

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ОРЕНБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ  
ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ**

**Б1.Б.11 Электротехника, электроника и схемотехника**

**Направление подготовки (специальность) 09.03.01 Информатика и вычислительная техника  
Профиль образовательной программы “Автоматизированные системы обработки  
информации и управления”  
Форма обучения заочная**

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>1. Конспект лекций .....</b>	<b>3</b>
<b>1.1 Лекция № 1 Электрические цепи постоянного тока. Законы Кирхгофа .....</b>	<b>3</b>
<b>1.2 Лекция № 2 Синусоидальный переменный электрический ток.....</b>	<b>17</b>
<b>1.3 Лекция № 3 Трансформаторы. ....</b>	<b>27</b>
<b>1.4 Лекция № 4 Элементная база современных электронных устройств.....</b>	<b>32</b>
<b>2. Методические материалы по выполнению лабораторных работ .....</b>	<b>53</b>
<b>2.1 Лабораторная работа № ЛР-1 Электрические цепи постоянного тока. Законы Кирхгофа .....</b>	<b>53</b>
<b>2.2 Лабораторная работа № ЛР-2 Элементы в цепях однофазного переменного тока.....</b>	<b>92</b>
<b>2.3 Лабораторная работа № ЛР-3 Расчет цепей переменного тока. Резонанс напряжений и токов .....</b>	<b>57</b>
<b>2.4 Лабораторная работа № ЛР-4 Соединение трехфазных цепей звездой и треугольником .....</b>	<b>59</b>
<b>2.5 Лабораторная работа № ЛР-5 Трансформаторы .....</b>	<b>60</b>
<b>2.6 Лабораторная работа № ЛР-6 Элементная база современных электронных устройств.....</b>	<b>62</b>
<b>2.7 Лабораторная работа № ЛР-7 Источники вторичного электропитания .....</b>	<b>65</b>
<b>2.8 Лабораторная работа № ЛР-8 Усилители электрических сигналов .....</b>	<b>71</b>
<b>2.9 Лабораторная работа № ЛР-9, 10 Цифровая схемотехника. Типовые комбинационные и последовательностные устройства.....</b>	<b>77</b>

# 1. КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

## 1.1 Лекция № 1 (2 часа).

**Тема: «Электрические цепи постоянного тока. Законы Кирхгофа»**

### 1.1.1 Вопросы лекции:

1. Основные определения и топологические параметры электрических цепей.
2. Закон Ома. Законы Кирхгофа.
3. Расчет простых цепей при последовательном, параллельном и смешанном включении элементов.
4. Анализ линейных электрических цепей постоянного тока. Метод контурных токов. Метод узловых потенциалов.

5. Мощность цепи постоянного тока. Баланс мощностей

6. Расчет нелинейных цепей постоянного тока

### 1.1.2 Краткое содержание вопросов:

#### 1. Основные определения и топологические параметры электрических цепей.

Электротехника – наука о практическом применении электрических и магнитных явлений. История становления электротехники как науки берет начало с момента открытия некоторых электрических и магнитных явлений. Древнегреческие ремесленники при обработке янтаря (электрон) наблюдали явления магнетизма и искрения, и назвали данные явления электрическими.

Среди всего многообразия существующих в природе форм энергии (химическая, механическая, тепловая, световая), электрическая энергия является наиболее распространенным видом, так как обладает некоторыми преимуществами:

- легко, в общих количествах и малыми потерями передается на большие расстояния;
- легко преобразуется в другие виды энергии;
- удобно распределяется между потребителями различными по мощности и характеру потребления.

Электрическая цепь

Любую реальную электрическую установку можно заменить математической моделью – электрической цепью, которая представляет собой совокупность устройств и объектов, образующих путь для электрического тока, электромагнитные процессы, в которых могут быть описаны с помощью понятий об электрическом токе, электродвигущей силе и электрическом напряжении.

Электрический ток

Электрическим током проводимости называется явление направленного движения свободных носителей электрического заряда в веществе или в пустоте, количественно характеризуемое скалярной величиной, равной производной по времени от электрического заряда, переносимого свободными носителями заряда сквозь рассматриваемую поверхность:

$$i = \frac{dq}{dt}, [A]$$

Под свободными носителями заряда понимают: в проводниках первого рода (металлах) – свободные электроны, а в проводниках второго рода (расплавленные соли, растворы кислот, щелочей) – ионы.

Электрический ток неизменный по направлению и величине называется постоянным.

Единицей измерения электрического тока проводимости является Ампер. Электрический ток измеряется прибором, который называется амперметр. Амперметр включается последовательно в электрическую цепь, и должен обладать минимальным сопротивлением, чтобы не оказывать влияние на режим работы цепи.

Одной из основных величин при расчете сечения проводов электрических линий, обмоток машин и аппаратов является плотность тока: величина тока, приходящаяся на единицу площади поперечного сечения проводника:

$$\delta = \frac{I}{S}, \left[ \frac{A}{cm^2} \right]$$

Электродвижущая сила

Рассмотрим такой пример, как замкнутая система водоснабжения. Вода течет по трубе благодаря разности уровней, создаваемых насосом.

Аналогично, в замкнутой электрической системе заряды движутся от точек с более высоким потенциалом к точкам с более низким потенциалом.

Разность электрических уровней, т.е. разность потенциалов на зажимах электрической системы поддерживает электродвижущая сила (ЭДС). Это скалярная величина, характеризующая способность стороннего и индуцированного полей вызывать электрический ток. ЭДС определяется как отношение работы, совершаемой сторонними силами при переносе заряженной частицы внутри источника к ее заряду.

$$E = \frac{A}{q}, [B]$$

Электрическое напряжение и электрический потенциал

При перемещении заряда  $q_0$  в электрическом поле вдоль некоторого пути  $l$ , действующие на него силы совершают работу.

Отношение работы к величине заряда  $q_0$  характеризует свойства поля вдоль данного пути и называется электрическим напряжением:

$$U_{ab} = \frac{A}{q_0} = \int_a^b E_n dl, [\text{В}]$$

Электрическое напряжение представляет собой физическую величину, характеризующую электрическое поле вдоль рассматриваемого пути.

Говоря об электрическом напряжении вдоль некоторого участка пути, часто употребляют термин **падение электрического напряжения** вдоль этого пути.

Любая точка ЭП может быть охарактеризована также работой, которую необходимо затратить против сил поля для переноса заряда в эту точку из точки, где поле практически отсутствует. Эта работа будет равна потенциальной энергии, которую получит заряд, перенесенный в данную точку поля. Величина потенциальной энергии зависит только от положения точки и не зависит от пути перемещения заряда. Таким образом, любую точку ЭП можно охарактеризовать скалярной величиной, называемой электрическим потенциалом.

$$\varphi_b = \int_0^b E dl, [\text{В}].$$

В механической системе высоту можно отсчитать по отношению к уровню моря. В электротехнике нулевым потенциалом принято считать потенциал Земли, так как земной шар является громадным проводником.

Однако, в большинстве случаев практическое значение имеет не потенциал какой-либо точки, а разность потенциалов, которая не зависит от выбора нуля.

Разность электрических потенциалов двух точек ЭП численно равна работе поля при перемещении заряда из одной точки в другую.

$$\varphi_a - \varphi_b = \int_0^a E dl - \int_0^b E dl = \int_a^b E dl = U_{ab}$$

### Измерение ЭДС и напряжения

Единицей измерения ЭДС и электрического напряжения является вольт, а прибор, измеряющий эти величины – вольтметр. Вольтметр включается параллельно в электрическую цепь, и должен обладать очень большим сопротивлением, чтобы он не влиял на режим работы

цепи. Величина ЭДС измеряется в режиме холостого хода, при разомкнутой электрической цепи, напряжение на любом участке в рабочем режиме.

### Элементы схемы замещения

Графическое изображение электрической цепи, содержащее условные обозначения ее элементов и показывающее соединения этих элементов называется схемой замещения.

Все элементы схемы замещения делятся на активные (источники ЭЭ) и пассивные (потребители ЭЭ).

#### Источник ЭДС

На рисунке представлено условное графическое изображение источника ЭДС. Основными параметрами источника ЭДС являются: величина ЭДС  $E$ ; внутреннее сопротивление  $r_0$  вольтамперная характеристика  $U = f(I)$ .

Ток, ЭДС, внутреннее сопротивление и напряжение на зажимах источника, связаны обобщенным законом Ома:

$$I = \frac{\pm E \pm U}{r_0}$$

Выразим напряжение

$$U = E - I \cdot r_0$$

Проанализируем зависимость напряжения от тока. При токе равном нулю, напряжение имеет максимальное значение и равно величине ЭДС, при увеличении тока – напряжение уменьшается. Так как выражение является уравнением прямой линии, то и ВАХ линейна. Жестокость ВАХ (наклон линии) зависит от величины внутреннего сопротивления. Если величина сопротивления внешней нагрузки много больше внутреннего сопротивления источника, то им можно пренебречь, когда напряжение не зависит от величины тока. Такой источник называется идеализированным.

Графическое изображение электрической цепи, содержащее условные обозначения ее элементов и показывающее соединения этих элементов называется схемой замещения.

Все элементы схемы замещения делятся на активные (источники ЭЭ) и пассивные (потребители ЭЭ).

### Элементы схемы замещения

На рисунке представлено условное графическое изображение источника ЭДС. Основными параметрами источника ЭДС являются: величина ЭДС  $E$ ; внутреннее сопротивление  $r_0$  и вольтамперная характеристика  $U = f(I)$ .

Ток, ЭДС, внутреннее сопротивление и напряжение на зажимах источника, связаны обобщенным законом Ома:

$$I = \frac{\pm E \pm U}{r_0}$$

Выразим напряжение

$$U = E - I \cdot r_0$$

Проанализируем зависимость напряжения от тока. При токе равном нулю, напряжение имеет максимальное значение и равно величине ЭДС, при увеличении тока – напряжение уменьшается. Так как выражение является уравнением прямой линии, то и ВАХ линейна. Жесткость ВАХ (наклон линии) зависит от величины внутреннего сопротивления. Если величина сопротивления внешней нагрузки много больше внутреннего сопротивления источника, то им можно пренебречь, тогда напряжение не зависит от величины тока. Такой источник называется идеализированным.

### Резистивный элемент

Резистор – элемент ЭЦ, предназначенный для использования его электрического сопротивления.

На резистивном элементе происходит необратимое преобразование ЭЭ в энергию какого-либо другого вида.

Основными параметрами РЭ являются: электрическое сопротивление, электрическая проводимость и ВАХ.

Электрическое сопротивление - скалярная величина, равная отношению постоянного электрического напряжения между выводами пассивного двухполюсника к постоянному току.

Ток пассивного двухполюсника, напряжение на его зажимах, сопротивление и проводимость связаны законом Ома.

Проанализировав закон Ома видно, что при токе равном нулю, напряжение также равно нулю, и ВАХ проходит через начало координат. При увеличении тока напряжение тоже увеличивается.

Сопротивление характеризует способность материала проводника сопротивляться проведению электрического тока. Оно зависит от удельного сопротивления материала проводника, длины проводника и площади поперечного сечения.

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}$$

Температура проводника также влияет на его сопротивление, увеличение температуры металлических проводников, приводит к увеличению сопротивления.

Измеряют сопротивление с помощью прибора, который называется – омметр. Однако, чаще всего, используя опыт вольтметра-амперметра, сопротивление рассчитывают по закону Ома.

**Катушка индуктивности** – элемент электрической цепи, предназначенный для использования его магнитного поля.

Основные параметры: индуктивность, вебер-амперная характеристика. Ток катушки, напряжение на его зажимах и индуктивность связаны законом Ома в дифференциальной форме записи.

$$u_L = L \cdot \frac{di}{dt}.$$

Ток, проходящий через катушку индуктивности, вызывает появление магнитного поля. Изменение тока приводит к изменению магнитного потока и наведению так называемой, ЭДС самоиндукции, стремящейся препятствовать изменению тока. Таким образом, катушка работает как элемент только в цепи переменного тока, в цепи постоянного тока катушка является просто проводником.

Индуктивность, параметр, характеризующий способность катушки индуктировать ЭДС.

**Емкостный элемент** – элемент электрической цепи, предназначенный для использования его электрической емкости.

Основные параметры: электрическая емкость, кулон-вольтная характеристика.

$$i_C = C \cdot \frac{du}{dt}.$$

Способность элемента накапливать электрические заряды с одновременным повышением потенциала до определенного уровня называется электрической емкостью.

Рассмотрим принцип действия емкостного элемента на примере плоского конденсатора. Он состоит из двух пластин и диэлектрика. Пластины изготавливают из твердого материала или металлической фольги. В качестве диэлектрика используют парафиновую бумагу, слюду, керамику или просто воздух.

Если зарядить одну пластину положительно, а другую - отрицательно, то разноименные заряды, притягиваясь друг к другу, будут удерживаться на пластинах – накапливаться.

## 2. Закон Ома. Законы Кирхгофа.

### Закон Ома для пассивной ветви

Ветвью называется участок ЭЦ вдоль которого течет ток одного значения.

Ветвь может быть пассивной, содержащей только потребители энергии и активной, содержащей один или несколько источников энергии.

Пример пассивной ветви с одним элементом мы рассматривали, когда говорили о резистивном элементе.

$$U = R \cdot I$$

Напряжение на зажимах ветви прямо пропорционально току ветви, где коэффициент пропорциональности называется электрическим сопротивлением.

Однако, ветвь может содержать несколько пассивных элементов. Такое соединение называется последовательным. Напряжение между выводами a и b представляет собой сумму напряжений на отдельных элементах ветви:

$$U_{ab} = U_1 + U_2 + \dots + U_n$$

Используя закон Ома, преобразуем данное выражение: подставим произведение тока на сопротивление соответствующего элемента.

$$\begin{aligned} U_{ab} &= I \cdot R_1 + I \cdot R_2 + \dots + I \cdot R_n = \\ &= I \cdot (R_1 + R_2 + \dots + R_n) = I \cdot R_{\text{экв}} \end{aligned}$$

Так как ток одного значения, вынесем его за знак скобки, тогда в скобках останется сумма сопротивление. Таким образом, мы можем заменить последовательное соединение нескольких элементов одним элементом с сопротивлением, которое называется эквивалентным.

$$R_{\text{экв}} = \sum_{k=1}^n R_k .$$

### Закон Ома для активной ветви

Рассмотрим пример активной ветви, содержащей несколько источников ЭДС. Обобщенный закон Ома для данного участка цепи запишется следующим образом:

$$I = \frac{(E_1 + E_2 - E_3) + U}{R} .$$

В скобках алгебраическая сумма ЭДС источников представляет собой ЭДС эквивалентного источника. Таким образом, исходная схема может быть представлена эквивалентной схемой. При последовательном соединении источников ЭДС, ЭДС эквивалентного источника определяется как алгебраическая сумма.

$$E_{\text{экв}} = \sum_{k=1}^n \pm E_k .$$

## Законы Кирхгофа

### Первый закон Кирхгофа

Первый закон Кирхгофа применим для узла. Узлом ЭЦ называют место соединения ветвей ЭЦ, как минимум трех. Формулируется следующим образом: алгебраическая сумма

токов узла равна нулю. Токи, направленные к узлу (входящие в узел), в алгебраической сумме учитываются с одним знаком, направленные от узла (выходящие) - с противоположным. Существует еще одна формулировка: сумма входящих в узел токов равна сумме выходящих токов.

Используя первый закон Кирхгофа можно вывести формулу эквивалентного преобразования параллельного соединения элементов схемы замещения. Параллельное соединение характеризуется общим напряжением, т.е. все ветви, включенные между одной и той же парой узлов, находятся под общим напряжением.

Ток в цепи до разветвления, согласно первому закону Кирхгофа, равен сумме токов ветвей, соединенных параллельно:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n.$$

Представим токи ветвей как отношение напряжения к сопротивлению соответствующего участка:

$$\begin{aligned} I &= \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \dots + \frac{U}{R_n} = \\ U \cdot \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \right) &= U \cdot G_{\text{экв}} \end{aligned}$$

В общем случае эквивалентное сопротивление при параллельном соединении элементов определяется как величина, обратная эквивалентной проводимости.

### **3. Расчет простых цепей при последовательном, параллельном и смешанном включении элементов.**

#### **Эквивалентные преобразования (параллельное соединение)**

Если элемента только два, то эквивалентное сопротивление определяется по формуле:

$$R_{\text{экв}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Если сопротивления всех элементов, включенных параллельно, равны  $R_1 = R_2 = \dots = R_n$ , то в этом случае эквивалентное сопротивление определяется:

$$R_{\text{экв}} = \frac{R}{n}.$$

Обе формулы получены в результате преобразования формулы определения эквивалентной проводимости.

При параллельном соединении ветвей с активными элементами, кроме сопротивления эквивалентного пассивного элемента, необходимо определить величину ЭДС эквивалентного источника. Она определяется по формуле:

$$E_{\text{экв}} = \frac{\mp \frac{E_1}{R_1} \pm \frac{E_2}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}},$$

### Эквивалентные преобразования (звезда-треугольник)

Трехлучевая звезда. Такое соединение, при котором по одному из выводов объединены в общий узел, а другие выводы соединены с другими участками схемы. Такое соединение можно преобразовать только в эквивалентный треугольник сопротивлений. При этом сопротивления сторон треугольника не равны сопротивлениям лучей звезды, и определяются по следующим формулам:

$$R_{12} = R_1 + R_2 + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_3}; \quad R_{13} = R_1 + R_3 + \frac{R_1 \cdot R_3}{R_2}; \quad R_{23} = R_2 + R_3 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1}.$$

И если звезду можно преобразовать только в треугольник, следовательно, треугольник можно преобразовать только в трехлучевую звезду.

$$R_1 = \frac{R_{12} \cdot R_{13}}{R_{12} + R_{13} + R_{23}}; \quad R_2 = \frac{R_{12} \cdot R_{23}}{R_{12} + R_{13} + R_{23}}; \quad R_3 = \frac{R_{13} \cdot R_{23}}{R_{12} + R_{13} + R_{23}}.$$

### Второй закон Кирхгофа

Второй закон Кирхгофа применим для контура ЭЦ. Последовательность ветвей ЭЦ, образующая замкнутый путь, в котором один из узлов одновременно является началом и концом пути, а остальные встречаются только один раз.

Формулировка второго закона Кирхгофа следующая: алгебраическая сумма напряжений на участках замкнутого контура равна нулю:

$$\sum_{k=1}^n U_n = 0.$$

Рассмотрим пример контура, состоящего из четырех ветвей. Токи в пассивных ветвях направим произвольно, токи в активных ветвях направим по направлению действия ЭДС. Также направим напряжения на участках ветвей. Для учета знака в алгебраической сумме необходимо указать направление обхода контура. Если направление напряжения совпадает с направлением обхода контура, то в алгебраическую сумму оно входит со знаком плюс.

$$-U_{ba} + U_{bc} - U_{dc} + U_{da} = 0.$$

Напряжения на сложных участках представим как сумму напряжений на каждом отдельном элементе, учитывая также, что напряжения на резистивных элементах равно произведению сопротивления на ток соответствующего участка, а напряжения на идеальных источниках равных величине ЭДС данного источника. Тогда уравнение запишется:

$$-I_1 \cdot R_1 + E_1 + I_3 \cdot R_3 + I_2 \cdot R_2 - E_2 + I_4 \cdot R_4 = 0$$

Сгруппируем уравнение, т.е. перенесем известные члены уравнения в правую часть. Получаем уравнение, по которому второй закон Кирхгофа можно сформулировать следующим образом: алгебраическая сумма падений напряжений на пассивных элементах замкнутого контура равна алгебраической сумме ЭДС источников, действующих в данном контуре. В алгебраическую сумму со знаком «+» водят произведения, если направление тока и НОК совпадают, аналогично учитывается знак в алгебраической сумме ЭДС.

### Показания вольтметра

Как мы уже говорили, вольтметр показывает значение напряжения на каком-либо участке ЭЦ. Чтобы расчетным путем определить показания вольтметра, можно воспользоваться законом Ома, если вольтметр включен на зажимы пассивного элемента. Обобщенным законом Ома, если вольтметр включен на зажимы активной ветви. Как рассчитать показание вольтметра, если он включен между точками различных ветвей. В этом случае можно воспользоваться законом Кирхгофа. Произвольно указываем направление напряжение, показываемое вольтметром. Затем записываем уравнение по второму закону Кирхгофа, откуда выражаем напряжение.

### Потенциальная диаграмма

Под потенциальной диаграммой понимают график распределения потенциала вдоль какого-либо участка цепи или контура. Если в рассматриваемом контуре принять потенциал одного из узла (произвольно) равным нулю, то используя законы Ома, возможно рассчитать потенциалы последующих узлов.

Примем потенциал одной из точек ЭЦПТ равным нулю  $\varphi_0 = 0$ . Тогда можем найти потенциалы остальных точек схемы при известных значениях тока  $I$ , ЭДС  $E_1, E_2, E_3$  и сопротивлений  $R_1, R_2, R_3$ :

$$U_{10} = \varphi_1 - \varphi_0 = E_1 \Rightarrow \varphi_1 = \varphi_0 + E_1;$$

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = I_1 \cdot R_1 \quad U_{23} = \varphi_2 - \varphi_3 = E_2 \quad U_{43} = \varphi_4 - \varphi_3 = I_2 \cdot R_2$$

$$\varphi_2 = \varphi_1 - I_1 \cdot R_1 \quad \varphi_3 = \varphi_2 - E_2 \quad \varphi_4 = \varphi_3 + I_2 \cdot R_2$$

$$U_{54} = \varphi_5 - \varphi_4 = E_3 \Rightarrow \varphi_5 = \varphi_4 + E_3$$

$$U_{50} = \varphi_5 - \varphi_0 = I_3 \cdot R_3 \Rightarrow \varphi_0 = \varphi_5 + I_3 \cdot R_3$$

#### 4. Анализ линейных электрических цепей постоянного тока Метод контурных токов. Метод узловых потенциалов

##### Метод узловых потенциалов

В основе метода - первый закон Кирхгофа.

Как связан закон относительно токов узла и потенциал данного узла. Рассмотрим такой пример: части электрической цепи, состоящей из трех ветвей. Запишем уравнение для узла.

$$-I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

$$I_1 = \frac{E_1 + U_{bc}}{R_1 + r_{01}} = \frac{E_1 + \varphi_b - \varphi_c}{R_1 + r_{01}} = E_1 \cdot G_1 + \varphi_b \cdot G_1 - \varphi_c \cdot G_1$$

$$I_2 = \frac{U_{cd}}{R_2} = \frac{\varphi_c - \varphi_d}{R_2} = \varphi_c \cdot G_2 - \varphi_d \cdot G_2,$$

$$I_3 = \frac{E_3 + U_{ca}}{R_3} = \frac{E_3 + \varphi_c - \varphi_a}{R_3} = E_3 \cdot G_3 + \varphi_c \cdot G_3 - \varphi_a \cdot G_3$$

Подставим полученные выражения токов в первое уравнение:

$$-E_1 \cdot G_1 - \varphi_b \cdot G_1 + \varphi_c \cdot G_1 + \varphi_c \cdot G_2 - \varphi_d \cdot G_2 + E_3 \cdot G_3 + \varphi_c \cdot G_3 - \varphi_a \cdot G_3 = 0,$$

Сгруппируем уравнение:

$$\varphi_c \cdot (G_1 + G_2 + G_3) - \varphi_b \cdot G_1 - \varphi_d \cdot G_2 - \varphi_a \cdot G_3 = E_1 \cdot G_1 - E_3 \cdot G_2$$

Применяется при расчете цепи, которая содержит параллельно соединенные ветви

Порядок расчета.

Примем потенциал узла  $d$  равным нулю. Для определения потенциалов остальных узлов запишем систему уравнений:

$$\varphi_a \cdot (G_6 + G_3 + G_5) - \varphi_b \cdot G_6 - \varphi_c \cdot G_3 = E_3 \cdot G_3,$$

$$-\varphi_a \cdot G_6 + \varphi_b \cdot (G_6 + G_1 + G_4) - \varphi_c \cdot G_1 = -E_1 \cdot G_1,$$

$$-\varphi_a \cdot G_3 - \varphi_b \cdot G_1 + \varphi_c \cdot (G_1 + G_2 + G_3) = E_1 \cdot G_1 - E_3 \cdot G_3$$

Выразим токи в ветвях по закону Ома:

$$I_4 = \frac{\varphi_d - \varphi_b}{R_4} = \frac{-\varphi_b}{R_4}, \quad I_5 = \frac{\varphi_d - \varphi_a}{R_5} = \frac{-\varphi_a}{R_5}, \quad I_6 = \frac{\varphi_b - \varphi_a}{R_6}$$

##### Метод двух узлов

Рассмотрим частный случай метода узловых потенциалов – метод двух узлов.

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = \varphi_a$$

### Метод контурных токов

Метод основан на втором законе Кирхгофа. Вводят такое понятие как контурный ток – ток, протекающий во всех ветвях, образующих данный контур. Количество уравнений при этом сокращается. Представим токи в ветвях через контурные.

$$\begin{aligned} I_{k1} \cdot (R_3 + R_1 + r_{01} + R_6) - I_{k2} \cdot R_3 - I_{k3} \cdot R_6 &= E_1 + E_3 \\ - I_{k1} \cdot R_3 + I_{k2} \cdot (R_5 + R_3 + R_2) - I_{k3} \cdot R_5 &= -E_3 \\ - I_{k1} \cdot R_6 - I_{k2} \cdot R_5 + I_{k3} \cdot (R_6 + R_4 + R_5) &= 0 \end{aligned}$$

### Метод эквивалентных преобразований

Преобразования считаются эквивалентными, если токораспределение в не преобразованной части схемы не изменилось.

$$\begin{aligned} I_1 \cdot (R_1 + R_{\text{экв}}) &= E_1 \pm E_{\text{экв}} \\ I_1 &= \frac{E_1 \pm E_{\text{экв}}}{(R_1 + R_{\text{экв}})} \end{aligned}$$

Перерисуем схему для удобства чтения. Четвертая, пятая и шестая ветви образуют пассивный треугольник сопротивлений, который преобразуем в эквивалентную звезду. Сопротивления лучей звезды определяются:

$$R_{45} = \frac{R_4 \cdot R_5}{R_4 + R_5 + R_6}; \quad R_{46} = \frac{R_4 \cdot R_6}{R_4 + R_5 + R_6}; \quad R_{56} = \frac{R_5 \cdot R_6}{R_4 + R_5 + R_6}.$$

Так как два узла не образуют узла, то в результате преобразования схемы получили параллельное соединение двух ветвей. Преобразуем его и определим параметры эквивалентных элементов:

$$R_{\text{экв}} = \frac{(R_2 + R_{45}) \cdot (R_3 + R_{56})}{R_2 + R_{45} + R_3 + R_{56}}, \quad E_{\text{экв}} = \frac{E_3 / (R_3 + R_{56})}{1 / (R_2 + R_{45}) + 1 / (R_3 + R_{56})}.$$

Ток первой ветви определиться:

$$I_1 = \frac{E_1 + E_3}{R_1 + r_{01} + R_{\text{экв}} + R_{46}}.$$

### 5. Мощность цепи постоянного тока. Баланс мощностей.

Поступательное движение свободных электронов в проводнике, создающее электрический ток, вызывает дополнительные столкновения электронов с атомами внутри

проводника. При таких столкновениях электроны сообщают атомам дополнительную энергию и усиливают их беспорядочные колебания, что проявляется в виде выделения тепла проводником.

Закон Джоуля-Ленца гласит, что количество тепла, выделившегося за время  $t$  в проводнике с сопротивлением  $R$  при прохождении через него тока  $I$ , прямо пропорционально квадрату тока, сопротивлению проводника и времени прохождения тока через проводник

$$Q = 0,24 \cdot R \cdot I^2 \cdot t$$

где 0,24 – тепловой коэффициент.

Провода электрических линий и электротехнических устройств должны быть защищены от перегрева при длительных перегрузках и коротком замыкании. Коротким замыканием принято называть такой режим, при котором сопротивление нагрузки стремиться к нулю, а ток, соответственно, к бесконечности. Короткое замыкание является аварийным режимом, возникающим вследствие случайного соединения токоведущих частей без изоляции, или же вследствие пробоя изоляции. Простейшим способом отключения токов короткого замыкания является использование приборов защиты. В качестве примера такого прибора можно рассмотреть плавкий предохранитель. Для напряжения до 250 В и тока до 60 А используют пробочные предохранители.

Количество электрической энергии выделившейся в виде тепла может быть представлено следующим выражением

$$W = U \cdot I \cdot t = R \cdot I \cdot I \cdot t = R \cdot I^2 \cdot t, \quad [\text{Вт} \cdot \text{сек}]$$

Работа, совершаемая электрическим током в секунду, называется электрической мощностью.

$$P = \frac{W}{t} = \frac{I^2 \cdot t \cdot R}{t} = I^2 \cdot R$$

### Баланс мощностей

Мощность источников (полная мощность) определяется как алгебраическая сумма произведения ЭДС источника на ток, проходящий через данный источник.

$$P_{\text{ист}} = \sum_{k=1}^n \pm E_n \cdot I_n, \quad + \text{ если } E_n \uparrow\uparrow I_n.$$

Мощность потребителей (полезная) определяется как арифметическая сумма произведения квадрата тока на соответствующее сопротивление:

$$P_{\text{потр}} = \sum_{k=1}^n I_n^2 \cdot R$$

Согласно закону сохранения и превращения энергии энергия не исчезает и не появляется вновь, она только переходит из одного вида в другой. Поскольку мощность есть количество энергии в единицу времени, то по аналогии можно сформулировать закон сохранения мощностей или баланс мощностей: вся мощность, вырабатываемая источниками энергии равна мощности, потребляемой нагрузкой.

$$P_{\text{потр}} = P_{\text{ист}}.$$

$$E_1 \cdot I_1 - E_2 \cdot I_2 + E_3 \cdot I_3 = I_1^2 \cdot (R_1 + R_3) + I_2^2 \cdot R_2.$$

## КПД

Отношение полезной мощности к полной мощности, развиваемой источниками, называется коэффициентом полезного действия.

Расчет нелинейных цепей постоянного тока

$$\eta = \frac{P_{\text{потр}}}{P_{\text{ист}}} \text{ (эта).}$$

## 6. Расчет цепей электрического тока с нелинейными элементами

В теории линейных ЭЦ предполагается, что параметры всех элементов (электрическое сопротивление, индуктивность, емкость) не зависят от напряжения и тока. Это предположение является идеализацией. В действительности параметры элементов в какой-то степени зависят от тока и напряжения. Поэтому их допустимо считать неизменными лишь в ограниченных пределах изменения токов и напряжений. Однако существует множество элементов и устройств, параметры которых существенно зависят от токов и напряжений. Такие элементы называют нелинейными, а цепь, содержащая хотя бы один нелинейный элемент, называется нелинейной.

Нелинейные цепи широко применяются в электротехнике, электронике, автоматике. Анализ процессов в нелинейных цепях значительно сложнее, чем в линейных.

## Характеристики НЭ

Свойства нелинейных элементов удобно анализировать с помощью ВАХ. Они обычно задаются таблицей или графиком. По виду ВАХ относительно координат, НЭ подразделяют на симметричные и несимметричные.

Симметричными называются элементы, ВАХ которых не зависят от направления в них тока и напряжения. К числу таких элементов относятся лампы накаливания, терморезисторы.

Элементы, ВАХ которых зависят от направления тока и напряжения, называются несимметричными. К несимметричным НЭ можно отнести диоды, стабилитроны (большая часть элементов электроники).

Свойства НЭ кроме ВАХ характеризуются также статическим и дифференциальным сопротивлениями.

Допустим рабочий режим резистора задан точкой  $A$  на ВАХ. Отношение напряжения на резисторе к протекающему току называют статическим сопротивлением:

$$R_A = \frac{U_A}{I_A}.$$

Из рисунка видно, что это сопротивление пропорционально тангенсу угла  $\alpha$  между прямой, соединяющей точку  $A$  с началом координат.

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

### Последовательное соединение НЭ

Для анализа нелинейной цепи чаще используют графоаналитический метод, когда ВАХ линейной части цепи задана аналитически, а нелинейной - графически. Анализ сводится к определению токов и напряжений на отдельных участках или во всей цепи.

Рассмотрим пример последовательного соединения двух НЭ, ВАХ которых заданы графиками. Необходимо определить ток в цепи при известной величине приложенного напряжения.

Последовательное соединение характеризуется общим током. А напряжение на входных зажимах, согласно второму закону Кирхгофа, представляет собой сумму напряжений на отдельных НЭ.

$$U = U_1 + U_2.$$

Заменяем последовательное соединение одним элементом с эквивалентной ВАХ. Для произвольного значения тока  $I_1$  строим прямую, параллельную оси напряжения, пересечение которой с ВАХ элементов, дает значения напряжений на них. Графическим складываем, и получаем напряжение в цепи при данном значении тока. Аналогично получаем значения напряжения цепи при различных значениях тока, и строим суммарную ВАХ.

### Параллельное соединение

Параллельное соединение характеризуется общим напряжением. Ток в цепи до разветвления, согласно первому закону Кирхгофа, является суммой токов параллельных ветвей.

$$I = I_1 + I_2.$$

Определяем токи в ветвях при различных значениях напряжения и суммируем их. Таким образом, получаем ВАХ эквивалентной цепи.

## 1.2 Лекция № 2 (2 часа).

Тема: «Синусоидальный переменный электрический ток»

### 1.2.1 Вопросы лекции:

1. Способы представления синусоидальной функции. Получение переменного тока.
2. Амплитудное, действующее и среднее значение синусоидального тока и напряжения.
3. Методика расчета цепи переменного тока с помощью комплексных чисел.
4. Простейшие цепи переменного тока с идеальным активным, индуктивным и емкостным элементом.

5 Активная, реактивная и полная мощности. Коэффициент мощности.

### 1.2.2 Краткое содержание вопросов:

#### 1. Способы представления синусоидальной функции. Получение переменного тока.

В настоящее время почти вся ЭЭ вырабатывается в виде энергии переменного тока, т.е. ток, изменяющий во времени. Он обладает преимуществом по сравнению с постоянным: просто и с минимальными потерями переменное напряжение преобразуется при передаче энергии. Устройства переменного тока имеют более простое конструктивное исполнение, удобны и надежны в эксплуатации.

Если мгновенные значения переменных величин повторяются через равные промежутки времени, то они являются переменными периодическими. В том случае, когда закон изменения переменных величин можно описать с помощью синусоиды, они являются переменными периодическими синусоидальными.

Переменный ток промышленной частоты (50 Гц) на электростанциях создают электромашинные синхронные генераторы трехфазного тока.

#### Получение переменного тока. Способы представления синусоидальной функции

Пусть в однородном магнитном поле с равномерной угловой скоростью  $\omega$  вращается замкнутый виток с током. Согласно закону электромагнитной индукции, при вращении витка в магнитном поле будет наводиться ЭДС, величина которой определиться выражением:

$$e = Blv \sin \alpha = Bl \sin \omega t = E_m \sin \omega t$$

где  $B$  – магнитная индукция;

$l$  – активная длина проводника;

$v$  - скорость движения проводника;

$\alpha$  - угол между направлением движения проводника и магнитной индукцией.

В начальный момент времени, когда угол  $\alpha$  равен 0, синус нулю равен нулю, величина ЭДС соответственно тоже равна нулю. Затем при повороте витка на угол, отличный от нуля, увеличивается синус угла и величина ЭДС. Наибольшее (максимальное) значение ЭДС достигается, когда рамка повернута под углом 90 градусов. Затем уменьшение угла (поворот до 180 градусов) приводит к уменьшению величины индуцированной ЭДС до нуля.

Затем начинается отрицательный полупериод ЭДС. Это значит, что направление ЭДС изменилось, а величина осталась такая же.

При повороте витка на  $360$  градусов или на  $2\pi$  наведенная ЭДС проходит полный цикл изменений, а время, соответствующее одному обороту, будет равно одному периоду. Если виток делает  $n$  оборотов в минуту, то число периодов в секунду будет равно:

$$f = \frac{n}{60}, \text{ [Гц]}$$

При этом угловая скорость (частота)  $\omega = 2\pi f$ .

## 2. Амплитудное, действующее и среднее значение синусоидального тока и напряжения.

Всякая синусоидальная величина может быть представлена вектором, вращающимся с постоянной угловой частотой.

Если на плоскости под углом  $\psi_i$  от оси абсцисс отложить вектор длиной  $I_m$  и вращать его с угловой частотой  $\omega$  против часовой стрелки, то, по закону синуса, проекция вектора на ось ординат будет равна мгновенному значению функции в данный момент времени.

Синусоидальному току соответствует непрерывное вращение вектора длиной  $I_m$ .

Это графическое представление синусоидального тока или временная диаграмма, аналитическое представление синусоидальной функции (закон изменения) запишется в следующем виде:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i), \text{ A},$$

аналогичным образом можно записать выражения для синусоидальных напряжений и ЭДС:

$$U = U_m \sin(\omega t + \psi_u), \text{ B},$$

$$E = E_m \sin(\omega t + \psi_e), \text{ B}.$$

где  $i, u, e$  - мгновенное значение;

$I_m, U_m, E_m$  - амплитудное значение;

$\psi_i, \psi_u, \psi_e$  - начальная фаза.

Начальная фаза характеризует мгновенное значение синусоидальной величины в момент времени, равный нулю. На временной диаграмме это отрезок от момента времени, когда синусоидальная функция равна нулю, при переходе от отрицательных мгновенных значений к положительным до начала координат. Если синусоида сдвинута влево от начала координат, то ее начальная фаза считается положительной, в противном случае, отрицательной.

### Среднее и действующее значения синусоидальной величины

Пусть закон изменения тока имеет вид:

$$i = I_m \sin \omega t .$$

Под средним значение синусоидально изменяющегося тока понимают среднее ее значение за полпериода.

Величину среднего значения переменного тока можно определить, если разделить площадь под положительным пол периодом на  $\frac{\pi}{2}$ .

$$I_{cp} = \frac{1}{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} i dt = \frac{2}{\pi} I_m ,$$

т.е. среднее значение синусоидального тока составляет  $0,638I_m$ . Среднее значение переменного тока за период равно нулю, т.к. площади, ограниченные кривой тока и осью абсцисс, в течение каждого полупериода равны, но противоположны по знаку.

Очень широко применяется понятие действующего (эффективного) значения синусоидально изменяющейся величины.

Действующее значение синусоидального тока численно равно значению такого постоянного тока, который за время, равное периоду синусоидального тока выделяет такое же количество тепла, что и синусоидальный.

При прохождении переменного тока по проводнику с электрическим сопротивлением  $R$ , за один период выделяется определенное количество тепловой энергии.

$$Q_i = \int_0^T 0,24 \cdot i^2 \cdot R dt .$$

Количество тепла, выделенного постоянным током  $I$  в проводнике с сопротивлением  $R$  за время, равное одному периоду переменного тока, можно определить по формуле:

$$Q_I = 0,24RI^2T .$$

Приравняем эти выражения:

$$Q_i = \int_0^T 0,24 \cdot i^2 \cdot R dt = Q_I = 0,24RI^2T ,$$

и найдем действующее значение синусоидального тока:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}$$

Установим связь между действующим и амплитудным значением:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (I_m \sin \omega t)^2 dt} = I_m \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} dt} = I_m \sqrt{\frac{1}{T} \left( \int_0^T \frac{1}{2} dt - \int_0^T \frac{1}{2} \cos 2\omega t dt \right)} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

### 3. Методика расчета цепи переменного тока с помощью комплексных чисел.

Простейшие цепи переменного тока с идеальным активным, индуктивным и емкостным элементом.

Любой вектор может быть представлен комплексным числом:

$$\dot{I}_m = I_m \cdot e^{j\psi_i}.$$

где  $I_m = \text{mod}(\dot{I}_m)$  - модуль к.ч.;

$e^{j\psi_i}$  - оператор поворота;

$\psi_i = \text{arg}(\dot{I}_m)$  - аргумент к.ч.

Проекция вектора на ось действительных величин называется действительной или реальной частью КЧ., определяется через косинус угла пси:

$$a = \text{Re}(\dot{I}_m) = I_m \cdot \cos \psi_i.$$

Проекция вектора на ось мнимых величин называется мнимой частью КЧ., определяется через синус угла пси:

$$b = \text{Im}(\dot{I}_m) = I_m \cdot \sin \psi_i.$$

Перепишем показательную форму записи:

$$\dot{I}_m = I_m \cdot \cos \psi_i + j \cdot I_m \cdot \sin \psi_i,$$

Эта форма записи называется тригонометрическая (формула перехода от показательной к алгебраической).

$$\dot{I}_m = a + b.$$

Если требуется перейти от алгебраической формы записи, то необходимо определить модуль комплексного числа и аргумент. Модуль комплексного числа определится по теореме Пифагора:

$$I_m = \sqrt{a^2 + b^2}.$$

Определение аргумента КЧ.

$$\psi_i = \text{arctg} \frac{b}{a}.$$

### Операции с комплексными числами. Сложение.

Сложение и вычитание. Предположим, что два тока заданы выражениями для мгновенных величин:

$$i_1 = 10 \cdot \sin(\omega t + 45^\circ), \text{ A};$$

$$i_2 = 5 \cdot \sin(\omega - 135^\circ), \text{ A}.$$

Перейдем от выражения для мгновенных значений к комплексным амплитудам токов:

$$\dot{I}_{1m} = 10 \cdot e^{j45^\circ} = 10 \cdot \cos 45^\circ + j \cdot 10 \cdot \sin 45^\circ = 10 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + j \cdot 10 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} = 5\sqrt{2} + j5\sqrt{2}.$$

$$\dot{I}_{2m} = 5 \cdot e^{-j135^\circ} = 5 \cdot \cos(-135^\circ) + j \cdot 5 \cdot \sin(-135^\circ)$$

$$= -5 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - j \cdot 5 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} = -2,5\sqrt{2} - j2,5\sqrt{2}$$

Сложение двух комплексных чисел удобнее производить в алгебраической форме записи:

$$\dot{I}_{1m} + \dot{I}_{2m} = (5\sqrt{2} + j5\sqrt{2}) + (-2,5\sqrt{2} - j2,5\sqrt{2}) =$$

$$(5\sqrt{2} - 2,5\sqrt{2}) + j(5\sqrt{2} - 2,5\sqrt{2}) =$$

$$= 2,5\sqrt{2}(2-1) + j2,5\sqrt{2}(2-1) =$$

$$= 2,5\sqrt{2} + j2,5\sqrt{2} = \sqrt{(2,5\sqrt{2})^2 + (2,5\sqrt{2})^2} \cdot e^{j\arctg\left(\frac{2,5\sqrt{2}}{2,5\sqrt{2}}\right)} =$$

$$= \sqrt{(2,5\sqrt{2})^2 \cdot (1+1)} \cdot e^{j\arctg(1)} =$$

$$= 2,5\sqrt{2}\sqrt{2} \cdot e^{j45^\circ} = 5 \cdot e^{j45^\circ}$$

Обратный переход к мгновенным значениям:

$$i_{12} = 5 \cdot \sin(\omega t + 45^\circ).$$

### Операции с комплексными числами. Вычитание.

$$\dot{I}_{1m} - \dot{I}_{2m} = (5\sqrt{2} + j5\sqrt{2}) - (-2,5\sqrt{2} - j2,5\sqrt{2}) =$$

$$(5\sqrt{2} + 2,5\sqrt{2}) + j(5\sqrt{2} + 2,5\sqrt{2}) =$$

$$= 2,5\sqrt{2}(2+1) + j2,5\sqrt{2}(2+1) =$$

$$\begin{aligned}
&= 7,5\sqrt{2} + j7,5\sqrt{2} = \sqrt{(7,5\sqrt{2})^2 + (7,5\sqrt{2})^2} \cdot e^{j\arctg\left(\frac{7,5\sqrt{2}}{7,5\sqrt{2}}\right)} = \\
&= \sqrt{(7,5\sqrt{2})^2 \cdot (1+1)} \cdot e^{j\arctg(1)} = \\
&= 7,5\sqrt{2}\sqrt{2} \cdot e^{j45^0} = 15 \cdot e^{j45^0}
\end{aligned}$$

Обратный переход к мгновенным значениям:

$$i_{12} = 15 \cdot \sin(\omega t + 45^0).$$

### Операции с комплексными числами. Деление.

Пусть задан двухполюсник, ток и напряжение, на зажимах которого изменяются по закону синуса:

Делить комплексные числа удобнее в показательной форме записи.

Комплексные амплитуды напряжения и тока имеют следующий вид:

$$\dot{U}_m = U_m \cdot e^{j\psi_u}; \quad \dot{I}_m = I_m \cdot e^{j\psi_i}$$

В результате деления, согласно закону Ома, получаем величину равную сопротивлению.

$$= Z \cdot \cos \varphi + jZ \cdot \sin \varphi \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m} \cdot e^{j\varphi}$$

В цепях переменного тока оно называется полным сопротивлением и обозначается буквой  $Z$ . Разность начальных фаз тока и напряжения обозначается буквой (фи)  $\varphi$  и называется углом сдвига фаз.

Используя тригонометрическую форму записи, перейдем к алгебраической форме записи К.Ч.

Реальная часть комплекса полного сопротивления называется активным сопротивлением и обозначается  $R$ . Мнимая часть комплекса полного сопротивления называется реактивным сопротивлением и обозначается буквой  $X$ .

$$R + j \cdot X = Z$$

$$\dot{U}_m = 100 \cdot e^{j90^0} \text{ В};$$

$$\dot{I}_m = 10 \cdot e^{-j135^0} \text{ А.}$$

$$\frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m} = \frac{100 \cdot e^{j90^0}}{10 \cdot e^{-j135^0}} = \frac{100}{10} \cdot e^{j(90^0 + 135^0)} = 10 \cdot e^{j225^0} = 10 \cdot e^{-j135^0}$$

Величина, обратная полному комплексному сопротивлению называется полной комплексной проводимостью:

$$\begin{aligned}\underline{Y} &= \frac{1}{\underline{Z}} = \frac{1}{R + jX} = \frac{R - jX}{(R + jX) \cdot (R - jX)} = \frac{R - jX}{R^2 + X^2} \\ &= \frac{R}{R^2 + X^2} - j \frac{X}{R^2 + X^2}\end{aligned}$$

Первая дробь (реальная часть) называется активная проводимость и обозначается буквой  $g$ .

### Резистор

Двухполюсник содержит резистивный элемент. Ток двухполюсника изменяется по закону синуса:

$$i = I_m \sin \omega t$$

Определим закон изменения напряжения на его зажимах:

$$u_R = R \cdot i = R \cdot I_m \sin \omega t = U_m \sin \omega t$$

Таким образом, напряжение на зажимах двухполюсника и ток, проходящий через резистор, имеют одинаковую начальную фазу ( $\psi_i = \psi_u$ ,  $\varphi = \psi_u - \psi_i = 0$ ), или совпадают по фазе. Они одновременно достигают своего максимального значения и соответственно одновременно проходят через ноль. Как показано на временной диаграмме. На векторной диаграмме векторы тока и напряжения на резисторе сонаправлены.

### Индуктивный элемент

Пусть в цепь переменного тока включена катушка с малым сопротивлением провода (идеальная катушка). Непрерывное изменение тока в витках катушки вызывает появление ЭДС самоиндукции, которое в соответствии с правилом Ленца противодействует изменению тока. Допустим, ток катушки изменяется по закону:

$$i = I_m \sin \omega t$$

Тогда величина ЭДС самоиндукции:

$$\begin{aligned}e_L &= -L \frac{di}{dt} = -L \frac{d(I_m \sin \omega t)}{dt} = -\omega L I_m \cos \omega t = -X_L I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \\ &= -E_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)\end{aligned}$$

ЭДС самоиндукции всегда направлено навстречу напряжению, а значит:

$$u_L = -e_L = U_m \sin(\omega t + 90^\circ)$$

Начальная фаза напряжения отличается от начальной фазы тока на угол  $90^0$ , т.е.  $\psi_u = \psi_i + 90^0$ , откуда следует, что  $\varphi = \psi_u - \psi_i = 90^0$ . Говорят, что напряжение на индуктивности опережает ток или ток отстает от напряжения на угол  $90^0$ . При тех значения, когда напряжение достигает своего максимума, ток равен нулю. На векторной диаграмме вектор напряжения повернут на угол  $90^0$  градусов против часовой стрелки относительно вектора тока.

### Емкостный элемент

Пусть в цепь переменного тока включен катушка емкостный элемент, напряжение на зажимах которого изменяется по закону синуса:

$$u_C = U_m \sin \omega t.$$

Ток и напряжение связаны законом Ома в дифференциальной форме записи:

$$\begin{aligned} i &= C \frac{du_C}{dt} = C \frac{d(U_m \sin \omega t)}{dt} = \omega C U_m \cos \omega t = b_C U_m \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right) = \\ &= I_m \sin \left( \omega t + 90^0 \right) \quad X_C = \frac{1}{\omega C} \end{aligned}$$

Начальная фаза тока отличается от начальной фазы напряжения на угол  $90^0$ , т.е.  $\psi_i = \psi_u + 90^0$ , откуда следует, что  $\varphi = \psi_u - \psi_i = -90^0$ . Говорят, что напряжение на емкости отстает или ток опережает напряжение на угол  $90^0$ . При тех значения, когда напряжение достигает своего максимума, ток равен нулю. На векторной диаграмме вектор напряжения повернут на угол  $90^0$  градусов в направлении по часовой стрелке относительно вектора тока.

### 5. Активная, реактивная и полная мощности. Коэффициент мощности

Рассмотрим пассивный двухполюсник, ток и напряжение, на зажимах которого, изменяются по синусоидальному закону:

$$u = U_m \sin \omega t, \quad i = I_m \sin(\omega t + \psi_i) = I_m \sin(\omega t + \varphi).$$

Мгновенная мощность, производимая источником энергии и потребляемая двухполюсником, равна скорости совершения работы в данный момент времени и равна произведению мгновенного напряжения на мгновенный ток:

$$\begin{aligned} p &= u \cdot i = U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin(\omega t + \varphi) = U_m I_m \sin \omega t \sin(\omega t + \varphi) \\ &= \frac{U_m I_m}{2} [\cos \varphi - \cos(2\omega t + \varphi)] = \frac{\sqrt{2}U \sqrt{2}I}{2} [\cos \varphi - \cos(2\omega t + \varphi)] \\ &= UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t + \varphi). \end{aligned}$$

Таким образом, мгновенная мощность имеет постоянную составляющую и гармоническую составляющую, угловая частота которой в 2 раза больше, чем угловая частота напряжения и тока.

Мгновенная мощность двухполюсника положительна, когда напряжение и ток одинаковы по знаку, и отрицательна, когда напряжение и ток противоположны по знаку.

Когда мгновенная мощность положительна по знаку, значит, она поступает от источника энергии к двухполюснику, и в случае, когда мгновенная мощность отрицательна, энергия возвращается в источник. Это значит, что энергия, накопленная в магнитных и электрических полях элементов (катушки и емкость) преобразуется в ЭЭ и возвращается в источник.

### **Мощность в цепи с резистивным элементом.**

Если двухполюсник содержит только резистивный элемент, обладающий активным сопротивлением, то энергия накапливаться в нем не может. Ток и напряжение всегда одного знака, следовательно, мгновенная мощность всегда по знаку положительна.

Среднее значение мгновенной мощности за период называется активной мощностью и определяется выражением:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p \, dt = UI \cos \varphi = UI$$

### **Мощность в цепи с индуктивным элементом.**

Рассмотрим двухполюсник, в который включен индуктивный элемент. Ток индуктивности отстает от напряжения на угол  $90^\circ$ . Таким образом, мгновенная мощность на индуктивности имеет только гармоническую составляющую, изменяющуюся с двойной частотой. Когда ток возрастает, происходит накопление энергии в магнитном поле индуктивности. Когда ток убывает, его магнитное поле в индуктивности распадается, а энергия, при посредстве ЭДС самоиндукции вся возвращается назад в источник.

В течение второй четверти периода мгновенная мощность отрицательна, так как индуктивность не поглощает энергию, а сама становится источником энергии.

Таким образом, ток в цепи с индуктивностью не совершает работу, он обусловливается лишь колебаниями энергии. Такой ток именуется реактивным. Он бесполезно загружает источник и провода линии электропередач, следовательно, для электроэнергетики он является вредным.

Среднее значение мгновенной мощности за период (активная мощность) равна нулю. В цепи происходят колебания энергии между источником энергии и магнитным полем потребителя. Амплитуду колебаний мгновенной мощности в цепи с индуктивностью называют реактивной индуктивной.

$$Q = I^2 \cdot X_L, [\text{вар}].$$

### **Мощность в цепи с емкостным элементом.**

В цепи с емкостным элементом ток опережает напряжение на  $90^\circ$ . Как и в случае с идеальным индуктивным элементом, мгновенная мощность на гармоническую составляющую, изменяющуюся с двойной частотой. Однако накопление энергии, заряд конденсатора, происходит, когда возрастает не ток, а напряжение, и конденсатор разряжается, когда напряжение уменьшается.

И, также как и в цепи с индуктивностью, ток в цепи с емкостным элементом не совершают работы.

Среднее значение мгновенной мощности за период (активная мощность) равна нулю. В цепи происходят колебания энергии между источником энергии и магнитным полем потребителя. Амплитуду колебаний мгновенной мощности в цепи с индуктивностью называют реактивной индуктивной.

$$Q_C = I^2 \cdot X_C, [\text{вар}].$$

### **1.3 Лекция № 3 (2 часа).**

#### **Тема: «Трансформаторы»**

##### **1.3.1 Вопросы лекции:**

1. Назначение, устройство и принцип действия трансформаторов. Основы теории однофазного трансформатора. Коэффициент трансформации.
2. Опыт холостого хода и короткого замыкания. Энергетическая диаграмма потерь. КПД.
3. Особенности трехфазных трансформаторов. Специальные трансформаторы.

##### **1.3.2 Краткое содержание вопросов:**

##### **1. Назначение, устройство и принцип действия трансформаторов. Основы теории однофазного трансформатора. Коэффициент трансформации.**

Трансформатором называется статический (без движущихся частей) электромагнитный аппарат, в котором переменный ток одного напряжения преобразуется в переменный ток другого уровня напряжения, той же частоты.

Различают силовые, измерительные, сварочные трансформаторы, а также автотрансформаторы.

Трансформатор простейшего типа состоит из ферромагнитного сердечника 1 и двух обмоток, связанных магнитной связью, исключение составляет автотрансформатор. Обмотка трансформатора, соединенная с источником электроэнергии 2, называется первичной, и,

соответственно, первичными именуются все параметры этой обмотки: число витков  $w_1$ ; подведенное напряжение  $U_1$ ; ток  $I_1$ .

Обмотка, к которой подключается нагрузка и, относящиеся к ней параметры, называется вторичной 3:  $w_2$ ;  $U_2$ ;  $I_2$ .

В зависимости от системы тока различают однофазные и трехфазные трансформаторы. Рабочий процесс однофазного трансформатора аналогичен рабочему процессу одной фазы трехфазного трансформатора. Поэтому, для удобства, принципа работы трансформатора будем рассматривать на примере однофазного.

Рассматривая катушку с ферромагнитным сердечником, мы выяснили, что при синусоидальном изменении напряжения  $U_1$ , переменный ток  $I_1$  первичной обмотки, возбуждает магнитный поток  $\Phi$ , также синусоидальной формы. Последний индуцирует в первичной обмотке ЭДС самоиндукции  $E_1$ , а во вторичной обмотке – ЭДС взаимоиндукции  $E_2$ .

Величину индуцированных ЭДС можно определить, воспользовавшись уравнением трансформаторной ЭДС:

$$E_{\text{ВН}} = 4,44 \cdot f \cdot w_{\text{ВН}} \cdot \Phi_m;$$

$$E_{\text{НН}} = 4,44 \cdot f \cdot w_{\text{НН}} \cdot \Phi_m$$

Отношение величины ЭДС самоиндукции к величине ЭДС взаимоиндукции называется коэффициентом трансформации:

$$k = \frac{E_{\text{ВН}}}{E_{\text{НН}}} = \frac{4,44 \cdot f \cdot w_{\text{ВН}} \cdot \Phi_m}{4,44 \cdot f \cdot w_{\text{НН}} \cdot \Phi_m} = \frac{w_{\text{ВН}}}{w_{\text{НН}}}.$$

Коэффициент трансформации показывает во сколько раз напряжение обмотки ВН, больше напряжения обмотки НН, в режиме холостого хода.

## 2. Опыт холостого хода и короткого замыкания. Энергетическая диаграмма потерь. КПД.

Испытательный режим, когда на ПО подается номинальное напряжение, а ВО разомкнута, и ее ток равен нулю  $I_2 = 0$ . В данном опыте измеряются напряжения ПО и ВО, ток ПО и активную мощность.

Ток ПО в этом режиме называется током ХХ и обозначается  $I_{10}$ , составляет 3-10 % от тока номинального режима, вследствие чего потерями в катушке можно пренебречь. Активная мощность, измеренная в этом режиме, составляет потери в стали магнитопровода. По показаниям вольтметров уточняют коэффициент трансформации.

Опыт ХХ обязателен при заводском испытании готового трансформатора, а также периодически проводят в период эксплуатации.

Следует различать режим короткого замыкания (аварийный режим), возникающий вследствие неправильной эксплуатации, при этом выделяется большое количество тепла, что может привести к разрушению обмоток, и опыт короткого замыкания. Опыт, при котором вторичная обмотка замкнута на очень малое сопротивление.

Измеряют напряжение ПО  $U_{1K}$ , ток короткого замыкания ПО  $I_{1K3}$  и  $I_{2K3}$  ВО, а также мощность  $P_{K3}$ . Для проведения опыта напряжение ПО занижено до 5-10% от номинального значения. При этом ток первичной обмотки достигает номинального значения. Потери мощности в проводниках такие же, как и в нагруженном трансформаторе, а потери в стали незначительны. Таким образом, мощность, измеренная в режиме КЗ, затрачивается на электрические потери в проводниках обмоток.

Опыт короткого замыкания может служить также контрольным опытом для определения коэффициента трансформации

$$k = \frac{I_{2K3}}{I_{1K3}}$$

### Энергетическая диаграмма потерь. КПД

Мощность  $P_1$ , подведенная к первичной обмотке трансформатора, частично расходуется на нагревание проводников ПО, потери в магнитопроводе (потери в стали), и нагрев проводников ВО. Оставшаяся мощность  $P_2$  передается от вторичной обмотки во внешнюю цепь. Мощность потерь в трансформаторе составляет лишь 1-2%. КПД трансформатора представляет отношение мощности, передаваемой во внешнюю цепь, к мощности, подведенной к трансформатору.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - (P_{CT} + P_{медь})}{P_1}$$

### 3. Особенности трехфазных трансформаторов. Специальные трансформаторы.

Для трансформирования трехфазной системы токов, возможно использовать три одинаковых однофазных трансформатора, что часто используют для трансформирования больших напряжений. Большинство трансформаторов малой и средней мощности выполняют трехфазными.

Представим себе три однофазных трансформатора, соединенных частью сердечника, другие же части сердечника остаются без изменения. Это соединение можно сравнить с трехфазной электрической цепью, с нулевым проводом, роль которого выполняет средний

стержень. В случае симметричной нагрузки нулевой провод можно исключить, и заменить симметричный сердечник несимметричным. Стержни несимметричного магнитопровода располагают в одной плоскости. Первичной или вторичной обмоткой называется совокупность трех фазных обмоток одного уровня напряжения. Зажимы трехфазного трансформатора должны размечаться в порядке чередования фаз: на стороне высшего напряжения зажимы маркируются прописными буквами, на стороне низшего напряжения – строчными буквами.

Основными способами соединения обмоток трехфазного трансформатора являются соединения по схеме звезда и о схеме треугольник. Наиболее простым и дешевым из них является соединение обеих обмоток трансформатора звездой. В этом случае каждая из обмоток и ее изоляция рассчитываются только на фазное напряжение.

Измерительные трансформаторы используются: во-первых, для изоляции измерительных приборов и аппаратов автоматической защиты от цепи высокого напряжения; во-вторых, для расширения пределов измерения измерительных приборов.

При непосредственном включении измерительных приборов в цепь высокого напряжения они были бы опасными при прикосновении. Во вторичных цепях измерительных трансформаторов напряжение не превышает 100 В, а связь с цепью высокого напряжения осуществляется только через магнитный поток в сердечнике. Кроме того, один зажим вторичной обмотки и корпус трансформатора заземляются, что делается на случай повреждения изоляции.

Применение измерительных трансформаторов дает возможность использование одних и тех же приборов со стандартными пределами измерений для измерения различных напряжений и токов.

Трансформаторы напряжения применяются для включения вольтметров, частотометров, и цепей напряжения измерительных приборов (ваттметров, счетчиков и фазометров). Схема включения показана на рисунке. Такой трансформатор конструктивно похож на силовой трансформатор. Его первичная обмотка, с большим числом витков, является обмоткой высшего напряжения, и включается параллельно как вольтметр в цепь. Вторичная обмотка, с меньшим числом витков, является обмоткой низшего напряжения, и замыкается на вольтметр или на обмотку напряжения ваттметра. Сопротивления измерительных приборов относительно велики (порядка тысяч Ом)  $Z_V \rightarrow \infty$ , вследствие чего трансформатор работает в режиме, близком к режиму ХХ ( $I_1 \cdot Z_1 I_2 \cdot Z_2$ ), что позволяет считать напряжения равными индуцированным ЭДС ( $U_1 = E_1, U_{20} = E_2$ ). Тогда вторичное напряжение, измеряемое вольтметром, связано с первичным постоянным соотношением, равным коэффициенту трансформации:

$$\frac{U_1}{U_{20}} = \frac{E_1}{E_2} = k \quad U_1 = k \cdot U_{20}.$$

Трансформаторы тока со стороны первичной обмотки включаются в линию, как амперметр, последовательно с контролируемым объектом, а его вторичная обмотка замыкается непосредственно на амперметр или цепи тока других измерительных приборов (например, токовую обмотку ваттметра). Все измерительные приборы включены последовательно, их суммарное сопротивление мало (приблизительно 2 Ом), поэтому трансформатор тока работает в условиях, близких к условиям опыта короткого замыкания силового трансформатора. Токи первичной и вторичной обмоток связаны постоянным соотношением, равным коэффициенту трансформации, следовательно, для определения первичного тока вторичный ток умножают на коэффициент трансформации:

$$I_1 = k \cdot I_2.$$

### Автотрансформаторы

Автотрансформатор отличается от обычного трансформатора тем, что первичная обмотка имеет со вторичной обмоткой, кроме магнитной связи, электрическое соединение. Таким образом, вторичная обмотка является частью первичной. Автотрансформаторы могут быть с переменным коэффициентом трансформации, который можно изменить с помощью контактного устройства изменением числа витков вторичной обмотки.

Мощность автотрансформатора

$$S = S_{\mathcal{E}} + S_T$$

складывается из мощности, передаваемой электрическим путем

$$S_{\mathcal{E}} = U_2 \cdot I_1,$$

и трансформируемой мощности

$$S_T = U_2 \cdot (I_2 - I_1)$$

Размеры и вес автотрансформатора определяются трансформируемой мощностью.

$$S_T = U_2 \cdot (I_2 - I_1) = U_2 \cdot I_2 \cdot \left(1 - \frac{1}{k}\right).$$

Чем ближе коэффициент трансформации автотрансформатора к 1, тем меньше мощность трансформирования, а, следовательно, сечение магнитопровода. Поэтому автотрансформатор будет иметь меньшие потери в стали сердечника и в обмотках, чем силовой трансформатор той же мощности. Преимущества автотрансформатора уменьшаются с увеличением коэффициента трансформации, вследствие чего автотрансформаторы используются лишь в тех случаях, где требуется сравнительно небольшое трансформирование – не более чем в 1,5-2 раза.

## **Сварочный трансформатор**

Конструктивное отличие сварочного трансформатора от силового в том, что во вторичную обмотку последовательно включается дополнительная катушка (дроссель). Она представляет собой магнитопровод с обмоткой, сопротивление которой намного больше индуктивного сопротивления обмоток трансформатора. При разомкнутой цепи сварки напряжение между электродом и объектом равно напряжению холостого хода. При касании объекта электродом в цепи возникает ток короткого замыкания, зажигается дуга, но напряжение уменьшается, вследствие падения напряжения на дополнительной катушке. Плавным регулированием воздушного зазора магнитопровода регулируют ток сварки.

### **1.4 Лекция № 4 (2 часа).**

**Тема: «Элементная база современных электронных устройств»**

#### **1.4.1 Вопросы лекции:**

1. Предмет курса. Краткая историческая справка. Основные определения.
2. Пассивные компоненты электронных устройств.
3. Электронно-дырочные переходы и приборы на их основе.
4. Биполярные транзисторы. Полевые транзисторы. Тиристоры. Элементы оптоэлектроники.

#### **1.4.2 Краткое содержание вопросов**

##### **1. Предмет курса. Краткая историческая справка. Основные определения.**

**Электроника** — наука о взаимодействии электронов с электромагнитными полями и методах создания электронных приборов и устройств для преобразования электромагнитной энергии, в основном для передачи, обработки и хранения информации.

Возникновению электроники предшествовало изобретение радио. Поскольку радиопередатчики сразу же нашли применение (в первую очередь на кораблях и в военном деле), для них потребовалась элементная база, созданием и изучением которой и занялась электроника. Элементная база первого поколения была основана на электронных лампах. Соответственно получила развитие вакуумная электроника. Её развитию способствовало также изобретение телевидения и радаров, которые нашли широкое применение во время Второй мировой войны.

Но электронные лампы обладали существенными недостатками. Это прежде всего большие размеры и высокая потребляемая мощность (что было критичным для переносных устройств). Поэтому начала развиваться твердотельная электроника, а в качестве элементной базы стали применять диоды и транзисторы.

Дальнейшее развитие электроники связано с появлением компьютеров. Компьютеры, основанные на транзисторах, отличались большими размерами и потребляемой мощностью, а также низкой надежностью (из-за большого количества деталей). Для решения этих проблем начали применяться микросборки, а затем и микросхемы. Число элементов микросхем постепенно увеличивалось, стали появляться микропроцессоры. В настоящее время развитию электроники способствует также появление сотовой связи, а также различных беспроводных устройств, навигаторов, коммуникаторов, планшетов и т. п.

Основными вехами в развитии электроники можно считать:

- изобретения А. С. Поповым радио (7 мая 1895 года), и начало использования радиоприёмников,
- изобретение Ли де Форестом лампового триода, первого усилительного элемента,
- использование Лосевым полупроводникового элемента для усиления и генерации электрических сигналов,
- развитие твёрдотельной электроники,
- использование проводниковых и полупроводниковых элементов (работы Иоффе, Шотки),
- изобретение в 1947 году транзистора (Уильям Шокли, Джон Бардин и Уолтер Браттейн),
- создание интегральной микросхемы и последующее развитие микроэлектроники, основной области современной электроники.

Можно различать следующие области электроники:

- физика (микромира, полупроводников, электромагнитных волн, магнетизма, электрического тока и др.) — область науки, в которой изучаются процессы, происходящие с заряженными частицами,
- бытовая электроника — бытовые электронные приборы и устройства, в которых используется электрическое напряжение, электрический ток, электрическое поле или электромагнитные волны. (Например, телевизор, мобильный телефон, утюг, лампочка, электроплита, и др.).
- Энергетика выработка, транспортировка и потребление электроэнергии, электроприборы высокой мощности (например, электродвигатель, электрическая лампа, электростанция), электрическая система отопления, линия электропередачи.
- Микроэлектроника - электронные устройства, в которых в качестве активных элементов используются микросхемы:
- оптоэлектроника - устройства в которых используются электрический ток и потоки фотонов,

- звуко-видео-техника - устройства усиления и преобразования звука и видео изображений,
- цифровая микроэлектроника - устройства на микропроцессорах или логических микросхемах. Например: электронный калькулятор, компьютер, цифровой телевизор, мобильный телефон, принтер, робот, панель управления промышленным оборудованием, средствами транспорта, и другие бытовые и промышленные устройства.

Электронное устройство может включать в себя самые разные материалы и среды, где происходит обработка электрического сигнала с использованием разных физических процессов. Но в любом устройстве обязательно имеется электрическую цепь.

Изучению различных аспектов электроники посвящены многие научные дисциплины технических вузов.

## 2. Пассивные компоненты электронных устройств.

**Резистор** — пассивный элемент электрической цепи, в идеале характеризуемый только сопротивлением электрическому току, то есть для идеального резистора в любой момент времени должен выполняться закон Ома для участка цепи: мгновенное значение напряжения на резисторе пропорционально току проходящему через него  $U(t) = R \cdot I(t)$ . На практике же резисторы в той или иной степени обладают также паразитной ёмкостью, паразитной индуктивностью и нелинейностью вольт-амперной характеристики.

В зависимости от назначения резисторы подразделяются на 2 группы: 1) *общего назначения* (диапазоны номиналов 1 Ом – 10 МОм, номинальные мощности рассеивания 0,062 – 100 Вт); 2) *специального назначения*, которые подразделяются на: а) высокоомные резисторы (от десятков мегаом до сотен тераом, рабочее напряжение 100 – 400 В); б) высоковольтные (сопротивления до  $10^{11}$  Ом, рабочее напряжение единицы – десятки кВ); в) высокочастотные (имеют малые собственные емкости и индуктивности); г) прецизионные (повышенная точность – допуск 0,001 – 1%, стабильность, номиналы 0,1 Ом – 10 МОм, номинальные мощности рассеивания до 2 Вт).

Переменные резисторы подразделяются на *подстроечные* и *регулировочные*.

*Подстроечные* резисторы рассчитаны на проведение подстройки электрических режимов и имеют небольшую износостойчивость (до 1000 циклов перемещения подвижной части), а *регулировочные* – для проведения многократных регулировок. Они отличаются большей износостойчивостью (более 5000 циклов) и в зависимости от характера изменения их сопротивления при перемещении подвижной части делятся на резисторы с линейной А и нелинейной функциональными характеристиками: логарифмической Б, обратнологарифмической В, характеристиками типа И, Е.

Проводящий элемент резистора выполняют в виде пленки, осажденной на поверхность изоляционного основания; проволоки или микропроволоки; объемной конструкции.

В зависимости от материала, использованного для создания проводящего элемента, резисторы подразделяют на проволочные, непроволочные, металлофольговые (проводящий элемент выполнен из фольги, нанесенной на непроводящие основания). У проволочных и металлофольговых резисторов в качестве материала проводящего элемента используют манганин и никром.

Непроволочные резисторы можно подразделить на следующие группы: а) углеродистые и бороуглеродистые (проводящий элемент — пленка пиролитического углерода или его соединений, осажденная на непроводящее основание); б) металлоизделийные, металлопленочные или металлооксидные (проводящий элемент — микрокомпозиционный слой из диэлектрика и металла или пленки из металла, оксида металла или его сплавов; в) композиционные (проводящий элемент — гетерогенная система из нескольких компонентов, один из которых проводящий, например графит или сажа); г) полупроводниковые (проводящий элемент выполнен из полупроводникового материала).

По конструктивному исполнению резисторы изготавливают в нормальном и тропическом (всеклиматическом) вариантах и выполняют неизолированными (касание токоведущих частей не допускается), изолированными (касание токоведущих частей допускается), герметизированными, в том числе и вакуумными (герметично изолированными от окружающей среды).

Основные параметры резисторов.

1. Номинальные сопротивления.
2. Допускаемые отклонения сопротивлений от номинальных величин.
3. Номинальные мощности рассеивания (максимальная мощность, которую резистор может рассеивать без изменения своих параметров свыше значений, указанных в технической документации, при непрерывной электрической нагрузке и определенной температуре окружающей среды).
4. Предельное рабочее напряжение (напряжение, которое может быть приложено к резистору без нарушения его работоспособности).
5. Температурный коэффициент сопротивления (характеризует изменение сопротивления резистора при изменении температуры на 1°C)

$$TKC = \frac{\Delta R}{R_1 \Delta t} \cdot 100,$$

$R_1$  — сопротивление резистора при нормальной температуре;  $\Delta t$  - предельная разность между предельной положительной (отрицательной) и нормальной температурами;  $\Delta R$  —

алгебраическая разность между значениями сопротивлений, измеренными при предельной положительной (отрицательной) и нормальной температурами.

6. Уровень собственных шумов D (мкВ/В).

7. Максимальная температура окружающей среды для номинальной мощности рассеивания.

8. Влагоустойчивость и термостойкость.

**Конденсатор** – элемент электрической цепи, состоящий из проводящих электродов (обкладок), разделенных диэлектриком и предназначенный для использования его емкости.

Емкость конденсатора есть отношение заряда конденсатора к разности потенциалов, которую заряд сообщает конденсатору:

$$C=q/u$$

C – емкость, Ф; q – заряд, Кл; u – разность потенциалов на обкладках конденсатора, В.

За единицу емкости принимают емкость такого конденсатора, у которого потенциал возрастает на один вольт при сообщении ему заряда один кулон (Кл). Эту единицу называют фарадой (Ф). Для практических целей она слишком велика, поэтому на практике используют более мелкие единицы емкости: микрофараду (мкФ), нанофараду (нФ) и пикофараду (пФ).

Для конденсатора, обкладки которого представляют собой плоские пластины одинакового размера, разделенные диэлектриком, емкость (Ф) определяется из выражения

$$C=(\epsilon_0\epsilon S)/d$$

$\epsilon_0$  – электрическая постоянная, равная  $8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость диэлектрика (безразмерная); S – площадь пластины, м<sup>2</sup>; d – толщина диэлектрика, м.

В качестве диэлектрика в конденсаторах используются органические и неорганические материалы, в том числе оксидные пленки некоторых металлов.

При приложении к конденсатору постоянного напряжения происходит его заряд; при этом затрачивается определенная работа, выражаемая в Дж. Она равна запасенной потенциальной энергии

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C}$$

Конденсатор в цепи постоянного тока может проводить ток в момент включения его в цепь (происходит заряд или перезаряд конденсатора), по окончании переходного процесса ток через конденсатор не течёт, так как его обкладки разделены диэлектриком. В цепи же переменного тока он проводит колебания переменного тока посредством циклической перезарядки конденсатора, замыкаясь так называемым током смещения.

### **Классификация конденсаторов**

В зависимости от назначения можно условно разделить конденсаторы на конденсаторы общего и специального назначения. Конденсаторы общего назначения используются практически в большинстве видов и классов аппаратуры. Традиционно к ним относят наиболее распространённые низковольтные конденсаторы, к которым не предъявляются особые требования. Все остальные конденсаторы являются специальными. К ним относятся высоковольтные, импульсные, помехоподавляющие, дозиметрические, пусковые и другие конденсаторы.

Также различают конденсаторы по форме обкладок: плоские, цилиндрические, сферические и другие.

Основная классификация конденсаторов проводится по *типу диэлектрика в конденсаторе*. Тип диэлектрика определяет основные электрические параметры конденсаторов: сопротивление изоляции, стабильность ёмкости, величину потерь и др.

По виду диэлектрика различают:

- Конденсаторы вакуумные (обкладки без диэлектрика находятся в вакууме).
- Конденсаторы с газообразным диэлектриком.
- Конденсаторы с жидким диэлектриком.
- Конденсаторы с твёрдым неорганическим диэлектриком: стеклянные (стеклоэмалевые, стеклокерамические, стеклоплёночные), слюдяные, керамические, тонкослойные из неорганических плёнок.
  - Конденсаторы с твёрдым органическим диэлектриком: бумажные, металлобумажные, плёночные, комбинированные — бумажноплёночные, тонкослойные из органических синтетических плёнок.
  - Электролитические и оксидно-полупроводниковые конденсаторы. Такие конденсаторы отличаются от всех прочих типов прежде всего большой удельной ёмкостью. В качестве диэлектрика используется оксидный слой на металлическом аноде. Вторая обкладка (катод) — это или электролит (в электролитических конденсаторах), или слой полупроводника (в оксидно-полупроводниковых), нанесённый непосредственно на оксидный слой. Анод изготавляется, в зависимости от типа конденсатора, из алюминиевой, ниобиевой или танталовой фольги или спечённого порошка.
  - Твердотельные конденсаторы — вместо традиционного жидкого электролита используется специальный токопроводящий органический полимер или полимеризованный органический полупроводник. Время наработки на отказ ~50000 часов при температуре 85°C. ЭПС меньше чем у жидкого-электролитических и слабо зависит от температуры. Не взрываются.

### **Основные параметры постоянных конденсаторов.**

#### 1. Номинальное значение ёмкости конденсатора.

2. Допускаемое отклонение действительной емкости от номинального значения (в %).

3. Тангенс угла потерь или добротность  $Q$  ( $Q=1/\tan\delta$ ).

4. Ток утечки (в основном для электролитических конденсаторов).

5. Сопротивление изоляции или постоянная времени саморазряда. Сопротивление изоляции определяют из формулы  $R_{из}=U_0/I_{ут}$  где  $U_0$  – постоянное напряжение, приложенное к конденсатору, вызвавшее ток утечки  $I_{ут}$ .

6. Температурные коэффициент емкости.

7. Номинальное напряжение.

### **3. Электронно-дырочные переходы и приборы на их основе.**

Электрический переход в полупроводнике — это граничный слой между двумя областями, физические характеристики которых существенно различаются.

Переходы между двумя областями полупроводника с различным типом электропроводности называют электронно-дырочными или p-n-переходами.

Переходы между двумя областями с одним типом электропроводности (*n*- или p-типа), отличающиеся концентрацией примесей и соответственно значением удельной проводимости, называют электронно-электронными ( $n^+ - n'$ -переход) или дырочно-дырочными ( $p^+ - p'$ -переход), причем знак «+» в обозначении одного из слоев показывает, что концентрация носителей заряда одного типа в этом слое значительно выше, чем во втором, и поэтому слой имеет меньшее удельное электрическое сопротивление.

Переходы между двумя полупроводниковыми материалами, имеющими различную ширину запрещенной зоны, называют гетеропереходами. Если одна из областей, образующих переход, является металлом, то такой переход называют переходом металл — полупроводник.

Электрические переходы нельзя создать путем механического контакта двух областей с разными физическими свойствами, хотя при рассмотрении физических процессов такая абстракция обычно используется. Это объясняется тем, что поверхности кристаллов обычно загрязнены оксидами и атомами других веществ. Существенную роль играет воздушный зазор, устраниить который при механическом контакте практически невозможно.

**Полупроводниковым диодом** называется полупроводниковый прибор с одним выпрямляющим электрическим переходом, имеющим два вывода.

Структура полупроводникового диода с электронно-дырочным переходом и его условное графическое обозначение приведены на рис. 1.

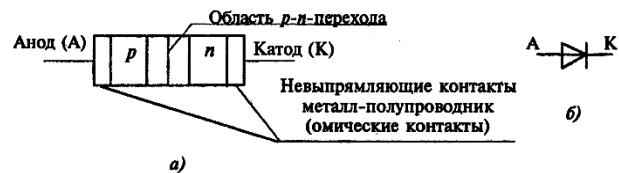


Рис. 1. Схема структуры полупроводникового диода (а)

и его графическое обозначение (б)

Буквами  $p$  и  $n$  обозначены слои полупроводника с проводимостями соответственно  $p$ -типа и  $n$ -типа. В контактирующих слоях полупроводника имеет место диффузия дырок из слоя  $p$  в слой  $n$ , причиной которой является то, что их концентрация в слое  $p$  значительно больше их концентрации в слое  $n$ . В итоге в приграничных областях слоя  $p$  и слоя  $n$  возникает так называемый обедненный слой, в котором мала концентрация подвижных носителей заряда (электронов и дырок). Обедненный слой имеет большое удельное сопротивление. Ионы примесей обедненного слоя не компенсированы дырками или электронами. В совокупности ионы образуют некомпенсированные объемные заряды, создающие электрическое поле с напряженностью  $E$ . Это поле препятствует переходу дырок из слоя  $p$  в слой  $n$  и переходу электронов из слоя  $n$  в слой  $p$ . Оно создает так называемый дрейфовый поток подвижных носителей заряда, перемещающий дырки из слоя  $n$  в слой  $p$  и электроны из слоя  $p$  в слой  $n$ . Таким образом, в зависимости от полярности проходящего через диод тока, проводимость диода существенно изменяется, приводя к изменению величину проходящего тока.

Основные характеристики полупроводникового диода представляются его вольт-амперной характеристикой (ВАХ). Вольт-амперная характеристика – это зависимость тока  $i$ , протекающего через диод, от напряжения  $u$ , приложенного к диоду. Вольт-амперной характеристикой называют и график этой зависимости (рис. 2).

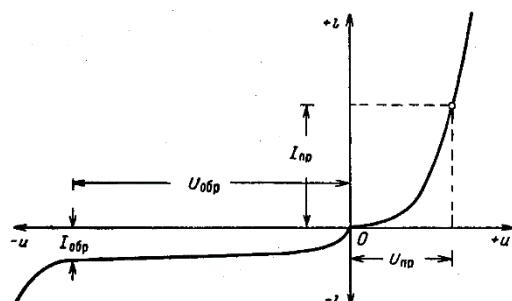


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика и основные параметры полупроводникового диода

**Диод Шоттки.** В диоде Шоттки используется не  $p$ - $n$ -переход, а выпрямляющий контакт металл-полупроводник. Условное графическое обозначение диода Шоттки представлено на рис. 3, б.

В обычных условиях прямой ток, образованный электронами зоны проводимости, переходящими из полупроводника в металл, имеет очень малую величину. Это является следствием недостатка электронов, энергия которых позволила бы им преодолеть данный барьер.

Для увеличения прямого тока необходимо «разогреть» электроны в полупроводнике, поднять их энергию. Такой разогрев может быть осуществлен с помощью электрического поля.

Если подключить источник внешнего напряжения плюсом к металлу, а минусом к полупроводнику *n*-типа, то потенциальный барьер понизится и через переход начнет протекать прямой ток. При противоположном подключении потенциальный барьер увеличивается и ток оказывается весьма малым.

Диоды Шоттки – очень быстродействующие приборы, они могут работать на частотах до десятков гигагерц ( $1 \text{ ГГц} = 1 \cdot 10^9 \text{ Гц}$ ). У диода Шоттки может быть малый обратный ток и малое прямое напряжение (при малых прямых токах) – около  $0,5 \text{ В}$ , что меньше, чем у кремниевых приборов. Максимально допустимый прямой ток может составлять десятки и сотни ампер, а максимально допустимое напряжение – сотни вольт.

**Стабилитрон.** Это полупроводниковый диод, сконструированный для работы в режиме электрического пробоя. Условное графическое обозначение стабилитрона представлено на рис. 3.а.

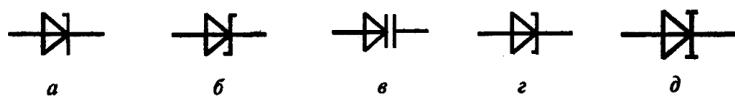


Рис. 3. Графическое изображение полупроводниковых диодов: а) стабилитрон; б) диод Шоттки; в) варикап; г) туннельный диод; д) обращенный диод

В указанном режиме при значительном изменении тока стабилитрона напряжение изменяется незначительно, т. е. стабилитрон стабилизирует напряжение. Вольт-амперная характеристика кремниевого стабилитрона Д814Д представлена на рис. 4.

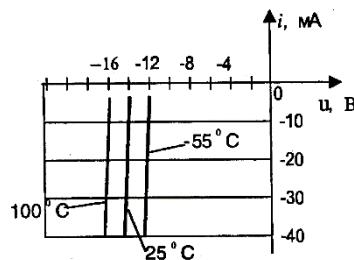


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика кремниевого стабилитрона Д814Д

В стабилитронах может иметь место и туннельный, и лавинный, и смешанный пробой в зависимости от удельного сопротивления базы.

В стабилитронах с низкоомной базой (низковольтных, до  $5,7\text{ V}$ ) имеет место туннельный пробой, а в стабилитронах с высокоомной базой (высоковольтных) – лавинный пробой.

Основными являются следующие параметры стабилитрона:

1.  $U_{cm}$  – напряжение стабилизации (при заданном токе в режиме пробоя);
2.  $I_{cm\text{.min}}$  – минимально допустимый ток стабилизации;
3.  $I_{cm\text{.max}}$  – максимально допустимый ток стабилизации;
4.  $r_{cm}$  – дифференциальное сопротивление стабилитрона (на участке пробоя),  $r_{cm} = du/di$ ;
5.  $\alpha_{U_{cm}}$  (ТКН) – температурный коэффициент напряжения стабилизации.

Величины  $U_{cm}$ ,  $I_{cm\text{.min}}$  и  $I_{cm\text{.max}}$  принято указывать как положительные.

Для примера применения стабилитрона обратимся к схеме так называемого параметрического стабилизатора напряжения (рис. 5.). Легко заметить, что если напряжение  $u_{ex}$  настолько велико, что стабилитрон находится в режиме пробоя, то изменения этого напряжения практически не вызывают изменения напряжения  $u_{bx}$  (при изменении напряжения  $u_{ex}$  изменяется только ток  $i$ , а также напряжение  $u_R = i \cdot R$ ).

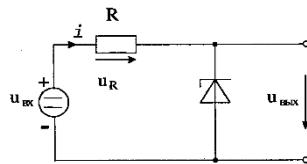


Рис. 5. Схема параметрического стабилизатора напряжения

Стабилитрон является быстродействующим прибором и хорошо работает в импульсных схемах.

**Стабистор.** Это полупроводниковый диод, напряжение на котором при прямом включении (около  $0,7\text{ V}$ ) мало зависит от тока (прямая ветвь на соответствующем участке почти вертикальная). Стабистор предназначен для стабилизации малых напряжений.

**Светодиодом** называется полупроводниковый диод, предназначенный для преобразования электрической энергии в энергию некогерентного светового излучения. При протекании через диод прямого тока происходит инжекция неосновных носителей заряда (электронов или дырок) в базовую область диодной структуры. Процесс самопроизвольной рекомбинации инжектированных неосновных носителей заряда, происходящих как в базовой области, так и в самом p-n переходе, сопровождается переходом их с высокого энергетического

уровня на более низкий; при этом избыточная энергия выделяется путем излучения кванта света.

Чтобы кванты энергии – фотоны, освободившиеся при рекомбинации, соответствовали квантам видимого света, ширина запрещенной зоны исходного полупроводника должна быть относительно большой ( $E_g > 1,8$  эВ). Исходя из этого ограничения, для изготовления светодиодов используются следующие полупроводниковые материалы: фосфид галлия (GaP), карбид кремния (SiC), твердые растворы: галлий—мышьяк—фосфор (GaAsP) и галлий—мышьяк—алюминий (GaAsAl), а также нитрид галлия (GaN), который имеет наибольшую ширину запрещенной зоны ( $E_g > 3,4$  эВ), что позволяет получать излучение в коротковолновой части видимого спектра вплоть до фиолетового.

Обычно излучение светодиодов является монохроматическим с оговоренной для каждого типа максимальной длиной волны, имеющей незначительный разброс внутри каждого типа. Светодиоды с управляемым цветом свечения изготавливаются на основе двух светоизлучающих переходов, один из которых имеет резко выраженный максимум спектральной характеристики в красной полосе, другой — в зеленой. При совместной работе цвет результирующего излучения зависит от соотношения токов через переходы. Основным технологическим методом изготовления светодиодов является метод эпитаксиального наращивания. Это жидкофазная эпитаксия или эпитаксия из газовой фазы. В некоторых случаях, в основном, при использовании карбида кремния, применяется метод диффузии примесей (акцепторных или донорных) из газовой фазы, проводящийся внутри кварцевых ампул.

**Фотодиоды** – селективные регистрирующие фотоэлектрические ПЛЭ, основанные на явлении фотовольтаического эффекта в полупроводниковом контактном переходе и предназначенные как для работы с приложением внешнего напряжения, так и без него.

Фотовольтаическим эффектом – (фотогальваническим, вентильным) – называют форму внутреннего фотоэффекта в полупроводниках со свойствами, неоднородными для движения фотоносителей даже при отсутствии внешнего напряжения, при которой оптически генерированные неравновесные носители заряда пространственно разделяются в объеме полупроводника вследствие его неоднородности, образуя при этом пространственно разделенные объемные заряды и, следовательно, разность потенциалов между участками облученного образца, называемую фото ЭДС ( $V_F$ ).

Фотодиод представляет собой пластинку полупроводникового материала, внутри которого имеются области примесной электронной ( $n$  – область) и дырочной ( $p$  – область) проводимостей. Границу между этими областями называют контактным  $p$ - $n$  переходом (рис. 6). Электронная и дырочная области снабжены невыпрямляющими контактами с

присоединенными к ним выводами, с помощью которых осуществляется связь с внешней цепью. С целью предохранения чувствительного слоя фотодиода от воздействия внешней среды он покрывается лаком или монтируется в герметичном корпусе, изготовленном или из металла (со стеклянным входным окном) или из пластмасс.

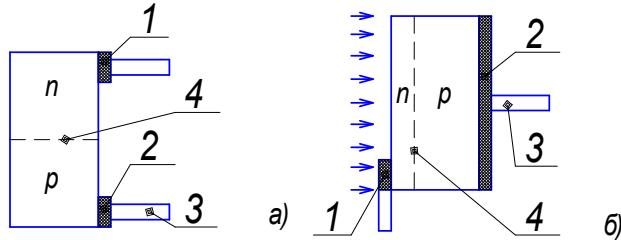


Рис. 6. Принципиальная схема фотодиода.

- а) – направление светового пучка параллельно плоскости  $p - n$  перехода;
- б) – световой пучок и плоскость  $p - n$  перехода взаимно перпендикулярны.

1 – контакт  $n$  – области; 2 – контакт  $p$  – области; 3 – выводы; 4 –  $p - n$  переход.

#### 4. Биполярные транзисторы. Полевые транзисторы. Тиристоры. Элементы оптоэлектроники.

**Биполярный транзистор** – это полупроводниковый прибор с двумя  $p-n$ -переходами, имеющий три вывода. Действие биполярного транзистора основано на использовании носителей заряда обоих знаков (дырок и электронов), а управление протекающим через него током осуществляется с помощью управляющего тока.

Биполярный транзистор является наиболее распространенным активным полупроводниковым прибором.

**Устройство транзистора.** Биполярный транзистор в своей основе содержит три слоя полупроводника ( $p-n-p$  или  $n-p-n$ ) и соответственно два  $p-n$ -перехода. Каждый слой полупроводника через невыпрямляющий контакт металл-полупроводник подсоединен к внешнему выводу.

Средний слой и соответствующий вывод называют базой, один из крайних слоев и соответствующий вывод называют эмиттером, а другой крайний слой и соответствующий вывод – коллектором.

На рис. 7,а показано схематическое, упрощенное изображение структуры транзистора типа  $n-p-n$  и два допустимых варианта условного графического обозначения (рис. 7,б).

Транзистор  $p-n-p$  устроен аналогично, упрощенное изображение его структуры дано на рис. 8, а. Более простой вариант условного графического обозначения – на рис. 8,б.

Транзистор называют биполярным, так как в процессе протекания электрического тока участвуют носители электричества двух знаков – электроны и дырки. Но в различных типах транзисторов роль электронов и дырок различна. Транзисторы типа  $n-p-n$  более распространены

в сравнении с транзисторами типа  $p-n-p$ , так как обычно имеют лучшие параметры. Это можно объяснить тем, что основную роль в электрических процессах в транзисторах типа  $n-p-n$  играют электроны, а транзисторах типа  $p-n-p$  – дырки. Электроны же обладают подвижностью в два-три раза большей, чем дырки.

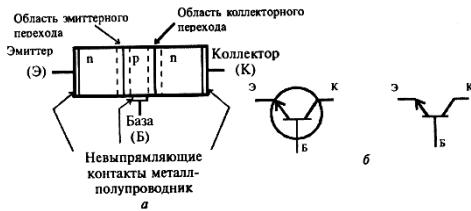


Рис. 7. Структура транзистора типа  $n-p-n$  (а)  
и его графическое обозначение (б)

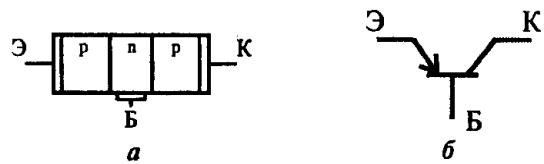


Рис. 8. Структура транзистора типа  $p-n-p$  (а)  
и его графическое обозначение (б)

Важно отметить, что реально площадь коллекторного перехода значительно больше площади эмиттерного перехода, так как такая несимметрия значительно улучшает свойства транзистора.

**Три схемы включения биполярного транзистора с ненулевым сопротивлением нагрузки.** Транзисторы часто применяют для усиления переменных сигналов (которые при расчетах обычно считают синусоидальными), при этом в выходной цепи транзистора применяется нагрузка с ненулевым сопротивлением.

Во входной цепи, кроме источника постоянного напряжения, необходимого для обеспечения активного режима работы, также используют источник входного переменного напряжения. Представим три характерные схемы включения транзистора.

**Схема с общей базой (ОБ)** (рис. 9). Если сопротивление нагрузки достаточно велико, то амплитуда переменной составляющей напряжения  $u_{вых}$  значительно больше амплитуды напряжения  $u_{вх}$ . Учитывая, что  $i_{вых} \approx i_{вх}$ , можно утверждать, что схема не обеспечивает усиления тока, но усиливает напряжение. Входной ток такой схемы достаточно большой, а соответствующее входное сопротивление мало.

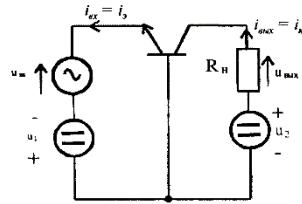


Рис. 9. Схема включения транзистора с общей базой (ОБ)

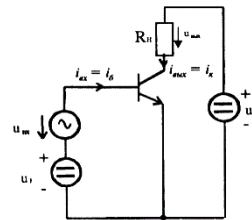


Рис. 10. Схема включения транзистора с общим эмиттером (ОЭ)

**Схема с общим эмиттером (ОЭ)** (рис. 10). Так как  $i_{\text{вых}} \gg i_{\text{ex}}$ , а при достаточно большом сопротивлении  $R_h$  амплитуда переменной составляющей напряжения  $u_{\text{вых}}$  значительно больше амплитуды напряжения  $u_{\text{ex}}$ , следовательно, схема обеспечивает усиление и тока, и напряжения.

Входной ток схемы достаточно мал, поэтому входное сопротивление больше, чем у схемы с общей базой.

**Схема с общим коллектором (ОК)** (рис. 11). При определении переменных составляющих токов и напряжений источники постоянного напряжения  $u_1$  и  $u_2$  заменяют закоротками (закорачивают).

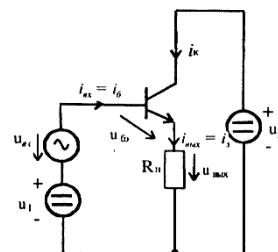


Рис. 11. Схема включения транзистора с общим коллектором (ОК)

После этого к коллектору оказываются подключенными и источник входного напряжения  $u_{\text{ex}}$ , и сопротивление нагрузки. Отсюда и название – схема с общим коллектором.

Напряжение  $u_{\text{бз}}$  и особенно его переменная составляющая достаточно малы, поэтому амплитуда переменной составляющей напряжения  $u_{\text{ex}}$  примерно равна амплитуде переменной составляющей напряжения  $u_{\text{вых}}$ . Поэтому схемы с общим коллектором называют эмиттерным повторителем.

Учитывая, что  $i_{\text{вых}} \gg i_{\text{ex}}$ , можно отметить, что схема усиливает ток, но не усиливает напряжение.

Схема отличается повышенным входным сопротивлением, так как при увеличении входного напряжения увеличению входного тока препятствует увеличение как напряжения  $u_{\text{бз}}$ , так и напряжения  $u_{\text{вых}}$ .

На практике наиболее часто используется схема с общим эмиттером.

### h – параметры транзистора

При определении переменных составляющих токов и напряжений (т. е. при анализе на переменном токе) и при условии, что транзистор работает в активном режиме, его часто представляют в виде линейного четырехполюсника (рис. 12). В четырехполюснике условно изображен транзистор с общим эмиттером.

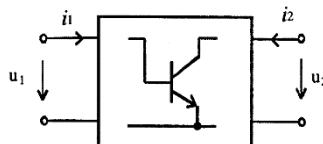


Рис. 12. Транзистор в виде четырехполюсника

Для разных схем включения транзистора токи и напряжения этого четырехполюсника обозначают различные токи и напряжения транзистора. Например, для схемы с общим эмиттером эти токи и напряжения следующие:

$i_1$  – переменная составляющая тока базы;

$u_1$  – переменная составляющая напряжения между базой и эмиттером;

$i_2$  – переменная составляющая тока коллектора;

$u_2$  – переменная составляющая напряжения между коллектором и эмиттером.

Транзистор удобно описывать, используя так называемые h-параметры.

Входное сопротивление транзистора для переменного сигнала (при закороченном выходе:  $u_2=0$ ) :

$$h_{11} = \left. \frac{u_1}{i_1} \right|_{u_2=0} .$$

Аналогично

$$h_{12} = \left. \frac{u_1}{u_2} \right|_{i_2=0} \quad \text{- коэффициент обратной связи по напряжению.}$$

Режим работы при  $i_1=0$  называют холостым ходом на входе.

Далее

$$h_{21} = \left. \frac{i_2}{i_1} \right|_{u_2=0} \quad \text{- коэффициент передачи тока,}$$

$$h_{22} = \left. \frac{i_2}{u_2} \right|_{i_1=0} \quad \text{- выходная проводимость.}$$

При этом

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ u_2 \end{bmatrix},$$

т. е.

$$\begin{aligned} u_1 &= h_{11} \cdot i_1 + h_{12} \cdot u_2; \\ i_2 &= h_{21} \cdot i_1 + h_{22} \cdot u_2. \end{aligned}$$

Коэффициенты  $h_{ij}$  определяются опытным путем. Параметры, соответствующие схеме с общим эмиттером, обозначаются буквой «Э», а схеме с общей базой – буквой «Б».

**Полевыми транзисторами** называют активные полупроводниковые приборы, в которых выходным током управляют с помощью электрического поля (в биполярных транзисторах выходной ток управляется входным током).

Полевые транзисторы называют также униполярными, так как в процессе протекания электрического тока участвуют только основные носители.

Различают два вида полевых транзисторов: с управляющим переходом и с изолированным затвором.

**Устройство полевого транзистора.** Схематическое изображение структуры полевого транзистора с управляющим переходом и каналом  $p$ -типа приведено на рис. 13, а условное графическое обозначение этого транзистора – на рис. 14, а. Стрелка указывает направление от слоя  $p$  к слою  $n$  (как и стрелка в изображении эмиттера биполярного транзистора). В интегральных микросхемах линейные размеры транзисторов могут быть меньше 1 мкм.

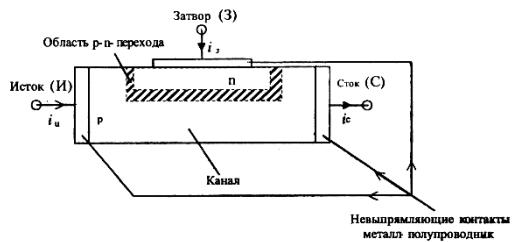


Рис. 13. Структура полевого транзистора

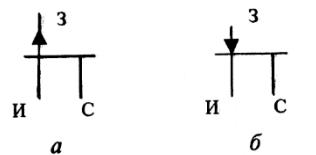


Рис. 14. Графическое изображение полевого транзистора:

а) с управляющим переходом и каналом  $p$ -типа;

б) с управляющим  $p-n$ -переходом и каналом  $n$ -типа

Удельное сопротивление слоя  $n$  (затвора) намного меньше удельного сопротивления слоя  $p$  (канала), поэтому область  $p-n$ -перехода, обедненная подвижными носителями заряда и имеющая очень большое удельное сопротивление, расположена главным образом в слое  $p$ .

Если типы проводимости слоев полупроводника в рассмотренном транзисторе изменить на противоположные, то получим полевой транзистор с управляющим *p-n*-переходом и каналом *n*-типа. Его условное графическое обозначение представлено на рис. 14,б.

**Схемы включения транзистора.** Для полевого транзистора, как и для биполярного, выделяют три схемы включения. Для полевого транзистора это схемы с общим затвором (ОЗ), общим истоком (ОИ) и общим стоком (ОС). Наиболее часто используют схемы с общим истоком (рис. 15).

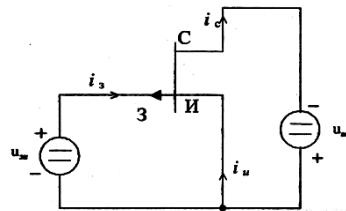


Рис. 15. Схема включения полевого транзистора с общим истоком (ОИ)

Так как в рабочем режиме  $i_3 \approx 0$ , а  $i_u \approx i_c$ , входными характеристиками обычно не пользуются. Например, для транзистора КП103Л для тока утечки затвора  $I_{3,ym}$  при  $t < 85^\circ\text{C}$  выполняется условие  $I_{3,ym} \leq 2 \mu\text{A}$ .

**Выходные (стоковые) характеристики.** Выходной характеристикой называют зависимость вида

$$i_c = f(u_{uc}) \Big|_{u_{3u} = \text{const}},$$

где  $f$  – некоторая функция.

Полевой транзистор характеризуется следующими предельными параметрами (смысл которых понятен из обозначений):  $U_{uc,\text{макс}}$ ,  $U_{3c,\text{макс}}$ ,  $P_{\text{макс}}$ .

Для транзистора КП103Л  $U_{uc,\text{макс}}=10 \text{ B}$ ,  $U_{3c,\text{макс}}=15 \text{ B}$ ,  $P_{\text{макс}}=120 \text{ mBt}$  (все при  $t=85^\circ\text{C}$ ).

**Стокозатворные характеристики** (характеристики передачи, передаточные, переходные, проходные характеристики). Стокозатворной характеристикой называют зависимость вида

$$i_c = f(u_{3u}) \Big|_{u_{uc} = \text{const}},$$

где  $f$  – некоторая функция.

Такие характеристики не дают принципиально новой информации по сравнению с выходными, но иногда более удобны для использования. Для некоторых транзисторов задается максимальное (по модулю) допустимое отрицательное напряжение  $u_{3u}$ , например, для транзистора 2П103Д это напряжение не должно быть по модулю больше чем  $0,5 \text{ B}$ .

*Параметры, характеризующие свойства транзистора усиливать напряжение.*

*Крутизна стокозатворной характеристики S ( крутизна характеристики полевого транзистора):*

$$S = \left| \frac{di_c}{du_{zu}} \right|_{\substack{u_{zu} = \text{заданное} \\ u_{uc} = \text{const}}} .$$

Обычно задается  $u_{zu}=0$ . При этом для транзисторов рассматривается крутизна максимальная Для КП103Л  $S=1,8\dots3,8\text{ mA/B}$  при  $u_{uc}=0$ ,  $t=20^\circ\text{C}$ .

*Внутреннее дифференциальное сопротивление  $R_{uc, \text{диф}}$  (внутреннее сопротивление) определяется выражением:*

$$R_{uc, \text{диф}} = \left| \frac{du_{uc}}{di_c} \right|_{\substack{u_{uc} = \text{заданное} \\ u_{zu} = \text{const}}} .$$

Для КП103Л  $R_{uc, \text{диф}} \approx 25\text{ kOm}$  при  $u_{uc}=10\text{ B}$ ,  $u_{zu}=0$ .

*Коэффициент усиления*

$$M = \left| \frac{du_{uc}}{du_{zu}} \right|_{\substack{u_{uc} = \text{заданное} \\ i_c = \text{const}}} .$$

Можно отметить, что

$$M = S \cdot R_{uc, \text{диф}} .$$

Для КП103Л при  $S=2\text{ mA/B}$  и  $R_{uc, \text{диф}}=25\text{ kOm}$   $M=2\text{ (mA/B)} \cdot 25\text{ kOm}=50$ .

Принципы управления параметрами электронного активного элемента, заложенные в полевых транзисторах, могут быть реализованы в более сложных электронных устройствах. К таким устройствам можно отнести ячейку памяти на основе полевого транзистора с изолированным затвором (флэш-память). Устройства флэш-памяти являются современными быстродействующими программируемыми постоянными запоминающими устройствами (ППЗУ) с электрической записью и электрическим стиранием информации (ЭСП-ПЗУ). Эти устройства являются энергонезависимыми, так как информация не стирается при отключении питания, выдерживают не менее 100 000 циклов записи/стирания.

Одной из разновидностей приборов, реализующих принципы полевых транзисторов, являются *полупроводниковые приборы с зарядовой связью (ПЗС)*. Приборы с зарядовой связью используются: в запоминающих устройствах ЭВМ; в устройствах преобразования световых (оптических) сигналов в электрические.

**Тиристорами** называют полупроводниковые приборы с двумя устойчивыми режимами работы (включен, выключен), имеющие три или более  $p-n$ -переходов.

Тиристор по принципу действия – прибор ключевого типа. Во включенном состоянии он подобен замкнутому ключу, а в выключенном – разомкнутому ключу. Те тиристоры, которые

не имеют специальных электродов для подачи сигналов с целью изменения состояния, а имеют только два силовых электрода (анод и катод), называют неуправляемыми, или диодными, тиристорами (динаисторами). Приборы с управляемыми электродами называют управляемыми тиристорами, или просто тиристорами.

Тиристоры являются основными элементами в силовых устройствах электроники, которые называют также устройствами преобразовательной техники (управляемые выпрямители, инверторы и т. п.).

Существует большое количество различных тиристоров. Наиболее часто используют незапираемые тиристоры с тремя выводами, управляемые по катоду. Такие тиристоры содержат два силовых и один управляемый электрод и проводят ток только в одном направлении.

Упрощенное изображение структуры тиристора представлено на рис. 16, а его условное графическое обозначение – на рис. 17.

Обратимся к простейшей схеме с тиристором (рис. 18), где использованы следующие обозначения:

- $i_a$  – ток анода (силовой ток в цепи анод-катод тиристора);
- $u_{ak}$  – напряжение между анодом и катодом;
- $i_y$  – ток управляющего электрода (в реальных схемах используют импульсы тока);
- $u_{yk}$  – напряжение между управляющим электродом и катодом;
- $u_{num}$  – напряжение питания.

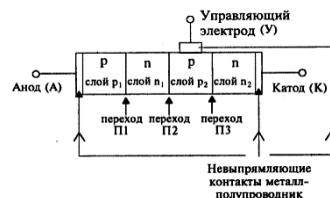


Рис. 16. Структурная схема тиристора



Рис. 17. Графическое изображение тиристора

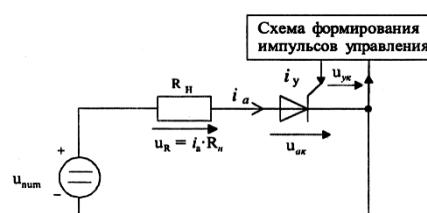


Рис. 18. Схема управления с применением тиристора

Предположим, что напряжение питания меньше так называемого напряжения переключения  $U_{nep}$  ( $u_{num} < U_{nep}$ ) и что после подключения источника питания импульс управления на тиристор не подавался. Тогда тиристор будет находиться в закрытом (выключенном) состоянии. При этом ток тиристора будет малым ( $i_a = 0$ ) и будут выполняться соотношения  $u_{ak} \approx u_{num}$ ,  $u_R \approx 0$  (нагрузка отключена от источника питания).

Если предположить, что выполняется соотношение  $u_{num} > U_{nep}$  или что после подключения источника питания (даже при выполнении условия  $u_{num} < U_{nep}$ ) был подан импульс управления достаточной величины, то тиристор будет находиться в открытом (включенном) состоянии. При этом для всех трёх переходов будут выполняться соотношения  $u_{ak} \approx 1 \text{ B}$ ,  $i_a \approx u_{num} / R_h$ ,  $u_R \approx u_{num}$  (т. е. нагрузка оказалась подключенной к источнику питания).

Существуют тиристоры, для которых напряжение  $U_{nep}$  больше 1  $kV$ , а максимально допустимый ток  $i_a$  больше, чем 1  $kA$ .

Характерной особенностью рассматриваемого незапираемого тиристора, который очень широко используется на практике, является то, что его нельзя выключить с помощью тока управления.

Для выключения тиристора на практике не него подают обратное напряжение  $u_{ak} < 0$  и поддерживают это напряжение в течение времени, большего так называемого времени выключения  $t_{выкл}$ . Оно обычно составляет единицы или десятки микросекунд. За это время избыточные заряды в слоях  $n_1$  и  $p_2$  исчезают. Для выключения тиристора напряжение источника питания  $u_{num}$  в приведенной выше схеме (см. рис. 6) должно изменить полярность.

После указанной выдержки времени на тиристор вновь можно подавать прямое напряжение ( $u_{ak} > 0$ ), и он будет выключенным до подачи импульса управления.

Существуют и широко используются так называемые симметричные тиристоры (симисторы, триаки). Каждый симистор подобен паре рассмотренных тиристоров, включенных встречно-параллельно (рис. 19). Условное графическое обозначение симистора показано на рис. 20.

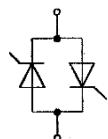


Рис. 19

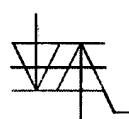


Рис. 20

**Оптоэлектронными называют** приборы, которые чувствительны к электромагнитному излучению в видимой, инфракрасной и ультрафиолетовой областях, а также приборы, производящие или использующие такое излучение.

Излучение в видимой, инфракрасной и ультрафиолетовой областях относят к оптическому диапазону спектра. Обычно к указанному диапазону относят электромагнитные волны с длиной от 1 нм до 1 мм, что соответствует частотам примерно от  $0,5 \cdot 10^{12}$  Гц до  $5 \cdot 10^{17}$  Гц. Иногда говорят о более узком диапазоне частот – от 10 нм до 0,1 мм ( $\sim 5 \cdot 10^{12} \dots 5 \cdot 10^{16}$  Гц). Видимому диапазону соответствуют длины волн от 0,38 мкм до 0,78 мкм (частота около  $10^{15}$  Гц).

На практике широко используются источники излучения (излучатели), приемники излучения (фотоприемники) и оптраны (оптопары).

Оптроном называют прибор, в котором имеется и источник, и приемник излучения, конструктивно объединенные и помещенные в один корпус.

Из источников излучения нашли широкое применение светодиоды и лазеры, а из приемников – фотодиоды, фототранзисторы и фототиристоры.

Широко используются оптраны, в которых применяются пары светодиод-фотодиод, светодиод-фототранзистор, светодиод-фототиристор.

Основные достоинства оптоэлектронных приборов:

- высокая информационная емкость оптических каналов передачи информации, что является следствием больших значений используемых частот;
- полная гальваническая развязка источника и приемника излучения;
- отсутствие влияния приемника излучения на источник (однонаправленность потока информации);
- невосприимчивость оптических сигналов к электромагнитным полям (высокая помехозащищенность).

**Оптрон** – полупроводниковый прибор, содержащий источник излучения и приемник излучения, объединенных в одном корпусе и связанные между собой оптически, электрически и одновременно обеими связями. Очень широко распространены оптраны, у которых в качестве приемника излучения используются фотодиод, фототранзистор и фототиристор.

В резисторных оптранах выходное сопротивление при изменении режима входной цепи может изменяться в  $10^7 \dots 10^8$  раз. Кроме того, вольт-амперная характеристика фотодиода отличается высокой линейностью и симметричностью, что обуславливает широкую применимость резистивных оптопар в аналоговых устройствах. Недостатком резисторных оптранов является низкое быстродействие – 0,01…1 с.

В цепях передачи цифровых информационных сигналов применяются главным образом диодные и транзисторные оптраны, а для оптической коммутации высоковольтных сильноточных цепей – тиристорные оптраны. Быстродействие тиристорных и транзисторных

оптранов характеризуется временем переключения, которое часто лежит в диапазоне 5...50 мкс.

Рассмотрим подробнее оптопару светодиод-фотодиод (рис.21,а). Излучающий диод (слева) должен быть включен в прямом направлении, а фотодиод – в прямом (режим фотогенератора) или обратном направлении (режим фотопреобразователя). Направления токов и напряжений диодов оптопары приведены на рис. 21,б.

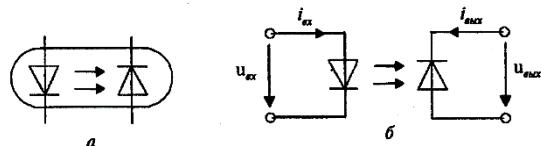


Рис. 21. Схема оптопары (а) и направление токов и напряжений в ней (б)

Изобразим зависимость тока  $i_{вых}$  от тока  $i_{вх}$  при  $u_{вых}=0$  для оптопары АОД107А (рис. 21). Указанная оптопара предназначена для работы как в фотогенераторном, так и в фотопреобразовательном режиме.

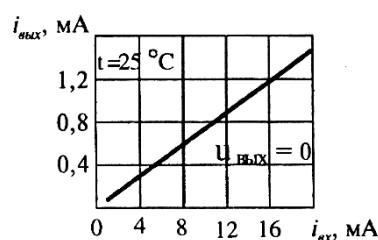


Рис. 22. Передаточная характеристика оптопары АОД107А

### Фототранзистор и фототиристор

Выходные характеристики фототранзистора подобны выходным характеристикам обычного биполярного транзистора, в котором положение характеристик определяется не током базы, а уровнем освещенности (или величиной светового потока).

Свойства фототиристора подобны свойствам обычного тиристора, однако с той лишь особенностью, что включение тиристора осуществляется не с помощью импульса тока управления, а с помощью светового импульса.

## 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

### 2.1 Лабораторная работа № 1 (2 часа).

**Тема: «Электрические цепи постоянного тока. Законы Кирхгофа»**

#### 2.1.1 Цель работы:

1. Экспериментально проверить справедливость законов Кирхгофа.
2. Экспериментально проверить справедливость принципа наложения.

#### 2.1.2 Задачи работы:

1. Освоить расчет сложной электрической цепи постоянного тока методом контурных токов.

### **2.1.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:**

1. Объектом исследования является сложная электрическая цепь постоянного тока с тремя источниками ЭДС и шестью ветвями. Исследования выполняются на компьютере с использованием программы MuLtisim

### **2.1.4 Описание (ход) работы:**

1. Собрать электрическую цепь по рисунку 1. На схеме в отчете указать направление токов всех ветвей в соответствии с полярностью установленных в цепи амперметров.

2. Установить параметры элементов цепи в соответствии с техническими характеристиками, выписанными из таблицы 1 по варианту, указанному преподавателем.

3. Провести измерение токов ветвей в режиме, когда действуют все источники ЭДС.

Результаты измерений занести в таблицу 2.

4. Отключить действие источников ЭДС E2 и E3, удалив их из цепи.

5. Провести измерение токов ветвей в режиме, когда действует источник E1. Результаты измерений занести в таблицу 2.

6. Отключить действие источников ЭДС E1 и E3, удалив их из цепи.

7. Провести измерение токов ветвей в режиме, когда действует источник E2. Результаты измерений занести в таблицу 2.

8. Отключить действие источников ЭДС E1 и E2, удалив их из цепи..

9. Провести измерение токов ветвей в режиме, когда действует источник E3. Результаты измерений занести в таблицу 2.

10. На основании полученных результатов выполнить проверку справедливости законов Кирхгофа. Составить уравнения для каждого узла цепи по первому закону Кирхгофа, подставить в них полученные в первом эксперименте токи и убедиться в справедливости уравнений. Составить уравнения для трех независимых контуров цепи по второму закону Кирхгофа, подставить в них полученные в первом эксперименте токи и убедиться в справедливости уравнений.

11. Выполнить проверку справедливости принципа наложения. Для этого рассчитать ток каждой ветви как сумму составляющих его токов от действия отдельных источников ЭДС. Составляющие токи – результаты экспериментов 2, 3, 4. Полученные токи занести в таблицу 3 и сравнить с результатами эксперимента 1 по таблице 2.

12. Используя метод контурных токов, теоретически рассчитать токи всех ветвей цепи. Результаты расчетов занести в таблицу 3 и сравнить с результатами эксперимента 1 по таблице 2.

13. Составить уравнение баланса мощности цепи, подставить в него результаты опыта 1 и убедиться в справедливости уравнения.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте законы Кирхгофа.
2. Опишите последовательность расчета цепи методом контурных токов.
3. В чем заключается принцип наложения применительно к электрической цепи?

## 2.2 Лабораторная работа № 2 (2 часа).

Тема: «Элементы в цепях однофазного переменного тока»

**2.2.1 Цель работы:** Ознакомиться со свойствами элементов электрической цепи однофазного переменного тока.

### 2.2.2 Задачи работы:

1. Исследовать режимы работы неразветвленной цепи переменного тока при индуктивном и емкостном характере нагрузки.

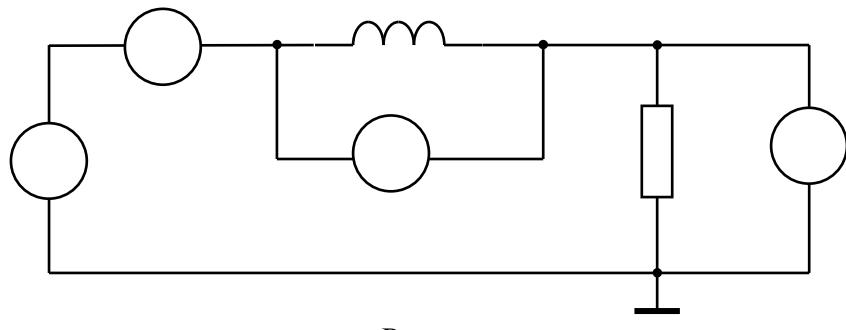
### 2.2.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Компьютер «Пентиум-4»

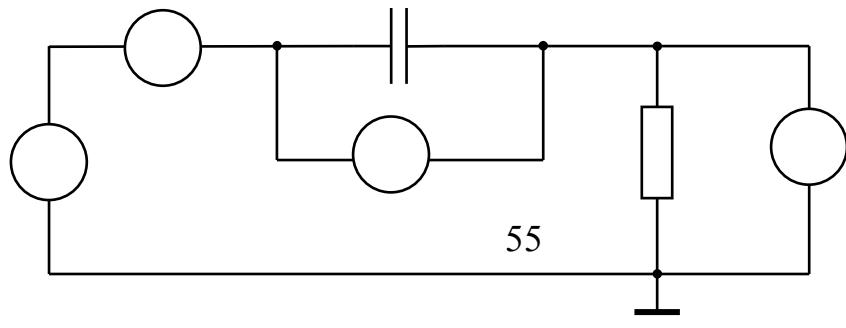
### 2.2.4 Описание (ход) работы:

Объектом исследования являются две простые электрические цепи переменного тока с индуктивным и емкостным характером нагрузки. Исследования выполняются на компьютере с использованием программы Electronics Workbench.

#### Электрические схемы



P



55

P

Таблица 1

Параметры элементов цепи

Вар.	U, Вольт	f, Герц	R, Ом	L, мГн	C, мкФ	Y <sub>A</sub> , В/дел	Y <sub>B</sub> , В/дел	X <sub>T</sub> , мС/дел
1	220	50	100	500	20	100	100	2
2	220	100	100	200	15	100	100	1
3	127	60	80	300	25	100	50	2
4	127	100	70	150	22	100	50	1
5	380	100	150	350	7	200	100	1
6	380	50	160	450	17	200	200	2
7	220	150	120	180	8	100	100	1
8	110	400	60	30	5	50	50	0,2

Таблица 3

Результаты расчетов

Режим работы цепи	ω, рад/С	X <sub>L</sub> , Ом	X <sub>C</sub> , Ом	φ, градус	Z, Ом	I, А	U <sub>L</sub> , В	U <sub>C</sub> , В	U <sub>R</sub> , В
Индуктивная нагрузка									
Емкостная нагрузка									

Таблица 2

Результаты экспериментов

Режим работы цепи	I, А	U <sub>R</sub> , В	U <sub>L</sub> , В	U <sub>C</sub> , В	ΔT, С	φ, градус
Индуктивная нагрузка				—		
Емкостная нагрузка			—			

I

варианту, указанному преподавателем. Амперметр и вольтметры перевести в режим АС.

2. Провести измерение тока и напряжений в цепи. Результаты измерений занести в таблицу 2.

3. Подключить к цепи осциллограф. При этом канал А подключить параллельно всей цепи (к точке 1), а канал В – параллельно активному сопротивлению (к точке 2). Установить чувствительность канала А –  $Y_A$ , чувствительность канала В –  $Y_B$  и частоту развертки  $X_T$  в соответствии с таблицей 1. Включить режим ZOOM на осциллографе.

4. При помощи визирных линий на экране осциллографа определить временной сдвиг по фазе между напряжением на резисторе и напряжением на всей цепи (красную визирную линию совместить с точкой пересечения кривой напряжения на резисторе с осью абсцисс, а синюю линию – с ближайшей точкой пересечения кривой напряжения на всей цепи с осью абсцисс). Результат измерения занести в таблицу 2 ( $\Delta T$ ).

5. Рассчитать угол сдвига фаз тока и напряжения на всей цепи  $\phi$ , используя временной сдвиг по фазе между напряжением на резисторе и напряжением на всей цепи ( $\phi = 360f\Delta T$ ). Результат занести в таблицу 2.

6. Собрать электрическую цепь, используя рис. 2. Установить параметры элементов цепи в соответствии с техническими характеристиками. Амперметр и вольтметры перевести в режим AC.

7. Провести измерение тока и напряжений в цепи. Результаты измерений занести в таблицу 2.

8. При помощи визирных линий на экране осциллографа определить временной сдвиг по фазе между напряжением на резисторе и напряжением на всей цепи. Результат измерения занести в таблицу 2.

9. Рассчитать угол сдвига фаз тока и напряжения на всей цепи  $\phi$ , используя временной сдвиг по фазе между напряжением на резисторе и напряжением на всей цепи ( $\phi = 360f\Delta T$ ). Результат занести в таблицу 2.

10. Используя параметры элементов электрической цепи, определить круговую частоту  $\omega$ , индуктивное и емкостное сопротивление. Рассчитать угол  $\phi$  между вектором тока и напряжения на всей цепи для опыта с индуктивной и емкостной нагрузкой. Рассчитать полное сопротивление цепей и, используя закон Ома, определить силу тока цепи в каждом опыте. Определить напряжения на индуктивности, емкости и активном сопротивлении. Результат занести в таблицу 3.

11. Сравнить результаты расчетов с результатами измерений.

12. Используя результаты расчетов построить в масштабе векторные диаграммы цепей.

### 2.3 Лабораторная работа № 3 (2 часа).

**Тема: «Расчет цепей переменного тока. Резонанс напряжений и токов»**

**2.3.1 Цель работы:** Изучение режима резонанса напряжений в неразветвленной цепи переменного тока.

**2.3.2 Задачи работы:**

1. Изучение методики расчета параметров неразветвленной цепи синусоидального переменного тока.

**2.3.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:**

1. Объектом исследования является простая неразветвленная электрическая цепь переменного тока. Исследования выполняются на компьютере с использованием программы MuLtisim.

**2.3.4 Описание (ход) работы:**

1. Собрать электрическую цепь по рисунку 1.

2. Используя параметры элементов цепи (технические характеристики элементов выписать из таблицы 1 по варианту, указанному преподавателем), рассчитать резонансную

частоту переменного тока в данной цепи 
$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$
. Заполнить вторую колонку таблицы 2.

3. Установить параметры элементов цепи в соответствии с техническими характеристиками. Измерительные приборы перевести в режим АС.

4. Подключить к цепи осциллограф. При этом канал А подключить параллельно всей цепи (к точке 1), а канал В – параллельно активному сопротивлению (к точке 2). Установить чувствительность канала А –  $Y_A$ , чувствительность канала В –  $Y_B$  и частоту развертки  $X_T$  в соответствии с таблицей 1. Включить режим ZOOM на осциллографе.

5. Установливая частоту источника ЭДС в соответствии со второй колонкой таблицы 2, снять показания приборов в каждом опыте. При помощи визирных линий на экране осциллографа определить временной сдвиг по фазе между напряжением на резисторе и напряжением на всей цепи в каждом опыте. Для этого красную визирную линию совместить с точкой пересечения кривой напряжения на резисторе с осью абсцисс, а синюю линию – с ближайшей точкой пересечения кривой напряжения на всей цепи с осью абсцисс. Результаты измерений занести в таблицу 2.

6. Рассчитать угол сдвига фаз тока и напряжения на всей цепи  $\phi$ , используя временной сдвиг по фазе между напряжением на резисторе и напряжением на всей цепи ( $\phi = 360f\Delta T$ ). Результат занести в таблицу 2.

7. Используя параметры элементов электрической цепи, для каждого значения частоты источника определить: круговую частоту  $\omega$ , индуктивное сопротивление  $X_L$ , емкостное

сопротивление  $X_C$ , полное сопротивление  $Z$ , ток цепи  $I$ , напряжение на индуктивности, емкости и активном сопротивлении, а также угол  $\varphi$  между вектором тока и напряжения на всей цепи. Результаты расчетов занести в таблицу 3.

8. Сравнить результаты расчетов с результатами измерений.
9. В одной системе координат построить зависимости  $I$ ,  $\varphi$ ,  $U_L$ ,  $U_C$  от частоты.
10. Для частоты  $0,5f_p$  построить в масштабе векторную диаграмму цепи.

## **2.4 Лабораторная работа № 4 (2 часа).**

**Тема: «Соединение трехфазных цепей звездой и треугольником»**

**2.4.1 Цель работы:** Изучение режимов работы трехфазной цепи переменного тока при соединении потребителей звездой.

### **2.4.2 Задачи работы:**

1. Изучение методики расчета трехфазной цепи синусоидального переменного тока при соединении потребителей звездой.

### **2.4.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:**

1. Объектом исследования является трехфазная электрическая цепь переменного тока, в которой потребители соединены звездой. Исследования выполняются на компьютере с использованием программы MuLtisim.

### **2.4.4 Описание (ход) работы:**

1. Собрать электрическую цепь, используя рис. 1. Установить параметры элементов цепи в соответствии с техническими характеристиками по варианту, указанному преподавателем. Фазовые углы источников установить равными:  $E_A$  -  $0^\circ$ ,  $E_B$  -  $240^\circ$ ,  $E_C$  -  $120^\circ$ . Амперметры перевести в режим АС.

2. Провести измерение токов. Результаты измерений занести в таблицу 2.

3. Подключить осциллограф к нагрузке фазы А. При этом канал А подключить параллельно всей нагрузке фазы (к точке 1), а канал В – параллельно активному сопротивлению (к точке 4). Установить чувствительность канала А –  $Y_A$ , чувствительность канала В –  $Y_B$  и частоту развертки  $X_T$  в соответствии с таблицей 1. Включить режим ZOOM на осциллографе.

4. При помощи визирных линий на экране осциллографа определить временной сдвиг по фазе между напряжением на резисторе и напряжением на всей фазе (красную визирную линию совместить с точкой пересечения кривой напряжения на резисторе с осью абсцисс, а синюю линию – с ближайшей точкой пересечения кривой напряжения на всей фазе с осью абсцисс). Результат измерения занести в таблицу 2.

5. Аналогично подключить осциллограф к нагрузке фазы В. Канал А подключить к точке 2, а канал В – к точке 5. При помощи визирных линий на экране осциллографа

определить временной сдвиг по фазе между напряжением на резисторе и напряжением на всей фазе. Результат измерения занести в таблицу 2.

6. Выполнить измерение сдвига по фазе между напряжением на всей нагрузке и напряжением на резисторе в фазе С (канал А подключить к точке 3, а канал В – к точке 6). Результат измерения занести в таблицу 2.

7. Установить симметричную нагрузку. Для этого индуктивности во всех фазах установить равными индуктивности в фазе А, а активное сопротивление всех фаз - равным активному сопротивлению в фазе В.

8. Провести измерение токов в цепи и временных сдвигов по фазе между напряжением на резисторе и напряжением на всей фазе. Результаты измерений занести в таблицу 2.

9. Рассчитать углы  $\phi$  сдвига вектора тока по отношению к вектору напряжения для каждой фазы, используя временной сдвиг по фазе между напряжением на резисторе и напряжением на всей фазе ( $\phi = 360f\Delta T$ ).

10. Используя результаты измерений, определить активную мощность каждой фазы и всей цепи для несимметричной и симметричной нагрузки. Результат расчета занести в таблицу 2.

11. Используя параметры элементов электрической цепи, рассчитать все токи, а также активную мощность каждой фазы и всей цепи при несимметричной и симметричной нагрузке. Результат занести в таблицу 3.

12. Сравнить результаты расчетов с результатами измерений.

13. Построить в масштабе векторную диаграмму цепи для несимметричной нагрузки.

## **2.5 Лабораторная работа № 5 (2 часа).**

### **Тема: «Трансформаторы»**

**2.5.1 Цель работы:** Исследовать режимы работы воздушного трансформатора при активной нагрузке.

#### **2.5.2 Задачи работы:**

1. Научиться определять параметры трансформатора по результатам испытаний.

#### **2.5.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:**

1. Компьютер «Пентиум-4»

2. программа Multisim

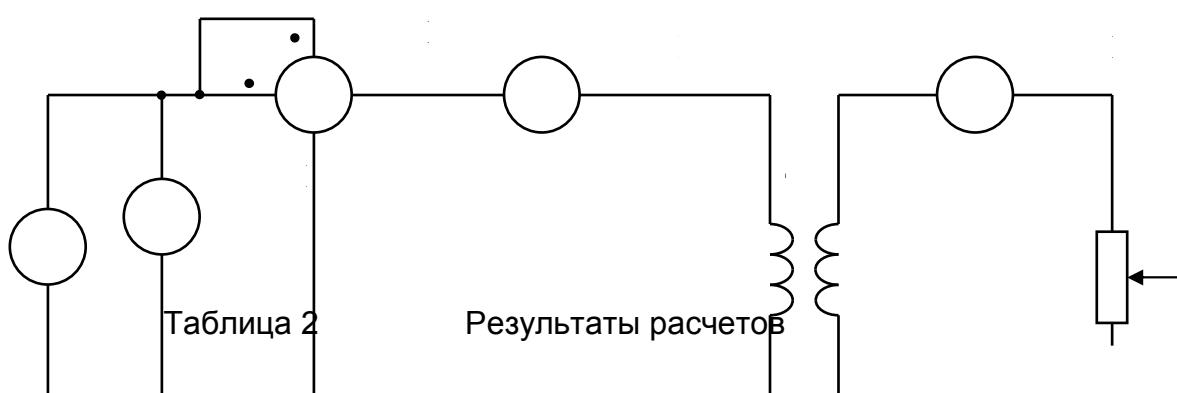
#### **2.5.4 Описание (ход) работы:**

##### **Объект и средства исследования**

Объектом исследования является двухобмоточный воздушный трансформатор. Исследования выполняются на компьютере с использованием программы Multisim

1. Запустите программу Multisim
2. Откройте файл lab9\_4 var\_ в соответствии с вариантом, указанным преподавателем (например, lab9\_4 var\_01). Файлы находятся в папке Lab09\_4.
3. Включить питание схемы и записать показания приборов в таблицу 1.
4. Подключить нижний по схеме вывод вторичной обмотки трансформатора к общей шине. Включить питание и записать показания приборов (переменный резистор нагрузки  $R_H$  должен иметь сопротивление в этом опыте 100%).
5. Уменьшая сопротивление нагрузки  $R_H$  с помощью клавиши  $R$ , записать показания приборов при всех значениях сопротивления (всего шесть значений).
6. Используя результаты измерений, определить потери в меди первичной и вторичной обмотки трансформатора в каждом опыте ( $P_{m1}$  и  $P_{m2}$ ), сопротивление нагрузки  $R_H$ , напряжение на нагрузке  $U_2$ , кпд трансформатора и коэффициент мощности в каждом опыте. Результаты расчета занести в таблицу 2.
7. По данным таблицы 2 в одной системе координат построить зависимости  $U_2$ ,  $\eta$ ,  $\cos \phi$  от тока нагрузки  $I_2$ .

### Электрическая схема



№ опыта	$P_{m1}$ , Вт	$P_{m2}$ , Вт	$R_H$ , Ом	$U_2$ , В	$\eta$	$\cos \phi$
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						

## 2.6 Лабораторная работа № 6 (2 часа).

Тема: «Элементная база современных электронных устройств»

**2.6.1 Цель работы:** снять зависимость тока от напряжения для различных типов полупроводниковых диодов и стабилитронов

**2.6.2 Задачи работы:** собрать электрическую схему лабораторной работы и провести ряд экспериментов по снятию вольт-амперной характеристики

**2.6.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:**

1. Стенд лабораторный «Промышленная электроника».

2. Мультиметр DT9205.

**2.6.4 Описание (ход) работы:**

Схема исследований входных и выходных ВАХ транзисторов в схеме включения с общим эмиттером

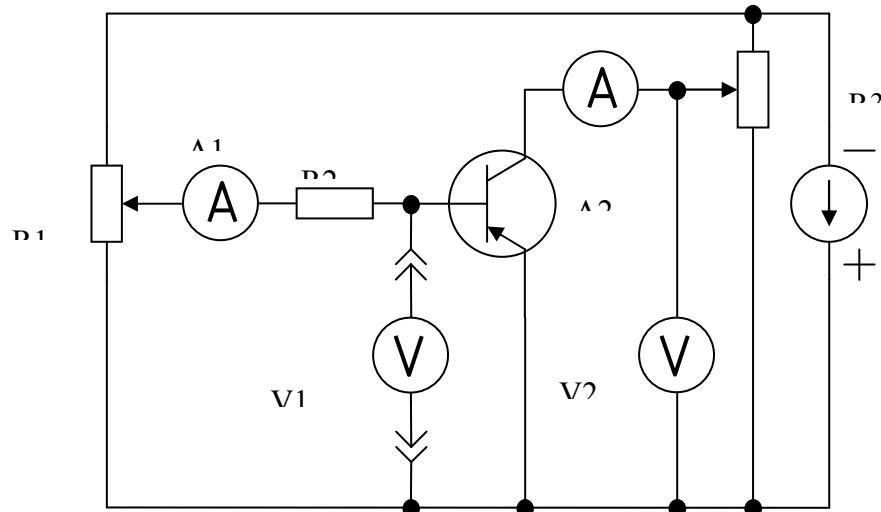


Рис. 3.1. Схема измерения входных и выходных ВАХ транзисторов в схеме с ОЭ

### Порядок выполнения эксперимента

1. Собрать схему.
2. Установить на измерительных приборах необходимые пределы измерений в соответствии с исследуемым прибором (на PV1 1 - 2 В). На потенциометрах R1 и R3, подключенных к блоку питания, ручки регулировки выходного напряжения установить в 0 В.
3. После проверки схемы преподавателем включить схему.

4. Произвести измерения входных характеристик транзистора. Следить, чтобы стрелки приборов не зашкаливали. Установить потенциометром R3 напряжение  $U_{k3} = 0$  В. Задавая потенциометром R1 ток базы транзистора  $I_b$  от 0 до максимального заданного значения определить напряжение база-эмиттер  $U_{b3}$ . Результаты измерений занести в таблицу.

Установить потенциометром R3 напряжение  $U_{k3} = 4$  В. Задавая потенциометром R1 ток базы транзистора  $I_b$  от 0 до максимального значения определить напряжение база-эмиттер  $U_{b3}$ . Напряжение на коллекторе поддерживать постоянным. Результаты измерений занести в таблицу.

5. Произвести измерения выходных характеристик транзистора. Следить, чтобы стрелки приборов не зашкаливали. Установить потенциометром R1 необходимый ток базы транзистора  $I_b$ . Задавая потенциометром R3 напряжение коллектора транзистора  $U_{k3}$  от 0 до максимального значения определить ток коллектора транзистора  $I_k$ . Ток базы поддерживать постоянным. Результаты измерений занести в таблицу.

Установить потенциометром R1 следующее необходимое значение тока базы транзистора  $I_b$ . Задавая потенциометром R3 напряжение коллектора транзистора  $U_{k3}$  от 0 до максимального значения определить ток коллектора транзистора  $I_k$ . Ток базы поддерживать постоянным. Результаты измерений занести в таблицу.

Повторить п. 5.2.

6. Отключить схему.

Для конкретных типов п/п транзисторов при измерениях рекомендуются установить следующие значения тока базы.

Таблица. Результаты измерений входных ВАХ транзистора типа МП42.

$U_{k3}$ , В	$I_b$	мкА	0	25	50	75	100	125	150	175	200
0	$U_{b3}$	мВ									
4	$U_{b3}$	мВ									

Таблица. Результаты измерений выходных ВАХ транзистора МП42.

$I_b$ , мкА	$U_{k3}$	В	0	0,25	0,5	1	2	4	6	8	10
0	$I_k$	мА									
25	$I_k$	мА									
50	$I_k$	мА									
75	$I_k$	мА									
100	$I_k$	мА									
125	$I_k$	мА									

150	$I_k$	мА								
175	$I_k$	мА								
200	$I_k$	мА								

### Представление и обработка результатов измерений

- Привести полную схему лабораторного стенда исследований характеристик транзисторов. Для исследуемых схем входных и выходных характеристик ниже указать положение всех тумблеров схемы (включено/выключено). Привести упрощенную итоговую схему исследований.
- На одном графике построить входные вольт-амперные характеристики транзисторов  $I_b = f(U_{b3})$ .
- На другом графике построить семейство выходных вольт-амперных характеристик транзисторов  $I_k = f(U_{k3})$  при разных токах базы  $I_b$ .
- Определить и вычислить:
  - стatische входное сопротивление транзистора при фиксированном напряжении  $U_{k3} = 4$  В и токе базы  $I_b = 75$  мкА  $r_{stat\ ex} = U_{b3}/I_b$ ;
  - дифференциальное входное сопротивление транзистора при фиксированном напряжении  $U_{k3} = 4$  В и токе базы  $I_b = 75$  мкА  $r_{diff\ ex} = \Delta U_{b3}/\Delta I_b$ ;
  - стatische коэффициент передачи транзистора при фиксированном напряжении  $U_{k3} = 4$  В и токе базы  $I_b = 75$  мкА  $K_{I\ stat} = \beta_{stat} = I_k/I_b$ ;
  - динамический коэффициент передачи тока транзистора при фиксированном напряжении  $U_{k3} = 4$  В и токе базы  $I_b = 75$  мкА  $K_I = \beta = \Delta I_k/\Delta I_b$ ;
  - произвести аналогичные вычисления для двух других точек, выбранных самостоятельно;
  - результаты занести в таблицу;
- Привести паспортные данные основных характеристик исследуемых приборов.
- Сравнить полученные результаты исследований с паспортными данными на приборы.

Таблица. Экспериментальные входные характеристики приборов.

№	$I_b$	$U_{b3}$	$\Delta I_b$	$\Delta U_{b3}$	$r_{stat\ ex}$	$r_{diff\ ex}$		Прим.
пп	мкА	мВ	мкА	мВ	Ом	Ом		-
1								
2								
3								

Таблица. Экспериментальные выходные и передаточные характеристики приборов.

№	$I_b$	$U_{k3}$	$\Delta I_b$	$I_k$	$\Delta I_k$	$\beta_{stat}$	$\beta$	Прим.

пп	мкА	В	мкА	мА	мА	о.е.	о.е.	-
1								
2								
3								

## 2.7 Лабораторная работа № 7 (2 часа).

**Тема: «Источники вторичного электропитания»**

**2.7.1 Цель работы:** исследовать схемы однофазных неуправляемых и управляемых выпрямителей

### 2.7.2 Задачи работы:

1. Собрать схемы однофазных управляемых и неуправляемых выпрямителей и провести их исследование

### 2.7.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Лабораторный стенд «Электроника с МПСО» НТЦ-05.100.

### 2.7.4 Описание (ход) работы:

#### Неуправляемые выпрямители.

Выпрямителем называется устройство, преобразующее переменное напряжение, полярность которого изменяется, в пульсирующее, полярность которого остается постоянной. Для получения постоянного напряжения из пульсирующего на выходе выпрямителя ставят сглаживающие фильтры. Таким образом, выпрямитель совместно с фильтром является устройством, преобразующим переменное напряжение в постоянное. При питании от однофазной сети применяются следующие основные схемы выпрямителей:

однополупериодные;

двуихполупериодные:

- мостовая (схема Греца),

- с нулевым выводом трансформатора.

Однополупериодная схема наиболее проста и содержит всего один диод V1 (рис. 1, а.). В положительный полупериод напряжения на вторичной обмотке трансформатора диод V1 находится в проводящем состоянии и через него протекает ток в нагрузку; а в отрицательный - диод закрыт и тока в нагрузке нет. Следовательно, ток в нагрузке протекает в одном направлении и только в один положительный полупериод напряжения вторичной обмотки трансформатора T1.

Мостовая схема выпрямителя (рис. 4.1, б.) содержит четыре вентиля V1 - V4; в положительный полупериод напряжения на вторичной обмотке трансформатора T1 пропускает

ток вентилии  $V1, V4$ , а в отрицательный - вентилии  $V2, V3$ . При этом ток в нагрузке протекает в одном направлении, указанном стрелкой. К закрытому вентилю прикладывается обратное напряжение  $U_{vd}$ , повторяющее по форме напряжение вторичной обмотки трансформатора.

Максимальное значение обратного напряжения на вентиле равно  $E2m$ ,  
где  $E2m$  - амплитуда напряжения вторичной обмотки трансформатора.

$$U_{cp} = \frac{1}{\pi} \int E2m \sin \omega t dt = 2E2m / \pi$$

Среднее значение выпрямленного напряжения:

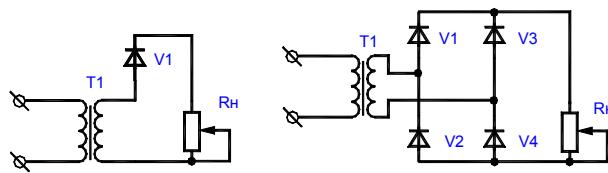
Если учесть, что действующее значение напряжения на вторичной обмотке  $E2$  связано с

$$E2m = E2\sqrt{2}$$

амплитудным соотношением:

можно получить простое соотношение для определения среднего значения выпрямленного

$$U_{cp}=0,9E2$$



напряжения:

а)

б)

Рис. 1. Схема однополупериодного (а) и двухполупериодного мостового (б) выпрямителей

В мостовой схеме Греца в первичной и вторичной обмотках при работе на активную нагрузку протекает синусоидальный ток. Схема Греца характеризуется хорошим использованием элементов выпрямителя и трансформатора. Поэтому в настоящее время она находит наибольшее применение для выпрямления однофазного тока.

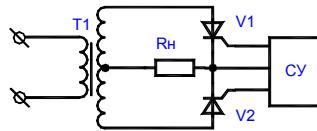
Схема со средней точкой содержит два вентиля  $V1$  и  $V2$  и трансформатор  $T1$ , имеющий две одинаковые вторичные обмотки, включенные последовательно и согласно. В положительный полупериод сетевого напряжения открыт вентиль  $V1$ . В отрицательный полупериод открыт вентиль  $V2$ . При этом ток обоих вентилей протекает через нагрузку в одном направлении. Формы напряжения и тока такие же, как и в мостовой схеме. Однако амплитудное значение обратного напряжения на вентиле в два раза больше, чем в схеме Греца. Недостатком

схемы является плохое использование трансформатора, так как имеются две вторичные обмотки, работающие по полпериода каждая. Основная область применения данной схемы – низковольтные выпрямители. В ней последовательно с нагрузкой включен только один вентиль, что при низких выпрямленных напряжениях позволяет получить более высокий к.п.д.

### Управляемые выпрямители

Управляемым называется такой выпрямитель, который, кроме выпрямления переменного напряжения, одновременно осуществляет регулирование напряжения. Управляемый выпрямитель (УВ) получается из обычного заменой в нем неуправляемых вентилей (диодов) управляемыми вентилями - тиристорами. Регулирование осуществляется задержкой отпирания очередного тиристора в пределах полупериода сетевого напряжения. Угол задержки отпирания тиристора, называемый углом управления  $\alpha$ , отсчитываемого от момента естественного отпирания вентиля, т.е. от момента, в который к вентилю начинает прикладываться положительное напряжение. Для выпрямителей, питающихся от однофазной сети, этот момент совпадает с моментом перехода сетевого напряжения через ноль.

Схема УВ, собранного по схеме с нулевой точкой трансформатора, показана на рис. 2.



$$U_{cp} = U_{cp0} * (1 + \cos \alpha) / 2$$

Рис. 2. Схема управляемого выпрямителя по схеме с нулевой точкой трансформатора

Преимущество этой схемы состоит в наличии общей точки катодов тиристоров V1 и V2. При этом упрощается подключение системы управления к выпрямителю. На вход выпрямителя переменное напряжение от двух вторичных обмоток T1. Эти напряжения сдвинуты на угол в 180 эл. градусов. Система управления (СУ) вырабатывает импульсы управления, временное положение которых можно изменять в пределах полупериода сетевого напряжения. До подачи импульса управления тиристоры закрыты и напряжение на нагрузке равно нулю. В момент подачи импульса управления открывается соответствующий тиристор и с этого момента к нагрузке прикладывается напряжение вторичной обмотки трансформатора. Изменяя угол управления  $\alpha$ , можно регулировать среднее значение выпрямленного напряжения, которое определяется из выражения:

где  $U_{cp0} = 2E2m/\pi = 0,9E2$ - среднее значение выпрямленного при угле управления  $\alpha = 0$ , т.е. выпрямленное напряжение обычного неуправляемого выпрямителя.

Последнее выражение определяет регулировочную характеристику УВ. Из него видно, что среднее значение выпрямленного напряжения при изменении угла от 0 до 180 градусов

плавно уменьшается от значения  $U_{ср}$  до 0. Таким образом, преимущество УВ состоит в возможности плавной регулировки среднего значения выпрямленного напряжения.

Недостатки УВ следующие:

1. Усложнение схемы, так как необходима система управления выпрямителя.
2. Увеличение коэффициента пульсаций выпрямленного напряжения и ухудшение его гармонического состава. Это происходит за счет искажения формы выпрямленного напряжения и появления скачков напряжения в момент отпирания тиристоров.
3. Появление сдвига по фазе между током и напряжением в первичной обмотке трансформатора. Таким образом, даже при чисто активной нагрузке УВ потребляет из сети реактивную мощность.

Если нагрузка начинается с емкости и тиристоры управляются короткими импульсами, то из-за появления угла отсечки при малых углах управления могут быть пропуски включения тиристоров (напряжение на конденсаторе больше, чем питающее напряжение). Поэтому УВ, как правило, не применяют для работы на нагрузку емкостного характера.

**Подготовка к работе:**

1. Изучить принцип работы однофазных неуправляемых и управляемых выпрямителей.
2. Изучить принцип построения схемы управления УВ.
3. Нарисовать схемы исследуемых выпрямителей.
4. Ознакомиться с порядком сборки схем на стенде.

**План работы:**

1. Собрать схему однополупериодного выпрямителя без фильтра в соответствии с рис. 3.
2. Подать на схему напряжение, снять и зарисовать для номинального тока нагрузки ( $I_H = 100mA$ ) осциллограммы выпрямленного напряжения, напряжения на диоде, анодного тока диода, тока на выходе выпрямителя, тока вторичной и первичной обмоток трансформатора.

Осциллограммы рисовать в соответствии с их временным положением друг относительно друга для номинального значения тока нагрузки.

3. Снять и построить внешнюю характеристику выпрямителя, изменяя величину

$$U_{cp} = f(I_{cp})$$

нагрузки сопротивлением  $R_{11}$ .

4. Определить внутреннее сопротивление выпрямителя в номинальном режиме.

$$R_{вых} = \Delta U_{вых} / \Delta I_{вых}$$

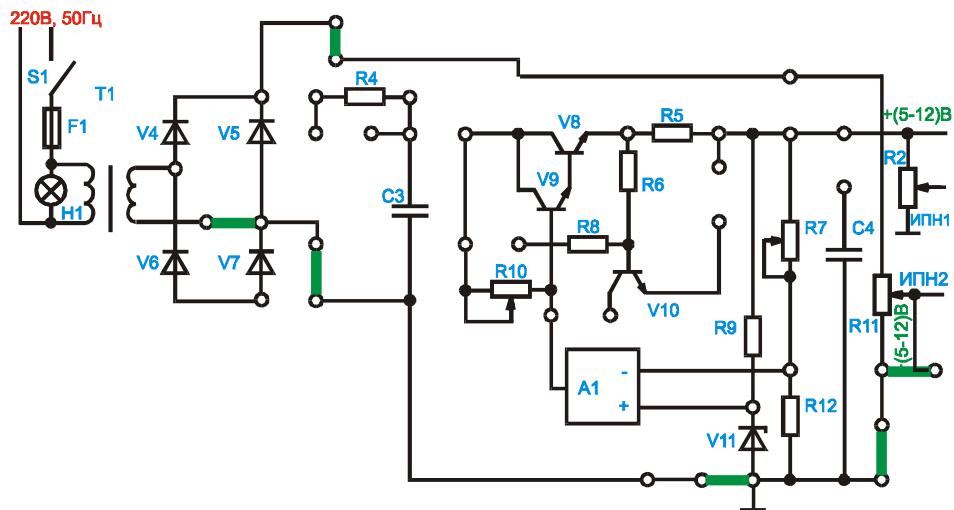


Рис. 3. Схема исследования однофазного однополупериодного выпрямителя, работающего на активную нагрузку

5. Собрать схему двухполупериодного мостового выпрямителя согласно рис. 4. и провести исследования, аналогичные п.п.2. - 4. ( $I_n = 200mA$ ).

6. Собрать на стенде схему управляемого выпрямителя согласно рис. 5.

7. Подать на схему напряжение, снять и зарисовать для номинального тока нагрузки ( $I_n = 100mA$ ) осциллограммы выпрямленного напряжения, напряжения на тиристорах, напряжения на управляющих электродах тиристоров (снимается относительно катодов тиристоров), тока на выходе выпрямителя, тока вторичной и первичной обмоток трансформатора.

Осциллограммы рисовать в соответствии с их временным положением друг относительно друга для номинального значения тока нагрузки.

8. Снять и построить внешние характеристики  $U_{cp} = f(I_{cp})$  выпрямителя для заданных преподавателем углов управления, изменяя величину нагрузки сопротивлением  $R2$ .

9. Снять и построить регулировочную характеристику  $U_{cp} = f(\alpha)$  управляемого выпрямителя для номинального тока нагрузки. Угол управления изменяется резистором  $R3$ , а его величина определяется по осциллограмме выходного напряжения с помощью осциллографа.

10. Определить внутреннее сопротивление выпрямителя в номинальном режиме.

$$R_{вых} = \Delta U_{вых} / \Delta I_{вых}.$$

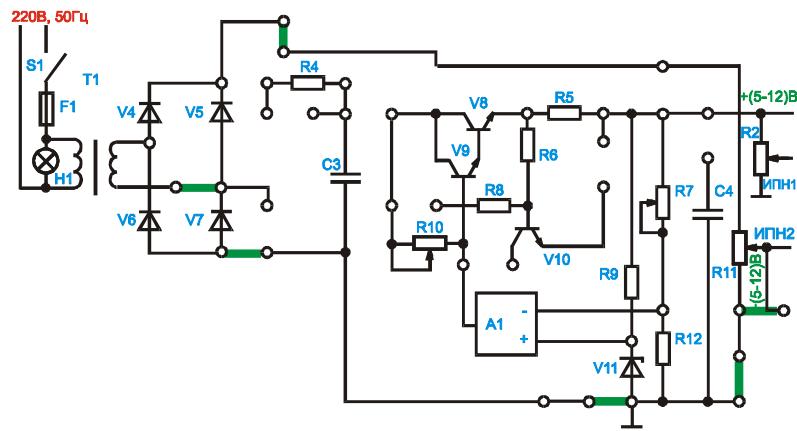


Рис. 4. Схема исследования однофазного двухполупериодного мостового выпрямителя, работающего на активную нагрузку

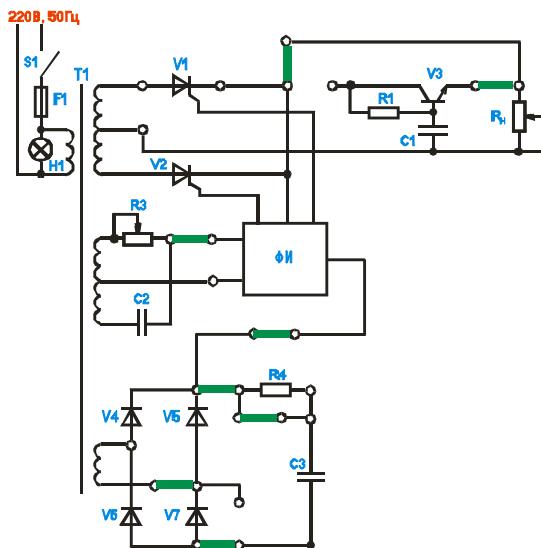


Рис. 5. Схема исследования однофазного двухполупериодного управляемого выпрямителя со средней точкой трансформатора, работающего на активную нагрузку

### Контрольные вопросы.

1. Объясните принцип работы однофазной мостовой схемы выпрямителя и схемы со средней точкой.
2. Что такое внешняя характеристика выпрямителя? От чего зависит ее наклон?
3. Почему максимальное значение тока вентиля выпрямителя различно для разных видов нагрузки при одной и той же мощности в нагрузке?
4. Сравните мостовую схему выпрямителя со схемой со средней точкой.
5. Отчего зависит к.п.д. выпрямителя?
6. Объясните назначение и принцип работы УВ.
7. Объясните принцип построения и работу системы управления по принципиальной схеме.
8. Нарисуйте форму напряжений и токов в элементах схемы управления и силовой части при углах управления  $\alpha = 30^\circ$ .

9. Объясните внешнюю и регулировочную характеристики УВ.

10. В чем преимущества и недостатки УВ?

## **2.8 Лабораторная работа № 8 (2 часа).**

### **Тема: «Усилители электрических сигналов»**

**2.8.1 Цель работы:** исследование характеристик и параметров усилительных каскадов на биполярных транзисторах в схемах: с общим эмиттером (ОЭ) и отрицательной обратной связью (ООС) по току; с общим коллектором (ОК)

**2.8.2 Задачи работы:** собрать и провести исследование различных схем усилителей на биполярных транзисторах

**2.8.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:** лабораторный стенд «Электроника с МПСО» НТЦ-05.100.

#### **2.8.4 Описание (ход) работы:**

##### **Основные характеристики усилителей.**

Усилитель - это устройство, предназначенное для усиления мощности входного сигнала за счет использования энергии источников питания.

В зависимости от схемы включения биполярного транзистора усилители делятся на: усилители с общим эмиттером - ОЭ, общим коллектором - ОК, общей базой - ОБ. К основным параметрам усилителей переменного тока относятся:

- коэффициент усиления по:

1) напряжению  $Ku = U_{вых}/U_{вх}$ ,

2) току  $Ki = I_{вых}/I_{вх}$ ,

3) мощности  $Kp = P_{вых}/P_{вх}$ ,

- входное сопротивление между входными зажимами усилителя для переменного входного тока  $R_{вх} = U_{вх}/I_{вх}$ ,

- выходное сопротивление - сопротивление между выходными зажимами усилителя для переменного тока при отключенном сопротивлении нагрузки  $R_{вых} = U_{вых}/I_{вых}$ ,

- коэффициент полезного действия усилителя - отношение мощности, поступающей в нагрузку, к мощности, потребляемой от источника питания:

$$\eta = P_h/P_n.$$

К основным характеристикам усилителя также относятся амплитудно-фазо-частотная (АФЧХ) и амплитудно-частотная (АЧХ) и амплитудная характеристики. В общем случае коэффициент усиления по напряжению и току является величиной комплексной, характеризующейся модулем и фазой, которые зависят от частоты усиливаемого сигнала.

Из-за наличия в схеме усилителя реактивных элементов и зависимости свойств транзистора от частоты коэффициент усиления усилителя имеет различные значения на различных частотах. Это явление называется частотными искажениями усилителя. Для их оценки вводится параметр, называемый коэффициентом частотных искажений  $M(\omega)$ , равный отношению коэффициента усиления на данной частоте  $Ku(\omega)$  к коэффициенту усиления на средних частотах  $Kuo$ :

$$M(\omega) = Ku(\omega)/Kuo.$$

Частоты, на которых коэффициент усиления достигает предельно допустимого (граничного) значения  $Ku(\omega)_{gr} = Ku_0/\sqrt{2} = 0,707 * Ku_0$ , называется верхней ф.в.гр и нижней ф.н.гр граничными частотами (частотами среза), а разность  $\omega = \omega_{в.гр} - \omega_{н.гр}$  – полосой пропускания усилителя.

Амплитудная характеристика усилителя - это зависимость амплитуды выходного сигнала  $U_{выхт}$  от амплитуды входного сигнала  $U_{вхт}$  на некоторой постоянной частоте.

Амплитудная характеристика идеального усилителя представляет прямую линию, проходящую через начало координат, а амплитудная характеристика реального усилителя совпадает с характеристикой идеального только на некотором участке. При больших входных сигналах  $U_{вхт} > U_{вхтmax}$  выходное напряжение усилителя перестает возрастать. Это связано

$$K_2 = \sqrt{EPn / P},$$

с тем, что рабочая точка транзистора попадает в область насыщения или отсечки. При этом выходной сигнал искажается. Это явление называется нелинейными искажениями и оценивается коэффициентом гармоник:

где  $Pn$  - мощность  $n$ -й гармонической составляющей выходного сигнала,

$P1$  - мощность первой гармоники.

$$K_2 = \sqrt{EU^2 nm / U^2 1m} = \sqrt{EI^2 nm / I^2 1m}$$

Если нагрузка усилителя активная, то коэффициент гармоник принимает вид:

При малых входных сигналах  $U_{вхт} < U_{вхтmin}$  выходное напряжение усилителя остается практически постоянным и равным  $U_{выхтmin}$ . Напряжение  $U_{выхтmin}$  называется напряжением собственных шумов усилителя. Собственные шумы усилителя обусловлены различными помехами и наводками, а также непостоянством электрических процессов во времени. Отношение  $U_{вхтmax}/U_{вхтmin} = D$  называется динамическим диапазоном усилителя.

**Усилительный каскад на БТ с ОЭ.**

Наиболее распространенная схема усилительного каскада на транзисторе с ОЭ показана на рис. 1.

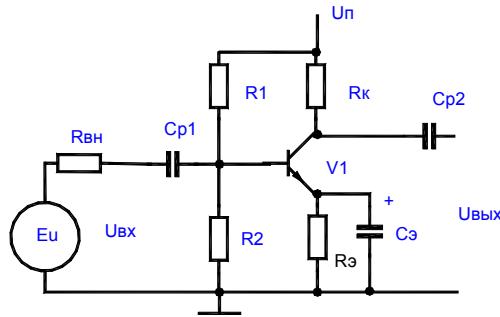


Рис. 1. Схема усилителя на БТ с ОЭ

Входное усилившемое переменное напряжение  $U_{вх}$  подводится ко входу усилителя через разделительный конденсатор  $C_{р1}$ . Конденсатор  $C_{р1}$  разделяет источник входного сигнала и базовый вход усилителя по постоянному току, чтобы исключить нарушение начального режима работы транзистора  $V1$ . Усиленное переменное напряжение, выделяемое на коллекторе транзистора  $V1$ , подводится к внешней нагрузке с сопротивлением  $R_h$  через разделительный конденсатор  $C_{р2}$ . Этот конденсатор служит для разделения выходной (коллекторной) цепи транзистора и внешней нагрузки по постоянной составляющей коллекторного тока  $I_{ок}$ . Значение  $I_{ок}$  и других постоянных составляющих токов и напряжений в цепях транзистора зависят от режима работы по постоянному току (положения рабочей точки на нагрузочной прямой). Положение рабочей точки, т.е. значение начального тока базы  $I_{об}$  задается делителем  $R1, R2$ . При отсутствии входного переменного сигнала в цепи коллектора протекает постоянный ток  $I_{ок}$ , значение которого определяется из выражения:

$$U_{ок\beta} + I_{ок} \cdot R_k + I_{ок} \cdot R_{\beta} = U_{ок\beta} + I_{ок}(R_k + R_{\beta}) = E_k,$$

где  $R_k$  - сопротивление в цепи коллектора,

$R_{\beta}$  - сопротивление в цепи эмиттера.

Решив это уравнение относительно тока  $I_{ок}$ , получим динамическую характеристику транзистора по постоянному току

$$I_{ок} = E_k / (R_k + R_{\beta}) - U_{ок\beta} / (R_k + R_{\beta}).$$

Это выражение представляет собой уравнение прямой линии,

проходящей через точки с координатами:  $E_k, 0; 0, E_k / R_{\beta}$ , изображенными на выходных характеристиках транзистора.

Усилительные каскады могут работать в одном из режимов: А, В, С, АВ, определяемых начальным положением рабочей точки при отсутствии входного переменного сигнала. При работе транзистора в активном (усилительном) режиме (класс А) начальное положение рабочей

точки должно быть таким, чтобы ток через активный элемент транзистора протекал в течение всего периода изменения входного сигнала, а амплитудное значение выходного тока  $I_{kmt}$  не превышало начального тока  $I_{ok}$ . Начальное положение рабочей точки обеспечивается делителем напряжения  $R1, R2$ , значения которых определяются соотношениями:

$$R1 = (E_k - U_{ob\varnothing} - U_{r\varnothing}) / (I_{del} + I_{ob\varnothing});$$

$$R2 = (U_{ob\varnothing} + U_{r\varnothing}) / I_{del},$$

где,  $I_{del} = (2...5)I_{ob\varnothing}$  - ток в цепи делителя,

$$U_{r\varnothing} = (0,1...0,25)E_k \text{ - для каскадов предварительного усиления.}$$

При обеспечении режима работы транзистора необходимо осуществить температурную стабилизацию положения рабочей точки. С этой целью в эмиттерную цепь введен резистор  $R_\varnothing$ , на котором создается напряжение отрицательной обратной связи ООС по постоянному току  $U_{r\varnothing}$ . Для устранения ООС по переменному току при наличии входного переменного сигнала резистор  $R_\varnothing$  шунтируют конденсатором  $C_\varnothing$ , сопротивление которого на частоте усиливаемого сигнала должно быть незначительным.

Аналитический расчет коэффициентов усиления по току, напряжению и мощности, а также входного и выходного сопротивлений производится по эквивалентным схемам усиливального каскада для различных диапазонов частоты входного сигнала.

#### Усилительный каскад на БТ с общим коллектором (эмиттерный повторитель).

Эмиттерный повторитель (ЭП) представляет собой усилитель тока и мощности, выполненный на транзисторе по схеме с ОК. Его схема представлена на рис. 2.

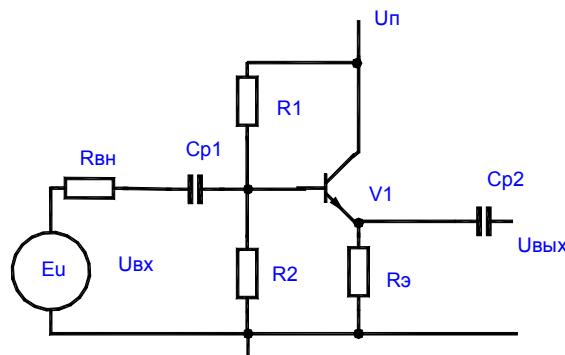


Рис. 2. Схема усилителя на БТ с ОК

Сопротивление нагрузки включается в эмиттерную цепь транзистора. ЭП обладает повышенным входным и пониженным выходным сопротивлениями. Его входное и выходное напряжения совпадают по фазе и незначительно отличаются по величине. Отмеченные свойства ЭП позволяют использовать его для согласования высокоомного источника напряжения с низкоомной нагрузкой.

ЭП можно рассматривать как усилительный каскад с ОЭ, у которого  $R_k = 0$ , а резистор в цепи эмиттера не зашунтирован конденсатором Сэ. В этом случае все выходное напряжение, выделяемое на сопротивлении в цепи эмиттера, последовательно вводится во входную цепь усилителя, где вычитается из напряжения входного сигнала  $U_{вх}$ , снижая его. В схеме действует 100% последовательная отрицательная обратная связь по напряжению.

Коэффициент усиления по напряжению ЭП

$$K_i = u_{вых}/u_{вх} = (I_{э} \cdot R_{э})/(I_{б} \cdot R_{вх}).$$

Коэффициент усиления по току в схеме ЭП без учета Rн (холостой ход)

$$K_i = I_{э}/I_{б} = 1 + \beta.$$

### Подготовка к работе.

1. Изучить принцип работы схем усилительных каскадов на БТ с ОЭ и ОК.
2. Изучить порядок расчета схем усилительных каскадов БТ с ОЭ и ОК.
3. По известным элементам схемы усилителей рассчитать величину сопротивления R23 с учетом наименьших нелинейных искажений.
4. Рассчитать значения основных параметров для названных схем включения усилителей  $K_i$ ,  $K_p$ ,  $K_p$ ,  $R_{вх}$  и  $R_{вых}$ , работающих в области средних частот ( $f = 1000 \text{ Гц}$ ).
5. Нарисовать схемы исследуемых усилительных каскадов.
6. Ознакомиться с порядком сборки схем на стенде.

### План работы.

1. Собрать схемы источника питания и генератора синусоидальных колебаний (см. паспорт к стенду). Выставить заданное преподавателем напряжение питания усилительных каскадов.
2. Собрать схему усилителя без шунтирующего конденсатора в цепи эмиттера, на основе схемы рис. 3, установив рассчитанное значение резистора R23.
3. Подать на вход усилителя от генератора ГС1 синусоидальный сигнал частотой  $f = 1 \text{ кГц}$  и амплитудой  $U_{вхт} = 0,05 \text{ В}$ . Замерить с помощью осциллографа амплитуду выходного сигнала  $U_{выхт}$  и зарисовать осциллограммы входного и выходного напряжений.

Рассчитать коэффициент усиления каскада по напряжению, току и мощности.

4. Изменяя величину сопротивления R23 по осциллографу определить момент появления в выходном сигнале больших нелинейных искажений и зарисовать осциллограмму этого напряжения.

5. Включить емкость в цепь эмиттера и выполнить операции п.п. 3 и 4.

6. Установить амплитуду входного сигнала  $U_{вхт} = 0,05 \text{ В}$ .

Изменяя частоту входного сигнала от 0 до 100кГц снять амплитудно-частотную характеристику усилителя и построить ее.

7. Подать на вход усилителя синусоидальный сигнал частотой  $f = 1\text{кГц}$ . Изменяя амплитуду входного сигнала  $U_{вхт}$  от 0 до 0,5В (порядка 10 значений) построить амплитудную характеристику усилителя. Для каждого значения  $U_{вхт}$  зарисовать осциллограмму выходного напряжения. Определить  $U_{вых\ max}$  в момент появления существенных нелинейных искажений.

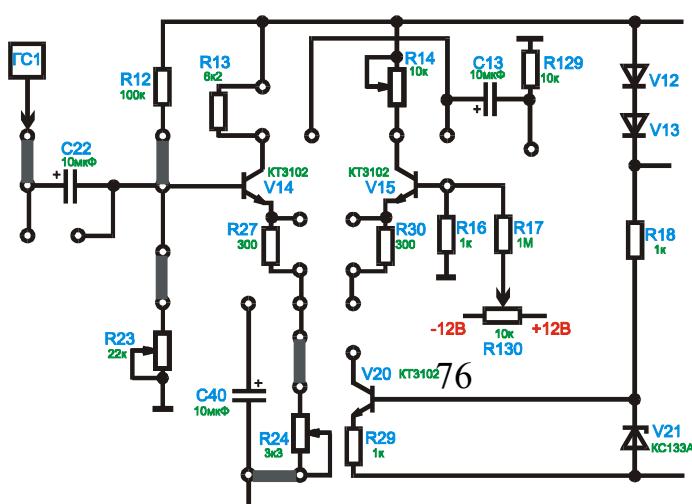
8. Собрать схему ЭП согласно рис. 4.

9. Для данной схемы провести исследования согласно п.п. 3, 6, 7.

10. Сравнить результаты теоретических расчетов и практических исследований, сформулировать выводы по каждому пункту рабочего задания.

### **Контрольные вопросы.**

1. Определить по принципиальной схеме усилительного каскада способ включения транзистора.
2. Сравните усилители с ОЭ, ОБ, ОК по коэффициентам усиления  $K_i$ ,  $K_u$ ,  $K_p$ .
3. В каком усилителе осуществляется усиление по напряжению и по мощности?
4. В каком усилителе осуществляется усиление по току и по мощности?
5. Какой усилитель обеспечивает максимальное усиление по мощности и почему?
6. Сравните усилители с ОЭ, ОБ, ОК по значениям  $R_{вх}$  и  $R_{вых}$ . Чем обусловлено их различие?
7. Сравните частотные свойства каскадов с ОЭ, ОБ, ОК и объясните причины различия.
8. Объясните назначения отдельных компонентов схем усилителей с ОЭ, ОБ, ОК.
9. Как зависит  $R_{вх}$ ,  $R_{вых}$ ,  $K_u$ ,  $K_i$ ,  $K_p$  усилителя с ОЭ от значений электрических параметров отдельных компонентов схемы?
10. Когда следует применять усилительные каскады, включенные по схеме с ОЭ, ОБ, ОК?
11. Назовите способы задания режима работы транзистора в усилительных каскадах.
12. Как построить нагрузочную линию транзистора по постоянному и переменному току?
13. Объясните влияние температуры на режим работы усилительных каскадов.
14. Какие вы знаете способы температурной стабилизации режима работы усилительных



каскадов?

Рис. 3. Схема исследования усилителя на БТ, включенного по схеме с ОЭ

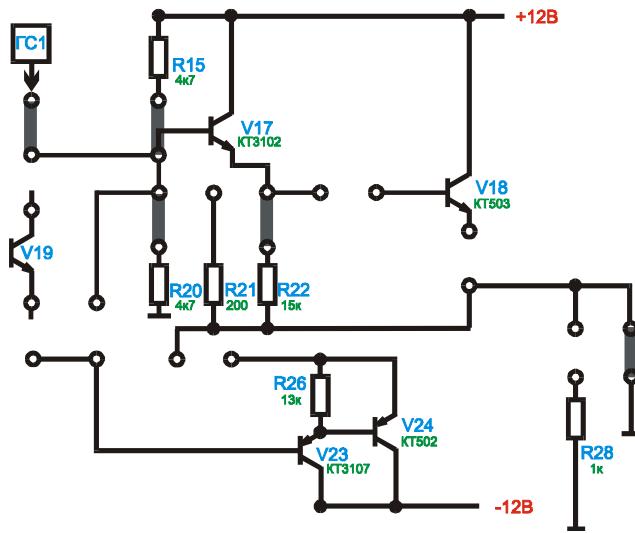


Рис. 4. Схема исследования усилителя на БТ, включенного по схеме с ОК

## 2.9 Лабораторная работа № 9, 10 (4 часа).

**Тема:** «Цифровая схемотехника. Типовые комбинационные и последовательностные устройства»

**2.9.1 Цель работы:** изучение электрических свойств и функциональных характеристик логических интегральных схем серии К155.

**2.9.2 Задачи работы:** собрать схемы типовых логических элементов и провести их исследование.

**2.9.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:** лабораторный стенд «Электроника с МПСО» НТЦ-05.100.

### 2.9.4 Описание (ход) работы:

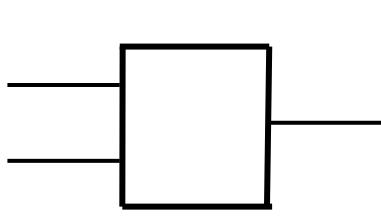
Логические элементы предназначены для выполнения различных логических операций над дискретными сигналами при двоичном способе их представления.

Преимущественное распространение получили логические элементы потенциального типа. В них используется дискретные сигналы, нулевому значению которых соответствует уровень низкого потенциала, а единичному значению - уровень высокого потенциала.

Связь потенциального логического элемента с предыдущим и последующим узлами в системе осуществляется непосредственно, без применения реактивных компонентов. Благодаря

этому преимуществу именно потенциальные логические элементы нашли исключительное применение в интегральном исполнении в виде микросхем. С позиций использования логических микросхем потенциального типа и проводится далее рассмотрение логических элементов.

Логический элемент ИЛИ имеет несколько входов и один общий выход. Его условное обозначение показано на рис. 1, а.



а)

1	2	

б)

Рис. 1. Логический элемент ИЛИ (а) и его таблица истинности (б)

Логический элемент ИЛИ выполняет операцию логического сложения (дизъюнкции).

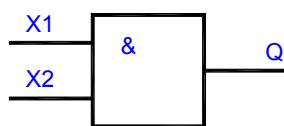
$$Q = X_1 + X_2 + \dots + X_n ,$$

где  $Q$  - функция;  $X_1, X_2 \dots$  - аргументы.

Здесь функция  $Q = 0$ , когда аргументы равны нулю, и  $Q = 1$  при одном, нескольких или всех аргументах, равных единице.

Работу схемы двухходового логического элемента ИЛИ иллюстрируют таблица истинности, приведенная на рис. 1, б.

Логический элемент И также имеет несколько входов и один выход. Его условное обозначение показано на рис. 2, а.



а)

$X_1$	$X_2$	$Q$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

б)

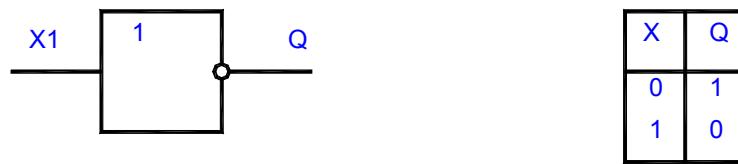
Рис. 2. Логический элемент И (а) и его таблица истинности (б)

Логический элемент И выполняет операцию логического умножения (конъюнкции):  $Q = X_1 X_2 \dots X_n$ .

Здесь функция  $Q = 0$ , когда хотя бы один из ее аргументов равен нулю, и  $Q = 1$  при всех аргументах, равных единице.

Работу схемы двухвходового логического элемента И иллюстрирует таблица истинности, приведенная на рис. 2, б. Элемент И является схемой совпадения: сигнал "1" на выходе появляется при совпадении сигналов "1" на всех входах.

Логический элемент НЕ имеет один вход и один выход. Его условное обозначение



показано на рис. 3, а.

а)

б)

Рис. 3. Логический элемент НЕ (а) и его таблица истинности (б)

Элемент НЕ выполняет операцию инверсии (отрицания), в связи с чем его часто называют логическим инвертором. Им реализуется функция

$$\overline{Q} = X.$$

Сигналу  $X = 0$  на входе соответствует  $Q = 1$  и, наоборот, при  $X = 1 Q = 0$ .

Работу логического элемента НЕ иллюстрирует таблица истинности, приведенная на рис. 3, б.

На основе простейших логических элементов строятся более сложные логические элементы:



а)

б)

Рис. 4. Логический элемент ИЛИ-НЕ (а), логический элемент И-НЕ (б)

Существуют логические элементы в микросхемном исполнении, представляющие комбинацию ранее рассмотренных элементов и позволяющие осуществлять более сложные логические операции. Некоторые из таких элементов и реализуемые ими функции показаны на рис. 5.

На рис.5.,а. приведен элемент 2И-ИЛИ-НЕ. Выполняемая им логическая операция поясняется функциональной схемой рис.5, б.

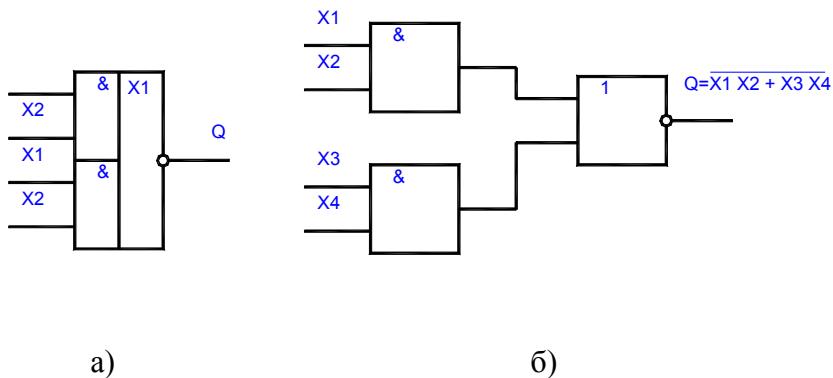


Рис. 5. Логический элемент 2И-ИЛИ-НЕ (а) и его функциональная схема (б)

При синтезе логических схем сначала записывается логическое выражение выходной функции, а затем проводится минимизация (упрощение формы записи) этой функции. Произвести минимизацию функции можно путем ее преобразований с использованием аксиом, законов, тождеств и теорем алгебры логики. Однако такие преобразования требуют громоздких выкладок и связаны с большой затратой времени. Современная алгебра логики располагает рядом приемов, разработанных на основе ее правил, позволяющих производить минимизацию функции более просто, быстро и безошибочно. Для минимизации функции с числом переменных до пяти-шести наиболее удобным является метод карт Карно (или аналогичный метод диаграммы Вейча).

#### Подготовка к работе.

1. Изучить принцип работы и параметры логических элементов серии К155.
2. Для логических элементов И, ИЛИ, НЕ, И-НЕ, ИЛИ-НЕ составить таблицы истинности и пояснить их работу с помощью временных диаграмм.
3. Нарисовать исследуемые схемы логических элементов.
4. Ознакомиться с порядком сборки и исследования схем на стенде.

#### План работы.

1. Для логических элементов НЕ, И, И-НЕ, схемы которых представлены на рис. 6, практически проверить правильность составленных ранее таблиц истинности и временных диаграмм. Для подачи на вход ЛЭ уровня логической "1" необходимо подключить соответствующий вход через сопротивления R76, R79, R72 либо R73 к источнику питания "+5В". Для подачи на вход ЛЭ уровня логического "0" необходимо этот вход подключить к общему проводу. Выходной сигнал ЛЭ регистрируется осциллографом.

2. Подав на один из входов ЛЭ И, а затем на И-НЕ, прямоугольные импульсы от генератора ГС2 зарисовать осциллограммы на выходе при уровне на втором входе "0" и "1". Пояснить полученные осциллограммы.

### Контрольные вопросы.

1. Назовите основные параметры логических элементов.
2. Изобразите схему логического элемента ИЛИ на диодах и поясните ее работу.
3. Изобразите схему логического элемента И на диодах и поясните ее работу.
4. Поясните минимизацию функции с помощью метода карт Карно.
5. Перечислите основные типы логик и дайте им сравнительную оценку.
6. Приведите пример схемной реализации ЛЭ "ИЛИ-НЕ" ТТЛ логики.
7. Приведите пример схемной реализации ЛЭ "И" КМОП логики.

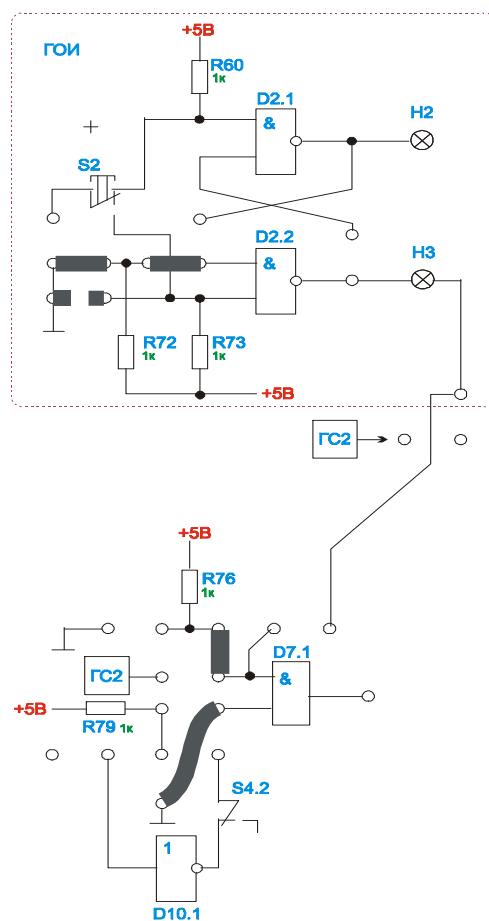


Рис. 6. Схема исследования логических элементов на ИМС