибора пропорционально реактивной мощности?
2. Какое условие необходимо соблюдать при использовании метода двух приборов с искусственной нулевой точкой и метода трех приборов с включением параллельных цепей на чужие фазы?
3. При какой нагрузке двухэлементный ваттметр с искусственной нулевой точкой дает отрицательное показание?
4. При какой нагрузке дифференциальный счетчик реактивной энергии будет вращаться в обратную сторону?
5. В каком случае и как можно измерить реактивную мощность трехфазной цепи однофазным ваттметром?

**Лабораторная работа № 2.8**  
ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ И ИНТЕРВАЛОВ ВРЕМЕНИ

ЗАДАЧИ РАБОТЫ

1. Изучение методов и средств измерения частоты и интервалов времени.
2. Ознакомление с методикой поверки аналогового показывающего частотомера.

ФОРМУЛЫ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И ТЕРМИНЫ

Предел допускаемой абсолютной основной погрешности ( $\Delta$ ) частотомеров, Гц:

$$\Delta = \pm \frac{k f_{\text{НОМ}}}{100}; \quad \Delta = \pm \frac{k(f_{\text{МАХ}} - f_{\text{МИН}})}{100},$$

для приборов выпуска с 1981 г.      для приборов выпуска до 1981 г.

где  $k$  – класс точности частотомера, %;

$f_{\text{НОМ}} = 50$  Гц – номинальное значение измеряемой частоты;

$f_{\text{МАХ}}$  и  $f_{\text{МИН}}$  – конечное и начальное значение шкалы частотомера, Гц.

Для цифрового электронно-счетного частотомера

$$\Delta = \pm \frac{1}{T_{\text{ИЗМ}}},$$

где  $T_{\text{ИЗМ}}$  – время измерения, с.

При поверке частотомера его основная абсолютная погрешность ( $\Delta$ ), Гц, – это наибольшее (по абсолютному значению) из двух значений

$$\Delta_1 = f_{\text{П}} - f_1 \quad \text{или} \quad \Delta_2 = f_{\text{П}} - f_2,$$

где  $f_{\text{П}}$  – показания поверяемого частотомера, Гц;

$f_1$  и  $f_2$  – действительное значение частоты при ее плавном увеличении и уменьшении, Гц.

Относительная ( $\delta$ ) и приведенная ( $\gamma$ ) основные погрешности частотомера, %:

$$\delta = \frac{\Delta}{f_{\text{П}}} \cdot 100; \quad \gamma = \frac{\Delta}{f_{\text{НОМ}}} \cdot 100.$$

Вариация показаний прибора, Гц:

$$b = f_1 - f_2.$$

При абсолютном измерении частота сети, Гц:

$$f = f_{\text{НОМ}} \frac{t_{\text{эс}}}{t_{\text{цх}}},$$

где  $t_{\text{эс}}$  – показание электромеханического секундомера, с;

$t_{\text{цх}}$  – показание цифрового хронометра, с.

При измерение методом фигур Лиссажу частоты сети ( $f$ ), Гц:

$$f = f_{\Gamma} \frac{n_y}{n_x},$$

где  $f_{\Gamma}$  – значение частоты образцового генератора, Гц;

$n_y, n_x$  – число пересечений фигуры Лиссажу с осями  $y$  и  $x$ .

### КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Привести в отчете принципиальные электрические схемы электродинамического, электромагнитного, электронного конденсаторного частотомеров, а также структурную схему электронно-счетного цифрового частотомера.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Перечень средств измерений.
2. По методике, приведенной в рабочей инструкции:
  - измеряют частоту сети всеми имеющимися в работе частотомерами;
  - определяют основную погрешность и вариацию показаний электромагнитного частотомера;
  - производят абсолютное измерение частоты сети с помощью электромеханического и цифрового секундомеров;
  - измеряют частоту сети методом фигур Лиссажу.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мотивированное заключение о соответствии погрешности поверяемого частотомера своему классу точности.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Принцип действия и основные свойства электродинамического, электромагнитного, электронного конденсаторного и цифрового электронно-счетного частотомеров?
2. У каких аналоговых частотомеров в отключенном состоянии указатель занимает произвольное положение? Почему?

3. Чем объясняется малое влияние изменения напряжения измеряемой частоты на показание электродинамического и электромагнитного частотомеров?

4. По какой схеме может быть перестроен цифровой частотомер для повышения точности измерения низких частот?

5. Как определить неизвестную частоту методом фигур Лиссажу, если фигура вращается?

6. Как оценить точность измерения частоты методом фигур Лиссажу?

**КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ**

Вопросы к зачёту по дисциплине  
«Электроника и информационно-измерительная техника»  
Семестр 4

1. Электропроводность полупроводников. Беспримесные и примесные полупроводники.
2. Образование электронно-дырочного перехода.
3. Физические процессы в  $p-n$  переходе. ВАХ. Электрический и тепловой пробой перехода.
4. Полупроводниковые резисторы, диоды, стабилитроны.
5. Биполярные транзисторы. Устройство и усилительные свойства. Схемы включения транзистора.
6. Схема включения биполярного транзистора с ОЭ. Входные и выходные характеристики,  $h$ -параметры.
7. Полевые транзисторы с  $p-n$ -переходом, с изолированным затвором (МДП-транзисторы); их вольтамперные характеристики и параметры.
8. Тиристоры. Определение. Классификация. Физические процессы в динисторе и тиристоре. ВАХ и основные параметры тиристоров.
9. Интегральные микросхемы. Классификация ИМС. Основные параметры ИМС.
10. Однофазный однополупериодный выпрямитель. Схема. Принцип действия. Основные соотношения.
11. Однофазный двухполупериодный (мостовой) выпрямитель. Схема. Принцип действия. Основные соотношения.
12. Трёхфазный мостовой выпрямитель. Схема. Принцип действия. Основные соотношения.
13. Управляемый выпрямитель. Схема. Принцип действия. Основные соотношения.
14. Сглаживающие фильтры, назначение, типы, расчет фильтра.
15. Параметрический стабилизатор напряжения. Схема. Принцип действия.
16. Компенсационный стабилизатор напряжения. Схема. Принцип действия.
17. Элементы оптоэлектроники. Преимущества оптоэлектронных приборов. Условные изображения, структура, принцип работы фоторезисторов, фотодиодов, фототранзисторов, светодиодов. Области их применения.
18. Усилители. Общие сведения. Классификация. Принцип построения усилительных каскадов. Режим покоя.
19. Усилительный каскад на биполярном транзисторе с ОЭ. Назначение элементов схемы. Принцип работы, временная диаграмма. Статический и динамический режимы.
20. Операционные усилители. Амплитудная характеристика. Структурная схема, обозначение, общие свойства.

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЕ ВОПРОСЫ  
ПО КУРСУ «Электроника и информационно-измерительная техника»

1. Электропроводность полупроводников. Бесприменные и примесные полупроводники.
2. Образование электронно-дырочного перехода.
3. Физические процессы в  $p-n$  переходе. ВАХ. Электрический и тепловой пробой перехода.
4. Полупроводниковые резисторы, диоды, стабилитроны.
5. Биполярные транзисторы. Устройство и усилительные свойства. Схемы включения транзистора.
6. Схема включения биполярного транзистора с ОЭ. Входные и выходные характеристики,  $h$ -параметры.
7. Полевые транзисторы с  $p-n$ -переходом, с изолированным затвором (МДП-транзисторы); их вольтамперные характеристики и параметры.
8. Тиристоры. Определение. Классификация. Физические процессы в динисторе и тиристоре. ВАХ и основные параметры тиристоров.
9. Интегральные микросхемы. Классификация ИМС. Основные параметры ИМС.
10. Однофазный однополупериодный выпрямитель. Схема. Принцип действия. Основные соотношения.
11. Однофазный двухполупериодный (мостовой) выпрямитель. Схема. Принцип действия. Основные соотношения.
12. Трехфазный мостовой выпрямитель. Схема. Принцип действия. Основные соотношения.
13. Управляемый выпрямитель. Схема. Принцип действия. Основные соотношения.
14. Сглаживающие фильтры, назначение, типы, расчет фильтра.
15. Параметрический стабилизатор напряжения. Схема. Принцип действия.
16. Компенсационный стабилизатор напряжения. Схема. Принцип действия.
17. Элементы оптоэлектроники. Преимущества оптоэлектронных приборов. Условные изображения, структура, принцип работы фоторезисторов, фотодиодов, фототранзисторов, светодиодов. Области их применения.
18. Усилители. Общие сведения. Классификация. Принцип построения усилительных каскадов. Режим покоя.
19. Усилительный каскад на биполярном транзисторе с ОЭ. Назначение элементов схемы. Принцип работы, временная диаграмма. Статический и динамический режимы.
20. Операционные усилители. Амплитудная характеристика. Структурная схема, обозначение, общие свойства.
21. Основные аналоговые схемы на основе ОУ (инвертирующий и неинвертирующий ОУ, сумматоры, вычитатель, интегратор, дифференциатор).
22. Генератор гармонических колебаний с мостом Вина. Мультивибратор.

23. Компаратор. Триггер Шмидта.
24. Основы алгебры логики. Аксиомы, законы, тождества, теоремы алгебры логики.
25. Логические функции. Логические элементы. Базовый логический элемент.
26. Комбинационные логические устройства. Устройство, принцип работы и назначение шифратора, дешифратора, мультиплексора и сумматора.
27. Триггеры. Основные определения и назначение. Классификация триггеров. Принцип работы асинхронного  $RS$ - триггера с прямыми входами. Временные диаграммы. Таблица истинности.
28. Принцип работы асинхронного  $RS$ - триггера с инверсными входами. Временные диаграммы. Таблицы истинности.
29. Принцип работы синхронного  $RS$ - триггера с прямыми входами. Временные диаграммы. Таблицы истинности.
30. Принцип работы  $D$ - триггера. Временные диаграммы. Таблицы истинности.
31. Принцип работы  $JK$ - триггера. Временные диаграммы. Таблицы истинности.
32. Принцип работы  $T$ - триггера. Временные диаграммы. Таблицы истинности.
33. Счетчики на  $JK$  триггерах. Последовательные и параллельные. Принцип построения и работы. Временные диаграммы.
34. Счетчики на  $D$  триггерах. Последовательные. С произвольным коэффициентом деления.
35. Параллельные и последовательные регистры. Принцип построения. Назначение и применение.
36. Цифро-аналоговые преобразователи. Принцип работы схем.
37. Аналого-цифровые преобразователи. Принцип работы схем

Вопросы к зачёту по дисциплине  
«Электроника и информационно-измерительная техника»  
Семестр 6

1. Классификация измерений: прямые, косвенные, совместные; статические и динамические.
2. Погрешности измерений и средств измерений.
3. Классы точности средств измерений.
4. Классификация и обозначения электромеханических приборов, их общие узлы. Обобщённый принцип действия, уравнение шкалы.
5. Электромагнитные приборы: устройство, принцип действия, характеристики.
6. Электростатические приборы: устройство, принцип действия, характеристики.
7. Электродинамические приборы: устройство, принцип действия, характеристики.
8. Ферродинамические приборы: устройство, характеристики.
9. Индукционные счетчики электрической энергии: устройство, принцип действия, характеристики.
10. Магнитоэлектрические приборы: устройство, принцип действия, характеристики.
11. Термоэлектрические приборы: устройство, принцип действия, характеристики.
12. Мостовая цепь: схемы, принцип действия условия равновесия, чувствительность.
13. Одинарный и двойной мосты постоянного тока: схемы, принцип действия, условия равновесия.
14. Электромеханические и электронные омметры. Измерения больших и малых сопротивлений.
15. Устройство, принцип действия и характеристики компенсаторов постоянного тока.
16. Устройство, принцип действия и характеристики компенсаторов переменного тока.
17. Электронно-лучевые осциллографы: структурная схема, принцип действия, характеристики.
18. Обобщенная структурная схема цифровых измерительных приборов (ЦИП). Дискретизация и квантование измеряемой величины.
19. Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) последовательного счёта, последовательного приближения, считывания.

20. Устройство, принцип действия, характеристики измерительных трансформаторов тока и напряжения. Подключение измерительных приборов к измерительным трансформаторам.
21. Принцип действия, характеристики, применение шунтов и делителей напряжения.
22. Электронные измерительные преобразователи электрических величин.
23. Устройство, принцип действия, характеристики электромеханических частотомеров (вибрационного, электромагнитного, электродинамического), электронных (аналогового, цифрового). Цифровой измеритель временных интервалов.
24. Устройство, принцип действия, характеристики электромеханических фазометров (однофазных и трехфазных), электронных фазометров (аналоговых, цифровых).
25. Измерительные преобразователи и приборы для измерений магнитных величин: измерительные катушки, веберметры, тесламетры с преобразователем Холла.
26. Регистрирующие приборы. Устройство, принцип действия, характеристики, применение.
27. Самопишущие приборы. Устройство, принцип действия, характеристики, применение.
28. Магнитографы. Устройство, принцип действия, характеристики, применение.
29. Потенциометры постоянного тока. Принципиальная схема, устройство, принцип действия.
30. Измерительные усилители и генераторы. Схемы, устройство, принцип действия.
31. Задачи на определение относительной погрешности измерения.
32. Задачи по определению абсолютной погрешности измерения.
33. Задачи по определению погрешности метода измерения и погрешности, обусловленной пределом измерения прибора и его классом точности.
34. Задачи по определению величины сопротивления шунтов и добавочных резисторов, которые подключают для расширения пределов измерения прибора.
35. Задачи с мостовыми схемами измерения параметров  $R$ ,  $L$ ,  $C$ , в которых необходимо определить неизвестный параметр.
36. Задачи с определением неизвестного сопротивления с помощью известного внутреннего сопротивления прибора и известного отклонения указателя.

## ВОПРОСЫ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

[I Контрольные задачи и тестовые задания по теме «Выпрямители»](#)

[II Контрольные задачи и тестовые задания по теме «Усилители»](#)

[III Контрольные задачи и тестовые задания по теме «Операционные усилители»](#)

[IV Контрольные задачи и тестовые задания по теме «Цифровые устройства»](#)

### I

#### Контрольные задачи по теме «Выпрямители»

**Задача В1.** На вход выпрямителя (рис. 1) подано напряжение  $u_1 = U_m \sin \omega t$ .

Число витков вторичных полуобмоток трансформатора  $w_1 = w_2$ .

Начертить временные диаграммы напряжения на нагрузке при включении ее между выводами а) 1 - 2; б) 1 - 3; в) 2 - 3.

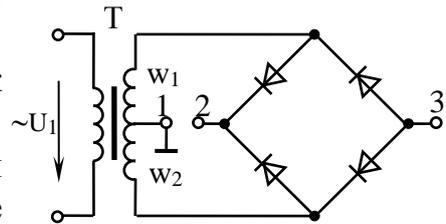


Рис. 1

**Задача В1** При прямом напряжении 0,9 В максимально допустимый ток диода равен 300 мА.

Каково наибольшее напряжение источника, при котором диод будет работать в безопасном режиме, если этот диод соединить последовательно с резистором  $R_H = 17 \text{ Ом}$ ?

**Задача В3.** В цепи (рис. 2) через нагрузочный резистор  $R_H = 500 \text{ Ом}$  протекает ток  $I_H = 0,1 \text{ А}$ .

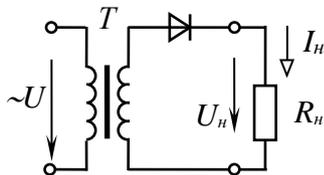


Рис. 2

Выбрать тип диода и рассчитать коэффициент трансформации и мощность трансформатора, если напряжение питающей сети  $U_1 = 220 \text{ В}$ .

**Задача В4** Аккумуляторная батарея, ЭДС которой  $E = 12 \text{ В}$ , внутреннее сопротивление  $R_0 = 1 \text{ Ом}$ , заряжается через однофазный мостовой выпрямитель, подключенный к трансформатору с вторичным напряжением  $u_2 = 22 \sin \omega t, \text{ В}$ . Начертить электрическую схему зарядной установки и определить среднее значение зарядного тока.

**Задача В5.** Определить параметры Г-образного LC-фильтра к однополупериодному выпрямителю, если коэффициент пульсации напряжения нагрузки  $K_{П2} = 0,02$ , частота питающей сети  $f = 50 \text{ Гц}$ .

**Задача В6** Определить угол управления однофазного мостового управляемого выпрямителя на тиристорах, если среднее значение напряжения на нагрузке должно быть равным а) 10 В; б) 1,75 В. Напряжение вторичной обмотки трансформатора, к которому подключен выпрямитель,  $U_2 = 13 \text{ В}$ .

**Задача В67.** Определить коэффициент полезного действия стабилизатора на полупроводниковом стабилизаторе, у которого напряжение стабилизации  $U_{ст} = 5$  В при токе стабилизации  $I_{ст} = 0,5$  А, если  $R_H = 10$  Ом ;  $R_б = 5$  Ом.

Ответы к контрольным задачам

В1  $R_{пр} = 16$  Ом;  $R_{обр} = 5$  МОм.; В2. 6 В.; В3 Д210;  $n = 2$ ;  $P_T = 15$  Вт.;  
В4. 2 А.; В5.  $C_\phi = 200$  мкФ;  $L_\phi = 3,92$  Гн.; В6. а)  $45^\circ$ ; б)  $135^\circ$ . В7. 0,25.

**Тест по теме «Выпрямители» для компьютерного или аудиторного контроля знаний студентов**

1. В схеме однополупериодного выпрямителя на нагрузке  $R_H = 510$  Ом постоянное напряжение  $U_H = 100$  В. Правильно ли выбран диод Д226, для которого максимальное обратное напряжение  $U_{обр} = 400$  В, а наибольший выпрямленный ток  $I_0 = 300$  мА?

2. В схеме двухполупериодного выпрямителя через нагрузку проходит постоянный ток  $I_H = 600$  мА. Можно ли в схеме использовать диоды типа Д229В, у которых наибольший средний прямой ток не более 400 мА?

3. Определить частоту пульсации основной гармоники напряжения на нагрузке трехфазного мостового выпрямителя, если напряжение первичной обмотки трансформатора имеет частоту  $f_C = 400$  Гц?

4. Определить действующее значение напряжения вторичной обмотки трансформатора в схеме двухполупериодного мостового выпрямителя, если через каждый диод идет ток  $I_0 = 150$  мА, а сопротивление нагрузки  $R_H = 430$  Ом.

5. В схему двухполупериодного выпрямителя включен индуктивный сглаживающий фильтр. Определить индуктивность дросселя, если выпрямленный ток  $I_H = 1$  А, выпрямленное напряжение  $U_H = 100$  В, частота сети  $f_C = 400$  Гц, коэффициент сглаживания  $k_{сгл} = 15$ .

## II

**Контрольные задачи по теме «Усилители»**

Задача У1. В биполярном транзисторе  $I_K = 10$  мА,  $I_Э = 10,5$  мА.

Определить коэффициенты передачи тока  $\alpha$  и  $\beta$ , если тепловым током можно пренебречь.

Задача У2 Биполярный транзистор с  $\beta = 100$  имеет  $I_B = 10$  мкА.

Определить  $I_K$  и  $I_Э$ , если тепловым током можно пренебречь. Сравнить токи  $I_K$  и  $I_Э$ .

Задача У3. Усилитель имеет  $K_U = 100$ . Он охвачен положительной обратной связью по напряжению с коэффициентом передачи  $\beta = 0,01$ .

Определить коэффициент усиления усилителя с обратной связью.

Задача У4. Усилитель имеет следующие динамические параметры:  $K_U = 250$ ;  $R_{âõ} = 0,5 \hat{\Omega}$ ;  $R_{âüõ} = 1 \hat{\Omega}$ .

Рассчитать коэффициент передачи цепи обратной связи  $\beta$ , которая позволит повысить входное сопротивление до 2 кОм.

Определить параметры усилителя с учетом ООС.

Задача У5. Двухкаскадный усилитель с коэффициентами усиления каскадов  $K_{U1} = 100$  и  $K_{U2} = 20$  охвачен общей отрицательной обратной связью по напряжению с  $\beta = 0,02$ .

Определить общий коэффициент усиления с учетом ООС.

Задача У6.  $K_{OC} = 48,8$ ; 14.31.  $P_{и} = P_K \geq 1$  Вт. Рассчитать мощность источника питания и максимальную мощность  $P_K$  транзистора однотактного трансформаторного каскада усиления мощности, если  $P_{1 \max} = 0,5 \hat{A}$ .

Задача У7. Какую максимальную мощность можно получить от двухтактного каскада усиления мощности, если транзисторы работают в классе В и имеют  $P_{ê \text{âи}} = 0,6 \hat{A}$ ?

Ответы к контрольным задачам

У1.  $\alpha = 0,95$ ;  $\beta = 20$ .; У2.  $I_K = 1$  мА;  $I_Э = 0,05$  мА.; 14.28.  $K_{OC} \rightarrow \infty$

У3.  $\beta = 0,012$ ;  $K_{OC} = 62,5$ ;  $R_{вх} = 2$  кОм;  $R_{вых} = 0,25$  кОм.

У4.  $K_{OC} = 48,8$ .; У5.  $P_{и} = P_K \geq 1$  Вт.; У6.  $P_{и} = P_K \geq 1$  Вт.; У7. При  $\eta = 0,7$   $P_H = 2,8$  Вт.

**Тест по теме «Усилители» для компьютерного или аудиторного контроля знаний студентов**

Для транзистора ГТ109А коэффициент передачи тока эмиттера  $h_{21Б} = 0,95 \dots 0,98$ . Определить в каких пределах может изменяться коэффициент усиления тока базы.

Для транзистора КТ312А статический коэффициент усиления тока базы  $h_{21Э} = 10 \dots 100$ . Определить, в каких пределах может изменяться коэффициент передачи тока эмиттера  $h_{21Б}$ .

Биполярный транзистор, имеющий коэффициент передачи тока базы  $\beta = 100$ , включен по схеме с общим эмиттером. Определить ток базы  $I_B$ , ток эмиттера  $I_E$ , коэффициент передачи тока эмиттера  $\alpha$ , если ток коллектора  $I_K = 1$  мА, а током  $I_{к0}$  можно пренебречь.

Усилитель имеет следующие динамические параметры:  $k_U = 100$ ,  $R_{вх} = 1$  кОм,  $R_{вых} = 10$  кОм. Рассчитать коэффициент передачи цепи обратной связи  $\beta$ , которая позволит повысить входное сопротивление до 5 кОм. Определить параметры усилителя с учетом ООС.

Двухкаскадный усилитель с коэффициентами усиления каскадов  $K_{U1} = 50$  и  $K_{U2} = 60$  охвачен общей отрицательной обратной связью по напряжению с  $\beta = 0,01$ . Определить общий коэффициент усиления с учетом ООС.

## III

## Контрольные задачи по теме «Операционные усилители»

Задача ОУ1. В цепи рис. 1

$$R_1 = 20 \text{ кОм}; R_2 = 10 \text{ кОм};$$

$$R_3 = 25 \text{ кОм}; R_{OC} = 100 \text{ кОм};$$

$$U_1 = U_2 = U_3 = 10 \text{ мВ}.$$

Определить  $U_{\text{ВЫХ}}$  и  $R_4$ .

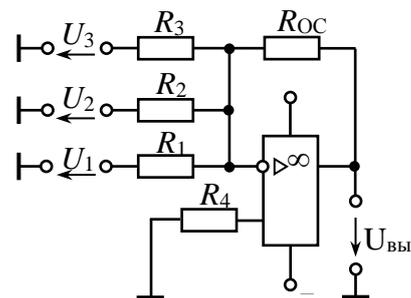


Рис. 1

Задача ОУ2. В цепи рис. 2  $R_1 = 5 \text{ кОм}$ ;  $U_{\text{ВХ}} = 10 \text{ мВ}$ ;

$$U_{\text{ВЫХ}} = 0,11 \text{ В}.$$

Определить  $R_{OC}$  и  $R_2$ .

Задача ОУ3. В цепи рис. 12  $U_{\text{ВХ}} = 1 \text{ В}$ .

Определить  $U_{\text{ВЫХ}}$ .

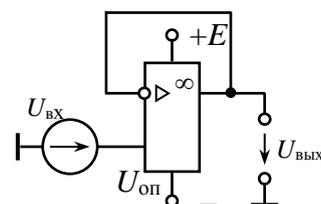


Рис. 2

Задача ОУ4. В цепь инвертирующего входа ОУ включен фотодиод VD. При некоторой освещенности ток фотодиода  $I_{\Phi} = 10 \text{ мкА}$ .

Рассчитать  $R_{OC}$ , при котором выходное напряжение  $U_{\text{ВЫХ}} = 1 \text{ В}$ .

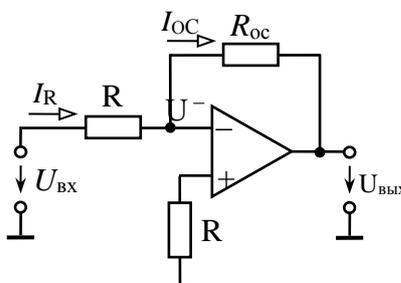
Ответы к контрольным задачам

ОУ1.  $U_{\text{ВЫХ}} = -190 \text{ мВ}$ ;  $R_4 = 5 \text{ кОм}$ .; ОУ2.  $R_{OC} = 50 \text{ кОм}$ ;  $R_2 = 4,55 \text{ кОм}$ .

ОУ3.  $U_{\text{ВЫХ}} = 1 \text{ В}$ .; ОУ4.  $R_{OC} = 100 \text{ кОм}$ .

### Тест по теме «Операционные усилители» для компьютерного или аудиторного контроля знаний студентов

Найдите напряжение на выходе усилителя  $U_{\text{ВЫХ}}$  и ток  $I_{OC}$ , если  $U_{\text{ВХ}} = 0,1 \text{ В}$ ;  $R = 1 \text{ кОм}$ ;  $R_{OC} = 50 \text{ кОм}$ ? Питание ОУ осуществляется от двух источников напряжения:  $U_{\text{ИП1}} = +10 \text{ В}$  и  $U_{\text{ИП2}} = -10 \text{ В}$ .



Составьте устройство на базе операционного усилителя для реализации функции

$$U_{\text{ВЫХ}} = -K_U \cdot (U_{\text{ВХ1}} - U_{\text{ВХ2}} + U_{\text{ВХ3}})$$

Определить параметры схемы, если известны  $R_{OC} = 20 \text{ кОм}$ ;  $K_U = 5$ .

Ограничится ли выходной сигнал в инвертирующем усилителе, если  $U_{\text{вх}} = 1$  В;  $R_1 = 1$  кОм;  $R_{\text{ос}} = 20$  кОм? Максимальное значение выходного напряжения ОУ  $U_{\text{вых max}} = 15$  В.

В каком режиме работает ОУ?

Составьте устройство на базе операционного усилителя для реализации функции

$$U_{\text{вых}} = -2 \cdot U_{\text{вх1}} - 3 U_{\text{вх2}} + U_{\text{вх3}}.$$

Определить параметры схемы, если  $R_{\text{ос}} = 20$  кОм.

Для разностного усилителя определить величину  $U_{\text{вых}}$ , если  $U_{\text{вх1}} = 0,2$  В;  $U_{\text{вх2}} = -0,2$  В;  $R_1 = R_2 = R_{\text{ос}} = R_3 = 20$  кОм.

## Практический раздел по ИИТ

**Практическое занятие №1**

Задача 1. Вольтметр с пределом измерения 7,5 В и максимальным числом делений 150 имеет наибольшую абсолютную погрешность 36 мВ. Определить класс точности прибора и относительную погрешность в точках 40, 80, 90, 100 и 120 делений.

Задача 2. Для расширения предела измерения амперметра с внутренним сопротивлением  $R_{пр}=0,5$  Ом в 50 раз необходимо подключить шунт. Определить сопротивление шунта, ток полного отклонения прибора и максимальное значение тока на расширенном пределе, если падение напряжения на шунте  $U_{ш} = 75$  мВ.

Задача 3. Магнитоэлектрический прибор с сопротивлением 10 Ом и током полного отклонения 7,5 мА может быть использован в качестве амперметра на 30 А. Определить сопротивление шунта.

Задача 4. Милливольтметр с пределом измерения 75 мВ и внутренним сопротивлением  $R_{п}=25$  Ом имеет 150 делений шкалы. Определить сопротивление шунта, чтобы прибором можно было измерять предельное значение тока 30 А. Определить цену деления прибора в обоих случаях.

Задача 5. Верхний предел измерений вольтметра 100 В, его внутреннее сопротивление 10 кОм, число делений шкалы 100. Определить цену деления шкалы вольтметра, если он включен с добавочным резистором 30 кОм.

Задача 6. Верхний предел измерения амперметра 1 А, его сопротивление  $R_A$ . Определить сопротивление шунта  $R_{ш}$ , чтобы при токе 5 А прибор показывал ток 1 А.

**Практическое занятие №2**

Задача 1. Вольтметр класса точности 1,0 с пределом измерения 300 В, имеющий максимальное число делений 150, поверен на отметках 30, 60, 100, 120 и 150 делений, при этом абсолютная погрешность в этих точках составила 1,8; 0,7; 2,5; 1,2 и 0,8 В. Определить, соответствует ли прибор указанному классу точности, и относительные погрешности на каждой отметке.

Задача 2. Паспортные данные счетчика электрической энергии: 220 В, 10 А, 1 кВт × ч — 640 оборотов диска. Определить относительную погрешность счетчика и поправочный коэффициент, если он был проверен при номинальных значениях тока и напряжения и за 10 мин сделал 236 оборотов.

Задача 3. Ток, измеренный амперметром класса точности 2 и диапазоном измерения 15 А, составлял 11,5 А. Определить диапазон возможного действительного значения измеряемого тока.

Задача 4. При изменении измеряемого тока на 0,5 А стрелка амперметра отклонилась на половину линейной шкалы, имеющей 100 делений. Определить верхний и нижний пределы измерения, цену деления и чувствительность амперметра.

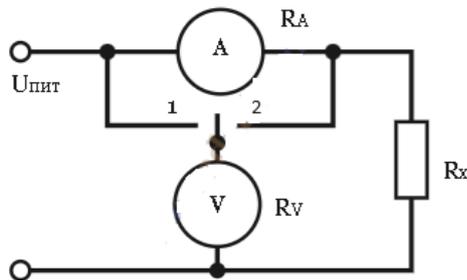
Задача 5. Рассчитать мощность, выделяемую в обмотке измерительного механизма вольтметра электромагнитной системы с пределом измерения 100 В, если активное сопротивление обмотки 1 кОм, ее индуктивность 0,3 Гн. Прибор рассчитан на измерение в цепях постоянного и переменного тока частотой 50 Гц.

Задача 6. Необходимо измерить ток потребителя в пределах 20 – 25 А. Имеется микроамперметр с пределом измерения 200 мкА, внутренним сопротивлением 300 Ом и максимальным числом делений 100. Определить сопротивление шунта для расширения предела измерения до 30 А и относительную погрешность измерения на отметке 85 делений, если класс точности прибора 1,0.

### Практическое занятие 3

Задача 1. При измерении сопротивления якоря двигателя переменного тока методом амперметра и вольтметра (см. рисунок) показания приборов были равны 10 А и 30 В. Амперметр имеет внутреннее сопротивление  $R_A = 0,1$  Ом, внутреннее сопротивление вольтметра  $R_V = 5$  кОм. Чему равна дополнительная относительная погрешность, вносимая внутренними сопротивлениями приборов в обоих случаях, т. е. при положениях 1 и 2 ключа (рис. 1)?

Рисунок 1



Задача 2. В сеть переменного тока через трансформатор тока 100/2,5 А и трансформатор напряжения 600/150 В включены амперметр, вольтметр и ваттметр, которые показали соответственно 100, 120 и 88 делений. Пределы измерения приборов, следующие: амперметр — 3 А, вольтметр — 150 В, ваттметр — 2,5 А по току, 150 В по напряжению. Все приборы класса точности 0,5 имеют максимальное число делений 150. Определить полную потребляемую сеть мощность, ее полное сопротивление и коэффициент мощности, наибольшую абсолютную и относительную погрешности измерения полного сопротивления, учитывая класс точности приборов.

Задача 3. Методом амперметра и вольтметра (рис.2) измеряется сопротивление по схеме рисунка. Показания амперметра и вольтметра, следующие:  $U = 4,8 \text{ В}$ ,  $I = 0,15 \text{ А}$ . Приборы имеют класс точности 1,0 и пределы измерения  $I_{\text{пр}} = 250 \text{ мА}$ ,  $U_{\text{пр}} = 7,5 \text{ В}$ . Определить измеряемое сопротивление, наибольшую абсолютную и относительную погрешности измерения.

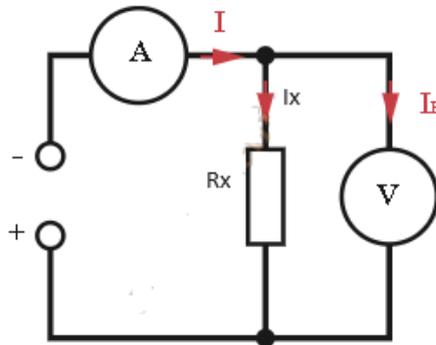
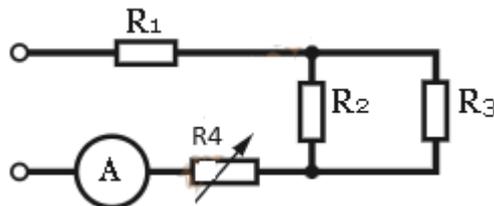


Рисунок 2

Задача 4. Амперметр включен в неразветвленную часть электрической цепи (рис.3), причем сопротивления резисторов  $R_1 = 2 \text{ Ом}$ ;  $R_2 = R_3 = 4 \text{ Ом}$ , полное сопротивление переменного резистора  $R_4 = 10 \text{ Ом}$ . ЭДС источника питания цепи  $15 \text{ В}$ , его внутреннее сопротивление  $R_{\text{в}} = 0,5 \text{ Ом}$ . Найти показания амперметра в двух крайних положениях резистора и выбрать сопротивление  $R_A$ , чтобы вносимая им погрешность измерения не превышала 1 %.

Рисунок 3



Задача 5. Определить параметры многопредельного шунта (рис.4) к амперметру для трех пределов измерения. Внутреннее сопротивление амперметра  $R_A = 2 \text{ Ом}$ , падение напряжения на шунте в каждом пределе измерения не должно превышать  $100 \text{ мВ}$ .

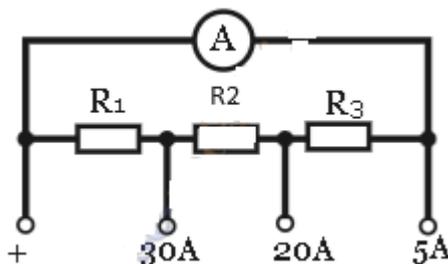


Рисунок 4

Задача 6. Вольтметр подключен параллельно резистору  $R_1 = 1 \text{ кОм}$  (рис.5), причем сопротивления резисторов  $R_2 = R_3 = 5 \text{ кОм}$ , а полное сопротивление переменного резистора  $R_4 = 10 \text{ кОм}$ . ЭДС источника питания цепи  $110 \text{ В}$ , его внутреннее сопротивление  $R_{\text{вн}} = 100 \text{ Ом}$ . Найти показания вольтметра в двух крайних положениях резистора  $R_4$  и выбрать такое сопротивление  $R_V$  чтобы вносимая им погрешность измерения не превышала  $1 \%$ .

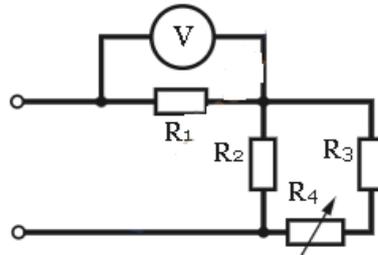


Рисунок 5

#### Практическое занятие 4

Задача 1. Определить параметры многопредельного делителя напряжения (рис.6) к вольтметру для трех пределов измерения. Внутреннее сопротивление вольтметра  $R_V = 4 \text{ кОм}$ . Найти мощности, потребляемые прибором в каждом диапазоне измерения.

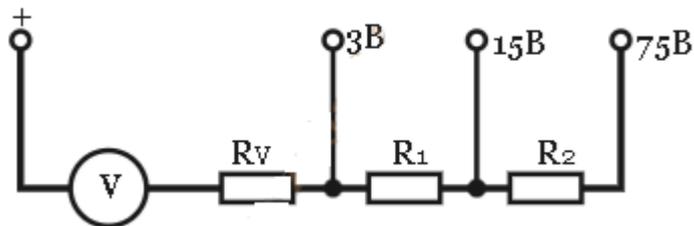


Рисунок 6

Задача 2. Логометр, схема которого соответствует рисунку, имеет шкалу, отградуированную от  $0$  до  $R_x \text{ max} = 1000 \text{ Ом}$ , длиной  $a \text{ max} = 100 \text{ мм}$ . Сопротивления  $R_{p2} = 50 \text{ Ом}$  и  $R_{огр} = 100 \text{ Ом}$ . Определить значения сопротивления  $R_{p1}$  и коэффициента шкалы  $k$ . Чему будет равна наибольшая абсолютная погрешность измерения при классе точности прибора  $1$ ?

Задача 3.

Для подбора резисторов используется мостовая схема (рис.7) с микроамперметром  $\text{РА}$ , шкала которого имеет отметки, соответствующие допуску на номинал сопротивления резисторов. Сопротивление резистора  $R_3$  выбирается равным номинальному сопротивлению резистора  $R_x = 100 \text{ Ом}$ , сопротивление плеч моста  $R_2 = R_4 = 15 \text{ кОм}$ . Определить значения тока, при которых на шкале можно будет поставить отметки  $\pm 1$ ;  $\pm 2,5$  и  $\pm 5 \%$ , если напряжение источника  $U_{\text{пит}} = 1,5 \text{ В}$ . Внутренними сопротивлениями микроамперметра и источника пренебречь.

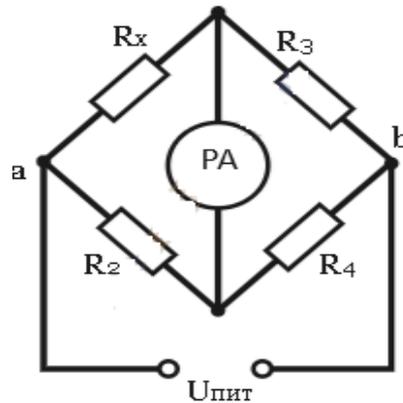


Рисунок 7

Задача 4.

Паспортные данные счетчика электрической энергии: 220 В, 10 А, 1 кВт × ч — 640 оборотов диска. Определить относительную погрешность счетчика и поправочный коэффициент, если он был проверен при номинальных значениях тока и напряжения и за 10 мин сделал 236 оборотов.

Задача 5.

В цепи, схема которой приведена на рисунке, включен симметричный трехфазный потребитель с фазным сопротивлением  $Z_{\text{ф}} = (6 + j2)$  Ом, линейное напряжение 380 В. Определить показания ваттметров, найти сдвиг фаз между токами и напряжениями их измерительных цепей. Рассчитать активную мощность потребителя.

### Практическое занятие 5

Задача 1. Определить количество электроэнергии, потребляемой в цепи постоянного тока за 24 ч, и абсолютную погрешность измерения, если ток в цепи  $I = 94$  А, напряжение цепи  $U = 217$  В, относительные погрешности измерения тока  $\gamma I = 1,5\%$ , напряжения  $\gamma U = 1,8\%$ ; время измерено с точностью до 3 мин.

Задача 2. Определить шунтирующее сопротивление  $R_x$  и емкость конденсатора  $C_x$ , если равновесие моста наступает в положении 1 ключа при  $R_1 = 5$  кОм и  $R_2 = 1$  кОм, а в положении 2 при  $R_1 = 2,5$  кОм и  $R_2 = 1$  кОм. Сопротивление  $R = 10$  кОм, емкость образцового конденсатора  $C_0 = 10$  мФ, частота напряжения питания 400 Гц.

Задача 3. Равновесие мостовой схемы на рисунке 8 наступает в положении 1 ключа при  $R_1 = 3,5 \text{ кОм}$  и  $R_2 = 2 \text{ кОм}$ , а в положении 2 ключа при  $R_1 = 0,3 \text{ кОм}$  и  $R_2 = 2 \text{ кОм}$ . Рассчитать активное сопротивление и индуктивность катушки, если образцовая катушка имеет параметры  $R_0 = 5 \text{ Ом}$  и  $L_0 = 50 \text{ мГн}$ . Сопротивление  $R = 80 \text{ Ом}$ , частота напряжения источника питания  $50 \text{ Гц}$ .

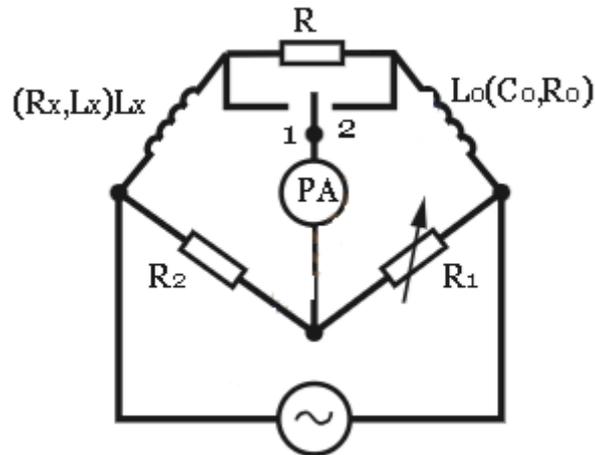


Рисунок 8

Задача 4. Тесламетр подключается к сети переменного напряжения  $42 \text{ В}$  через трансформатор с коэффициентом трансформации  $5$  (см. рисунок). Сопротивление цепи продольного электрического поля датчика Холла равно  $500 \text{ Ом}$ . Опорное напряжение  $U_{оп}$  составляет  $1,5 \text{ В}$ , толщина пластины  $0,5 \text{ мм}$ . Определить выходное напряжение тесла метра при значениях индукции  $B = 0,5; 1$  и  $1,5 \text{ Тл}$ , если постоянная Холла  $k_H = 0,025 \text{ м}^3/(\text{А} \times \text{с})$ .

Задача 5. В генераторном датчике положения с резонансным контуром индуктивность дросселя при приближении металлической пластины меняется от  $1$  до  $50 \text{ мГн}$ . Какой конденсатор необходимо подключить параллельно дросселю, чтобы резонансная частота датчика в исходном положении была  $10 \text{ кГц}$ ? Как меняется волновое сопротивление контура?

Задача 6. В качестве измерительного прибора в мостовой схеме датчика температуры, схема которого приведена на рисунке, используется миллиамперметр со шкалой  $0 — 10 \text{ мА}$ , отградуированный от  $100$  до  $200 \text{ }^\circ\text{С}$ . В качестве термочувствительного элемента применяется терморезистор, изменяющий свое сопротивление в указанном диапазоне от  $64$  до  $81,5 \text{ Ом}$ . Подобрать резисторы  $R_2$  и  $R_3$ , чтобы отклонение указателя на границах диапазона соответствовало началу и концу шкалы. Сопротивление  $R_1 = 330 \text{ Ом}$ , напряжение питания моста  $U_{аб} = 15 \text{ В}$ .

### Практическое занятие 6

Задача 1. Даны четыре вольтметра. 1)  $U_{ном} = 500 \text{ В}$ ,  $K = 0,1$ , 2)  $U_{ном} = 100 \text{ В}$ ,  $K = 0,5$ ; 3)  $U_{ном} = 50 \text{ В}$ ,  $K = 1$ ; 4)  $U_{ном} = 10 \text{ В}$ ,  $K = 2,5$ .

Какой из приборов даст наименьшую относительную и абсолютную погрешности при измерении напряжения примерно 10 В?

Задача 2. Измерение сопротивления изоляции электродвигателя производится с помощью магнитоэлектрического вольтметра с внутренним сопротивлением 50 кОм. Напряжение, которое показал вольтметр, при прямом подключении к сети - 220 В, а при подключении к этой же сети последовательно с резистором, вольтметр показал 20 В. Определить сопротивление изоляции.

Задача 3. Определить максимально допустимую абсолютную погрешность магнитоэлектрического амперметра с  $I_{ном} = 5$  и классом точности 0.5.

Задача 4. Определить максимально допустимую абсолютную и относительную погрешности электродинамического ваттметра с  $I_{ном} = 5$ ,  $U_{ном} = 150$  В и классом точности 1.5.

Задача 5. Необходимо определить величину сопротивления активной составляющей катушки с индуктивностью  $L$ . Назовите способы измерения, приведите схемы.

### **Практическое занятие 7**

Контрольная работа.

### Контрольные задачи по теме «Цифровые устройства»

Задача ЦУ1. Определить период  $T$ , длительность импульса  $t_{и}$  и паузы  $t_{п}$ , если частота следования импульсов  $f = 10 \text{ кГц}$ , а скважность  $Q = 10$ .

Задача ЦУ2. Составить таблицы истинности для функций, реализуемых логическими элементами 2И-НЕ, 3ИЛИ-НЕ. Начертить условное обозначение этих элементов.

Задача ЦУ3. Составить функциональную схему устройства на логических элементах, реализующего функцию а)  $F_1 = \bar{X}_1 + X_2 + \bar{X}_3$ ; б)  $F_2 = X_1 \cdot X_2 + X_3$ .

Задача ЦУ4. Составить функциональную схему устройства, реализующего логические функции  $F_1 = \bar{X}$ ;  $F_2 = X_1 + X_2$ ;  $F_3 = X_1 \cdot X_2$  на логических элементах а) 2И-НЕ; б) 2ИЛИ-НЕ.

Задача 16.22. Составить функциональную схему на логических элементах 2И-НЕ, реализующую функцию  $F = X_1 \cdot X_2 + \bar{X}_3 \cdot X_4$ .

Задача ЦУ5. На рис. 1 приведена структурная схема логического устройства. Запишите уравнение логической функции, реализуемой этим устройством. При каком наборе входных сигналов  $F = 1$ ?

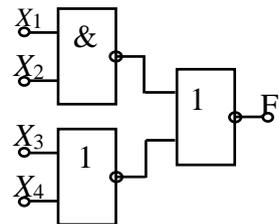


Рис. 1

Задача ЦУ6. Записать функцию и составить схему, реализующую мажоритарную логику (на выходе появляется 1, если на всех трех или на любых двух входах имеется 1).

Задача ЦУ7. Составить схему шифратора для преобразования числа из восьмеричного кода в двоичный.

Задача ЦУ8. Составить схему дешифратора для перевода числа из двоичного кода в восьмеричный.

Задача ЦУ9. Составить схему мультиплексора для передачи информации от трех источников по одной линии.

Задача ЦУ10. Используя схемы мультиплексора и демультиплексора, составить схему передачи информации от трех источников трем приемникам по одной линии связи.

Задача ЦУ11. Составить таблицу состояний для  $RS$  – триггера на элементах И-НЕ. Начертить условное обозначение такого триггера.

Задача ЦУ12. Какой сигнал установится на выходах  $Q$  и  $\bar{Q}$   $JK$ -триггера, если к приходу синхроимпульса а)  $J = 1; K = 0$ ; б)  $K = 1; J = 0$ ; в)  $K = 1; J = 1$ ?

Задача ЦУ13. Составить схему  $T$ -триггера на основе  $JK$ -триггера, привести временные диаграммы его работы.

Задача ЦУ14. Составить схему последовательного суммирующего счетчика импульсов на  $D$ -триггерах с модулем счета  $K = 8$ . Начертить временные диаграммы его работы.

Задача ЦУ15. Составить схему последовательного суммирующего счетчика импульсов на  $JK$ -триггерах с модулем счета  $K = 5$ . Начертить временные диаграммы его работы. Каково состояние выходов счетчика после прихода трех импульсов?

Ответы к контрольным задачам

ЦУ1.  $T = 0,1$  мс;  $t_{и} = 0,01$  мс;  $t_{п} = 0,09$  мс.

ЦУ5.  $X_1 = X_3 = X_4 = 1$ ;  $X_2 = X_3 = X_4 = 1$ .

ЦУ6.  $Y = X_1 X_2 + X_2 X_3 + X_1 X_3$

ЦУ11. а)  $Q = 1$ ;  $\bar{Q} = 0$ ;

б)  $Q = 0$ ;  $\bar{Q} = 1$ ;

в)  $Q_{n+1} = \bar{Q}_n$ .

ЦУ15.  $Q_3 Q_2 Q_1 = 011$ .

Тест по теме «Цифровые устройства» для компьютерного или аудиторного контроля знаний студентов

Преобразуйте логическую функцию для реализации на элементах 2И-НЕ. Изобразите схему на заданных элементах.

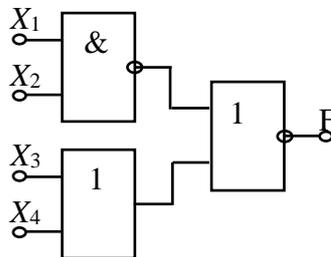
$$F = (\overline{\overline{X_1 + X_2 + X_3}}) + (\overline{X_3 + X_4}) + \overline{X_6 + X_7}$$

Используя логические элементы 3И, НЕ, составить комбинационную схему, вырабатывающую на выходе сигнал «1», только при поступлении на ее входы заданной комбинации входных сигналов 0101001. Запишите логическую функцию, отражающую работу устройства.

Преобразуйте логическую функцию для реализации на элементах 2ИЛИ, 2И, НЕ. Изобразите схему на заданных элементах.

$$F = \overline{X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 + X_5 \cdot X_6 \cdot X_7}$$

Записать уравнение функции, которую реализует данная схема. При каких сочетаниях входных сигналов  $F = 1$ ?



Составить функциональную схему на логических элементах 2И-НЕ, реализующую функцию  $F = X_1 \cdot \overline{X_2} + \overline{X_1} \cdot X_2$ .

## ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ

Для изучения дисциплины «Электроника и информационно-измерительная техника» студентами специальности 7-07-0712-01 «Электроэнергетика и электротехника», согласно с утвержденной рабочей программе учебной дисциплины отведено:

- для очной формы получения высшего образования всего 380 ч., из них аудиторных - 200 часов;

- для заочной формы получения высшего образования всего 380 ч., из них аудиторных - 36 часов.

- для заочной интегрированной формы на основе среднеспециального образования всего 290 ч., из них аудиторных - 28 часов.

Распределение аудиторных часов по курсам, семестрам и видам занятий для очной формы приведено в таблице 1, по заочной форме в таблице 2, по заочной интегрированной форме получения высшего образования на основе среднеспециального в таблице 3.

Таблица 1.

Очная (дневная) форма получения высшего образования						
Курс	Семестр	Лекции, ч.	Лабораторные занятия, ч.	Практические занятия, ч.	Форма текущей аттестации	Форма промежуточной аттестации
2	4	36	18	18	Контрольная работа.	зачет
3	5	36	18	18	Расчётно-графическая работа	экзамен
3	6	28	14	14	Лабораторная работа	зачет

Таблица 2.

Заочная форма получения высшего образования Профилизации: «Электрические установки, электростанций и подстанций»; «Электроэнергетические системы и сети».						
Курс	Семестр	Лекции, ч.	Лабораторные занятия, ч.	Практические занятия, ч.	Форма текущей аттестации	Форма промежуточной аттестации
3	5	6	8	2	Контрольная работа.	зачет
3	6	6	4		Лабораторная работа	экзамен
4	7	6	4		Лабораторная работа	зачет

Заочная интегрированная форма получения высшего образования на основе среднеспециального образования Профилизация «Электроснабжение»						
Курс	Семестр	Лекции , ч.	Лабораторные занятия, ч.	Практически е занятия, ч.	Форма текущей аттестации	Форма промежуточной аттестации
3	5	6	4	4	Контрольная работа.	экзамен
3	6	6	4	4	Лабораторна я работа	зачет

Ниже представлены разделы учебной программы: содержание учебного материала, учебно–методическая карта дисциплины, список рекомендуемой литературы

## СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### Раздел I. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

#### Тема 1.1. Полупроводниковые диоды

Краткие сведения об электропроводности чистых и примесных полупроводников. Образование электронно-дырочного перехода. Физические процессы в *p-n*-переходе. Вольтамперная характеристика. Электрический и тепловой пробой перехода. Полупроводниковые диоды: выпрямительный, туннельный, обращенный, стабилитрон, варикап, светодиод, фотодиод; их характеристики и параметры.

#### Тема 1.2. Тиристоры

Определение и область применения. Классификация. Физические процессы в динисторе и тринисторе. Эквивалентные схемы, параметры и характеристики тиристоров, симметричных тиристоров (симисторов) и тиристоров

#### Тема 1.3. Биполярные транзисторы

Биполярные транзисторы. Физические процессы в биполярном транзисторе, параметры и вольтамперные характеристики. Схемы включения транзистора. Схемы замещения. Составные биполярные транзисторы. Силовые транзисторы и их особенности; область применения. Зависимость параметров транзистора от температуры

#### Тема 1.4. Полевые транзисторы

Особенности строения, принцип действия полевых транзисторов: с *p-n*-переходом, с изолированным затвором (МДП-транзисторы); их вольтамперные характеристики, основные параметры, влияние температуры

#### Тема 1.5. Элементы электроники

Полупроводниковые резисторы: линейные, варисторы, терморезисторы, фоторезисторы, тензорезисторы; их характеристики и параметры

Элементы оптоэлектроники. Фотоэлектрические и светоизлучающие устройства, оптроны; параметры и характеристики. Знаковые и световые индикаторы

Интегральные микросхемы. Классификация интегральных схем по конструктивным и функциональным признакам

### Раздел II. АНАЛОГОВЫЕ УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРОНИКИ

#### Тема 2.1. Выпрямители переменного тока

Выпрямители переменного тока. Структура источников вторичного питания. Однофазные и трехфазные неуправляемые выпрямители: схемы, принцип работы, внешние характеристики, основные соотношения для выбора вентиля, трансформаторов.

Сглаживающие фильтры: назначение, классификация, принцип работы.

Однофазные и трехфазные управляемые выпрямители: схемы, принцип работы, временные диаграммы, регулировочная характеристика. Область применения.

Стабилизаторы напряжения и тока. Параметрические и компенсационные стабилизаторы напряжения и тока. Назначение, схемы, принцип работы.

### **Тема 2.2. Усилители аналогового сигнала**

Работа биполярного и полевого транзисторов в одиночных усилительных каскадах. Аналитический и графический методы расчета и анализа работы транзистора в одиночном каскаде усиления. Статический и динамический режимы каскада. Классы усилительных каскадов. Общие сведения о многокаскадных усилителях, межкаскадные связи, параметры и характеристики.

Выходные каскады: однотактные и двухтактные трансформаторные и бестрансформаторные усилители мощности.

Обратные связи в электронных усилителях и их влияние на параметры и характеристики.

### **Тема 2.3. Усилители постоянного тока**

Усилители постоянного тока (УПТ). Общая характеристика УПТ и их особенность. Классификация. Дифференциальные усилительные каскады, анализ работы, выбор элементов, параметры и характеристики.

Операционные усилители (ОУ). УПТ, выполнение в виде операционного усилителя на ИС, их параметры и характеристики. Применение ОУ

Избирательные усилители (активные полосовые фильтры); амплитудно-частотная характеристика, полоса пропускания, добротность, параметры.

## **Раздел III. ИМПУЛЬСНЫЕ УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРОНИКИ**

### **Тема 3.1. Генераторы импульсного сигнала**

Импульсные устройства на транзисторах и ОУ. Генераторы линейно-изменяющегося напряжения. Электронные генераторы.

Параметры импульсных сигналов. Характеристика режимов работы и принципов построения генераторов импульсов. Автоколебательный и ждущий режимы работы мультивибратора.

### **Тема 3.2. Логические функции и элементы**

Логические операции. Основы алгебры логики. Логические элементы (ЛЭ) И, ИЛИ, НЕ, И-НЕ, ИЛИ-НЕ, Исключающее ИЛИ и т.п. и их микросхемная реализация. Таблицы истинности, логические функции.

Принципы минимизации логических функций; карты Карно, алгебра логики. Приведение логической функции к заданному логическому базису

### **Тема 3.3. Последовательностные логические устройства**

Логические последовательностные элементы и устройства. Построение триггеров и их классификация по способу управления и функциональному назначению входов  $R$ ,  $S$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $T$ ,  $J$ ,  $K$ . Таблицы переходов, временные диаграммы, реализация с помощью ЛЭ.

Последовательные и параллельные регистры. Счетчики импульсов двоичные и с произвольным коэффициентом счета. Десятичные счетчики

#### **Тема 3.4. Комбинационные логические устройства**

Комбинационные логические устройства: шифратор, дешифратор, мультиплексор, демультиплексор. Назначение. Реализация на логических элементах.

Полусумматор, одноразрядный сумматор, многоразрядный сумматор реализация на ЛЭ

#### **Тема 3.5. Элементы микропроцессорных систем**

Цифро-аналоговые и аналого-цифровые преобразователи.

Элементы памяти, принципы организации запоминающих устройств. Разновидности постоянно запоминающих устройств. Оперативное запоминающее устройства; статические, динамические.

Микропроцессоры. Состав и структура микропроцессорной системы: центральный процессор, источники и носители информации, устройства ввода и вывода, внешняя память. Структура микропроцессора: АЛУ, основная и регистровая память, устройство управления, регистр команд, регистр-аккумулятор, счетчик команд, регистр признаков. Микроконтроллеры.

Тенденции и перспективы развития электроники и микропроцессорной техники

### **РАЗДЕЛ VI ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА**

#### **Тема 4.1. Классификация измерений. Основные характеристики и классы точности средств измерений.**

Значение информационно-измерительной техники в народном хозяйстве и науке, ее современное состояние и перспективы развития.

Прямые, косвенные, совместные измерения; статические и динамические измерения. Метрологические и неметрологические характеристики средств измерений. Классы точности средств измерений.

#### **Тема 4.2. Устройство и принцип действия электромеханических приборов (ЭМП).**

Классификация и обозначения ЭМП, их общие узлы. Принцип действия, уравнение шкалы. Электромагнитные приборы (устройство, принцип действия, характеристики). Электростатические приборы (устройство, принцип действия, характеристики). Электродинамические амперметры, вольтметры, ваттметры (устройство, принцип действия, характеристики). Ферродинамические приборы (устройство, характеристики). Индукционные счетчики электрической энергии (устройство, принцип действия, характеристики).

Магнитоэлектрические приборы (устройство, принцип действия, характеристики). Гальванометры. Выпрямительные и комбинированные

приборы (устройство, характеристики). Термоэлектрические приборы (устройство, характеристики).

#### **Тема 4.3. Компенсаторы и мосты. Измерение параметров пассивных элементов электрических цепей.**

Устройство, принцип действия и характеристики компенсаторов постоянного тока, компенсаторов переменного тока.

Мостовая цепь- условия равновесия, чувствительность. Одинарный и двойной мост постоянного тока. Автоматические мосты.

Частотонезависимые мосты переменного тока. Косвенные измерения параметров пассивных элементов цепей. Электромеханические и электронные омметры.

#### **Тема 4.4. Электронные аналоговые приборы.**

Классификация и обозначения электронных приборов. Устройство, принцип действия, характеристики вольтметров постоянного и переменного тока, комбинированных (структурные схемы, преобразователи амплитудного, среднего, действующего значения). Электронно-лучевые осциллографы (структурная схема, принцип действия, характеристики).

#### **Тема 4.5. Цифровые измерительные приборы (ЦИП).**

Обобщенная структурная схема ЦИП. Дискретизация и квантование измеряемой величины. Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) последовательного счета, последовательного приближения, считывания. Аналоговые измерительные цепи ЦИП. Примеры ЦИП (структурные схемы, характеристики). Устройство и принцип действия цифровых осциллографов.

#### **Тема 4.6. Регистрирующие измерительные приборы.**

Самопишущие приборы прямого действия; быстродействующие регистрирующие приборы; светолучевые осциллографы (устройство, принцип действия, характеристики). Цифровые регистраторы переходных процессов.

#### **Тема 4.7. Измерительные трансформаторы тока и напряжения.**

##### **Шунты. Делители напряжения.**

Устройство, принцип действия, характеристики измерительных трансформаторов тока и напряжения. Подключение измерительных приборов к измерительным трансформаторам. Применение шунтов и делителей напряжения.

#### **Тема 4.8. Измерения напряжения и силы тока, активной и реактивной мощности и энергии в однофазных и трехфазных цепях переменного тока.**

Применение амперметров, вольтметров. Косвенные измерения. Измерения несинусоидальных токов и напряжений. Анализ формы электрических сигналов (анализаторы гармоник, анализаторы спектра).

Применение электродинамических и ферродинамических ваттметров. Косвенные измерения. Измерения в трехфазных цепях (методы одного, двух, трех приборов; схемы с девяностоградусным сдвигом при измерении реактивной

мощности и энергии). Трехфазные приборы. Электронные счетчики электрической энергии.

#### **Тема 4.9. Измерения временных параметров, сдвига фаз и коэффициента мощности.**

Устройство, принцип действия, характеристики электромеханических частотомеров (вибрационного, электромагнитного, электродинамического), электронных (аналогового, цифрового). Цифровой измеритель временных интервалов. Осциллографические методы измерения частоты и временных интервалов.

Устройство, принцип действия, характеристики электромеханических фазометров (однофазного и трехфазного), электронных фазометров (аналогового, цифрового). Осциллографические методы.

#### **Тема 4.10. Измерения магнитных величин.**

Измерительные преобразователи и приборы для измерений магнитных величин (измерительные катушки, баллистические гальванометры, веберметры, тесламетры с преобразователем Холла).

Характеристики магнитных материалов и образцы для испытаний. Определение статических характеристик (индукционно-импульсный метод) и динамических характеристик (индукционный и осциллографический методы, ваттметровый метод измерения потерь).

#### **Тема 4.11. Методы и средства измерений неэлектрических величин.**

Классификация, характеристики, принцип действия измерительных преобразователей, датчики, структурные схемы приборов для измерений неэлектрических величин. Измерения температуры, давления, расхода жидких и газообразных сред.

#### **Тема 4.12. Автоматизация измерений.**

Классификация ИИС. ИИС как составная часть автоматизированных систем управления (АСУ). Информационно-измерительные комплексы как разновидность ИИС. ИИС для учета электрической энергии, количеств теплоты и измеряемых сред. Состав комплекса технических средств. Алгоритмы обработки измерительной информации. Характеристики ИИС.

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**  
**Очная (дневная) форма получения высшего образования**

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов				Формы контроля занятий
		лекции	практические занятия	лабораторные занятия	управляемая самостоятельная	
1	2	3	4	5	6	7
	<b>Семестр 4</b>					
<b>1.</b>	<b>Полупроводниковые приборы</b>					
1.1	Полупроводниковые диоды	4				
	Практическое занятие №1 Полупроводниковые диоды		2			
1.2	Тиристоры	2				
	Практическое занятие №2 Стабилитроны		2			
	Лабораторное занятие №1 Исследование полупроводниковых диодов и тиристоров			2		Отчет по лабораторной работе
1.3	Биполярные транзисторы	4				
	Практическое занятие №3 Биполярные транзисторы. Определение параметров		2			
1.4	Полевые транзисторы	2				
	Практическое занятие №4 Полевые транзисторы. Маркировка полупроводниковых приборов		2			
	Лабораторное занятие №2 Исследование биполярного и полевого транзисторов			2		Отчет по лабораторной работе
1.5	Элементы электроники	2				
	Лабораторное занятие №3 Фото- и оптоэлектронные приборы			2		Отчет по лабораторной работе
<b>2.</b>	<b>Аналоговые устройства электроники</b>					
2.1	Выпрямители переменного тока	8				

	Практическое занятие №5 Расчет выпрямителей с фильтрами		2			
	Лабораторное занятие №4 Исследование однофазных выпрямителей с фильтрами			2		Отчет по лабораторной работе
	Лабораторное занятие №5 Управляемый выпрямитель			2		Отчет по лабораторной работе
	Лабораторное занятие №6 Исследование стабилизаторов постоянного напряжения и тока			2		Отчет по лабораторной работе
2.2	Усилители аналогового сигнала	8				
	Практическое занятие №6 Усилительные каскады на биполярных транзисторах		2			
	Практическое занятие №7 Моделирование электронных схем в программах симуляторов (EWB, Matlab)		2			
	Лабораторное занятие №7 Исследование каскада усиления			2		Отчет по лабораторной работе
2.3	Усилители постоянного тока	6				
	Практическое занятие №8 Операционные усилители		2			
	Практическое занятие №9 Расчет генераторных схем на базе операционного усилителя		2			
	Лабораторное занятие №8 Исследование операционного усилителя			2		Отчет по лабораторной работе
	Лабораторное занятие №9 Исследование операционного усилителя. Генераторные устройства			2		Отчет по лабораторной работе
	Итого за семестр	<b>36</b>	<b>18</b>	<b>18</b>		<b>зачет</b>
	<b>Семестр 5</b>					
<b>3.</b>	<b>Импульсные устройства электроники</b>					
3.1	Генераторы импульсного сигнала	2				
3.2	Логические функции и элементы	8				
	Практическое занятие №1 Логические операции, минимизация логических схем		2			
	Практическое занятие №2 Моделирование логической схемы в EWB (Matlab)		2			
	Лабораторное занятие №1 Логические функции и микросхемы			2		Отчет по лабораторной работе

3.3	Последовательностные логические устройства	10				
	Практическое занятие №3. Исследование триггеров в программах симуляторов (EWB, Matlab)		2			
	Практическое занятие №4 Счетчик импульсов с заданным модулем счета		2			
	Практическое занятие №5 Реализация регистров в EWB (Matlab)		2			
	Лабораторное занятие №2 Исследование триггерных схем			2		Отчет по лабораторной работе
	Лабораторное занятие №3 Исследование счетчиков импульсов			2		Отчет по лабораторной работе
	Лабораторное занятие №4 Исследование последовательных и параллельных регистров			2		Отчет по лабораторной работе
3.4	Комбинационные логические устройства	10				
	Практическое занятие №6 Комбинационные логические схемы		2			
	Практическое занятие №7 Реализация шифраторов, преобразователей кодов в среде EWB (Matlab).		2			
	Лабораторное занятие №5 Исследование комбинационных логических схем			2		Отчет по лабораторной работе
	Лабораторное занятие №6 Исследование АЦП и ЦАП			2		Отчет по лабораторной работе
3.5	Элементы микропроцессорных систем	6				
	Практическое занятие №8 Разработка схемы управления на триггерах и логических элементах		2			
	Практическое занятие №9 Мультиплексор. Демультимплексор. Арифметико-логическое устройство		2			
	Лабораторное занятие №7 Исследование полупроводниковых запоминающих устройств			2		Отчет по лабораторной работе
	Лабораторное занятие №8 Арифметико-логическое устройство			2		Отчет по лабораторной работе
	Лабораторное занятие №9 Исследование элементов промышленной электроники и автоматики			2		Отчет по лабораторной работе
	Итого за семестр	<b>36</b>	<b>18</b>	<b>18</b>		<b>экзамен</b>

	<b>Семестр 6</b>					
4	<b>Информационно-измерительная техника</b>					
4.1	Классификация измерений. Основные характеристики и классы точности средств измерений.	2				
4.2	Устройство и принцип действия электромеханических приборов	4				
	Практическое занятие №1 Использование характеристик средств измерений при обработке результатов измерений		2			
	Практическое занятие №2 Анализ уравнений измерительных механизмов электромеханических приборов		2			
	Лабораторное занятие №1 Исследование общих свойств электромеханических вольтметров			2		Отчет по лабораторной работе
4.3	Компенсаторы и мосты. Измерение параметров пассивных элементов электрических цепей.	2				
	Практическое занятие №3 анализ измерительных цепей электромеханических приборов		2			
	Практическое занятие №4 анализ мостов постоянного и переменного тока		2			
	Лабораторное занятие №2 исследование однофазного индукционного счетчика активной энергии			2		Отчет по лабораторной работе
4.4.	Электронные аналоговые приборы.	2				
	Лабораторное занятие №3 измерение сопротивлений			2		Отчет по лабораторной работе
4.5.	Цифровые измерительные приборы (ЦИП).	2				
4.6.	Регистрирующие измерительные приборы.	2				
4.7.	Измерительные трансформаторы тока и напряжения. Шунты. Делители напряжения.	4				
	Лабораторное занятие №4 применение электронно-лучевого осциллографа для измерения электрических величин			2		Отчет по лабораторной работе
	Практическое занятие №5 анализ схем измерения с использованием измерительных трансформаторов		2			
	Практическое занятие №6 анализ свойств приборов при измерении несинусоидальных величин		2			

4.8.	Измерения напряжения и силы тока, активной и реактивной мощности и энергии в однофазных и трехфазных цепях переменного тока.	2				
	Лабораторное занятие №5 измерение активной мощности и энергии в трехфазных цепях			2		Отчет по лабораторной работе
4.9.	Измерения временных параметров, сдвига фаз и коэффициента мощности.	2				
	Практическое занятие №7 анализ схем измерения активной и реактивной мощности и энергии		2			
	Лабораторное занятие №6 измерение частоты и интервалов времени			2		Отчет по лабораторной работе
4.10	Измерения магнитных величин.	2				
4.11	Методы и средства измерений неэлектрических величин.	2				
	Лабораторное занятие №7 индукционный метод исследования образцов ферромагнитных материалов			2		Отчет по лабораторной работе
4.12	Автоматизация измерений.	2				
	Итого за семестр	<b>28</b>	<b>14</b>	<b>14</b>		<b>зачет</b>

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**  
**Заочная форма получения высшего образования**  
**Профилизации: «Электрические установки, электростанций и подстанций»;**  
**«ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ».**

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов					Формы контроля занятий
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия	Управляемая самостоятел		
1	2	3	4	5	6	7	
	<b>Семестр 4</b>						
<b>1.</b>	<b>Полупроводниковые приборы</b>						
1.1	Полупроводниковые диоды, тиристоры	2					
	Лабораторное занятие №1 Исследование полупроводниковых диодов и тиристоров			2		Отчет по лабораторной работе	
1.3	Биполярные транзисторы, полевые	2					
	Лабораторное занятие №2 Исследование биполярного и полевого транзисторов			2		Отчет по лабораторной работе	
<b>2.</b>	<b>Аналоговые устройства электроники</b>						
2.1	Выпрямители переменного тока	2					
	Практическое занятие №5 Расчет выпрямителей с фильтрами		2				
	Лабораторное занятие №4 Исследование однофазных выпрямителей с фильтрами			2		Отчет по лабораторной работе	

	Лабораторное занятие №8 Исследование операционного усилителя			2		Отчет по лабораторной работе
	Итого за семестр	<b>6</b>	<b>2</b>	<b>8</b>		<b>Зачет</b>
	<b>Семестр 5</b>					
<b>3.</b>	<b>Импульсные устройства электроники</b>					
3.2	Логические функции и элементы	2				
	Лабораторное занятие №1 Логические функции и микросхемы			2		Отчет по лабораторной работе
3.3	Последовательностные логические устройства	2				
	Лабораторное занятие №2 Исследование триггерных схем			2		Отчет по лабораторной работе
3.4	Комбинационные логические устройства	2				
	Итого за семестр	<b>6</b>		<b>4</b>		<b>Экзамен</b>
	<b>Семестр 6</b>					
<b>4</b>	<b>Информационно-измерительная техника</b>					
4.1	Классификация измерений. Основные характеристики и классы точности средств измерений.	<b>2</b>				
	Лабораторное занятие №2 Исследование однофазного индукционного счетчика активной энергии			<b>2</b>		Отчет по лабораторной работе
4.4.	Электронные аналоговые приборы.	<b>2</b>				
	Лабораторное занятие №3 Измерение сопротивлений			<b>2</b>		Отчет по лабораторной работе

4.8.	Измерения напряжения и силы тока, активной и реактивной мощности и энергии в однофазных и трехфазных цепях переменного тока.	2				
	<b>Итого за семестр</b>	<b>6</b>		<b>4</b>		<b>Зачет</b>

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**  
**Заочная интегрированная форма получения высшего образования на основе**  
**среднеспециального образования**  
**Профилизация «Электроснабжение»**

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов				Формы контроля занятий
		лекции	практические занятия	лабораторные занятия	управляемая самостоятельная работа студента	
1	2	3	4	5	6	9
	<b>Семестр 5</b>					
<b>1.</b>	<b>Полупроводниковые приборы</b>					
1.1	Полупроводниковые диоды, тиристоры	2				
<b>2.</b>	<b>Аналоговые устройства электроники</b>					
2.1	Выпрямители переменного тока	2				
	Практическое занятие №5 Расчет выпрямителей с фильтрами		2			
	Лабораторное занятие №4 Исследование однофазных выпрямителей с фильтрами			2		Отчет по лабораторной работе
<b>3.</b>	<b>Импульсные устройства электроники</b>					
3.2	Логические функции и элементы, функции.	2				
	Практическое занятие №6 Комбинационные логические схемы		2			
	Лабораторное занятие №1 Логические функции и микросхемы			2		Отчет по лабораторной работе
	<b>Итого за семестр</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>4</b>		<b>экзамен</b>
	<b>Семестр 6</b>					
4	<b>Информационно-измерительная техника</b>					
4.1	Классификация измерений. Основные характеристики и классы точности средств измерений.	2				

	Практическое занятие №1 Использование характеристик средств измерений при обработке результатов измерений		2			
	Лабораторное занятие №2 Исследование однофазного индукционного счетчика активной энергии			2		Отчет по лабораторной работе
4.4.	Электронные аналоговые приборы.	2				
	Лабораторное занятие №3 Измерение сопротивлений			2		Отчет по лабораторной работе
4.8.	Измерения напряжения и силы тока, активной и реактивной мощности и энергии в однофазных и трехфазных цепях переменного тока.	2				
	Практическое занятие №7 Анализ схем измерения активной и реактивной мощности и энергии		2			
	<b>Итого за семестр</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>4</b>		<b>зачет</b>

## Список литературы

### Основная литература

1. Щука, А.А. Электроника: учебник для академического бакалавриата : для студентов высших учебных заведений, обучающихся по инженерно-техническим направлениям и специальностям / А.А. Щука; под ред. А.С. Сигова. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Юрайт, 2018. – Ч.2 : Микроэлектроника. – 324 с.
2. Щука, А.А. Электроника: учебник для академического бакалавриата : для студентов высших учебных заведений, обучающихся по инженерно-техническим направлениям и специальностям / А.А. Щука; под ред. А.С. Сигова. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Юрайт, 2018. – Ч.3 : Квантовая и оптическая электроника. – 116 с.
3. Щука, А.А. Электроника: учебник для академического бакалавриата : для студентов высших учебных заведений, обучающихся по инженерно-техническим направлениям и специальностям / А.А. Щука; под ред. А.С. Сигов. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Юрайт, 2018. – Ч.4 : Функциональная электроника. – 182 с.
4. Новожилов, О.П. Электроника и схемотехника: учебник для академического бакалавриата : для студентов высших учебных заведений, обучающихся по инженерно-техническим направлениям и специальностям : [в 2 ч.] / О.П. Новожилов. – Москва: Юрайт, 2018.
5. Электронный учебно-методический комплекс по учебной дисциплине "Основы электроники" [Электронный ресурс]: для специальности 1-53 01 04 "Автоматизация и управление теплоэнергетическими процессами" / Белорусский национальный технический университет, Энергетический факультет, Кафедра "Электротехника и электроника"; [сост.: Ю. В. Бладыко, И. П. Матвеенко, Т. Е. Жуковская]. – Электрон. дан. – Минск: БНТУ, 2020. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Режим доступа: <https://rep.bntu.by/handle/data/82372>

### Дополнительная литература

1. Опадчий, Ю.Ф. Аналоговая и цифровая электроника (Полный курс): учебник для вузов / Ю.Ф. Опадчий, О.П. Глудкин, А.И. Гуров. – М.: Горячая линия - Телеком, 2005. – 768 с.
2. Забродин, Ю.С. Промышленная электроника: учебник для вузов / Ю.С. Забродин. – М.: ООО ИД «Альянс», 2008. – 496 с.
3. Электроника: лабораторные работы (практикум) для студентов электротехнических специальностей / сост.: Ю.В. Бладыко [и др.]; под общ. ред. Ю.В. Бладыко. – Минск: БНТУ, 2008. – Ч. 1. – 100 с.
4. Электроника: лабораторные работы (практикум) для студентов электротехнических специальностей / сост.: Ю.В. Бладыко [и др.]; под общ. ред. Ю.В. Бладыко. – Минск: БНТУ, 2009. – Ч. 2. – 96 с.

5. Бладыко, Ю.В. Электроника: метод. пособие к выполнению расчетно-графической работы / Ю.В. Бладыко, Г.С. Климович, Л.С. Пекарчик; под общ. ред. Ю.В. Бладыко. – Мн.: БНТУ, 2005. – 71 с.
6. Гусев, В.Г. Электроника и микропроцессорная техника / В.Г. Гусев, Ю.М. Гусев. – Москва: : КноРус, 2013. – 798 с.

## СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

**Валентная связь** - взаимное притяжение атомов, приводящее к образованию молекул и кристаллов. Принято говорить, что в молекуле или в кристалле между соседними атомами существуют химическая связь. Валентность атома показывает число связей, образуемых данным атомом с соседними атомами.

**Акцепторные примеси** - атомы химических элементов, внедренные в кристаллическую решетку полупроводника и создающие дополнительную концентрацию дырок. Акцепторными примесями являются химические элементы, внедренные в полупроводник с большей, чем у примеси, валентностью.

**Донорные примеси** - атомы химических элементов: - внедренные в кристаллическую решетку полупроводника; и - создающие дополнительную концентрацию свободных электронов. Донорными примесями являются химические элементы, внедренные в полупроводник с меньшей, чем у примеси, валентностью.

**Диффузия** - явление самопроизвольного проникновения одного вещества в другое вещество, обусловленное тепловым движением атомов, молекул, ионов и других частиц. Скорость протекания процесса диффузии зависит от рода диффундирующих веществ и температуры

**Объемный заряд** - атом примеси, потерявший один электрон, превращается в неподвижный положительный ион, связанный в узле кристаллической решетки, т.е. происходит ионизация атомов примеси. Положительный заряд иона примеси компенсируется отрицательным зарядом свободного электрона, и слой полупроводника с примесью остается электрически нейтральным, если свободный электрон не уходит из этого слоя. В случае ухода электрона в другие слои полупроводникового кристалла неподвижные заряды ионов примеси образуют нескомпенсированный положительный объемный заряд.

**Катод** – один из электродов электровакуумного или полупроводникового приборов, соединенный с отрицательным полюсом источника электрического тока.

**Анод** – один из электродов электровакуумного или полупроводникового

приборов, соединенный с положительным полюсом источника электрического тока.

**Инжекционная электролюминесценция** - возникает при прямом включении  $p$  -  $n$  - перехода. В  $n$ -область инжектируются избыточные дырки, а в  $p$  - область — электроны, т. е. часть носителей проникает в переход и прилегающие к нему области и рекомбинирует с носителями заряда противоположного знака, испуская при этом кванты света. Рекомбинация может происходить также с участием уровней примеси. При рекомбинации электронов и дырок в этом слое возникает свечение. Цвет свечения при инжекционной электролюминесценции зависит от материала-основы и природы примесей.

**Внутренний фотоэффект** в кристаллических полупроводниках и некоторых диэлектриках состоит в том, что под действием света электропроводимость этих веществ увеличивается за счет возрастания в них числа свободных носителей тока - электронов проводимости, то есть происходит переход электрона из одной энергетической зоны (валентной) в другую (проводимости)

**Внешний фотоэффект** – испускание электронов из одной среды в другую под воздействием квантов электромагнитного излучения (фотонов).

**Динактронный эффект** – изменение тока в электровакуумных приборах, обусловленное возникновением вторичной электронной эмиссии с поверхности электродов под воздействием электронной бомбардировки.

**Дрейф носителей заряда** – движение электронов и дырок под воздействием электрического поля.

**Инжекция электронов** – введение (вбрасывание) избыточных электронов в полупроводник под воздействием электрического поля.

**Эмиттер** – (лат. *emittere* испускать, излучать)1) излучатель;2) электрод, который является источником электронов при воздействии внешних причин (нагревание, электрическое поле и т. д.).

**Коллектор** – (от позднелат. *collector* собиратель), электрод биполярного транзистора, принимающий носители заряда

**Эмиттерный переход** –  $p$ - $n$  переход в транзисторе между эмиттером и базой.

**Коллекторный переход** –  $p-n$  переход в транзисторе между базой и коллектором.

**Каскад** – схема одноступенчатого усилителя, построенная на одном усилительном элементе (лампа, биполярный или полевой транзистор).

**ОЭ, ОК, ОБ** – включение биполярного транзистора по схеме с общим эмиттером, общим коллектором, общей базой.

**ОИ, ОС, ОЗ** – включение полевого транзистора по схеме с общим истоком, общим стоком, общим затвором.

**ОК, ОА, ОС** – включение лампы по схеме с общим катодом, общим анодом, общей сеткой.