

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

**МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ
ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ**

Б1.Б.12 Электротехника и электроника

Направление подготовки (специальность) 27.03.04 Управление в технических системах

Профиль подготовки (специализация) Интеллектуальные системы обработки информации и управления

Квалификация выпускника бакалавр

Форма обучения заочная

СОДЕРЖАНИЕ

Конспект лекций.....	3
1.1 Лекция № 1 Электрические цепи постоянного тока.....	3
1.2Лекция № 2 Анализ линейных электрических цепей постоянного тока.....	11
1.3Лекция № 3 Полупроводниковые приборы	16
1.4Лекция № 4 Источники вторичного электропитания.....	19
1.8 Лекция 5 Электронные устройства.....	22
2. Методические указания по выполнению лабораторных работ	46
2.1 Лабораторная работа № ЛР-1 Исследование цепи постоянного тока с последовательным и параллельным включением элементов	46
2.2 Лабораторная работа № ЛР-2 Исследование законов Кирхгофа и принципа наложения в сложной электрической цепи постоянного тока	48
2.3 Лабораторная работа № ЛР-3 Исследование законов Кирхгофа и принципа наложения в сложной электрической цепи постоянного тока.....	51
2.4 Лабораторная работа № ЛР-4 Усилитель постоянного тока	55
2.5 Лабораторная работа № ЛР-5 Исследование двухполупериодного мостового выпрямителя при работе со сглаживающими фильтрами.....	57
2.6 Лабораторная работа № ЛР-6 Включение трехфазного трансформатора в трехфазную систему	60
3. Методические указания по проведению практических занятий	62
3.1 Практическое занятие № ПЗ 1Расчет трансформатора.....	62

1. КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

1. 1 Лекция № 1(2 часа).

Тема: «Электрические цепи постоянного тока»

1.1.1 Вопросы лекции:

1. Основные определения и топологические параметры электрических цепей.
2. Основные законы электрических цепей. Закон Ома.
3. Расчет простых цепей при последовательном, параллельном и смешанном включении элементов. Законы Кирхгофа

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:

$$\delta = \frac{I}{S}, \left[\frac{\text{А}}{\text{см}^2} \right]$$

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.

$$E = \frac{A}{q}, [\text{В}]$$

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. Жесткость 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 Основные законы электрических цепей. Закон Ома.

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 а и в 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 сопротивления. 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.

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

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

$$R_{\text{экв}} = \frac{1}{G_{\text{экв}}} .$$

Эквивалентные преобразования (параллельное соединение)

Если элемента только два, то эквивалентное сопротивление определится 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 определится:

$$R_{\text{экв}} = \frac{R}{n}.$$

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:

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

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:

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

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 равны 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 второму 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 узлов (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 :

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

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

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

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

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

1. 2 Лекция №2 (2 часа).

Тема: «Анализ линейных электрических цепей постоянного тока»

1.2.1 Вопросы лекции:

1. Метод контурных токов. Метод узловых потенциалов
2. Мощность цепи постоянного тока. Баланс мощностей

3. Расчет нелинейных цепей постоянного тока

1.2.2 Краткое содержание вопросов:

1 Основные определения и топологические параметры электрических цепей.

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.

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

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{E_1 + U_{bc}}{R_1 + r_{01}} = \frac{E_1 + \varphi_b - \varphi_c}{R_1 + r_{01}} = E_1 \cdot G_1 + \varphi_b \cdot G_1 - \varphi_c \cdot G_1 \\ I_2 &= \frac{U_{cd}}{R_2} = \frac{\varphi_c - \varphi_d}{R_2} = \varphi_c \cdot G_2 - \varphi_d \cdot G_2, \\ I_3 &= \frac{E_3 + U_{ca}}{R_3} = \frac{E_3 + \varphi_c - \varphi_a}{R_3} = E_3 \cdot G_3 + \varphi_c \cdot G_3 - \varphi_a \cdot G_3 \end{aligned}$$

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:

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

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:

$$\begin{aligned} \varphi_a \cdot (G_6 + G_3 + G_5) - \varphi_b \cdot G_6 - \varphi_c \cdot G_3 &= E_3 \cdot G_3, \\ -\varphi_a \cdot G_6 + \varphi_b \cdot (G_6 + G_1 + G_4) - \varphi_c \cdot G_1 &= -E_1 \cdot G_1, \\ -\varphi_a \cdot G_3 - \varphi_b \cdot G_1 + \varphi_c \cdot (G_1 + G_2 + G_3) &= E_1 \cdot G_1 - E_3 \cdot G_3 \end{aligned}$$

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 определятся:

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

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

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

Ток первой ветви определиться:

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

2 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 стремится 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, совершаяя 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.

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

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

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

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.

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

3 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 называются 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 α между прямой, соединяющей точку A с началом координат.

$$R_{\partial u \phi} = \frac{\Delta U_{AB}}{\Delta I_{AB}}.$$

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.

Задача синтеза – проектирования устройств с заданными параметрами, задача анализа – определение параметров существующей установки, в частности расчет токов ветвей и напряжений на участках.

1. 3 Лекция №3 (2 часа).

Тема: «Полупроводниковые приборы»

1.3.1 Вопросы лекции:

1. Полупроводниковые приборы, принцип действия и конструкция
2. Электронные усилители на транзисторах

1.3.2 Краткое содержание вопросов:

1 Полупроводниковые приборы, принцип действия и конструкция

Электроника – отрасль науки и техники, изучающая физические процессы, происходящие в электровакуумных и полупроводниковых приборах при взаимодействии заряженных частиц и электрических полей, а также занимающаяся разработкой и созданием электронных приборов и устройств измерения, контроля, обработки и хранения информации.

Развитие электроники как науки началось с открытия явления термоэлектронной эмиссии (1887 г.), создания электровакуумного диода в 1904 г. английским ученым Флемингом и триода.

Огромный скачок в развитии электроники произошел после открытия в 1922 г. русским ученым Лосевым явления проводимости в полупроводниках, а также разработки группой российских физиков теории полупроводников и их технического применения. Современный этап развития электроники и электронной техники характеризуется использованием новых материалов и технологий, что привело к созданию интегральной микросхемы. Микросхема – миниатюрный функциональный узел электронной аппаратуры, в котором элементы и соединительные провода изготавливаются в едином объеме или на поверхности полупроводника и имеет общую герметичную оболочку. Появление микросхем позволило существенно снизить размеры и энергопотребление устройств, повысить их надежность и быстродействие.

Следующим важным этапом развития электроники является создание микропроцессоров – основных элементов современных электронно-вычислительных машин.

К полупроводникам относят твердые вещества, электропроводность которых, как и в проводниках, связана с перемещением электронов, но значительно меньше электропроводности проводников.

Полупроводниками являются такие химические элементы как германий, кремний, теллур, селен; окислы металлов; сернистые соединения (сульфиды); соединения с селеном.

Элементы физики полупроводников

Рассмотрим упрощенную схему структуры кристалла полупроводника (германия). Четыре электрона внешней электронной оболочки каждого атома участвуют в связях с четырьмя соседними атомами. В веществе нет свободных электронов, которые могли бы перемещаться для образования тока.

Любая поступившая (тепловая, лучистая, электрическая) энергия извне, сообщает электрону атома энергию, достаточную для того, чтобы порвать парно-электронную связь. Электрон, освободившись, становится носителем заряда – электроном проводимости.

«Пустое место», образующееся в результате выхода электрона, получившее название «дырки» соответствует положительному заряду. Дырки могут заполняться электронами, из соседнего нейтрального атома.

При отсутствии внешнего электрического поля перемещение электронов и дырок хаотичное. При наличии внешнего электрического поля в полупроводнике дырки дрейфуют по направлению поля, а электроны – в противоположном направлении. Следовательно, в полупроводнике имеются два типа носителей тока: дырки проводимости и электроны проводимости.

При освещении проводника энергия света, передаваясь электронам, вызывает усиленное высвобождение их из связей с атомами, что при наличии разности потенциалов так же, как и при нагревании, ведет к появлению тока. Это явление называется фотопроводностью.

Принцип действия многих полупроводниковых приборов основан на получении в полупроводнике электропроводности, связанной с присутствием свободных носителей электрического заряда какого-либо одного типа: только электронная (*n*-типа) или только дырочная (*p*-типа). Такая электропроводность может быть получена добавлением в кристалл полупроводника примесей других элементов (индий, фосфор, сурьма, бора, алюминия). Получаемая при этом электропроводность называется примесной, может быть значительно больше, чем электропроводность чистого полупроводника. Электронная примесная проводимость возникает, когда у атома примеси одним валентным электроном больше (донарная примесь), а дырочная – когда у атома примеси одним электроном меньше (акцепторная примесь).

Полупроводниковые диоды

Полупроводниковый диод – электронный прибор с одним *p* – *n* переходом и двумя выводами.

В пограничном слое двух полупроводников с различным характером электропроводности при одном направлении тока дырки и электроны движутся навстречу друг другу, при их встрече происходит рекомбинация. В цепи, таким образом, протекает ток.

Если изменить направление напряжения на обратное, то изменится и направление движение носителей зарядов. При этом, они будут двигаться ни навстречу друг к другу, а в противоположные стороны. В результате чего в пограничной области образуется слой, лишенный свободных носителей зарядов, так называемый запирающий слой.

Таким образом, полупроводниковый диод хорошо пропускает ток одного направления (прямой ток) и плохо пропускает ток противоположного направления (обратный ток). Поэтому, диоды используют, в основном, для выпрямления тока. По конструктивному исполнению различают точечные и плоские диоды. У точечных диодов размеры *p* – *n* перехода меньше его толщины, а значит, прямой ток имеет небольшую величину (мА). Такой диод используется для выпрямления тока в слаботочных устройствах сверхвысокой частоты.

Плоский диод имеет размеры *p* – *n* перехода, больше чем его толщина, поэтому прямой ток составляет от единиц до тысяч ампер.

Вольтамперная характеристика диода. Стабилитрон

Условное графическое обозначение диода и его идеализированная вольтамперная характеристика, представлены следующим слайдом. ВАХ имеет три участка:
1 – прямая ветвь, характеризуется незначительным значением сопротивления;

- 2 – обратная ветвь;
 3 – участок стабилизации, характеризуется большой величиной сопротивления.

Полупроводниковые диоды, у которых рабочим участком является участок стабилизации, называются стабилитронами. Стабилитроны используют для стабилизации напряжения в различных электронных устройствах, например, в блоках питания. Одним из основных параметров, учитываемых при выборе стабилитрона, является напряжение стабилизации (пробоя). В справочных данных указывается номинальное напряжение стабилизации для определенного тока, максимальный и минимальный токи стабилизации. Параметры схем со стабилитронами выбираются так, чтобы длительный средний ток через них был меньше максимально допустимого. Кратковременно же стабилитрон способен выдержать токи, большие максимального значения.

Транзисторы

Транзистор – управляемый полупроводниковый прибор, служащий для усиления мощности электрических сигналов.

По принципу действия транзисторы делятся на: управляемые электрическим током (биполярные), и управляемые электрическим полем (полевые).

Биполярный транзистор имеет трехслойную структуру с тремя выводами. В зависимости от способа чередования слоев различают $p-n-p$ или $n-p-n$ типа.

Средний слой называется базой, вывод обозначается буквой Б. Один крайний слой – коллектором (К), другой – эмиттером (Э).

Биполярный транзистор

Один из крайних слоев транзистора соединяется через свой электрод с источником постоянного напряжения. Если это $p-n-p$ -переход, то эмиттер соединяется с положительным выводом источника напряжения а база с отрицательным выводом этого же источника. Т.е. к зажимам «база-эмиттер» приложено прямое напряжение, дырки $p-n$ -перехода притягиваются. Небольшая часть дырок рекомбинирует в базе с ее электронами. К зажимам «база-коллектор» приложено обратное напряжение другого источника большей величины. Дырки из правого крайнего слоя перемещаются по направлению коллекторного выхода. Причем это направленное движение основных носителей заряда данного слоя (дырок), а также носителей заряда эмиттера, прошедших через базу. Чтобы большая часть дырок достигла коллектора, слой базы должен иметь малую толщину.

Таким образом, через вывод коллектора проходит в обратном направлении ток, представляющий сумму тока, обусловленного собственными носителями, и тока, обусловленными инжектированными носителями:

$$I_K = I_{\text{обр}} + I_{p,\text{инж}}$$

Коэффициент передачи тока

$$\alpha = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_E}$$

при постоянном напряжении является одним из основных параметров транзистора.

2 Электронные усилители на транзисторах

Усиление электрических сигналов необходимо при приеме радио- и телесигналов, контроле и автоматизации технологических процессов. усиление сигналов осуществляется с помощью усилителей.

Усилители предназначены для увеличения мощности сигнала за счет энергии источника питания.

В зависимости от формы сигнала усилители классифицируются на: усилители непрерывных сигналов, называемые усилителями постоянного тока; усилители сигналов с гармоническим несущим процессом (усилители переменного тока); усилители импульсных сигналов (импульсные усилители).

Простейшим усилителем является усилительный каскад, содержащий нелинейный управляемый элемент, как правило, биполярный транзистор, резистор и источник электрической энергии.

На входную цепь усилительного каскада подводится входное напряжение (усиливаемый сигнал)

Простейшим усилителем является усилительный каскад, содержащий нелинейный управляемый элемент, как правило, биполярный транзистор, резистор и источник электрической энергии.

1. 4 Лекция №4 (2 часа).

Тема: «Источники вторичного электропитания»

1.4.1 Вопросы лекции:

1. Источники вторичного электропитания: выпрямители, фильтры, стабилизаторы напряжения

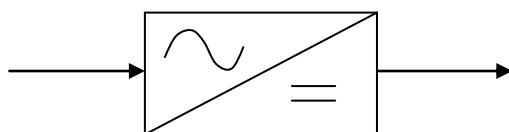
1.4.2 Краткое содержание вопросов:

1 Источники вторичного электропитания: выпрямители, фильтры, стабилизаторы напряжения

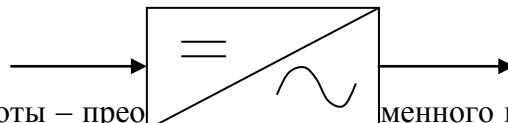
В качестве первичных источников электропитания для ЭУ и систем обычно используют либо промышленную сеть переменного тока, либо автономные источники переменного (генераторы) или постоянного (аккумуляторы, химические батареи и т.д.) тока.

Источники вторичного электропитания (ИВЭП) – электронные устройства, предназначенные для преобразования энергии первичного источника электропитания в электрическую энергию значения частоты, уровня и стабильности которой согласованы с требованиями, предъявляемыми к этим параметрам конкретными электронными устройствами (ЭУ) и системами.

1. Выпрямитель – преобразователь электрической энергии; механическое, электровакуумное или полупроводниковое устройство, предназначенное для преобразования переменного входного электрического тока в постоянный выходной электрический ток. Большинство выпрямителей создаёт не постоянные, а пульсирующие односторонние напряжение и ток, для сглаживания пульсаций которых применяют фильтры.

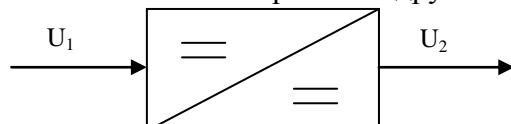


2. Инвертор – устройство преобразования постоянного тока в переменный. Обычно представляет собой генератор периодического напряжения, по форме приближённого к синусоиде.

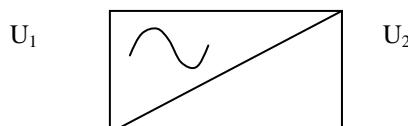


3. Преобразователь частоты – преобразует постоянное напряжение одной частоты в переменное напряжение другой частоты.

4. Регуляторы постоянного напряжения (конверторы) – преобразуют постоянное напряжение одного уровня в постоянное напряжение другого уровня.



5. Регуляторы переменного напряжения – преобразуют переменное напряжение одного уровня в переменное напряжение другого уровня.



6. Трансформатор (Т) – статическое устройство, предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции напряжений переменного тока с одними параметрами в напряжение с другими параметрами. С помощью силового трансформатора источника вторичного электропитания осуществляется гальваническая развязка высоковольтных, опасных для жизни цепей напряжения электрической сети и вторичных цепей устройств потребителей. Низкочастотные трансформаторы малой мощности промышленного изготовления обладают высокой надежностью и энергетической эффективностью (КПД). С определенной степенью приближения трансформатор можно считать линейным устройством преобразования электрической энергии.

Выпрямительное устройство (В) источника питания предназначено для преобразования электрической энергии переменного тока в энергию постоянного тока. В источниках вторичного электропитания находят применение нерегулируемые и реже регулируемые выпрямители, выполняемые на полупроводниковых приборах: диодах, тиристорах или транзисторах. В регулируемых выпрямителях одновременно с функцией выпрямления выполняется регулирование выходного напряжения. Выпрямитель является нелинейным устройством, которое в общем случае обладает определенной энергетической эффективностью.

Источники питания включают, как правило, несколько **фильтров (ФНЧ** - фильтр низкой частоты), с помощью которых осуществляется подавление паразитных гармоник напряжения и тока или сглаживание выпрямленного напряжения. Пассивные фильтры (включающие емкости, индуктивности и резисторы) являются линейными устройствами, поскольку строятся на основе только линейных элементов. Для фильтрации низкочастотных пульсаций и получения весьма значительного подавления помех

используют активные фильтры. В большинстве случаев применения фильтр источников питания обладает высоким КПД.

Большинство источников вторичного электропитания содержат в своем составе **стабилизаторы напряжения и тока**, как простейшие *параметрические*, так и более сложные – *компенсационные*. Стабилизаторы предназначены для автоматического поддержания напряжения (тока) на выходе с заданной степенью точности. Стабилизаторы являются сравнительно сложными устройствами, КПД которых зависит от типа стабилизатора и принципа регулирования энергии.

Достоинства такой схемы: простота, недорогие типовые электронные полупроводниковые элементы и малое их количество.

Недостатки: большая масса и габариты низкочастотного трансформатора, сглаживающего фильтра, линейного стабилизатора напряжения, а также большие потери в стабилизаторе. Из-за этих недостатков такая схема питания в современных устройствах применяется редко.

Однополупериодный выпрямитель на полупроводниковых диодах

Наиболее часто источники постоянного напряжения получают путем преобразования синусоидального напряжения в постоянное. Устройства, осуществляющие такое преобразование, называются выпрямителями. Рассмотрим схему однополупериодного выпрямителя. Она состоит из последовательного соединения источника переменной ЭДС, диода и нагрузочного резистора. Источник ЭДС является однофазным, и ток проходит через него в одном направлении один раз за период (один такт за период).

В течение положительного полупериода ЭДС напряжение для диода является прямым, сопротивление его мало, и проходит ток, создающий на нагрузочном резисторе падение напряжения $U_R = U_{\text{вых}}$.

В течение обратного полупериода напряжение является обратным, тока практически нет из-за большого сопротивления диода и напряжение на выходе равно нулю.

Таким образом, через диод, нагрузочный резистор и источник проходит пульсирующий ток в виде импульсов, дляящихся полпериода и разделенных промежутками также в полпериода. Этот ток называется выпрямленным, он создает на резисторе пульсирующее напряжение, полярность которого: со стороны катода получается плюс, а со стороны анода – минус.

Полезной частью выпрямленного напряжения является его постоянная составляющая, или среднее значение, которое за весь период равно:

$$U_{\text{ср}} \approx 0,318 \cdot U_m$$

Вычитая из пульсирующего напряжение среднее значение, получим переменную составляющую, которая имеет синусоидальную форму. Переменная составляющая является вредной частью выпрямленного напряжения, для ее уменьшения в нагрузочном резисторе и в выходном напряжении, т.е. сглаживании пульсации выпрямленного напряжения применяют сглаживающие фильтры. Простейшим сглаживающим фильтром является конденсатор большой мощности, через который ответвляется переменная составляющая тока. При наличии конденсатора среднее значение приближается к амплитудному значению напряжения источника.

Основными электрическими параметрами однополупериодного выпрямителя являются:

- средние значения выпрямленного тока и напряжения $I_{\text{ср}}, U_{\text{ср}}$;
- мощность нагрузки $P_{\text{ср}} = U_{\text{ср}} \cdot I_{\text{ср}}$;
- амплитуда основной гармоники выпрямленного напряжения U_m ;
- коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения $p = \frac{U_m}{U_{\text{ср}}}$;
- действующие значения тока и напряжения первичной и вторичной обмоток трансформатора I_1, U_1, I_2, U_2 ;
- типовая мощность трансформатора $S_{\text{тр}} = 0,5 \cdot (S_1 + S_2)$;
- КПД

$$\eta = \frac{P_{\text{ср}}}{P_{\text{ср}} + P_{\text{тр}} + P_{\text{Д}}}.$$

Двухполупериодный мостовой выпрямитель

Наибольшее распространение получил двухполупериодный мостовой выпрямитель, который состоит из трансформатора и четырех диодов, подключенных к вторичной обмотке трансформатора по мостовой схеме. К одной диагонали моста присоединена обмотка трансформатора, а к другой - нагрузочный резистор. Каждая пара работает поочередно 1 и 3, затем 2 и 4.

Первый и третий диоды открыты в первый полупериод напряжения, когда потенциал точки a больше потенциала точки b . В следующем полупериоде напряжение на обмотке меняет свое направление, диоды два и четыре открыты, а один и три закрыты. В оба полупериода ток через нагрузочный резистор имеет одно и то же направление.

Среднее значение выпрямленного напряжения:

$$U_{\text{ср}} = \frac{2 \cdot U_m}{\pi}.$$

Таким образом, достоинством такой схемы выпрямления является большая, в два раза, величина среднего значения выпрямленного напряжения и тока; пульсация значительно меньше, что уменьшает габариты сглаживающего фильтра.

1. 5 Лекция №5 (2 часа).

Тема: «Электронные устройства»

1.5.1 Вопросы лекции:

1. Аналогово-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи
2. Импульсные устройства
3. Основные элементы алгебры логики
4. Микропроцессорные средства

1.5.2 Краткое содержание вопросов:

1 Аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи.

Цифровая электроника в настоящее время все более и более вытесняет традиционную аналоговую. Ведущие фирмы, производящие самую разную электронную аппаратуру, все чаще заявляют о полном переходе на цифровую технологию. Причем это относится как к бытовой технике (аудио-, видеоаппаратура, средства связи), так и к профессиональной технике (измерительная, управляющая аппаратура). Ставшие уже привычными персональные компьютеры также полностью реализованы на основе цифровой технологии.

Аналоговый сигнал – это сигнал, который может принимать любые значения в определенных пределах (например, напряжение может плавно меняться в пределах от нуля до десяти вольт). Устройства, работающие только с аналоговыми сигналами, называются аналоговыми устройствами.

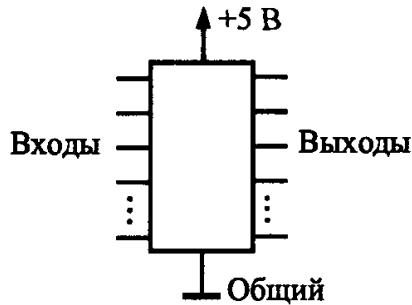
Цифровой сигнал – это сигнал, который может принимать только два значения. Причем разрешены некоторые отклонения от этих значений. Например, напряжение может принимать два значения: от 0 до 0,5 В (уровень нуля) или от 2,5 до 5 В (уровень единицы). Устройства, работающие исключительно с цифровыми сигналами, называются цифровыми устройствами.

В отличие от аналоговых, цифровые сигналы, имеющие всего два разрешенных значения, защищены от действия шумов, наводок и помех гораздо лучше. Небольшие отклонения от разрешенных состояний никак не искажают цифровой сигнал, так как всегда существуют зоны допустимых отклонений. Именно поэтому цифровые сигналы допускают гораздо более сложную и многоступенчатую обработку, гораздо более длительное хранение без потерь и гораздо более качественную передачу, чем аналоговые. К тому же поведение цифровых устройств всегда можно абсолютно точно рассчитать и предсказать. Цифровые устройства гораздо меньше подвержены старению, так как небольшое изменение их параметров никак не отражается на их функционировании. Кроме того, цифровые устройства проще проектировать и отлаживать.

Все цифровые устройства строятся из логических микросхем, каждая из которых обязательно имеет следующие выводы:

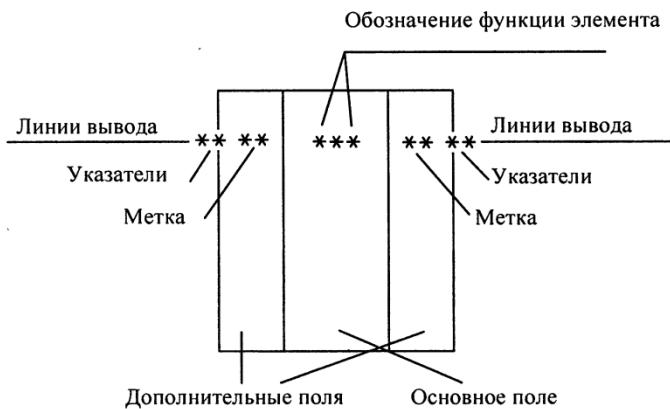
- выводы питания: общий (или «земля») и напряжения питания (в большинстве случаев +5 В или +3,3 В), которые на схемах обычно не показываются;
- выводы для входных сигналов (или «входы»), на которые поступают внешние цифровые сигналы;

- выводы для выходных сигналов (или «выходы»), на которые выдаются цифровые сигналы из самой микросхемы.



Цифровая микросхема

Цифровые микросхемы или микросборки, их элементы или компоненты обозначаются на принципиальных схемах УГО в соответствии с ГОСТ 2.743-91. УГО микросхемы имеет форму прямоугольника, к которому подводят линии выводов. Оно может содержать три поля: основное и два дополнительных.

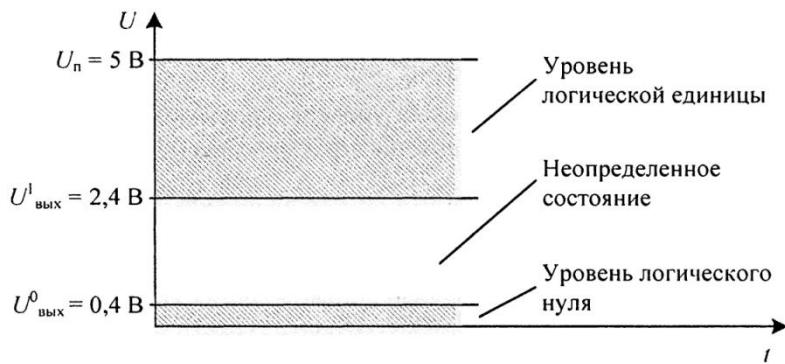


УГО цифровых микросхем

Каждая микросхема преобразует тем или иным способом последовательность входных сигналов в последовательность выходных сигналов. Способ преобразования чаще всего описывается или в виде таблицы (так называемой *таблице истинности*) или в виде временных диаграмм, то есть графиков зависимости от времени всех сигналов.

Все цифровые микросхемы работают с логическими сигналами, имеющими два разрешенных уровня напряжения. Один из этих уровней называется *уровнем логической единицы* (или единичным уровнем), а другой - *уровнем логического нуля* (или нулевым уровнем). Чаще всего логическому нулю соответствует низкий уровень напряжения, а

логической единице – высокий уровень напряжения. В этом случае говорят, что принята «*положительная логика*». Однако при передаче сигналов на большие расстояния и в системных шинах микропроцессорных систем порой используют и обратное представление, когда логическому нулю соответствует высокий уровень напряжения, а логической единице – низкий уровень. В этом случае говорят о «*отрицательной логике*».



Уровни логических сигналов на выходе цифровых микросхем

Логическими элементами (ЛЭ) называются функциональные устройства, с помощью которых реализуются элементарные логические функции. Они обычно используются для построения сложных преобразователей цифровых сигналов комбинационного типа. В комбинационных устройствах отсутствует внутренняя память. Сигналы на их выходах в любой момент однозначно определяются сочетаниями сигналов на входах и не зависят от предыдущих состояний системы.

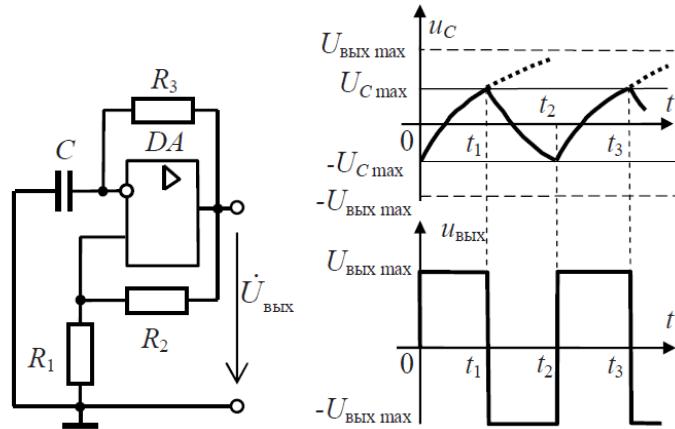
Практически все цифровые устройства без памяти (комбинаторные устройства) могут быть построены на основе трех простейших логических элементов. Все более сложные системы реализуются из этих простейших логических элементов как из кубиков. Остановимся на описании простейших логических элементов.

2 Импульсные устройства

Мультивибратор — релаксационный генератор электрических колебаний прямоугольного типа с крутыми фронтами. Термин предложен голландским физиком ван дер Полем, так как в спектре мультивибратора присутствует множество гармоник — в отличие от генератора синусоидальных колебаний («*моновибратора*»).

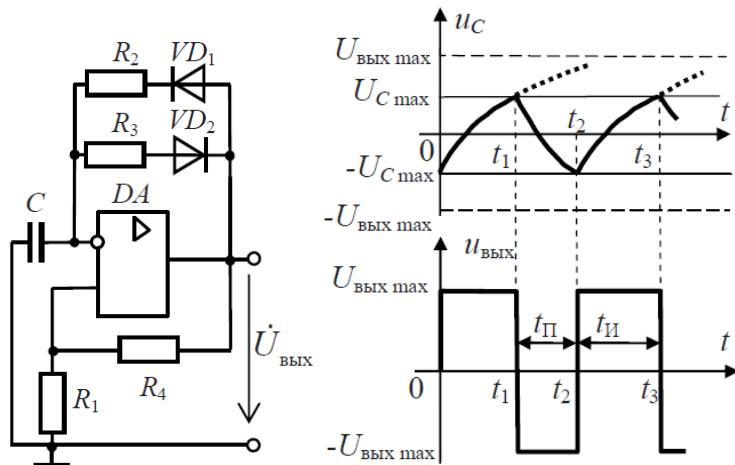
Мультивибратор является одним из самых распространённых генераторов импульсов прямоугольной формы, представляющий собой двухкаскадный резистивный усилитель с глубокой положительной обратной связью. В электронной технике используются самые различные варианты схем мультивибраторов, которые различаются между собой по типу используемых элементов (ламповые, транзисторные, тиристорные,

микроэлектронные и так далее), режиму работы (автоколебательный, ждущий синхронизации), видам связи между усилительными элементами, способам регулировки длительности и частоты генерируемых импульсов и так далее.



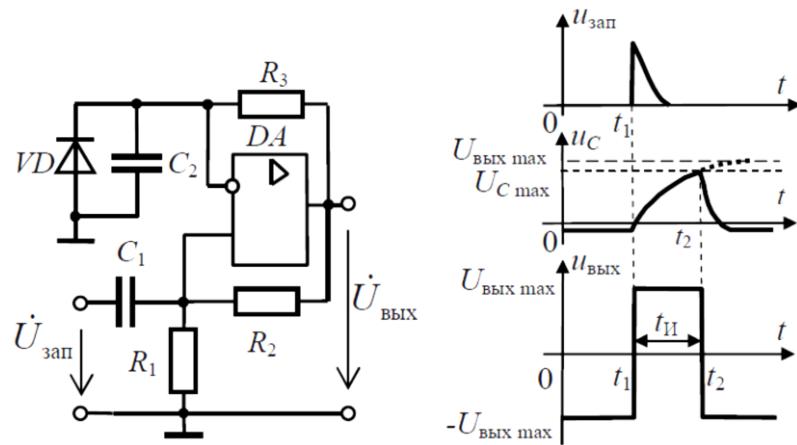
Мультивибратор симметричных колебаний

и его временные диаграммы



Мультивибратор несимметричных колебаний

и его временные диаграммы



Мультивибратор в ждущем режиме

Мост Вина представляет собой двойной делитель напряжения, первый из которых является частотно-зависимой цепью. Этот делитель ослабляет напряжение тем больше, чем заметнее текущая частота отличается от его собственной, квазирезонансной частоты $f_o=1/2\pi CR$.

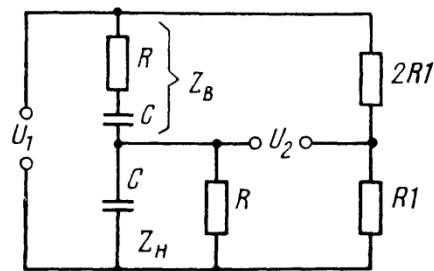
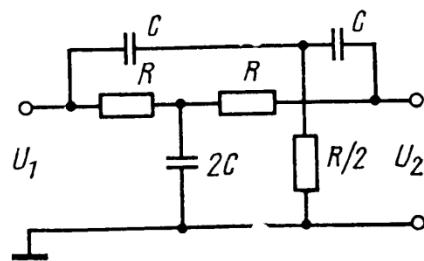


Схема моста Вина

Двойной Т-образный мост (2Т-мост) содержит по три резистора и конденсатора. В отличие от моста Вина, он имеет общую точку у выхода, что расширяет возможности применения. Но вместе с тем он менее удобен при перестройке частоты f_o , так как требует изменения либо сопротивления трех резисторов R , R и $R/2$, либо емкостей трех конденсаторов C , C и $2C$.



. Схема моста типа 2Т

Генератор гармонических (синусоидальных) колебаний фиксированных частот в пределах от нескольких герц до десятков и выше килогерц несложно выполнить на операционном усилителе. В общем случае генератором называется автоколебательная структура, в которой энергия источников питания преобразуется в энергию электрических автоколебаний. Основной цепью одного из видов подобного генератора является 2Т-мост на RC-элементах с квазирезонансной частотой $f_o=1/2\pi CR$. Этот мост находится в цепи ОС; процесс генерирования обеспечивает положительная ОС, цепь которой состоит из делителя напряжения $R_1 R_2 R_3$. Подстроечный резистор R предназначен для плавной регулировки амплитуды выходного напряжения. Практически для возникновения собственных колебаний достаточно выбрать $R_2+R_3=(10\dots 20)R_{2H}$ и $R_1=(0,05\dots 0,1)(R_2+R_3)$. Стабилитроны VD1, VD2 ограничивают размах генерируемых колебаний и способствуют приближению их формы к синусоидальной.

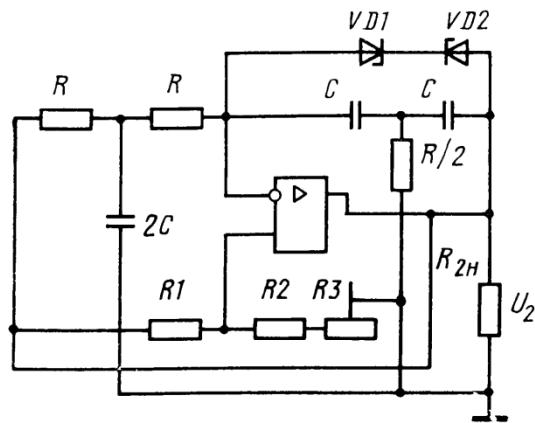


Схема генератора синусоидальных колебаний

Генератор прямоугольных импульсов можно получить с помощью стабилитронов VD1, VD2. Цепь положительной ОС у генератора состоит из делителя напряжения $R_3 R_4$. Частотно-зависимая ОС обеспечивается элементами $C_1 R_2$. Для ограничения тока, потребляемого стабилитронами, включен резистор R_5 . Резисторы R_1 с сопротивлением около 100 кОм предназначен для повышения действенности защиты входа, содержащейся в ОУ.

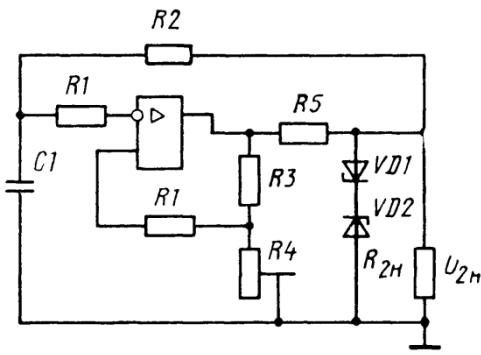


Схема генератора симметричных
прямоугольных импульсов

3 Основные элементы алгебры логики.

Работа всех цифровых устройств основана на *алгебре логики*. В ее основе лежат функции логического отрицания, логического сложения (дизъюнкция) и логического умножения (конъюнкция). Аксиомы алгебры логики:

$$\bar{\bar{x}} = x$$

$$x + \bar{x} = 1$$

$$x + 1 = 1;$$

$$x + x = x;$$

$$x + 0 = x;$$

$$x * \bar{x} = 0$$

$$x * x = x;$$

$$x * 0 = 0;$$

$$x * 1 = x;$$

Функция «не», инвертор

$$\begin{aligned}
 \bar{0} &= 1 & 0 + 0 &= 0 & 0 \cdot 0 &= 0 \\
 \bar{1} &= 0 & 0 + 1 &= 1 & 0 \cdot 1 &= 0 \\
 1 + 0 &= 1 & 1 \cdot 0 &= 0 \\
 1 + 1 &= 1 & 1 \cdot 1 &= 1
 \end{aligned}$$

Простейшим логическим элементом является инвертор, который просто изменяет значение входного сигнала на прямо противоположное значение. Его функция записывается в следующем виде:

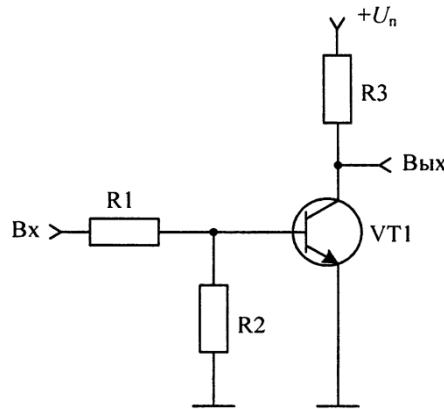
$$F = \overline{X}$$

где черта над входным значением обозначает изменение его на противоположное. То же самое действие можно записать при помощи таблицы истинности. Так как вход у этого логического элемента лишь один, его таблица истинности состоит только из двух строк.

X	F
0	1
1	0

Таблица истинности функции «не» (инвертор)

В качестве инвертора в простейшем случае можно использовать обычный усилитель с транзистором, включенным по схеме с общим эмиттером или истоком.



Схема, позволяющая реализовать
функцию логического инвертирования

Для того чтобы особенности включения транзисторов не затеняли выполняемую функцию, для цифровых микросхем введены специальные условно-графические обозначения.

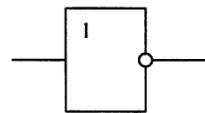


Рис. 21.4. УГО логического инвертора

В одном корпусе микросхемы обычно бывает шесть инверторов. Отечественное обозначение микросхем инверторов – ЛН. Примеры: КР1533ЛН1 (SN74ALS04).

Две основные области применения инверторов – это изменение полярности сигнала и изменение полярности фронта сигнала. То есть из положительного входного сигнала инвертор делает отрицательный выходной сигнал и наоборот, а из положительного фронта входного сигнала – отрицательный фронт выходного сигнала и наоборот. Еще одно важное применение инвертора – буферизация сигнала (с инверсией), то есть увеличение нагрузочной способности сигнала. Это бывает нужно в том случае, когда какой-то сигнал надо подать на много входов, а выходной ток источника сигнала недостаточен.



Инверсия полярности сигнала и
инверсия полярности фронта сигнала

Функция «и», логическое умножение

Следующим простейшим логическим элементом является схема, реализующая операцию логического умножения «и»:

$$F = X \wedge Y$$

Где символ \wedge обозначает функцию логического умножения (конъюнкцию). Иногда эта же функция записывается в другом виде:

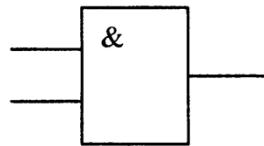
$$F = X \wedge Y = X \cdot Y = X \& Y$$

То же самое действие можно записать при помощи таблицы истинности. В формуле, приведенной выше, использовано два аргумента. Поэтому элемент, выполняющий эту функцию, имеет два входа. Такой элемент обозначается «2И». Для элемента «2И» таблица истинности будет состоять из четырех строк.

X	Y	F
0	0	0
0	1	0

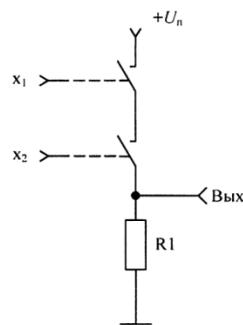
1	0	0
1	1	1

Как видно из приведенной таблицы истинности, активный сигнал на выходе этого логического элемента появляется только тогда, когда обоих входах будут присутствовать логические единицы.



УГО элемента, выполняющего
функцию логического умножения

Проще всего понять, как работает такой элемент при помощи схемы, построенной на идеализированных ключах с электронным управлением, как это показано на рисунке. В приведенной схеме ток будет протекать только тогда, когда оба ключа будут замкнуты, а значит, единичный уровень на выходе схемы появится только при подаче на ее вход двух логических единиц.



Эквивалентная схема, реализующая
логическую функцию «2И»

Функция «или», логическое сложение

Следующим простейшим элементом является схема, реализующая операцию логического сложения «или»:

$$F = X \vee Y$$

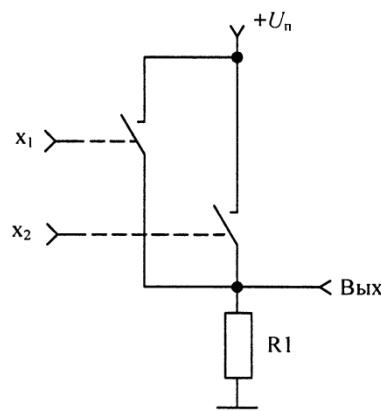
Где символ \vee обозначает функцию логического сложения (дизъюнкция). Иногда эта же функция записывается в другом виде:

$$F = X \vee Y = X + Y = X|Y$$

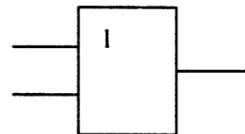
Таблица истинности для данного элемента:

X	Y	F
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Эквивалентная схема, реализующая таблицу истинности для данного элемента, приведена на рисунке. Как видно из приведенной схемы, уровень логической единицы появится на ее выходе, как только будет замкнут любой из ключей.



Эквивалентная схема, реализующая логическую функцию «2ИЛИ»



УГО элемента, выполняющего функцию логического сложения

Инверсию логической суммы двух величин называют *стрелкой Пирса*:

$$F = \overline{X + Y} \text{ или } F = X \downarrow Y$$

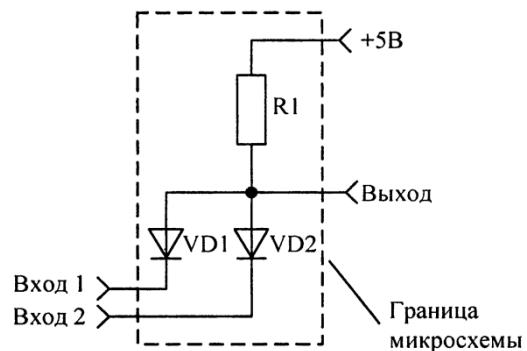
а логического произведения – *штиrixом Шеффера*:

$$F = \overline{X \cdot Y} \text{ или } F = X / Y$$

В настоящее время используется несколько технологий схемотехнического построения логических элементов:

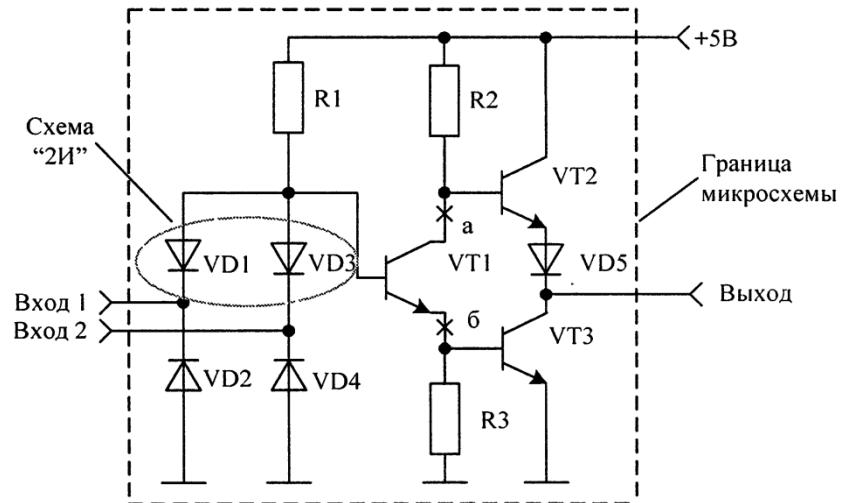
- диодно-транзисторная логика (ДТЛ);
- транзисторно-транзисторная логика (ТТЛ);
- логика на основе комплементарных МОП-транзисторов (КМОП);
- логика на основе сочетания комплементарных МОП и биполярных транзисторов (BiCMOS).

Диодно-транзисторная логика (ДТЛ) - технология построения цифровых схем на основе биполярных транзисторов, диодов и резисторов. Своё название технология получила благодаря реализации логических функций (например, 2И) с помощью диодных цепей, а усиления и инверсии сигнала — с помощью транзистора. Наиболее простая реализация логического элемента «и» получается при помощи диодов.



Принципиальная схема логического элемента «2И»,
выполненного на диодах

В этой схеме при подаче нулевого потенциала на любой из входов (или на оба сразу) через резистор будет протекать ток и на его сопротивлении возникнет падение напряжения. Напряжение на выходе схемы в этой ситуации будет близко к потенциальну общего провода. В результате единичный потенциал на выходе схемы появиться, только если подать единичный потенциал сразу на оба входа логического элемента. То есть анализируемая схема реализует логическую функцию «2И».



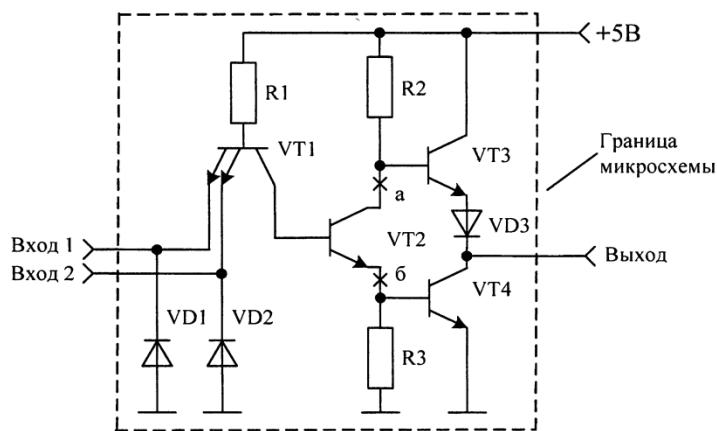
Принципиальная схема базового элемента микросхемы ДТЛ

На рисунке приведена схема построения логического элемента «2И-НЕ». В этой схеме транзистор VT1 инвертирует сигнал на выходе элемента «И». То есть вместо логической единицы на выходе этой схемы присутствует логический ноль. И, наоборот, вместо логического нуля на выходе схемы присутствует логическая единица. В результате базовый элемент ДТЛ реализует не просто функцию «2И», а более сложную логическую функцию «2И-НЕ».

Транзисторно-транзисторная логика (ТТЛ, TTL) — разновидность цифровых логических микросхем, построенных на основе биполярных транзисторов и резисторов. Название *транзисторно-транзисторный* возникло из-за того, что транзисторы используются как для выполнения логических функций (например, И, ИЛИ), так и для усиления выходного сигнала (в отличие от резисторно-транзисторной и диодно-транзисторной логики). Характерной особенностью ТТЛ ЛЭ является наличие на их входе многоэмиттерных транзисторов (МЭТ), с помощью которых реализуется требуемая логическая функция.

Простейший базовый элемент ТТЛ выполняет логическую операцию И-НЕ, в принципе повторяет структуру ДТЛмикросхем и в то же время за счёт использования многоэмиттерного транзистора, объединяет свойства диода и транзисторного усилителя что позволяет увеличить быстродействие и энергопотребление, снизить потребляемую мощность и усовершенствовать технологию изготовления микросхемы.

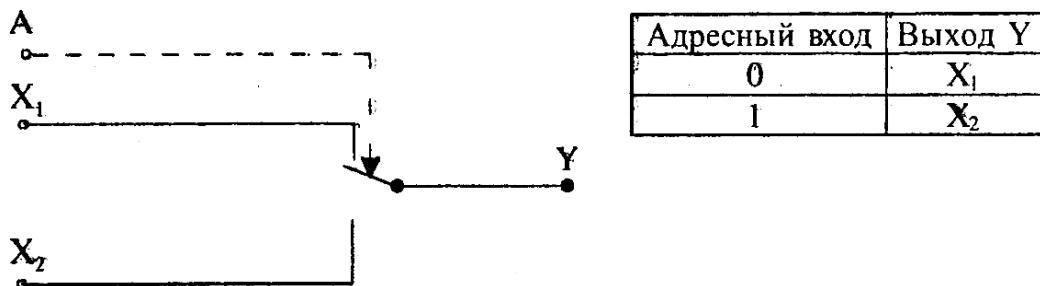
ТТЛ получила широкое распространение в компьютерах, электронных музыкальных инструментах, а также в контрольно-измерительной аппаратуре и автоматике (КИПиА). Благодаря широкому распространению ТТЛ входные и выходные цепи электронного оборудования часто выполняются совместимыми по электрическим характеристикам с ТТЛ. Максимальное напряжение в схемах с ТТЛ может достигать 24В, однако это приводит к большому уровню паразитного сигнала. Достаточно малый уровень паразитного сигнала при сохранении достаточной эффективности достигается при напряжении 5В, поэтому данная цифра и вошла в технический регламент ТТЛ.



Принципиальная схема типового элемента ТТЛ-микросхемы («2И-НЕ»)

Мультиплексором называют комбинационное устройство, обеспечивающее передачу в желаемом порядке цифровой информации, поступающей по нескольким входам на один выход. Мультиплексоры обозначают через MUX, а также через MS. Функционально мультиплексор можно изобразить в виде коммутатора, обеспечивающего подключение одного из нескольких входов (их называют информационными) к одному выходу устройства. Кроме информационных входов в мультиплексоре имеются адресные входы и разрешающие (стробирующие). Сигналы на адресных входах определяют, какой конкретно информационный канал подключен к выходу. Если между числом информационных входов n и числом адресных входов m существует соотношение $n=2^m$, то такой мультиплексор называют полным. Если $n < 2^m$, то мультиплексор называют неполным.

Рассмотрим функционирование двухвходового мультиплексора ($2 \rightarrow 1$), который условно изображен в виде коммутатора, а состояние его входов X_1 , X_2 и выхода Y приведено в таблице

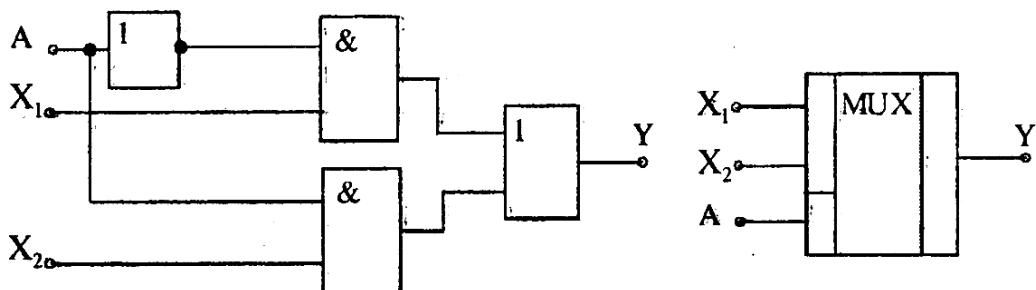


Двухвходовый мультиплексор

Исходя из таблицы, можно записать следующее уравнение:

$$Y = X_1 \cdot \bar{A} + X_2 \cdot A.$$

На рисунке показаны реализация такого устройства и его условное графическое обозначение. Основой данной схемы является две схемы совпадения на элементах И, которые при логическом уровне «1» на одном из своих входов повторяют на выходе то, что есть на другом входе.



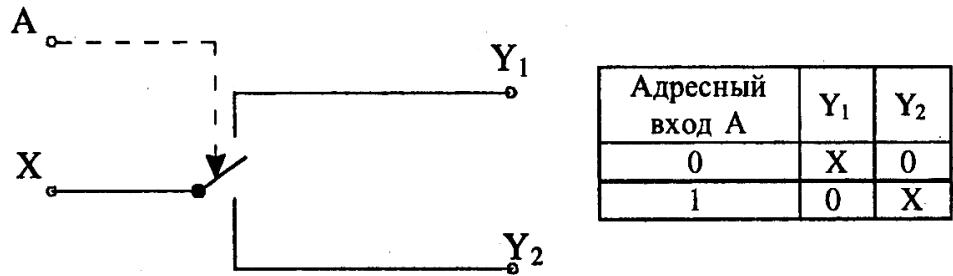
Реализация двухвходового мультиплексора

на логических элементах И

Мультиплексоры являются универсальными логическими устройствами, на основе которых создают различные комбинационные и последовательностные схемы. Мультиплексоры могут использовать в делителях частоты, триггерных устройствах, сдвигающих устройствах, для преобразования параллельного двоичного кода в последовательный и др.

Демультиплексором называют устройство, в котором сигналы с одного информационного входа поступают в желаемой последовательности по нескольким выходам в зависимости от кода на адресных шинах. Таким образом, демультиплексор в

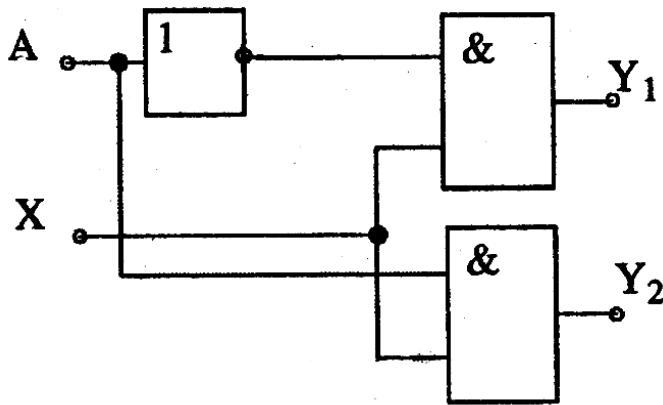
функциональном отношении противоположен мультиплексору. Демультиплексоры обозначают через DMX или DMS.



Функциональная схема демультиплексора с двумя выходами

Если соотношение между числом выходов n и числом адресных входов m определяется равенством $n=2^m$, то такой демультиплексор называют полным, при $n < 2^m$ демультиплексор является неполным.

Рассмотрим функционирование демультиплексора с двумя выходами, который условно изображен в виде коммутатора, а состояние его входов приведено в таблице (рис. 16.8). Из этой таблицы следует: $Y_1 = X \cdot \bar{A}$; $Y_2 = X \cdot A$, т.е. реализовать такое устройство можно так, как показано на рис. 22.14.



Реализация демультиплексора с двумя выходами
на логических элементах И

Функции демультиплексоров сходны с функциями дешифраторов. Дешифратор можно рассматривать как демультиплексор, у которого информационный вход поддерживает напряжение выходов в активном состоянии, а адресные входы выполняют роль входов дешифратора. Поэтому в обозначении как дешифраторов, так и демультиплексоров

используются одинаковые буквы – ИД. Выпускают дешифраторы (демультиплексоры) К155ИД3, К531ИД7 и др.

Сумматоры – это комбинационные устройства для сложения чисел. Рассмотрим сложение двух одноразрядных двоичных чисел, для чего составим таблицу сложения (таблицу истинности), в которой отразим значения входных чисел A и B, значение результата суммирования S и значение переноса в старший разряд P. Работа устройства, реализующего таблицу истинности, описывается следующими уравнениями:

$$S = A \cdot \bar{B} + \bar{A} \cdot B; \quad P = A \cdot B.$$

Очевидно, что по отношению к столбцу S реализуется логическая функция «исключающее ИЛИ», т.е. $S=A \oplus B$.

A	B	P	S
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	0

Таблица истинности

Устройство, реализующее таблицу, называют полусумматором, и оно имеет логическую структуру, изображенную на рисунке. Поскольку полусумматор имеет только два входа, он может использоваться для суммирования лишь в младшем разряде.

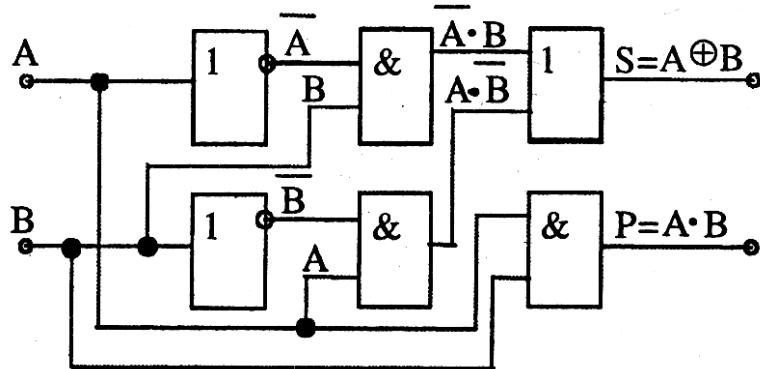


Схема полусумматора

При суммировании двух многоразрядных чисел для каждого разряда (кроме младшего) необходимо использовать устройство, имеющее дополнительный вход переноса.

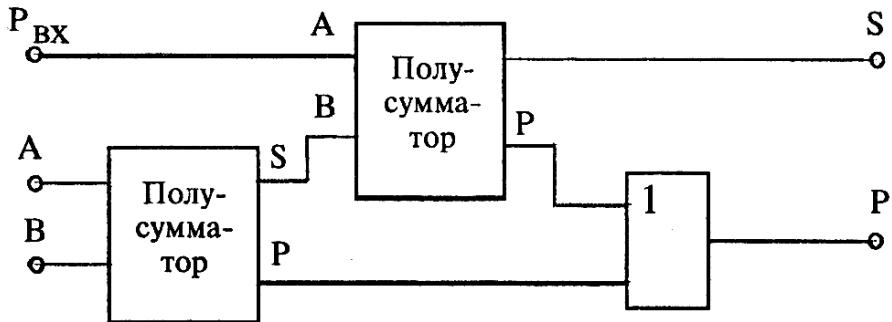


Схема полного сумматора

Такое устройство (рис. 22.17) называют полным сумматором и его можно представить как объединение двух полусумматоров ($P_{вх}$ — дополнительный вход переноса).

Сумматор обозначают через SM.

4 Микропроцессорные средства.

Микропроцессорная система (МПС) представляет собой функционально законченное изделие, состоящее из одного или нескольких устройств, главным образом микропроцессорных: микропроцессора и/или микроконтроллера.

Микропроцессорное устройство (МПУ) представляет собой функционально и конструктивно законченное изделие, состоящее из нескольких микросхем, в состав которых входит микропроцессор; оно предназначено для выполнения определённого набора функций: получение, обработка, передача, преобразование информации и управление.

Генератор тактовых импульсов задаёт временной интервал, который является единицей измерения (квантом) продолжительности выполнения команды. Чем выше частота, тем при прочих равных условиях более быстродействующей является МПС. МП, ОЗУ и ПЗУ — это неотъемлемые части системы. Интерфейсы ввода и вывода — устройства сопряжения МПС с блоками ввода и вывода информации. Для измерительных приборов характерны устройства ввода в виде кнопочного пульта и измерительных преобразователей (АЦП, датчиков, блоки ввода цифровой информации). Устройства вывода обычно представляют цифровые табло, графический экран (дисплей), внешние устройства сопряжения с измерительной системой. Все блоки МПС связаны между собой шинами передачи цифровой информации. В МПС используют магистральный принцип

связи, при котором блоки обмениваются информацией по единой шине данных. Количество линий в шине данных обычно соответствует разрядности МПС (количеству бит в слове данных). Шина адреса применяется для указания направления передачи данных — по ней передаётся адрес ячейки памяти или блока ввода-вывода, которые получают или передают информацию в данный момент. Шина управления служит для передачи сигналов, синхронизирующих всю работу МПС.

Главная особенность микропроцессора — возможность программирования логики работы. Поэтому МПС используются для управления процессом измерения (реализацией алгоритма измерения), обработки опытных данных, хранения и вывода результатов измерения и пр. Рассмотрим основные преимущества микропроцессорных средств измерения.

Многофункциональность. Замена измерительного комплекса (совокупности различных измерительных приборов) одним, многофункциональным. Такая замена в приборах с «жесткой» логикой неэкономична. Так как добавление новой функции требует ввода дополнительного блока. Программируемая логика позволяет сделать это добавлением блока программы. Число программ ограничено возможностями ПЗУ и блока управления.

Повышение точности — наиболее важный момент. Уменьшение погрешностей по сравнению с обычными цифровыми приборами при прочих равных условиях достигается за счет исключения систематических погрешностей в процессе самокалибровки: коррекция смещения нуля, учет собственной АЧХ прибора, учет нелинейности преобразователей. Самокалибровка в данном случае — это измерение поправок или поправочных множителей и запоминание их в ОЗУ с целью использования на этапе обработки опытных данных.

Уменьшение влияния случайных погрешностей (путем проведения многократных измерений с последующей обработкой выборки — усреднением, вычислением мат. ожидания и пр.). Выявление и устранение грубых погрешностей (промахов). Вычисление и индикация оценки погрешности прямо в процессе измерения.

Компенсация внутренних шумов и повышение чувствительности средства измерения. Простое усреднение сигнала на входе прибора требует достаточно большого времени туср. Один из вариантов — проведение многократных измерений и усреднение результатов с целью компенсации случайной составляющей измерительного сигнала. Пример — микропроцессорный ВЧ вольтметр среднеквадратического значения.

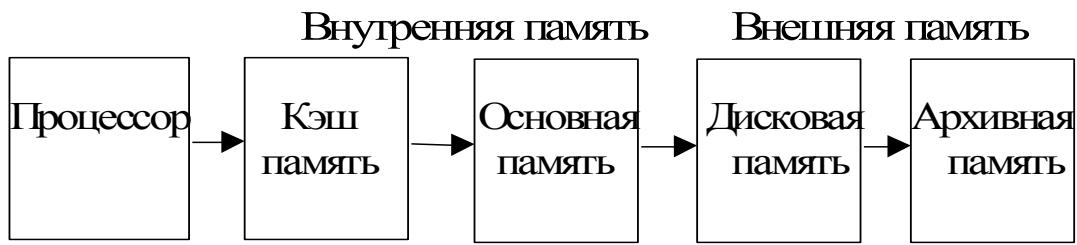
Расширение измерительных возможностей путем широкого использования косвенных и совокупных измерений, воспринимаемых оператором в этом случае как прямые (поскольку результат обработки появляется на индикаторе сразу после проведения измерения). Напомним, что косвенные измерения включают в себя вычисления результата по опытным данным по известному алгоритму. Совокупные измерения предполагают измерение нескольких одноименных физических величин путем решения системы уравнений, получаемых при прямых измерениях сочетаний этих величин. (Например, измерение сопротивления различных сочетаний резисторов — последовательное, параллельное, последовательно-параллельное, позволяют рассчитать сопротивление каждого из них). В этих случаях микропроцессор осуществляет управление процессом измерения по программе и проводит обработку опытных данных. Результат расчетов воспринимается оператором как результат прямых измерений, поскольку расчет делается быстро.

Упрощение и облегчение управления прибором. Все управление производится с кнопочной панели, выносные клавиатуры используют редко. Чем меньше кнопок, тем более «разумным» является прибор. Автоматизация установок прибора приводит к упрощению его использования (выбор пределов измерения, автоматическая калибровка и пр.). В ряде приборов использую контроль за ошибочными действиями оператора — индикация его неверных действий на табло или экране. Упрощает измерения визуализация результатов на экране в удобном виде, с дополнительными шкалами. Ряд приборов предусматривает вывод результатов на печатающее устройство или портативный носитель информации.

Микропроцессорные системы используют память для хранения команд, данных и другой информации. Системы памяти отличаются друг от друга по способам доступа к ним, по объему памяти, энергонезависимости, стоимости хранения в расчете на бит информации, времени доступа.

Вычислительные системы используют обычно целую иерархическую структуру систем памяти как это показано на рисунке. Память вычислительной системы можно разделить на внутреннюю память, если любой ее элемент доступен процессору непосредственно, и внешнюю, если это не так. Прямо или произвольно адресуемая память представляет собой последовательность нумерованных ячеек, доступ к которым осуществляется с помощью адресных сигналов, определяющих номер ячейки, и специальных стробирующих сигналов, определяющих момент чтения или записи.

Системы внешней памяти используются для хранения больших объемов информации. К ним относятся накопители на магнитных дисках, накопители на магнитных лентах, оптические системы такие как CDROM, и другие приборы. При взаимодействии с системами внешней памяти вычислительная система переносит блоки информации из нее во внутреннюю память и выбирает данные уже из нее.



Иерархическая структура памяти

В этой главе рассматриваются принципы построения и функционирования **внутренней памяти**. Системы вторичной памяти доступны для процессора как периферийное оборудование через порты ввода/вывода.

С точки зрения системы команд память это набор **слов**, каждое из которых имеет уникальный **адрес**, показывающий расположение слова в памяти. Концепция адресов памяти эквивалента концепции телефонных номеров. Каждый телефон имеет свой собственный номер в некотором поле возможных номеров. Подобно этому каждая ячейка памяти имеет адрес который определяет модуль памяти и расположение ячейки в этом модуле.

Каждое слово памяти содержит один или более адресуемых байт. Количество адресуемых байт определяется разрядностью микропроцессора. Например, восьмибитные микропроцессоры имеют байтовую организацию памяти. За одно обращение микропроцессор может обработать только один байт информации. Шестнадцатиразрядные микропроцессоры могут обращаться к одному или двум байтам одновременно. Современные 32-разрядные микропроцессоры могут работать с 32-разрядными словами 16-разрядными словами и 8-разрядными байтами. Поэтому память для этих микропроцессоров организована таким образом чтобы допускать обращение к одному, двум или четырем байтам одновременно. Количество адресуемых ячеек памяти зависит от количества бит шины адреса микропроцессора. 8-ми разрядные микропроцессоры и микроконтроллеры имеет 16 битную шину адреса позволяя адресовать 64-К байт памяти. 16- разрядные микропроцессоры позволяют адресовать несколько мегабайт памяти.

Наконец, современные микропроцессоры используют 64-разрядную шину адреса, что позволяет адресовать фактически бесконечный объем памяти.

Под памятью цифровых вычислительных систем понимают совокупность технических средств, предназначенных для приема (записи), хранения и выдачи (считывания) информации, представленной двоичным кодом.

Основными характеристиками запоминающих устройств (ЗУ) являются:

информационная емкость, определяемая максимальным объемом хранимой информации в битах или байтах;

быстродействие, характеризуемое **временем выборки информации** из ЗУ и временем цикла обращения к ЗУ с произвольным доступом или временем поиска и количеством переданной в единицу времени информации в ЗУ (или из ЗУ) с последовательным доступом;

энергопотребление, определяемое электрической мощностью, потребляемой ЗУ от источников питания в каждом из режимов работы;

стоимость хранения информации в расчете на один бит;

энергонезависимость, то есть сохраняется ли информация в ЗУ после выключения электропитания;

а также надежность, масса, габаритные размеры и др.

Применение МП в электроприводах. Микроконтроллеры. Применение микроконтроллеров в системах автоматизации

Микроконтроллер (англ. Micro Controller Unit, MCU) — микросхема, предназначенная для управления электронными устройствами. Типичный микроконтроллер сочетает на одном кристалле функции процессора и периферийных устройств, содержит ОЗУ или ПЗУ. По сути, это однокристальный компьютер, способный выполнять простые задачи.

С появлением однокристальных микро-ЭВМ связывают начало эры массового применения компьютерной автоматизации в области управления. По-видимому, это обстоятельство и определило термин «контроллер» (англ. controller — регулятор, управляющее устройство).

В связи со спадом отечественного производства и возросшим импортом техники, в том числе вычислительной, термин «микроконтроллер» (МК) вытеснил из употребления ранее использовавшийся термин «однокристальная микро-ЭВМ».

Первый патент на однокристальную микро-ЭВМ был выдан в 1971 году инженерам М. Кочрену и Г. Буну, сотрудникам американской Texas Instruments. Именно они предложили на одном кристалле разместить не только процессор, но и память с устройствами ввода-вывода.

При проектировании микроконтроллеров приходится соблюдать баланс между размерами и стоимостью с одной стороны и гибкостью и производительностью с другой. Для разных приложений оптимальное соотношение этих и других параметров может различаться очень сильно. Поэтому существует огромное количество типов микроконтроллеров, отличающихся архитектурой процессорного модуля, размером и типом встроенной памяти, набором периферийных устройств, типов корпуса и т. д. В отличие от обычных компьютерных микропроцессоров, в микроконтроллерах часто используется гарвардская архитектура памяти, то есть раздельное хранение данных и команд в ОЗУ и ПЗУ соответственно.

Кроме ОЗУ, микроконтроллер может иметь встроенную энергонезависимую память для хранения программы и данных. Во многих контроллерах вообще нет шин для подключения внешней памяти. Наиболее дешёвые типы памяти допускают лишь однократную запись. Такие устройства подходят для массового производства в тех случаях, когда программа контроллера не будет обновляться. Другие модификации контроллеров обладают возможностью многократной перезаписи энергонезависимой памяти.

Неполный список периферии, которая может присутствовать в микроконтроллерах, включает в себя:

универсальные цифровые порты, которые можно настраивать как на ввод, так и на вывод; различные интерфейсы ввода-вывода, такие как UART, I²C, SPI, CAN, USB, IEEE 1394, Ethernet;

аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи;

компараторы;

широкто-импульсные модуляторы;

таймеры;

контроллеры бесколлекторных двигателей;

контроллеры дисплеев и клавиатур;

радиочастотные приемники и передатчики;

массивы встроенной флеш-памяти;

встроенный тактовый генератор и сторожевой таймер;

Ограничения по цене и энергопотреблению сдерживают также рост тактовой частоты контроллеров. Хотя производители стремятся обеспечить работу своих изделий на высоких частотах, они, в то же время, предоставляют заказчикам выбор, выпуская модификации, рассчитанные на разные частоты и напряжения питания. Во многих моделях микроконтроллеров используется статическая память для ОЗУ и внутренних регистров. Это даёт контроллеру возможность работать на меньших частотах и даже не терять данные при полной остановке тактового генератора. Часто предусмотрены различные режимы энергосбережения, в которых отключается часть периферийных устройств и вычислительный модуль.

Использование в современном микроконтроллере достаточного мощного вычислительного устройства с широкими возможностями, построенного на одной микросхеме вместо целого набора, значительно снижает размеры, энергопотребление и стоимость построенных на его базе устройств. Используются в управлении различными устройствами и их отдельными блоками:

в вычислительной технике: материнские платы, контроллеры дисководов жестких и гибких дисков, CD и DVD;

электронике и разнообразных устройствах бытовой техники, в которой используется электронные системы управления — стиральных машинах, микроволновых печах, посудомоечных машинах, телефонах и современных приборах;

В промышленности:

устройств промышленной автоматики — от программируемого реле и встраиваемых систем до ПЛК,
систем управления станками

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ

ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

2.1 Лабораторная работа № 1 (2 часа).

Тема: «Исследование цепи постоянного тока с последовательным и параллельным включением элементов.»

2.1.1 Цель работы:

1. Уяснить принципы графического изображения электрической цепи.
2. Научиться собирать электрические цепи.

2.1.2 Задачи работы:

1. Освоить методы расчета простых электрических цепей.

2. Научиться включать в цепь электроизмерительные приборы, выбирать и устанавливать пределы измерений и производить измерения.

2.1.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Источник питания ИП 1 (8 шт.),
2. амперметр $\pm 23\text{A}$ (4 шт.), $\pm 20\text{A}$ (4 шт.);
3. вольтметр $\pm 150\text{V}$ (3 шт.); $\pm 300\text{V}$ (5 шт.);
4. лампы накаливания $250\text{V} 150 \text{ Вт}$ (4 шт.), $250\text{V} 100 \text{ Вт}$ (10 шт.);
5. резистор ПЭВ25 (4 шт.), ПЭВ 10 (3шт.).

2.1.4 Описание (ход) работы:

1. Начертить принципиальную схему (по указанию преподавателя) и получить задание.
2. В соответствии с полученным заданием дополнить схему измерительными приборами.
3. Собрать цепь по начерченной схеме.
4. Произвести расчет напряжения, силы тока и мощности на указанных в задании участках.
5. Выбрать и установить пределы измерительных приборов в соответствии с расчетами.
6. После проверки схемы преподавателем и получения разрешения, включить источник питания и снять показания приборов.
7. Обработать результаты измерений и вычислить относительную погрешность.

Объект и средства исследования

Объектом исследования служит электрическая цепь, которую собирает экспериментатор в соответствии с принципиальной схемой.

Техническая характеристика элементов цепи:

Напряжение источника питания:	127 В.
Лампы накаливания E1; E2; E3:	220 В, 100 Вт.
Лампы накаливания E4; E5; E6:	220 В, 110 Вт.
Электродвигатель:	127 В, 80 Ом.
Резистор R1:	90 Ом.

Таблица расчетных величин.

U (Вольт)	I (Ампер)	P (Бацт)

Таблица измеренных величин.

PU		PI		PW	
$C_U =$		$C_I =$		$C_W =$	
Делен.	Вольт	Делен.	Ампер	Делен.	Бацт

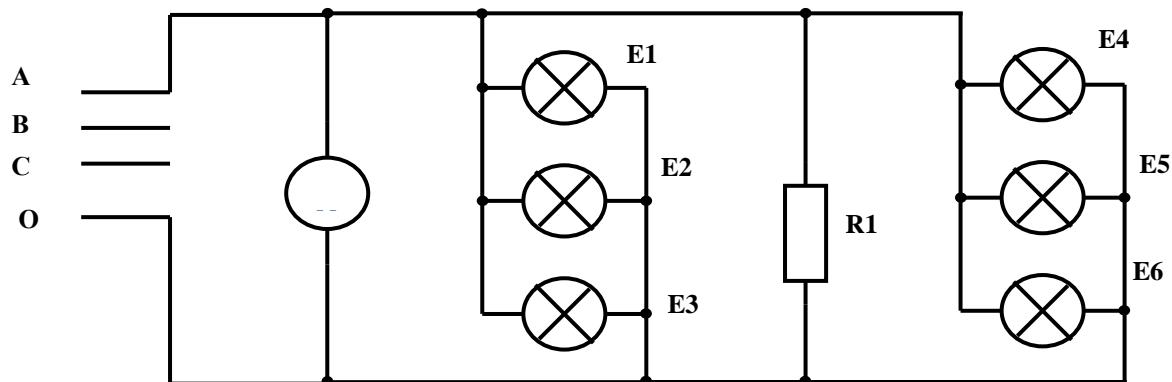


Рис. 1

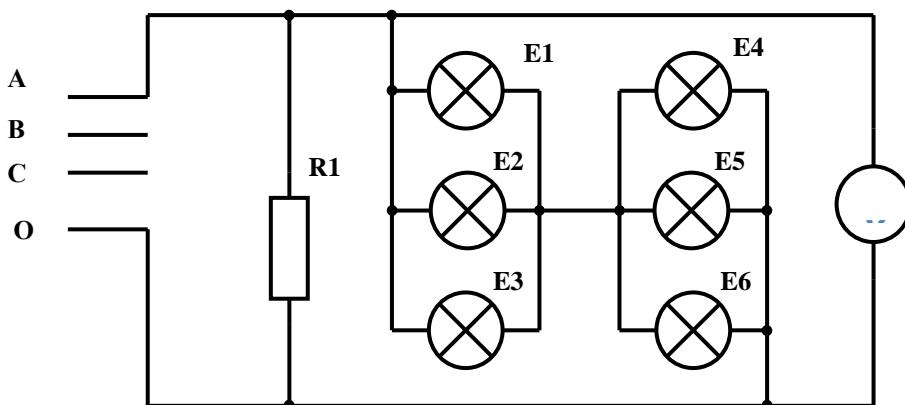


Рис. 2

2.2Лабораторная работа № 2 (2 часа).

Тема: «Исследование законов Кирхгофа и принципа наложения в сложной электрической цепи постоянного тока»

2.2.1 Цель работы:

1. Экспериментально проверить справедливость законов Кирхгофа.
2. Экспериментально проверить справедливость принципа наложения.
3. Освоить расчет сложной электрической цепи постоянного тока методом контурных токов.

2.2.2 Задачи работы:

Освоить расчет сложной электрической цепи постоянного тока методом контурных токов

2.2.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Компьютер «Пентиум-4», ПО Multisim

2.2.4 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.

Объект и средства исследования

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

Электрическая схема

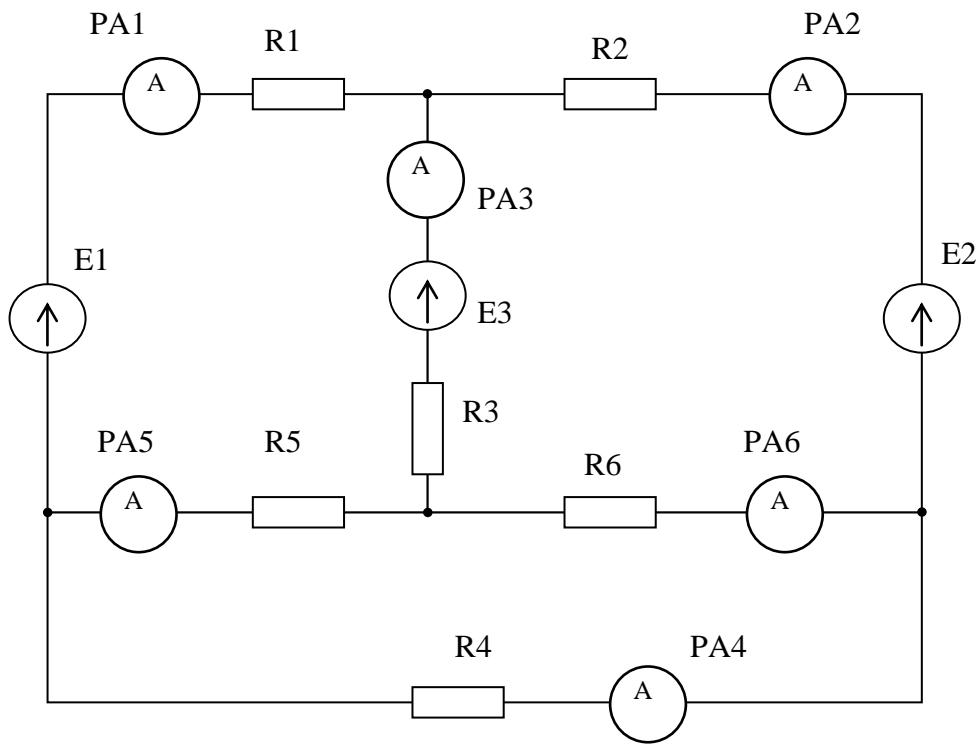


Таблица 1 Параметры элементов цепи

№ Вар.	E ₁ , Вольт	E ₂ , Вольт	E ₃ , Вольт	R ₁ , Ом	R ₂ , Ом	R ₃ , Ом	R ₄ , Ом	R ₅ , Ом	R ₆ , Ом
1	36	10	15	4	8	3	1	2	1,5
2	16	28	15	4	15	3	1	2	1,5
3	26	17	5	4	1	3	1	2	3
4	6	10	4	4	2	3	3	2	3
5	10	25	20	4	4	3	2	2	3
6	18	5	30	8	5	2	3	4	2

Таблица 2 Результаты экспериментов

Режим работы цепи (№ опыта)		I ₁ , А	I ₂ , А	I ₃ , А	I ₄ , А	I ₅ , А	I ₆ , А
1	Действуют все источники						
2	Действует источник E1						
3	Действует источник E2						
4	Действует источник E3						

Методика расчета	I_1 , Ампер	I_2 , Ампер	I_3 , Ампер	I_4 , Ампер	I_5 , Ампер	I_6 , Ампер
Метод наложения						
Метод контурных токов						

2.3 Лабораторная работа № 3 (2 часа).

Тема: «Исследование прямой и обратной ветви вольт-амперной характеристики полупроводниковых диодов и стабилитронов»

2.3.1 Цель работы: Изучить свойства и характеристики диодов и стабилитронов

2.3.2 Задачи работы:

1. Построить обратные ветви вольт-амперных характеристик исследуемых приборов.
2. Определить и вычислить:
 - среднее напряжение стабилизации $U_{ст}$ на рабочем участке;
 - мощность, рассеиваемую стабилитроном, $P_{ст} = U_{ст}I_{ст}$ (при начальном установившемся напряжении стабилизации, при среднем и наибольшем обратном токе стабилизации);
 - мощность, рассеиваемую балластным сопротивлением R_1 , $P_{бал} = (U_{вх} - U_{ст})I_{ст}$ (при начальном установившемся напряжении стабилизации, при среднем и наибольшем обратном токе стабилизации);
 - дифференциальное сопротивление стабилитрона при обратном постоянном токе $\Delta I_{ст} = \Delta U_{ст} / \Delta I_{ст}$ (при начальном установившемся напряжении стабилизации, при среднем и наибольшем обратном токе стабилизации);
 - результаты занести в таблицу;
3. Привести паспортные данные основных характеристик исследуемых приборов;
4. Сравнить полученные результаты исследований с паспортными данными на приборы.

2.3.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Панели лабораторные с различными типами диодов
2. Блок питания с постоянным выходным напряжением, регулируемым от 0 до 15 В.
3. Стрелочные или светолучевые измерительные приборы (вольтметры, амперметры).

2.3.4 Описание (ход) работы:

Схема исследований прямой ветви ВАХ диодов, стабисторов

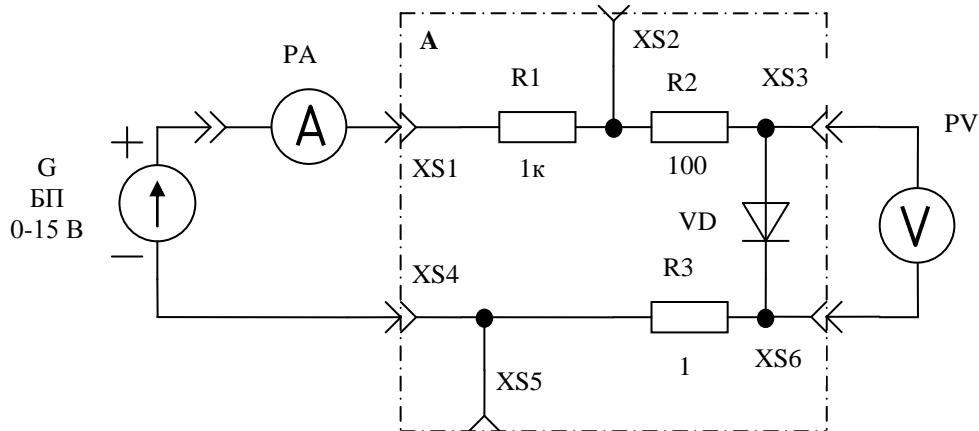


Рис. 1.1. Схема измерения прямой ветви ВАХ диодов

Порядок выполнения эксперимента

- Собрать схему.
- Установить на измерительных приборах необходимые пределы измерений в соответствии с исследуемым прибором. На блоке питания ручку регулировки выходного напряжения установить в 0 В.
- После проверки схемы преподавателем включить схему.
- Задавая прямой ток через исследуемый прибор определить падение напряжения на нем. Результаты измерений занести в таблицу. На начальном участке ВАХ (для обеспечения малого тока) напряжение питания подается на гнездо «XS1» (через резистор R_1+R_2). При необходимости увеличить прямой ток, напряжение «+ БП» (подается через амперметр PA) переключить с гнезда «XS1» на гнездо «XS2», предварительно отключив БП. Следить, чтобы прямой ток не превышал предельно допустимый ток для прибора.
- Отключить схему.

Для конкретных типов п/п диодов при измерениях рекомендуются становить следующие значения прямого тока.

Таблица. Результаты измерений прямой ветви ВАХ диодов типа МД226Б, КД221А.

$I_{\text{пр}}$	mA	0	0,5	1	2	3	4	5	10	25	50	75	100	125	150	200	250	300
$U_{\text{пр}}$	V																	

Таблица. Результаты измерений прямой ветви ВАХ стабисторов типа КС113А.

$I_{\text{пр}}$	mA	0	0,5	1	2	3	5	10	20	40	60	80	100
$U_{\text{пр}}$	V												

Представление и обработка результатов измерений

- Построить прямые ветви вольт-амперных характеристик исследуемых приборов. При необходимости, начальные участки ВАХ представить на отдельных графиках.
- Определить и вычислить:
 - пороговое напряжение U_{nop} ;
 - полное сопротивление диода при прямом постоянном токе $R_{np}=U_{np}/I_{np}$ (при начальном установившемся прямом напряжении большем U_{nop} , при среднем и наибольшем прямом токе);
 - дифференциальное сопротивление диода при прямом постоянном токе $r_{di\phi}=\Delta U_{np}/\Delta I_{np}$ (при начальном установившемся прямом напряжении большем U_{nop} , при среднем и наибольшем прямом токе);
 - результаты занести в таблицу;
- Привести паспортные данные основных характеристик исследуемых приборов;
- Сравнить полученные результаты исследований с паспортными данными на приборы.

Таблица. Экспериментальные характеристики приборов.

№ пп	I_{np} мА	U_{np} В	ΔI_{np} мА	ΔU_{np} В	R_{np} Ом	$r_{di\phi}$ Ом	Прим.
1							
2							
3							

Схема исследований обратной ветви ВАХ стабилитронов

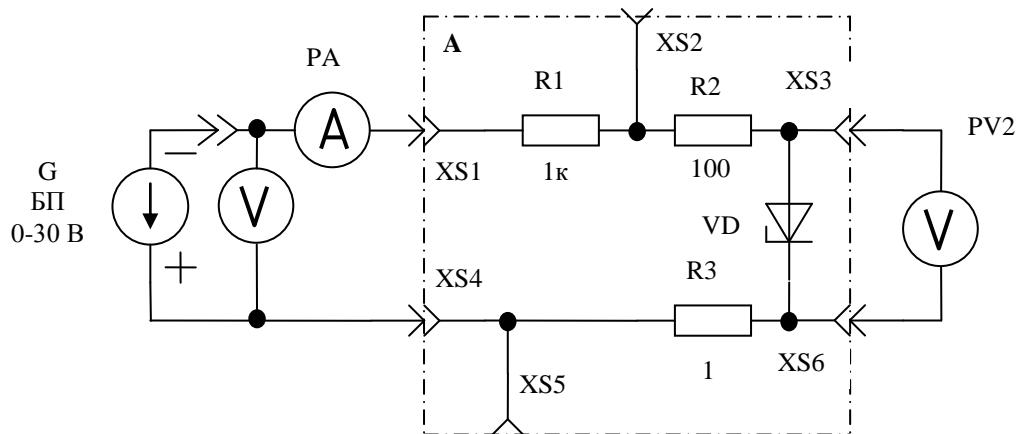


Рис. 1.2. Схема измерения обратной ветви ВАХ стабилитронов

Порядок выполнения эксперимента

- Собрать схему.
- Установить на измерительных приборах необходимые пределы измерений в соответствии с исследуемым прибором. На блоке питания ручку регулировки выходного напряжения установить в 0 В.
- После проверки схемы преподавателем включить схему.

4. Задавая обратный ток через исследуемый прибор определить падение напряжения на нем. Результаты измерений занести в таблицу. На начальном участке ВАХ (для обеспечения малого тока) напряжение питания подается на гнездо «XS1» (через резистор R1+R2). При необходимости увеличить ток, напряжение БП (подается через амперметр РА) переключить с гнезда «XS1» на гнездо «XS2», предварительно отключив БП. Следить, чтобы ток не превышал предельно допустимый ток для прибора.
 5. Отключить схему.

Таблица. Результаты измерений обратной ветви ВАХ стабилитронов.

Для конкретных типов п/п стабилитронов при измерениях рекомендуются установить следующие значения обратного тока.

Таблица. Результаты измерений обратной ветви ВАХ стабилитронов типа Д814А.

Таблица. Результаты измерений обратной ветви ВАХ стабилитронов типа КС139А.

Представление и обработка результатов измерений

1. Построить обратные ветви вольт-амперных характеристик исследуемых приборов.
 2. Определить и вычислить:
 - среднее напряжение стабилизации U_{cm} на рабочем участке;
 - мощность, рассеиваемую стабилитроном, $P_{cm}=U_{cm}I_{cm}$ (при начальном установившемся напряжении стабилизации, при среднем и наибольшем обратном токе стабилизации);
 - мощность, рассеиваемую балластным сопротивлением $R1$, $P_{бал}=(U_{ax} - U_{cm})I_{cm}$ (при начальном установившемся напряжении стабилизации, при среднем и наибольшем обратном токе стабилизации);
 - дифференциальное сопротивление стабилитрона при обратном постоянном токе $r_{диф}=\Delta U_{cm}/\Delta I_{cm}$ (при начальном установившемся напряжении стабилизации, при среднем и наибольшем обратном токе стабилизации);
 - результаты занести в таблицу;
 3. Привести паспортные данные основных характеристик исследуемых приборов;
 4. Сравнить полученные результаты исследований с паспортными данными на приборы.

Таблица. Экспериментальные характеристики приборов.

2.4 Лабораторная работа № 4 (2 часа).

Тема: «Усилитель постоянного тока»

2.4.1 Цель работы:

Изучить схемы и характеристики усилителей постоянного тока.

2.4.2 Задачи работы:

1. Экспериментально снять амплитудные и частотные характеристики усилителя при изменении глубины обратной связи.

1.3 Записать выводы по результатам.

2.4.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Компьютер «Пентиум-4»

2. программа Multisim.

2.4.4 Описание (ход) работы:

1 Подготовка к работе на компьютере

Усилители постоянного тока- электронные устройства, предназначенные для усиления медленно изменяющихся во времени сигналов.

2 По формуле, приведенной в таблицах 1 2, рассчитать глубину обратной связи усилителя для трех значений сопротивления (с учетом варианта – Вашего номера в журнале группы).

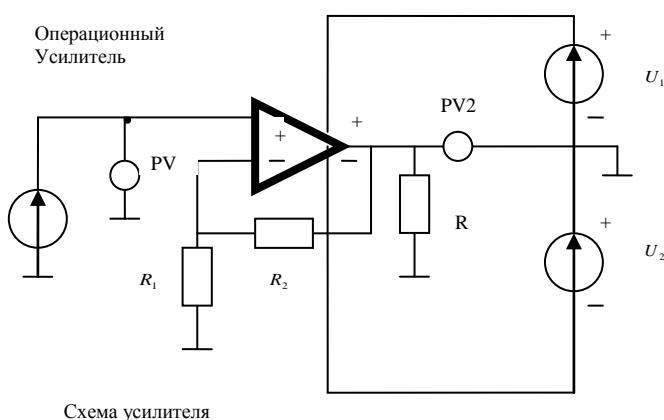
Результаты записать в таблицы 1 и 2

.2 Работа на компьютере

2.1 Показать преподавателю подготовленный отчет.

2.2 «Собрать» схему (рисунок).в качестве усилителя постоянного тока выбрать операционный усилитель модели 741. для этого в окне элементов (см. рисунок 1 «инструкции пользователю программой.....»)нажать клавишу с изображением и из открывшегося окна «мышью» переместить в рабочее окно операционный усилитель, над изображением которого появится надпись «741».

Источником входного напряжения выбрать источник синусоидальной ЭДС (220, 50 Гц и начальной фазой равной 0).



сопротивления резисторов в схеме , -задано в таблицах 1 и 2. сопротивления вольтметров (типа «AC») оставить без изменений 1 Мом, а напряжения источников питания (постоянного тока)
 2.2.3 Поочередно устанавливая глубину обратной связи для

заданных входных напряжений (см. таблицу 1) и резистора, снять семейство амплитудных характеристик усилителя . результаты записать в эту таблицу.

2.2.4 поочередно устанавливая глубину обратной связи при входном напряжении, равном 1 мВ (см. таблицу 2), снять семейство частотных характеристик . результаты записать в эту таблицу.

Таблица 1.

$U_{\text{вых}}, \text{мВ} (\text{при } f = 1000 \text{ Гц})$		0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6
$U_{\text{вых}}, \text{В}$ при глубине обратной связи	$\beta = R_1 / (R_1 + R_2)$	$R_1 + 10 \cdot N, \text{kОм}$							
		$R_1 + 30 \cdot N, \text{kОм}$							
		$R_1 + 50 \cdot N, \text{kОм}$							
рассчитать	$K = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх.}}$ (при $R_1 + 30 \cdot N, \text{kОм}$)								
	$K_{o.c.} = K_u / (1 + \beta \cdot K_u)$								

3 По результатам занятий

3.1 По показаниям вольтметров рассчитать коэффициенты усиления K_u и коэффициенты обратной связи $K_{o.c.}$ (формулы приведены в таблицах 1 и 2). Результаты записать в эти таблицы.

$f, \text{кГц} (\text{при } U_{\text{вх.}} = 1 \text{ мВ})$			0,01	5	12	15	20	25	30
$U_{\text{вых.}}, \text{ В}$ при глубине обратной связи	$\beta = R_1 / (R_1 + R_2)$	$R_1 = 10 \cdot N, \text{kОм}$							
		$R_1 + 30 \cdot N, \text{kОм}$							
		$R_1 + 50 \cdot N, \text{kОм}$							
рассчитать	$K_u = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх.}}$ (при $R_1 = 30 \cdot N, \text{kОм}$)								
	$K_{o.c.} = K_u / (1 + \beta \cdot K_u)$								

3.2 Построить (по данным таблицы 2) экспериментальные и расчетные зависимости K_u и $K_{o.c.}$ от частоты при $R_1 = 30 \cdot N, \text{kОм}$.

3.3 Записать выводы о характере полученных зависимостей.

4 Содержание отчета

4.1 Заполнение таблицы результатов измерений и расчетов.

4.2 Графики зависимостей $K_u(f)$ и $K_{o.c.}(f)$.

4.3 Выводы.

2.5 Лабораторная работа № 5 (2 часа).

Тема: «Исследование двухполупериодного мостового выпрямителя при работе со сглаживающими фильтрами»

2.5.1 Цель работы: Изучение принципа работы однофазных однополупериодной и двухполупериодных схем неуправляемых и управляемых выпрямителей; исследование основных характеристик выпрямителей.

2.5.2 Задачи работы:

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.

2.5.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Компьютер «Пентиум-4»
2. программа Multisim

2.5.4 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;
- двуухполупериодные:
 - мостовая (схема Грэца),
 - с нулевым выводом трансформатора.

Однополупериодная схема наиболее проста и содержит всего один диод V1 (рис. 4.1, 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 вентили V1, V4, а в отрицательный - вентили 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 E_{2m} , где E_{2m} - амплитуда напряжения вторичной обмотки трансформатора.

Среднее значение выпрямленного напряжения:

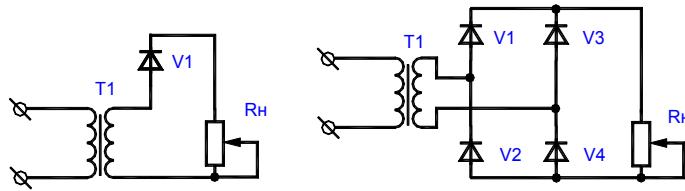
$$U_{cp} = \frac{1}{\pi} \int E2m \sin \omega t dt = 2E2m / \pi$$

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

можно получить простое соотношение для определения среднего значения

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

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



выпрямленного напряжения:

a)

б)

Рис. 4.1. 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 нагрузкойключен 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

α , 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. 4.2.

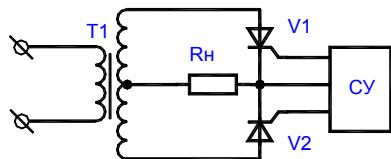


Рис. 4.2. Схема управляемого выпрямителя по схеме с нулевой точкой трансформатора

Преимущество этой схемы состоит в наличии общей точки катодов тиристоров VI 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 α , можно регулировать среднее значение выпрямленного напряжения, которое определяется из выражения:

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

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_{cp0} 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.

Ход работы:

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.

1. Собрать схему однополупериодного выпрямителя без фильтра в соответствии с рис. 2.3.

2. Подать на схему напряжение, снять и зарисовать для номинального тока нагрузки ($I_n = 100mA$) осцилограммы выпрямленного напряжения, напряжения на диоде, анодного тока диода, тока на выходе выпрямителя, тока вторичной и первичной обмоток трансформатора.

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

3. Снять и построить внешнюю характеристику выпрямителя, изменяя величину нагрузки сопротивлением R11.

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

4. Определить внутреннее сопротивление выпрямителя в номинальном режиме.

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

5. Собрать схему двухполупериодного мостового выпрямителя согласно рис. 2.4. и провести исследования, аналогичные п.п.2. - 4. ($I_n = 200mA$).

6. Собрать на стенде схему управляемого выпрямителя согласно рис. 2.5.

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

Осциллографы 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 осциллографу выходного напряжения с помощью осциллографа.

10. Определить внутреннее сопротивление выпрямителя в номинальном режиме.

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

2.6Лабораторная работа № 6 (2 часа).

Тема: «Включение трехфазного асинхронного электродвигателя в трехфазную систему»

2.6.1 Цель работы:

1. Изучить конструкцию трехфазного асинхронного электродвигателя с коротко замкнутым ротором.

2. Исследовать работу электродвигателя в нормальном и аварийных режимах.

2. 6.2 Задачи работы:

1. Научиться маркировать выводы трехфазного асинхронного электродвигателя.

2. 6.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Электродвигатель асинхронный 4АМ10062У3 3~50Гц, U_n 380В, P_n 4,0кВт, I_n 7,8А, $\cos\phi_n$ 0,89, η_n 0,865, n_n =2880 об/мин, класс изоляции В, режим S1,

2. 6.4 Описание (ход) работы:

На рабочем месте имеются трехфазный асинхронный электродвигатель с коротко замкнутым ротором. Его техническая характеристика:

- | | |
|---|------------|
| номинальное напряжение | 220/380 В, |
| ток холостого хода | 6,4/2,2 А, |
| кратность пускового тока (по отношению к току х.х.) | 7,5. |
1. В соответствии с техническими характеристиками электродвигателя и трехфазной сети выбрать схему включения двигателя в сеть.
 2. Самостоятельно начертить схему в отчете. В схеме предусмотреть амперметр для измерения линейного тока двигателя. Амперметр включить с измерительным трансформатором тока.
 3. Собрать электрическую цепь согласно схеме.
 4. В соответствии с техническими характеристиками электродвигателя рассчитать его пусковой ток и установить пределы измерений на приборах.
 5. Включить источник тока и измерить пусковой ток электродвигателя (максимальное отклонение стрелки амперметра в момент пуска). После запуска электродвигателя, не выключая источник, установить на трансформаторе тока предел, соответствующий току холостого хода для собранной схемы и записать показания амперметра.
 6. Изменить схему включения обмоток электродвигателя, рассчитать пусковой ток для данной схемы, установить пределы измерения приборов и измерить пусковой ток двигателя. После раскрутки электродвигателя установить на трансформаторе тока предел, соответствующий току холостого хода для собранной схемы и записать показания амперметра.
 7. Отсоединить один линейный провод от сети и на несколько секунд включить сеть (предел измерения на трансформаторе тока должен соответствовать пусковому току для собранной схемы). Измерить пусковой ток двигателя.

8. Подключить оборванный линейный провод и включить сеть (предел измерения на трансформаторе тока должен соответствовать пусковому току для собранной схемы). После раскрутки электродвигателя установить на трансформаторе тока предел, соответствующий току холостого хода для данной схемы и соблюдая меры предосторожности, при работающем двигателе отключить линейный провод. Измерить ток холостого хода.
9. Умышленно перепутать начало и конец одной обмотки электродвигателя, включить сеть и произвести измерение пускового тока и тока холостого хода электродвигателя. При этом необходимо учитывать, что работа с таким включением обмоток является аварийным режимом для двигателя, и ток холостого хода будет в несколько раз выше нормы. Поэтому включение сети должно быть кратковременным и при измерении тока холостого хода предел измерения на измерительном трансформаторе тока уменьшать не следует.
10. Разобрать схему, к клеммам выводов обмоток электродвигателя подключить переходную колодку и произвести маркировку выводов на ней по методике, изложенной на лекции.
11. Соединить обмотки электродвигателя на переходной колодке по схеме «звезда», подключить двигатель к сети и произвести его испытание.
12. Оформить отчет об исследованиях. Результаты каждого опыта должны быть сведены в таблицу измеренных величин (для каждого опыта отдельная таблица).

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

3.1 Практическое занятие №1 (2 часа).

Тема: Расчет трансформатора

3.1.1 Задание для работы:

1. Расчет мощности вторичных обмоток трансформатора
2. Определение расчетной мощности трансформатора
3. Выбор конструкции трансформатора
4. Определение расчетного габаритного параметра трансформатора
5. Выбор типоразмера магнитопровода
6. Расчет количества витков трансформатора
7. Расчет действующего значения тока холостого хода первичной обмотки трансформатора
8. Расчет конструкции трансформатора

3.1.2 Краткое описание проводимого занятия:

Основной задачей расчета трансформатора является определение оптимальных массогабаритных и энергетических характеристик при выполнении заданных требований к его параметрам. Критериями расчета являются: температура нагрева обмоток, падение напряжения на обмотках, коэффициент полезного действия трансформатора и ток холостого хода.

Исходными данными при расчете трансформатора являются:

- напряжение питающей электросети U_C ;
- напряжение вторичных обмоток $U_{21}, U_{22}, \dots, U_{2K}$ и $U_{31}, U_{32}, \dots, U_{3K}$;
- токи вторичных обмоток, работающих в течение двух полупериодов $I_{21}, I_{22}, \dots, I_{2K}$ или одного полупериода $I_{31}, I_{32}, \dots, I_{3K}$;
- частота тока питающей сети f_C .

Расчет мощности вторичных обмоток трансформатора

В соответствии с назначением трансформатора нужно составить его электрическую схему. В схеме трансформатора необходимо разделить обмотки на обычные и имеющие вывод средней точки, т.е. работающие в течение одного полупериода.

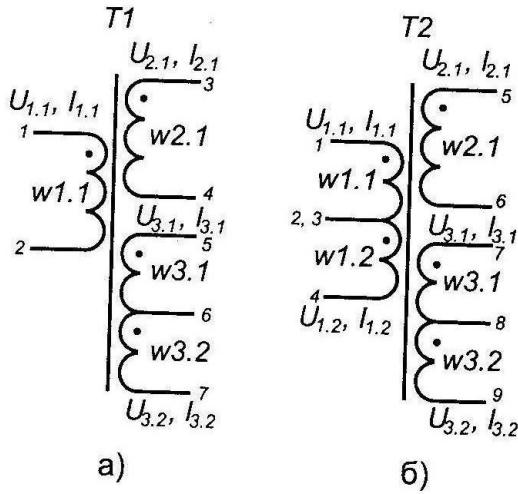


Рис. 1.1 – Электрическая схема силового трансформатора малой мощности

На основании схемы однофазного трансформатора и значений выходных напряжений и токов определяется максимальное значение габаритной мощности вторичных обмоток:

$$P_2 = (U_{21}I_{21} + U_{22}I_{22} + \dots + U_{2K}I_{2K}) + 2(U_{31}I_{31} + U_{32}I_{32} + \dots + U_{3L}I_{3L}), \text{ ВА}$$

здесь: U_{2k}, I_{2k} - действующие значения напряжений (В) и токов (А) в отдельных вторичных обмотках; $k=1, 2, \dots, K$; U_{2l}, I_{2l} - действующие значения напряжений и токов в обмотках (вторичных) с выводом средней точки, $l=1, 2, \dots, L$.

Определение расчетной мощности трансформатора

В общем случае мощность вторичных обмоток может отличаться от мощности первичных. Поэтому в качестве расчетной мощности трансформатора принимается полусумма электромагнитных мощностей первичной и вторичной обмоток трансформатора.

Для определения расчетной мощности трансформатора необходимо знать или найти приближенное значение коэффициента полезного действия η (рис. 2.2, а).

Ориентировочное значение коэффициента полезного действия, которое возрастает с увеличением мощности трансформатора, можно приблизенно найти из следующего соотношения:

$$\eta = (1 + 0,14 \sqrt{\frac{2 \cdot f_c}{50}} - 2) th(1,14 + 0,024 \sqrt{\sum P_2})$$

Здесь: f_c - частота питающей сети, $f_c < 5000$ Гц; $P_{21}, P_{22}, \dots, P_{2m}$ – мощность вторичных обмоток трансформатора, ВА.

В трансформаторе двухобмоточного типа с отдельной первичной и раздельными вторичными обмотками при работе на чисто активную нагрузку расчетная мощность равна:

$$P_{pac} = [(1 + \eta) / 2\eta] \sum_{k=1}^K U_{2k} I_{2k}, \text{ ВА}$$

Расчетную мощность трансформатора для схем аналогичным схеме на рис. 2.1а (обмотки $w3.1$ и $w3.2$ работают в течение одного полупериода) можно найти из соотношения:

$$P_{pac} = (\sqrt{2} / 4\eta) \cdot [\sqrt{2}(1 + \eta) \sum_1^K U_{2k} I_{2k} + 2(1 + \sqrt{2\eta}) \sum_1^L U_{2l} I_{2l}], \text{ ВА}$$

Выбор конструкции трансформатора

Наиболее распространенные типы конструкций трансформатора приведены в таблице 1.1 (броневая, стержневая или торOIDальная конфигурации). В таблицах указаны марки материала магнитопровода и толщина ленты, которые в значительной мере определяют свойства трансформатора. Основными факторами, определяющими конструкцию, являются назначение трансформатора и требования к нему, частота электросети или частота преобразования, а также расчетная мощность трансформатора. Конструктивное исполнение трансформатора малой мощности может быть открытым, защищенным или закрытым.

Для низкочастотных трансформаторов наиболее приемлемы металлические магнитные материалы, которые обладают наивысшими значениями магнитной индукции насыщения, магнитной проницаемостью и температурной стабильностью. Такие материалы имеют низкое удельное сопротивление, что приводит к резкому возрастанию вихревых токов и снижению параметров при повышении частот. Магнитопроводы (сердечники) низкочастотных трансформаторов изготавливаются из изолированных пластин или навиваются из ленты.

При напряжениях, не превышающих 1кВ, и частоте сети 50 Гц для трансформаторов малой мощности (30 ВА) следует отдать предпочтение броневым трансформаторам. Лишь незначительно уступая стержневым трансформаторам по объему и массе, броневые трансформаторы, имеющие одну катушку, значительно технологичнее в изготовлении и проще по конструкции. При мощностях от нескольких десятков до нескольких сотен вольт-ампер при частоте 50 Гц наиболее предпочтительными являются стержневые трансформаторы.

Таблица 1.1 - Основные типы конструкций ленточных сердечников

Конструкция сердечника	Маркировка	Конструктивные характеристики сердечников
Стержневая конструкция (СТ)	ПЛ	П-образные ленточные
	ПЛМ	П-образные ленточные с уменьшенным отношением ширины окна к толщине

		навивки
	ПЛР	П-образные ленточные с геометрическими размерами, обеспечивающими наименьшую стоимость трансформаторов
Броневая конструкция (БТ)	ШЛ	Ш-образные ленточные
	ШЛМ	Ш-образные ленточные с уменьшенным отношением ширины окна к толщине навивки
Кольцевая конструкция (ОЛ)	ОЛ	Кольцевые ленточные

Таблица 1.2 Электромагнитные свойства электротехнических сталей

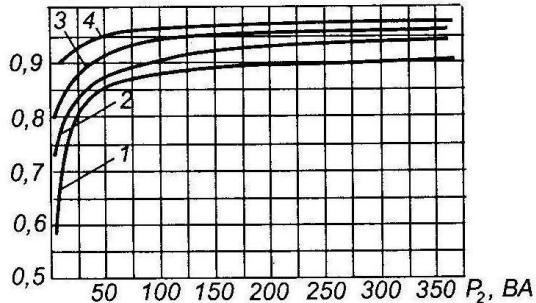
Толшина ленты δ_c , мм	Марка стали	Магнитные удельные потери $P_{yд}$, Вт/кг, не более		Магнитная индукция B_m , Тл, не менее, при напряженности		
		$B_m = 1,5 \text{ Тл}; f_c = 50 \text{ Гц} (P_{1,5/50})$	$B_m = 1,7 \text{ Тл}; f_c = 50 \text{ Гц} (P_{1,7/50})$	$H_{CT} = 80 \text{ А/м};$	$H_{CT} = 100 \text{ А/м};$	$H_{CT} = 2500 \text{ А/м};$
0,5	3411	2,45	-	-	-	1,75
	3412	2,10	-	-	-	1,80
	3413	1,75	-	-	-	1,85
	3414	1,50	-	-	-	1,88
0,35	3411	1,75	-	-	-	1,75
	3412	1,50	-	-	-	1,80
	3413	1,30	1,90	-	1,58	1,85
	3414	1,10	1,60	-	1,60	1,88
	3415	1,03	1,50	-	1,61	1,90
	3404	-	1,60	-	1,60	-
	3405	-	1,50	-	1,61	-
	3406	-	1,43	-	1,62	-
	3407	-	1,36	-	1,68	-
	3408	-	1,30	-	1,71	-
0,27	3414	1,03	-	-	1,60	1,85
	3405	-	1,36	-	1,61	-
	3406	-	1,27	-	1,62	-
	3407	-	1,20	-	1,68	-
	3408	-	1,14	-	1,71	-
0,20	3411	1,50	2,20	0,85	-	1,70
0,15	3421	-	-	-	-	-
	3422	-	-	-	-	-
	3423	-	-	-	-	-

Таблица 1.3 - Зависимость коэффициента k_c заполнения сечения магнитопровода сталью от толщины ленты

Толщина ленты δ_c , мм	0,5	0,35	0,15	0,1-0,08	0,05	0,02
-------------------------------	-----	------	------	----------	------	------

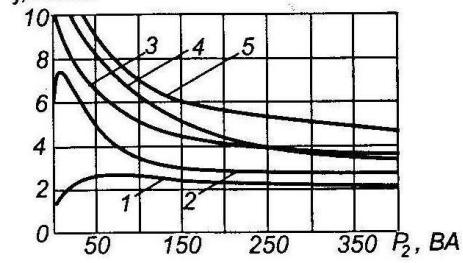
Коэффициент заполнения сталью k_c	0,96	0,93	0,9	0,85	0,75-0,8	0,65-0,7
-------------------------------------	------	------	-----	------	----------	----------

К.П.Д.



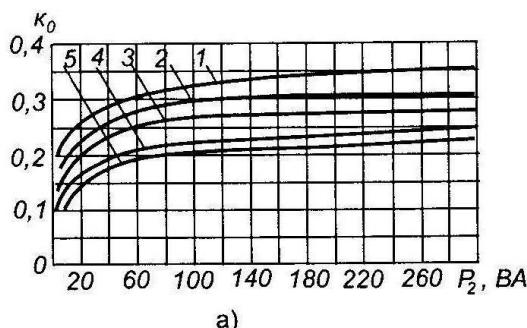
а)

$j, A/mm^2$



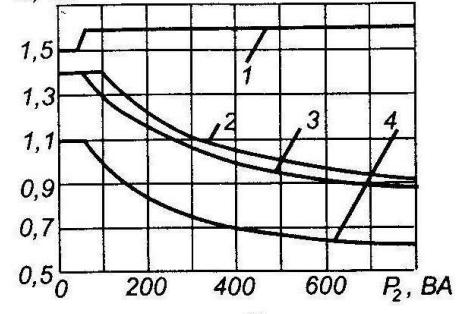
б)

Рис.1.2 – а) зависимость коэффициента полезного действия трансформатора от выходной мощности: 1 – для броневых и стержневых трансформаторов с магнитопроводом из стали 3411, 3412 толщиной ленты $\delta=0,35$ мм, частотой напряжения $f=50$ Гц; б) зависимость плотности тока $j=f(P_{pac})$ в обмотках от выходной мощности трансформатора: 1 - для броневых и стержневых трансформаторов с магнитопроводом из стали 3411, 3412 толщиной ленты $\delta=0,35$ мм, частотой напряжения $f=50$ Гц



а)

$B, T_{л}$



б)

Рис. 1.3. а) зависимость коэффициента заполнения окна $\kappa_o=f(P_{pac})$ от выходной мощности трансформатора: 1 – для трансформаторов с броневым и стержневым сердечником с напряжением до 100 В, 50 Гц; 2 – для тех же трансформаторов с напряжением до 300 В, 50 Гц; б) зависимость магнитной индукции $B=f(P_{pac})$ в магнитопроводе от выходной мощности трансформатора при перегреве сердечника $\Delta T_{пер}=50^{\circ}\text{C}$: 1 – для броневых и стержневых трансформаторов с магнитопроводом из стали 3412, частотой напряжения 50 Гц.

Определение расчетного габаритного параметра трансформатора

Для выбранной конструкции трансформатора (и материала сердечника) необходимо выбрать справочные параметры, которые указываются производителем (приложение 1).

Типоразмер магнитопровода (размеры сердечника) определяется мощностью трансформатора и находится с помощью формулы:

$$S_C \cdot S_O = \frac{50 \cdot P_{pac}}{f \cdot B_m \cdot j \cdot k_c \cdot k_o \cdot k_\phi}, \text{ см}^4$$

здесь: S_C , S_O - сечение соответственно сердечника и окна магнитопровода, см^2 ; P_{pac} – расчетная мощность трансформатора, ВА; B_m - максимальное значение индукции в

сердечнике, Тл; j – плотность тока в проводах обмоток, А/мм²; k_c - коэффициент заполнения сталью сердечника; k_o - коэффициент заполнения окна проводом обмоток; k_ϕ - коэффициент формы, который для синусоидального напряжения равен 1,1.

Максимальное значение индукции в сердечнике рекомендуется выбирать в соответствии с кривыми, изображенными на рис. 1.3б, либо на основе данных, рекомендуемых производителем сердечника, который планируется использовать.

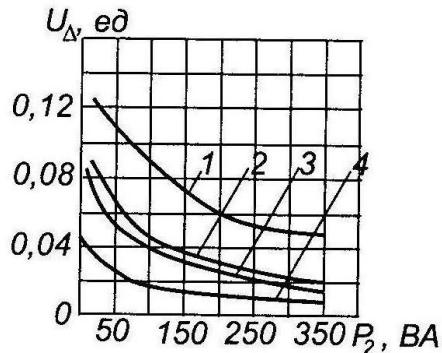


Рис. 1.4. Зависимость относительного падения напряжения $U\Delta=\Delta U/U=f(P_{pac})$, В на выходе, соответствующее изменению тока от нуля до номинального для трансформаторов: 1 – стержневых ленточных из стали 3412, $\delta=0,35$ мм, $f=50$ Гц.

Выбор типоразмера магнитопровода

На основе полученного значения $S_C \cdot S_o$ выбираем типоразмер магнитопровода и уточняем (выписываем) его конструктивные данные: $S_C \cdot S_o$, k_c, k_o , среднюю длину магнитной силовой линии l_c , массу G_c , площадь окна магнитопровода S_o , удельные потери P_{UD} (приложение 1).

Расчет количества витков трансформатора

Электрический расчет параметров трансформатора производится на основе параметров выбранного сердечника. Основным соотношением для определения числа витков в обмотках трансформатора можно использовать формулу для расчета числа витков на один Вольт:

$$w_0 = \frac{10^4}{4B_m f S_C k_c k_\phi}$$

Здесь значение B_m не должно превышать значение, установленное для расчетов с помощью графика рис. 2.3б. Более точно число витков первичной (w_{11}) и вторичных (w_{2k} , w_{3l}) обмоток (полуобмоток) определяется с учетом относительного падения напряжения $U\Delta=\Delta U/U$ на обмотках:

$$w_{11} = \frac{10^4 U_{11} (1 - 0,5 U\Delta)}{4B_m f S_C k_c k_\phi}$$

$$w_{2k} = \frac{10^4 U_{2k} (1 - 0,5 U\Delta)}{4B_m f S_C k_c k_\phi}$$

$$w_{3l} = \frac{10^4 U_{3l} (1 - 0,5 U\Delta)}{4B_m f S_C k_c k_\phi}$$

Здесь U_{11} , U_{2k} , U_{3l} – напряжение соответственно первичной и вторичных обмоток, В; $U\Delta$ – относительное падение напряжения (ориентировочное значение) в обмотках, В; S_C

– сечение магнитопровода, см²; f – частота, Гц; B_m - максимальное значение индукции в сердечнике, Тл; k_C – коэффициент заполнения сталью сердечника; k_O – коэффициент заполнения окна проводом обмоток; k_ϕ – коэффициент формы.

Таблица 1.4 – Рекомендуемые расчетные значения коэффициента полезного действия $\eta_{\text{ном}}$, % и относительного падения напряжения на обмотках $U\Delta$, % на обмотках низкочастотных трансформаторов малой мощности

P _{2ном} , ВА	20	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	600	800	1000	1200
$\eta_{\text{ном}}$, %	75	81	84	87	88	89	90	91	92	92,5	93	94	95	96	96,5
$U\Delta$, %	20	14	10	8	7	6	5	4,5	4	3,5	3	2,8	2,5	2,3	2,2

Оценка потерь энергии в магнитопроводе

Определяем потери P_C в магнитопроводе:

$$P_C = P_{y\delta} G_C, \text{ Вт},$$

где G_C - масса магнитопровода в кг; $P_{y\delta}$ - удельные потери в магнитопроводе (массой 1 кг), Вт/кг.

Приближенное значение удельных потерь в магнитопроводе можно найти с помощью графиков на рис. 1.5 (либо воспользоваться данными табл. 1.2)

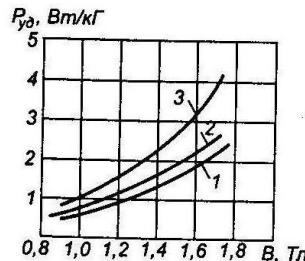


Рис. 1.5. Зависимость удельной мощности $P_{\text{уд}}$ потерь в сердечниках от максимальной индукции B_m : 1 – из стали 3413, $\delta=0,35$ мм, $f=50$ Гц; 2 – из стали 3412, $\delta=0,35$ мм, $f=50$ Гц; 3 – из стали 3412, $\delta=0,5$ мм, $f=50$ Гц.

Расчет действующего значения тока холостого хода первичной обмотки трансформатора

Определяем значение тока холостого хода трансформатора, для этого находим его активную составляющую:

$$I_{XXA} = \frac{P_C}{U_{11}(1 - 0,5U\Delta)}, \text{ А}$$

где P_C – потери в стали, Вт; U_{11} – напряжение первичной обмотки трансформатора (действующее значение), В; $U\Delta$ – относительное падение напряжения, %.

Реактивная составляющая тока холостого хода трансформатора может быть подсчитана по формуле:

$$I_{XXP} = \frac{H_m l_C 10^{-2}}{w_{11}} + \frac{0,8B_m n_3 l_3 10^4}{2^{0,5} w_{11}}, \text{ А}$$

где H_m – эффективное значение напряженности магнитного поля, А/м, соответствующее максимальному значению индукции B_m в сердечнике (выбирается приближенно по рис. 2.6 или кривой намагничивания выбранного материала); l_C – средняя

длина магнитной силовой линии, см; n_3 – число зазоров (для броневого и стержневого трансформатора $n_3=2$, для тороидального $n_3=0$); l_3 – длина немагнитного зазора, обусловленного неидеальностью сопряжения поверхностей половинок разъемного магнитопровода, приблизительно $l_3=0,002$ см; w_{11} – число витков первичной обмотки.

Действующее значение тока холостого хода первичной обмотки равно:

$$I_{XX} = \sqrt{I_{XXA}^2 + I_{XXP}^2}, \text{ A}$$

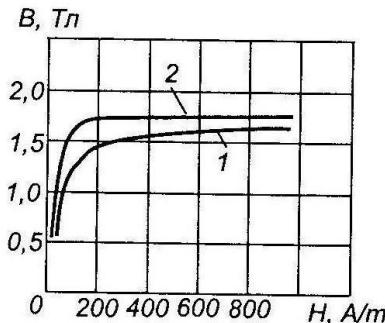


Рис. 1.6. Зависимость индукции в сердечнике от напряженности поля:
1 - для стали 3412; 2 – для стали 3423.

Расчет действующих значений токов обмоток трансформатора и выбор марки проводов

Действующее значение тока первичной обмотки (полуобмотки) трансформатора находится как сумма составляющих, в том числе тока холостого хода:

$$I_{11} = \sqrt{\frac{1}{p} \cdot \left[2 \sum_1^L \left(\frac{I_{3l} w_{3l}}{w_{11}} \right)^2 + \sum_1^K \left(\frac{I_{2k} w_{2k}}{w_{11}} \right)^2 + I_{XX}^2 \right]}$$

где: $p=2$ для первичной обмотки с выводом нулевой точки, $p=1$ – без вывода первичной обмотки трансформатора; $l=1,2,\dots,L$ – количество вторичных обмоток с выводом средней точки; $k=1,2,\dots,K$ – количество вторичных обмоток без выводов; w_{2k} , w_{3l} , w_{11} – число витков обмоток.

Для определения поперечного сечения проводов необходимо задаться плотностью тока в соответствии с рекомендациями, приведенными на рис. 2.2 б для максимального перегрева $\Delta T_{\text{пер}}=50^\circ\text{C}$. Заметим, что плотность тока в обмотках в значительной мере влияет на температуру нагрева трансформатора и должна быть одинаковой, либо выбрана с учетом укладки и охлаждения той или иной обмотки. Площадь поперечного сечения проводов равна:

$$q_{11} = \frac{I_{11}}{j}; q_{2k} = \frac{I_{2k}}{j}; q_{3l} = \frac{I_{3l}}{j}, \text{ мм}^2$$

где j – плотность тока, $\text{A}/\text{мм}^2$.

Наибольшее применение находят медные провода круглого и прямоугольного сечения с эмалевой изоляцией, имеющие малую толщину изоляции и высокую электрическую прочность. Выбор марки провода осуществляется прежде всего исходя из допустимой рабочей температуры провода ($T_{\text{раб}}$), амплитудного значения рабочего напряжения обмоток и силы тока в обмотках.

При напряжении обмоток до 500 В и токах до нескольких ампер рекомендуется применять провода марки ПЭВ-1 ($T_{\text{раб}}=105^\circ\text{C}$), ПЭТВ (130°C), ПСД (155°C) и ПСДК (180°C). При больших токах (более 5 А) следует применять провода прямоугольного сечения (например, марок ПЭВП, ПБД при $T_{\text{раб}}=105^\circ\text{C}$ или ПСД, ПСДК при 155°C). При

более высоких рабочих напряжениях рекомендуется применять провода марок ПЭВ-2 и ПЭВТЛ-2.

Рассчитав поперечное сечение проводов q_i всех обмоток (полуобмоток) и выбрав марку провода (по значению поперечного сечения) находим справочные данные: диаметр проводов с изоляцией d_i и без нее d'_i , а также массу g_i одного метра провода (приложение 2). Затем вычисляем действительную плотность тока j в каждой обмотке и ее среднее значение j_{cp} для трансформатора:

$$j_{cp} = \kappa_{+L+1} \sqrt{\left(j_{11} \prod_1^K j_{2k} \prod_1^L j_{3l} \right)}, \text{ A/mm}^2$$

Расчет конструкции трансформатора

Конструктивный расчет трансформатора включает расчет размещения обмоток (с учетом изоляционных прокладок) в конструкции, массу трансформатора и потери энергии.

Геометрические размеры и электрические параметры каждой из обмоток определяются не только числом витков, диаметром проводников и рабочим напряжением обмотки, но и местом расположения ее в окне магнитопровода. Поэтому конструктивный расчет трансформатора должен начинаться с согласования плана размещения обмоток в окне магнитопровода с указанием числа витков и диаметра провода с изоляцией для каждой из обмоток.

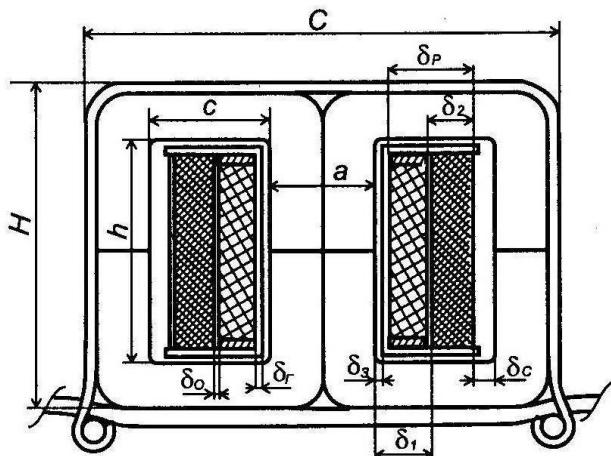


Рис. 1.7. Конструкция обмотки броневого трансформатора с ленточным магнитопроводом

Обмотки броневых и стержневых трансформаторов выполняются в виде катушек каркасной или бескаркасной намотки. В обоих случаях используется, как правило, рядовая многослойная намотка обмоток по всей высоте окна магнитопровода. Каркас отличается от гильзы наличием боковых щек, имеющих обычно толщину, равную толщине гильзы: $\delta_r = \delta_{\text{щ}}$. Толщина гильзы (каркаса) обычно составляет 1...3 мм. Зазор между гильзой и магнитопроводом δ_3 должен быть в пределах 0,5...1 мм.

Высота h_{o611} одного слоя обмотки равна:

$$h_{o611} = h - 2\delta_3 - 2\delta_{\text{щ}}$$

где δ_3 - зазор между гильзой или между каркасом катушки обмотки и сердечником, мм; $\delta_r = \delta_{\text{щ}}$ – толщина стенки каркаса катушки, мм; h – высота окна, мм.

Количество витков в слое обмотки определяется с учетом плотности намотки (с помощью коэффициента укладки k_y) и округлением до ближайшего меньшего числа:

$$w_{C\text{Л}1} = \frac{h_{o\delta 11} k_y}{d_{11}}; \quad w_{C\text{Л}2i} = \frac{h_{o\delta 2i} k_{y2i}}{d_{2i}}.$$

где d_{11} , d_{2i} – диаметр провода с изоляцией соответственно первого слоя первичной обмотки и i -го слоя вторичной обмотки, мм; k_y , k_{y2i} – коэффициенты укладки обмоток.

Таблица 1.5 – Рекомендуемые расчетные значения коэффициента укладки провода в слое обмотки

Толщина провода d , мм	0,2	0,2-0,5	0,5-0,8	0,8-1	1
Коэффициент укладки k_y	0,9	0,93	0,95	0,9	0,85

Число слоев в каждой обмотке равно:

$$n_{C\text{Л}11} = \frac{P_1}{m_1} \cdot (w_{11} / w_{C\text{Л}11});$$

$$n_{C\text{Л}2i} = \frac{P_{2i}}{m_1} \cdot (w_{2i} / w_{C\text{Л}2i}),$$

где m_1 – число катушек, в трансформаторе броневого типа $m_1=1$, стержневого $m_1=2$; $p=1$ для обмотки в два провода с выводом средней точки или без вывода, $p=1$ в противном случае.

Выбрав изоляцию обмоток в зависимости от их рабочего напряжения и диаметр проводов, производится расчет размеров обмоток. Толщина (сечение) первичной обмотки δ_1 и вторичных обмоток δ_{2i} с коэффициентом неплотности намотки, равным 1,2:

$$\delta_1 = 1,2 \cdot n_{C\text{Л}1} \cdot d_{11}, \text{мм}$$

$$\delta_{2i} = 1,2 \cdot n_{C\text{Л}2i} \cdot d_{2i}, \text{мм}$$

В результате общий радиальный размер всех обмоток катушки будет составлять величину:

$$\delta_P = \delta_1 + \sum_{i=1}^p \delta_{2i} + (p+1)\delta_0, \text{мм}$$

где δ_0 - толщина прокладки между обмотками катушки, мм; $p=1$ для обмотки в два провода с выводом средней точки или без вывода, $p=1$ в противном случае.

Средняя длина обмотки трансформатора кроме прочего определяется ее положением на катушке, т.е. величиной условного радиуса r_{cp} закругления витка, который находится как:

$$r_{CP} = \delta_3 + \delta_\Gamma + \frac{\delta_1}{2}, \text{мм} \text{ - для первичной обмотки;}$$

$$r_{CP2i} = \delta_3 + \delta_\Gamma + i\delta_0 + \delta_1 + \sum_{i=1}^l \delta_{2i} - \delta_{2i}/2, \text{мм} \text{ - для } i\text{-ой вторичной обмотки.}$$

Отсюда средняя длина витка обмотки трансформатора может быть найдена с помощью соотношения:

$$l_{CP} = 2(a + b + \pi r_{CP})10^{-3} \text{ м,}$$

где a и b – размеры стержня магнитопровода в мм; r_{cp} – условный радиус закругления витка, мм.

Активное сопротивление i -ой обмотки при максимальной температуре окружающей среды равно:

$$r_i = \frac{l_{CPi} w_i k_t k_f}{57 q_i}, O_m$$

$$r_{2i} = \frac{l_{CP2i} w_{2i} k_i k_f}{57 q_{2i}}, O_m$$

где $k_i=1+0,004(T_C+\Delta T-20)$ – температурный коэффициент удельного сопротивления материала проводников; T_C – максимальная температура окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$; $\Delta T=50$ $^{\circ}\text{C}$ – максимальная температура перегрева обмоток, $^{\circ}\text{C}$; k_f – коэффициент увеличения сопротивления провода в зависимости от частоты преобразования напряжения, на частотах меньших 10 кГц, $k_f=1$.

Потери в меди первичной, i -ой вторичной обмотки можно определить с помощью выражений:

$$P_{m1} = I_{11}^2 r_1, \quad P_{m2i} = I_{2i}^2 r_{2i}$$

Суммарные потери в меди будут равны:

$$P_m = P_{m1} + \sum_{i=1}^p P_{m2i}$$

Коэффициент полезного действия трансформатора:

$$\eta_{TP} = \frac{\sum_{i=1}^l P_{2i}}{P_m + P_C + \sum_{i=1}^l P_{2i}}$$

где $\sum_{i=1}^l P_{2i}$ - суммарная активная мощность в нагрузке, Вт.

3.1.3 Результаты и выводы: