

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

Кафедра «Электротехнологии и электрооборудование»

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ
ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ**

Электротехника и электроника

Направление подготовки 27.03.04 Управление в технических системах

Профиль образовательной программы Системы и средства автоматизации технологических процессов

Форма обучения очная

СОДЕРЖАНИЕ

Конспект лекций.....	4
1.1 Лекция № 1,2 Электрические цепи постоянного тока.....	4
1.2Лекция № 3 Анализ линейных электрических цепей постоянного тока.....	13
1.3Лекция № 4 Электромагнетизм.....	17
1.4Лекция № 5,6,7 Синусоидальный переменный электрический ток.....	31
1.5Лекция № 8,9 Расчет цепей переменного тока. Резонанс напряжений. Резонанс токов.....	38
1.6 Лекция № 10 Основы электроники.....	43
1.7 Лекция 11,12 Основы электроники.....	46
1.8 Лекция 13 Электронные устройства.....	50
1.9 Лекция 14 Переходные процессы в электрических цепях.....	73
1.10 Лекция 15,16 Основные методы расчета переходных процессов.....	80
1.11 Лекция 17 Электрические цепи несинусоидального тока.....	90
1.12 Лекция 18,19 Соединение трехфазных цепей звездой и треугольником.....	93
1.13 Лекция 20,21 Аварийные режимы в трехфазных цепях.....	97
1.14 Лекция 22 Трансформаторы.....	104
1.15 Лекция 23 Асинхронные машины переменного тока.....	108
1.16 Лекция 24, 25 Электрические машины постоянного тока.....	116
1.17 Лекция 26 Основы электропривода.....	124
2. Методические указания по выполнению лабораторных работ	129
2.1 Лабораторная работа № ЛР-1 Электробезопасность	129
2.2 Лабораторная работа № ЛР-2,3 Электрические измерения и приборы	138
2.3 Лабораторная работа № ЛР-4,5 Исследование законов Кирхгофа и принципа наложения в сложной электрической цепи постоянного тока.....	150
2.4 Лабораторная работа № ЛР-6,7 Исследование цепи постоянного тока с последовательным и параллельным включением элементов.....	153
2.5 Лабораторная работа № ЛР-8,9 Элементы в цепи переменного тока	
2.6 Лабораторная работа № ЛР-10,11 Исследование цепи переменного тока с последовательным включением элементов.....	157

2.7 Лабораторная работа № ЛР-12,13 Исследование резонансных явлений в цепи переменного тока. Резонанс напряжения.....	160
2.8 Лабораторная работа № ЛР-14,15 Исследование резонансных явлений в цепи переменного тока. Резонанс тока.....	163
2.9 Лабораторная работа № ЛР-16,17 Расчет цепи переменного тока с параллельным включением элементов.....	166
2.10 Лабораторная работа № ЛР-18, Исследование прямой и обратной ветви вольт-амперной характеристики полупроводниковых диодов и стабилитронов.....	168
2.12 Лабораторная работа № ЛР-19 Исследование биполярных транзисторов...172	
2.13 Лабораторная работа № ЛР-20 Двухполупериодный неуправляемый выпрямитель.....	175
2.14 Лабораторная работа № ЛР-21,22 Усилитель постоянного тока.....	178
2.16 Лабораторная работа № ЛР-23,24 Исследование двухполупериодного мостового выпрямителя при работе со слаживающими фильтрами.....	181
2.18 Лабораторная работа № ЛР-25 Исследование трехфазной электрической цепи переменного тока при соединении потребителей звездой.....	185
2.19 Лабораторная работа № ЛР-26,27 Исследование трехфазной электрической цепи переменного тока при включении нагрузки звездой.....	187
2.20 Лабораторная работа № ЛР-28 Исследование трехфазной электрической цепи переменного тока при включении нагрузки треугольником.....	190
2.21 Лабораторная работа № ЛР-29 Исследование трехфазной электрической цепи переменного тока при соединении потребителей звездой и треугольником.....	193
2.22 Лабораторная работа № ЛР-30,31 Включение трехфазного трансформатора в трехфазную систему.....	196
2.23 Лабораторная работа № ЛР-32,33 Включение трехфазного асинхронного электродвигателя в трехфазную систему.....	198
2.24 Лабораторная работа № ЛР-34 Исследование однофазного воздушного трансформатора.....	200
3. Методические указания по проведению практических занятий	203
3.1 Практическое занятие № ПЗ 1,2,3Расчет трансформатора.....	203
3.2 Практическое занятие № ПЗ 4,5Расчет схем выпрямителей.....	213
3.3 Практическое занятие № ПЗ 6,7Расчет схем выпрямителей.....	216
3.4 Практическое занятие № ПЗ 8,9Расчет схем интегральных стабилизаторов....	218

1. КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

1. 1 Лекция № 1,2(4 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:

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

Электродвижущая сила

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

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

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

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

Электрическое напряжение и электрический потенциал

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Измерение ЭДС и напряжения

Единицей измерения ЭДС и электрического напряжения является вольт, а прибор, измеряющий эти величины – вольтметр. Вольтметр включается параллельно в

электрическую цепь, и должен обладать очень большим сопротивлением, чтобы он не влиял на режим работы цепи. Величина ЭДС измеряется в режиме холостого хода, при разомкнутой электрической цепи, напряжение на любом участке в рабочем режиме.

Элементы схемы замещения

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

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

Источник ЭДС

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

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

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

Выразим напряжение

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

Проанализируем зависимость напряжения от тока. При токе равном нулю, напряжение имеет максимальное значение и равно величине ЭДС, при увеличении тока – напряжение уменьшается. Так как выражение является уравнением прямой линии, то и ВАХ линейна. 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 сопротивление. Таким образом, мы можем заменить последовательное соединение нескольких элементов одним элементом с сопротивлением, которое называется эквивалентным.

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

Закон Ома для активной ветви

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

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

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

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

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 определяется по формуле:

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

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

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

Эквивалентные преобразования (звезда-треугольник)

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

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

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

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

Второй закон Кирхгофа

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

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

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

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 второй закон Кирхгофа можно сформулировать следующим образом: алгебраическая сумма падений напряжений на пассивных элементах замкнутого контура равна алгебраической сумме ЭДС источников, действующих в данном контуре. В алгебраическую сумму со знаком «+» входят 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 №3 (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:

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

Применяется при расчете цепи, которая содержит параллельно соединенные ветви

Порядок расчета.

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

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

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 определяются:

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

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

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

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 стремиться к нулю, а ток, соответственно, к бесконечности. Короткое замыкание является аварийным режимом, возникающим вследствие случайного соединения токоведущих частей без изоляции, или же вследствие пробоя изоляции. Простейшим способом отключения токов короткого замыкания является использование приборов защиты. В качестве примера такого прибора можно рассмотреть плавкий предохранитель. Для напряжения до 250 В и тока до 60 А используют пробочные предохранители.

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

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

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

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

Баланс мощностей

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

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

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.

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

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 называют нелинейными, а цепь, содержащая хотя бы один нелинейный элемент, называется нелинейной.

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

Характеристики НЭ

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

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

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

Свойства НЭ кроме ВАХ характеризуются также статическим и дифференциальным сопротивлениями.

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

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

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

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

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. Графически 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 № 4 (2 часа).

Тема: «Электромагнетизм»

1.3.1 Вопросы лекции:

1. Основные характеристики магнитного поля
2. Характеристики ферромагнитных материалов
3. Закон электромагнитной индукции. Самоиндукция. Взаимодействие поля с электрическим током
4. Закон полного тока. Магнитные цепи с постоянными магнитными потоками.
Магнитные цепи с переменными магнитными потоками

1.3.2 Краткое содержание вопросов:

1 Основные характеристики магнитного поля.

Вокруг проводника, по которому проходит электрический ток, возбуждается магнитное поле. Рассмотрим пример, если перпендикулярно к проводнику поместить плексиглас с металлическими опилками, то под воздействием магнитного поля проводника опилки расположатся по концентрическим окружностям. Таким образом, можно сказать, что в магнитном поле действуют магнитные силы, а ток возбуждает магнитное поле благодаря своей намагничивающей силе или магнитодвижущей силе.

Для наглядности, пространство, где находится магнитное поле, можно представить заполненным силовыми линиями. Направление силовых линий определяется по правилу правоходового винта (правило буравчика).

Магнитодвижущая сила (МДС) создает в каждой точке поля определенную напряженность \vec{H} , измеряемую в [A/m]. Напряженность характеризует интенсивность МП, но не учитывает влияния среды, в котором оно находится.

В вакууме и неферромагнитной среде величина напряженности определяется выражением:

$$H = \frac{B}{\mu_0},$$

где B - магнитная индукция, [Тл];

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [Гн/м] - магнитная проницаемость вакуума.

Магнитная индукция величина векторная. Направление вектора магнитной индукции является касательной к силовым линиям МП в каждой их точке.

Посредством магнитных линий можно магнитную индукцию выразить числом линий, проходящих через площадку, равную единице поверхности, поставленную перпендикулярно направлению силовых линий поля.

Поток вектора магнитной индукции сквозь какую-либо поверхность площадью S называется магнитным потоком

$$\Phi = \int_S B dS, \quad [\text{Вб}].$$

2 Характеристики ферромагнитных материалов.

Для использования явления ЭМИ в рабочем объеме ЭТУ создается магнитный поток заданной конфигурации и интенсивности. Причем задачу усиления МП и придания ему необходимой конфигурации можно решить, используя магнитные материалы с различными свойствами и геометрическими размерами.

Все магнитные материалы подразделяются на диамагнетики, относительная магнитная проницаемость которых меньше 1, парамагнетики и ферромагнетики, к последним относятся: железо, никель, кобальт и их сплавы.

Если в магнитное поле, например в поле катушки, поместить стержень из ферромагнитного материала, то его магнитные свойства усиливаются: на конце стержня, из которого поток выходит, возникает северный полюс, другой полюс стержня является южным. Намагниченный стержень, удаленный из магнитного поля, в некоторой степени сохраняет свои магнитные свойства, называемые остаточным намагничиванием. Оно особенно сильно выражено у ферромагнетиков, и незначительно у пара- и диамагнетиков. Для электротехнических расчетов имеет значение, что отношение магнитной индукции к напряженности магнитного поля для ферромагнетиков, называемое магнитной проницаемостью материала сердечника μ , имеет большое значение и непостоянно.

$$\mu = \frac{B}{H}$$

Таким образом, зависимость $B = f(H)$ у ферромагнетиков не может быть выражена аналитически, а может быть представлена графической или табличной зависимостью. Рассмотрим пример кривой намагничивания Листовой стали Э4. Нижняя ветвь кривой соответствует ненасыщенному состоянию стали, в этой части зависимость практически линейна. Затем вследствие явления магнитного насыщения имеет место перегиб кривой, так называемое колено кривой намагничивания. В условиях, соответствующих части кривой, лежащей выше этого колена, ферромагнетик насыщен, т.е. магнитная индукция увеличивается незначительно при значительном увеличении напряженности.

Если требуется, чтобы колебания тока намагничивания мало влияли на магнитный поток, то выбирается индукция соответствующая условиям насыщения (генераторы постоянного тока параллельного возбуждения), если же нужно, чтобы индукция или магнитный поток изменились пропорционально току намагничивания, то выбирают индукцию, соответствующую нижней части кривой (в приборах автоматического управления, измерительных приборах).

Данные кривой намагничивания получают экспериментально по образцу материала. В рабочих же условиях магнитная индукция ферромагнетика определяется не только данной напряженностью поля, но и предыдущим магнитным состоянием, что является

следствием магнитного гистерезиса. При первоначальном намагничивании сердечника кривая намагничивания возрастает от нулевого значения по кривой. Затем, при уменьшении намагничающего тока, магнитная индукция уменьшается, но не по кривой первоначального намагничивания, а по кривой, лежащей несколько выше. При напряженности магнитного поля, равной нулю, в сердечнике сохраняется некоторая остаточная индукция B_0 . Чтобы полностью размагнитить сердечник, необходима напряженность поля обратного направления H_c , называемая коэрцитивной силой, для возбуждения которой, по катушке нужно пропустить ток обратного направления. Дальнейшее увеличение напряженности приводит к возникновению магнитной индукции обратного направления. Если уменьшать намагничающий ток, то магнитная индукция будет уменьшаться по кривой расположенной ниже оси абсцисс, но такой же по форме, что и кривая убывания индукции при положительно направлении напряженности магнитного поля. Эта кривая намагничивания при циклическом перемагничивании сердечника называется петлей гистерезиса. В условиях такого циклического перемагничивания работают якоря машин постоянного тока и сердечники машин и аппаратов машин переменного тока.

Площадь петли гистерезиса пропорциональна затрате энергии на один цикл перемагничивания единицы объема ферромагнетика. Чтобы уменьшить потери энергии на гистерезис, в машинах с циклическим перемагничиванием ферромагнетика используют материалы с узкой петлей гистерезиса. К таким материалам относится электротехническая сталь.

Также к магнитным потерям относят потери, связанные с вихревыми токами. Вихревыми называют электрические токи, возникающие вследствие электромагнитной индукции в проводящей среде (обычно в металле) при изменении пронизывающего ее магнитного потока. В качестве примера рассмотрим массивный цельный сердечник, на который поместим катушку с переменным током. Переменное магнитное поле индуцирует токи, которые замыкаются в самом сердечнике по плоскостям, перпендикулярным направлению магнитного потока, вызывают: во-первых, нагрев сердечника, во-вторых, вихревые токи обладают размагничающим действием, т.е. их собственное магнитное поле, уменьшает величину магнитного потока, их индуцирующего. Для уменьшения потерь от вихревых токов, можно либо увеличить сопротивление сердечника, либо уменьшить площадь контуров, охватываемых вихревыми токами. Для этого сердечник изготавливают не цельным, а сборным из штампованных, изолированных друг от друга изоляционным лаком листов электротехнической стали.

3. Закон электромагнитной индукции. Самоиндукция. Взаимодействие поля с электрическим током.

Проявления магнитного поля: механическое

Рассмотрим магнитное поле, образованное постоянным магнитом. Направление силовых линий магнитного поля всегда от северного поля к южному. Вектор магнитной индукции, в каждой точке поля, всегда направлен от северного поля к южному. Если поместить в область действия поля проводник с током, то он испытывает со стороны внешнего для него поля механическую силу F , стремящуюся вытолкнуть его из области действия поля. Для определения направления этой силы служит правило левой руки: ладонь нужно поставить так, чтобы магнитные линии в нее входили, пальцы вытянуть по направлению тока вдоль проводника, отогнутый большой палец левой руки покажет направление действующей на проводник механической силы. Эта сила называется электромагнитной, так как она является следствием взаимодействия тока и магнитного поля.

Связь между током, магнитной индукцией и электромагнитной силой установил Ампер: электромагнитная сила прямо пропорциональна величине магнитной индукции, силе тока активной длине проводника и синусу угла между направлением поля и направлением тока.

$$F = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \alpha, [\text{Н}]$$

Применим закон Ампера для расчета силы взаимодействия проводов двухпроводной линии. На расстоянии a от оси провода 1 напряженность магнитного поля, возбуждаемого током этого провода равна:

$$H = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot a},$$

следовательно, магнитная индукция поля

$$B = \mu_0 \cdot H = \mu_0 \cdot \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot a}$$

Силовые линии магнитного поля первого провода располагаются перпендикулярно току второго провода, следовательно, на второй провод действует электромагнитная сила:

$$F = \mu_0 \cdot \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot a} \cdot I \cdot l = \mu_0 \cdot \frac{l}{2 \cdot \pi \cdot a} \cdot I^2.$$

Такая же сила, но противоположная по направлению, создается воздействием поля второго проводника на провод 1. И та, и другая электромагнитные силы пропорциональны квадрату тока, поэтому при коротких замыканиях, когда токи увеличиваются в сотни раз, силы взаимодействия возрастают в десятки тысяч раз и могут нарушить механическую целостность устройства.

Механическое проявление магнитного поля используют во всех электродвигателях для получения врачающих моментов, в измерительных приборах, а также в подъемных электромагнитах и электромагнитных реле.

Проявления магнитного поля: электромагнитное

В проводнике, движущемся в магнитном поле, возбуждается электрическое поле, пропорциональное магнитной индукции и скорости движения проводника. В проводнике происходит смещение зарядов против направления сил электрического поля, как это имеет место внутри всякого источника электроэнергии. Следовательно, здесь действует ЭДС, называемая индуцированной. Если проводник движется под углом α к направлению магнитного поля, то величина ЭДС прямо пропорциональна скорости перемещения, длине проводника, магнитной индукции и синусу угла между направлением магнитного поля и направлению перемещения проводника:

$$E = -v \cdot B \cdot l \cdot \sin \alpha$$

Направление индуцированной ЭДС определяется по правилу правой руки. Если ладонь правой руки расположить так, чтобы силовые линии входили в нее, а большой палец направлен по направлению движения проводника, то вытянутые пальцы покажут направления действия индуцированной ЭДС.

Знак «-» в уравнении ЭДС выражает принцип Ленца, т.е. индуцированная ЭДС стремится противодействовать причине, ее вызывающей.

Если замкнуть проводник на сопротивление и перемещать его со скоростью v , то индуцированная ЭДС вызовет в созданном контуре ток i . Взаимодействие которого с магнитным полем создаст электромагнитную силу, противодействующую движению проводника, т.е. причине возбуждающей ЭДС.

Закон электромагнитной индукции может быть выражен другой формулой. Скорость движения проводника может быть выражена через путь $d x$, проходимый им за время $d t$, т.е.

$$v = \frac{d x}{d t}$$

Произведение магнитной индукции на площадь есть магнитный поток, пересеченный проводником за время $d t$, следовательно:

$$E = -\frac{B \cdot l \cdot d x}{d t} = -\frac{B \cdot d S}{d t} = -\frac{d \Phi}{d t}.$$

Индуктированная ЭДС равна скорости изменения магнитного потока.

В различных электромагнитных устройствах – трансформаторах, машинах измерительных приборах – магнитных поток пронизывает катушку устройства, сцепляясь с отдельными ее витками. Причем, этот поток может по-разному, сцепляясь с витками. Например, часть потока Φ_1 сцепляется со всеми витками одного диаметра, а другая часть потока Φ_2 пронизывает несколько витков большего диаметра. Как только катушка начнет перемещаться по отношению к потокам, или поток начнет изменяться во времени, так в каждом отдельном витке будет индуцироваться ЭДС, величина которой определится выражением:

$$e_0 = -\frac{d \Phi_e}{d t}$$

Так как катушка представляет собой последовательное соединение витков, то ЭДС всей катушки будет представлять собой сумму индуцированных ЭДС каждого отдельного витка

$$e_k = -\frac{d(\Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_w)}{d t} \Psi = (\Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_w)$$

Величина в скобках является суммой магнитных потоков отдельных витков катушки, и называется потокосцеплением Ψ , измеряется как и магнитный поток в [Вб].

Если же магнитный поток пронизывает витки одинакового диаметра, то имеет место полное потокосцепление:

$$\Phi_1 = \Phi_2 = \dots = \Phi_w = \Phi, \Psi = w \cdot \Phi.$$

Электродвижущая сила, индуцируемая в катушке при полном потокосцеплении, будет равна:

$$e_k = -w \frac{d \Psi}{d t}.$$

4 Закон полного тока. Магнитные цепи с постоянными магнитными потоками.

Магнитные цепи с переменными магнитными потоками.

Магнитные цепи

Всякий электромагнит состоит из стального сердечника – магнитопровода и намотанной на него катушки с витками изолированной проволоки, по которой проходит электрический ток.

Совокупность нескольких участков: ферромагнитных (сталь) и неферромагнитных (воздух), по которым замыкаются линии магнитного потока, составляют магнитную цепь.

Закон полного тока

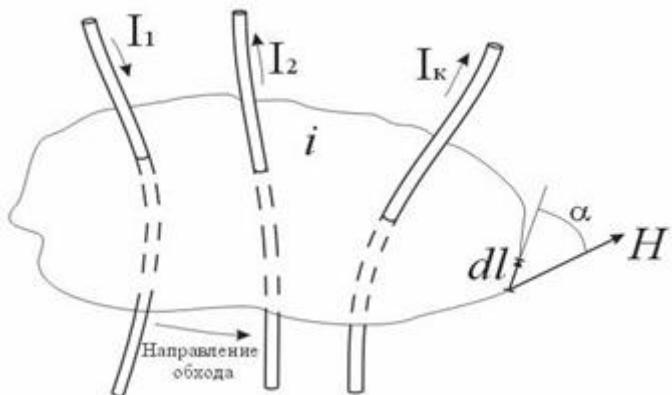
В основе расчета магнитных цепей лежит закон полного тока

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{L} = \oint \mathbf{H} \cos \alpha dL = \sum I$$

где: \mathbf{H} – напряженность магнитного поля в данной точке пространства;
 dL – элемент длины замкнутого контура L ;

α – угол между направлениями векторов \mathbf{H} и $d\mathbf{L}$;

\square I – алгебраическая сумма токов, пронизывающих контур L .

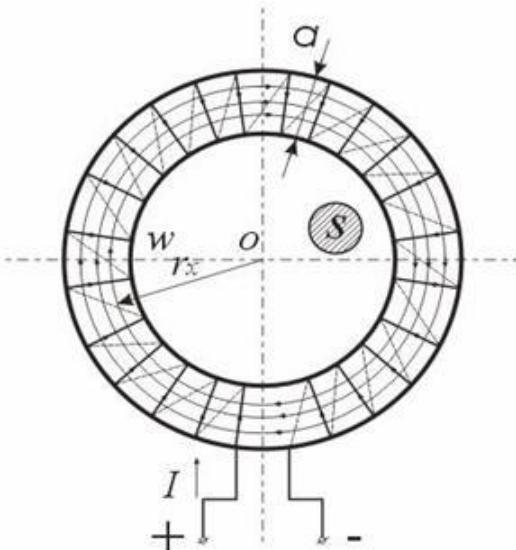


Закон полного тока

Ток I_k , пронизывающий контур L считается положительным, если принятое направление обхода контура и направление этого тока связаны правилом правоходового винта (буравчика).

Применение закона полного тока для расчета магнитных цепей

Рассмотрим простейшую магнитную цепь, выполненную в виде кольца тороида из однородного материала (рис. 4.4).



Кольцевая магнитная цепь

Обмотка имеет W витков и обтекается током I . Магнитные линии внутри кольца представляют собой концентрические окружности с центром в точке O . Применим к контуру C_x , совпадающему с одной из магнитных линий, проходящих в магнитопроводе, закон полного тока. При этом будем считать:

\bar{H} и $d\bar{L}$ совпадают, следовательно $\alpha = 0$;

величина H_x во всех точках контура одинакова;

сумма токов, пронизывающих контур, равна IW .

Тогда

$$\oint H_x \cos \alpha dL = H_x \oint dL = H_x L_x = IW$$

Отсюда

$$H_x = \frac{IW}{L_x} = \frac{IW}{2\pi r_x} [\text{A/m}],$$

где L_x – длина контура, вдоль которого велось интегрирование;
 r_x – радиус окружности.

Вектор \bar{H} внутри кольца зависит от расстояния r_x . Если a – ширина кольца $\ll d$, то эта разница между значениями H в пределах сердечника не велика. При этом в расчет допустимо принять для всего поперечного сечения магнитопровода одно значение напряженности магнитного поля:

$$H_{cp} = IW / L,$$

где L – длина средней магнитной линии.

Закон Ома для магнитной цепи. Линейные и нелинейные магнитные сопротивления

В кольцевом магнитопроводе с равномерной обмоткой все поле концентрируется внутри кольца.

Определим в этом случае магнитный поток в магнитопроводе с распределенной обмоткой.

Исходя из соотношений $\Phi = B_{cp} S$ и $B_{cp} = \mu_a H_{cp}$ получим

$$\Phi = B_{cp} S = \mu_a H_{cp} S .$$

$$\Phi = \mu_a S \frac{IW}{L} = \frac{IW}{\frac{L}{\mu_a S}} = \frac{F}{R_m}$$

Магнитный поток Φ зависит от произведения $IW = F$, которое получило название магнитодвижущей силы (МДС).

Величину $L / (\mu_a S) = R_m$ – принято называть магнитным сопротивлением магнитопровода (по аналогии с электрическим сопротивлением $r = L / \gamma S$).

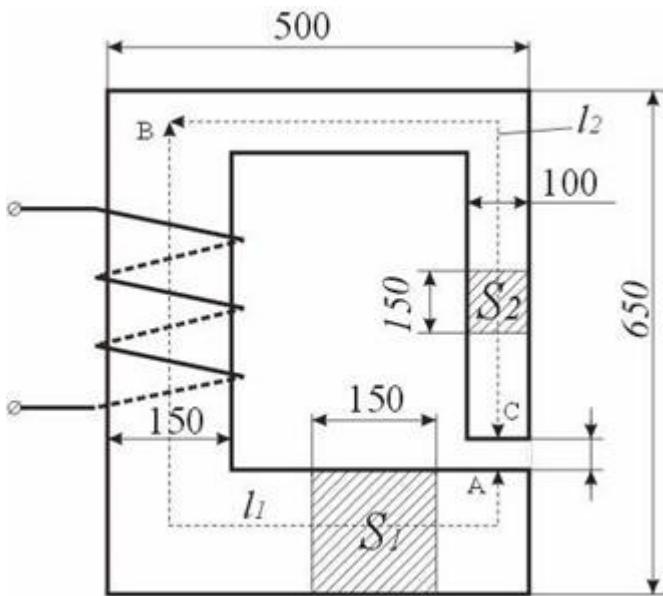
Магнитное сопротивление воздуха (зазоров) линейное, т.к. $\mu_a = \mu_0 = \text{const}$. Магнитное сопротивление сердечника нелинейно – μ_a зависит от B .

Если намагничающую силу F , уподобить действию ЭДС, будет получено соотношение, похожее на выражение закона Ома для цепи постоянного тока. В связи с этим формулу (*) принято называть законом Ома для магнитной цепи. Следует оговориться, что эта аналогия – формальная, а физическая сущность процессов в электрических и магнитных цепях различна.

В расчетах магнитных цепей различают прямую и обратную задачи.

Прямая задача

Задано: 1) геометрические размеры магнитной цепи; 2) характеристика $B = f(H)$ (кривая намагничивания) ферромагнитных материалов, из которых выполнена магнитная цепь; 3) магнитный поток Φ , который надо создать в магнитной цепи. Требуется найти намагничающую силу обмотки $F = IW$. Решение задачи рассматривается применительно к магнитопроводу, представленному на рис. 4.7.



Магнитная цепь

1. Магнитная цепь разбивается на ряд участков с одинаковым поперечным сечением S , выполненном из однородного материала.
2. Намечается путь прохождения средней магнитной линии (
3. Т.к. магнитный поток на всех участках цепи остается постоянным, то магнитная индукция $B = \Phi / S$ на каждом из участков и напряженность магнитного поля H неизменны. Это позволяет сравнительно просто определить значение $\oint H dL$ для контура, образованного средней магнитной линией, а следовательно, найти искомую величину намагничивающей силы, поскольку $F = \oint H dL$

Запишем интеграл $\oint H dL$ в виде суммы интегралов с границами интегрирования, совпадающими с началом и концом каждого участка цепи. Тогда

$$\oint H dL = \int_a^b H_1 dL + \int_b^c H_2 dL + \int_c^d H_3 dL = H_1 L_1 + H_2 L_2 + H_{\text{возд}} \delta = IW$$

где: L_1 и L_2 – длины ферромагнитных участков цепи [м].
 δ – ширина воздушного зазора, [м].

4. Значения H_1 и H_2 определяют по известным величинам магнитной индукции B с помощью кривых намагничивания, соответствующих ферромагнитных материалов.

А для воздушного зазора

$$H_{\text{возд}} = \frac{B_{\text{возд}}}{\mu_0} = \frac{B_{\text{возд}}}{4\pi \times 10^{-7}} = 8 \times 10^5 B_{\text{возд}} \text{ А/м.}$$

Обратная задача

Задано:

Геометрические размеры магнитной цепи;

Характеристики ферромагнитных материалов;

Намагничающая сила обмотки F.

Требуется определить магнитный поток Φ .

$$\Phi = \mu_s S \frac{IW}{L} = \frac{IW}{\frac{L}{\mu_s S}} = \frac{F}{R_m}$$

Непосредственное использование формулы магнитного потока Φ оказывается невозможным, поскольку магнитное сопротивление цепи переменное и само зависит от величины магнитного потока. Такие задачи решаются методом последовательного приближения в следующем порядке. Задаются рядом произвольных значений магнитного потока в цепи и для каждого из этих значений определяют необходимую намагничающую силу обмотки так, как это делается при решении прямой задачи.

По полученным данным строят кривую $\Phi(F)$ – вебер-амперную характеристику. Имея эту зависимость, нетрудно для заданного значения намагничающей силы найти величину магнитного потока.

Для оценки необходимого значения Φ можно пренебречь сопротивлением ферромагнитного участка и посчитать поток, который получится под действием намагничающей силы F при сопротивлении воздушного участка. Это значение Φ заведомо больше расчетного.

Остальные значения можно давать меньше.

$$\Phi = \frac{F}{R_{ возд }} = \frac{F}{\frac{b}{S \times 4\pi \times 10^{-7}}}.$$

Особенности расчета магнитных цепей с переменной магнитодвижущей силой

Физические процессы в цепях переменного тока, содержащих катушку со стальным сердечником, имеют ряд особенностей по сравнению с процессами в цепях постоянного тока. Эти особенности оказывают существенное влияние на конструктивное выполнение и технические характеристики электрических аппаратов и машин переменного тока.

Ферромагнитные элементы в цепях переменного тока имеют дополнительные потери в сердечнике на гистерезис и вихревые токи. Для снижения потерь стальной сердечник выполняют шихтованным из тонких изолированных друг от друга пластин.

Потери в сердечнике

Потери в сердечнике, называемые потерями в стали P_c , увеличиваются при повышении частоты питающего напряжения. Переменный магнитный поток Φ индуцирует в стальном сердечнике вихревые токи (токи Фуко), замыкающиеся в плоскостях, перпендикулярных к оси потока. Эти токи вызывают нагрев стали, снижая тем самым к.п.д. и ограничивая нагрузочную способность электромагнитных устройств. Потери энергии в стальном магнитопроводе значительно снижаются при уменьшении толщины листа электротехнической стали ($0,1 \div 0,5$ мм)

$$P_b = k_b f^2 B_m^2 d^2 / \rho ,$$

где k_b – коэффициент, определяемый экспериментально;

f – частота перемагничивания стали;

B_m – максимальная магнитная индукция;

d – толщина листа электротехнической стали сердечника;

ρ – удельное сопротивление материала сердечника.

Помимо потерь от вихревых токов, в стальном магнитопроводе при переменном магнитном потоке возникают потери, обусловленные явлением гистерезиса

$$P_r = k_r f B_m^2 G ,$$

где k_r – постоянный коэффициент;

G – вес сердечника в килограммах.

Суммарные потери от вихревых потоков и гистерезиса $P_c = P_b + P_r$ [Вт] называют магнитными потерями или потерями в стали.

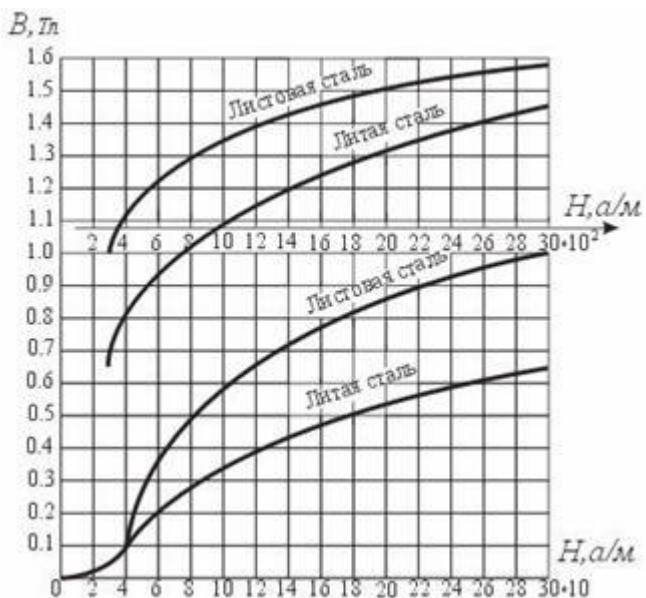
Векторная диаграмма и схема замещения катушки с сердечником

При расчете цепей с ферромагнитными элементами с синусоидальными источниками питания индуктивность L нельзя считать постоянной, и поэтому необходимо использовать зависимость между ЭДС и потокосцеплением или потоком. Форма кривой зависимости между потоком Φ и намагничающим током i подобна форме основной кривой намагничивания $B(H)$, т.к. $\Phi = B S$, а $H = IW / L$.

Нелинейный характер зависимости между Φ и i приводит к тому, что индуктивность катушки $L = W \Phi / i$ перестает быть величиной постоянной и зависит от величины намагничающего тока.

При непостоянстве индуктивности L ЭДС самоиндукции e , наводимую в катушке переменным током i следует определять по формуле

$$e = -W \frac{d\Phi}{dt} .$$



Зависимость В(Н)

Если к катушке подведено синусоидальное напряжение $u = U_m \sin(\omega t + \pi/2)$, а активное сопротивление обмотки $R \approx 0$, то приложенное напряжение уравновешивается только ЭДС самоиндукции:

$$u = -e, \\ U_m \sin(\omega t + \pi/2) = W d\Phi / dt.$$

Интегрируя это выражение, получим

$$\Phi = U_m / (2 \pi f) W \sin(\omega t) = \Phi_m \sin(\omega t).$$

Из полученного соотношения следует:

1. При синусоидальном напряжении на зажимах катушки магнитный поток Φ , вызванный протекающим по цепи током I , тоже синусоидальный.
2. Заданному действующему значению напряжения U на зажимах катушки соответствует определенная амплитуда магнитного потока Φ_m независимо от того, имеется ли у катушки стальной сердечник или же магнитный поток целиком замыкается по воздуху. Магнитный поток индуцирует в обмотке катушки ЭДС самоиндукции e , равную по величине приложенному напряжению и противоположную ему по направлению

$$e = -W d\Phi/dt = -W \Phi_m \omega \cos(\omega t) = 2 \pi f W \Phi_m \sin(\omega t - \pi/2),$$

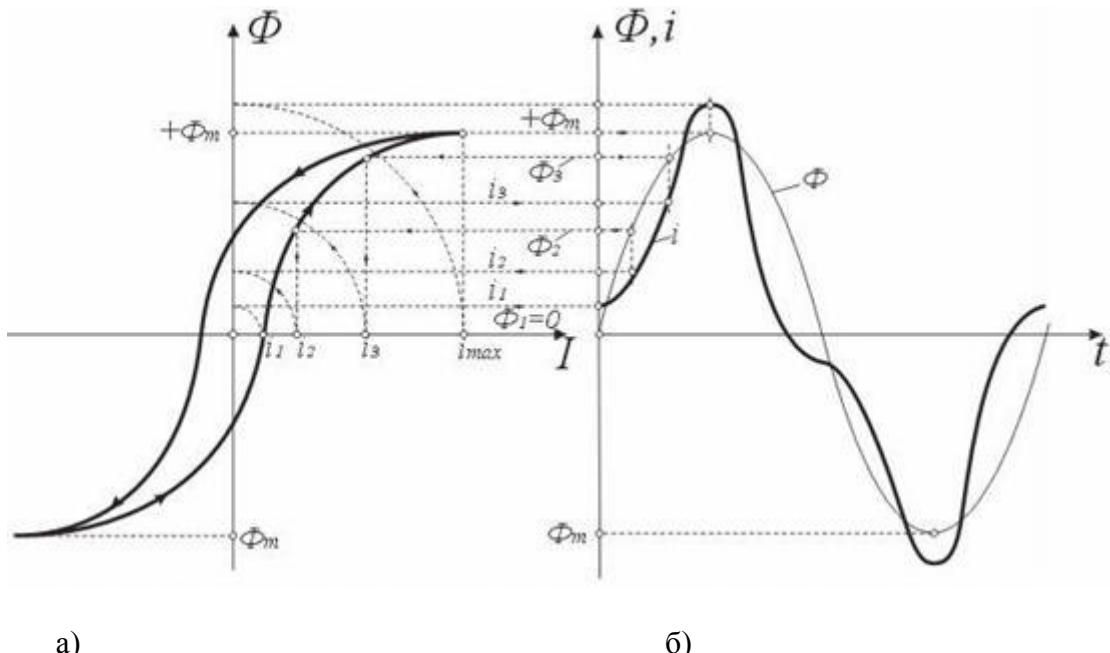
$$E_m = 2 \pi f W \Phi_m,$$

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f W \Phi_m = 4,44 f W \Phi_m.$$

При этом индуцируемая ЭДС E отстает от магнитного потока на четверть периода.

Выражение для действующей индуцированной ЭДС $E = 4,44 f W \Phi_m$ часто используется при анализе работы и в практических расчетах и называется трансформаторной ЭДС.

Процесс намагничивания и размагничивания стального сердечника протекает по несовпадающим ветвям петли гистерезиса. График зависимости $\Phi(i)$ при циклическом перемагничивании (рис. 4.9 а) имеет такую же форму, как и петля гистерезиса $B(H)$. На рис. 4.9 б изображен график синусоидального изменения магнитного потока во времени $\Phi(t)$.



Кривая перемагничивания (а) и кривые $\Phi(t)$ и $\Phi(i)$ для катушки со стальным сердечником
Располагая кривыми $\Phi(i)$ и $\Phi(t)$, построим кривую намагничающего тока $i(t)$.

Полученная кривая намагничающего тока $i(t)$ является несинусоидальной периодической функцией. Для упрощения анализа и расчета цепей переменного тока, содержащих катушки с ферромагнитными сердечниками, несинусоидальный намагничающий ток заменяют эквивалентным синусоидальным, опираясь на равенство действующих значений. Для построения расчетной схемы замещения катушки с сердечником запишем уравнение

$$u = -e + L_p di / dt + Ri,$$

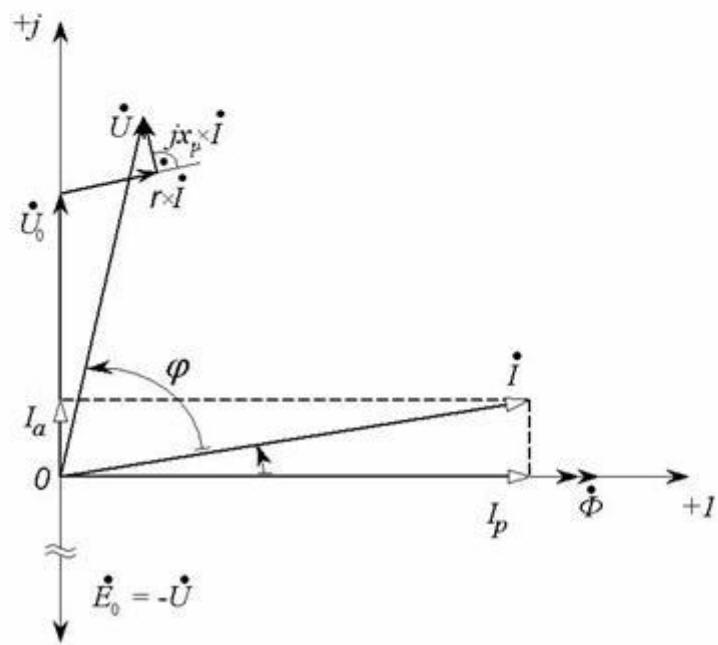
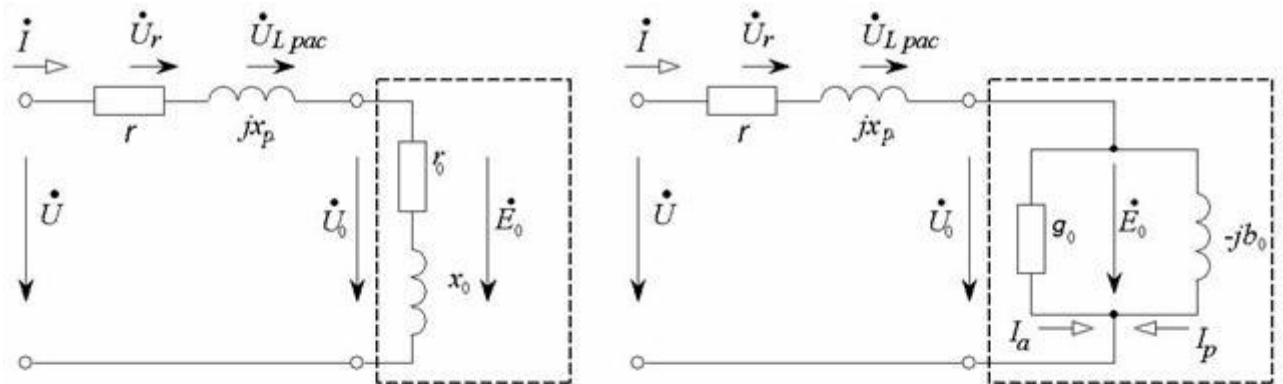
где: R – сопротивление обмотки;
 L_p – индуктивность рассеяния.

Полное комплексное сопротивление запишется

$$\underline{Z} = R_o + i(x_p + x_0),$$

где: R_o – активное сопротивление, обусловлено потерями на вихревые токи и гистерезис;
 x_o – индуктивное сопротивление, определяет мощность, необходимую на создание основного магнитного потока;
 R – сопротивление обмотки катушки;
 x_p – индуктивное сопротивление, определяет мощность потока рассеяния;
 R_o и x_o – нелинейные сопротивления.

Векторная диаграмма и а) последовательная, б) параллельная схемы замещения изображены на рисунке



Векторная диаграмма и соответствующие ей а) последовательная и б) параллельная схемы замещения

1. 4 Лекция №5,6,7 (6 часов).

Тема: «Синусоидальный переменный электрический ток»

1.4.1 Вопросы лекции:

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

1.4.2 Краткое содержание вопросов:

1. Способы представления синусоидальной функции. Получение переменного тока

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

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

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

1. Получение переменного тока. Способы представления синусоидальной функции

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

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

где B – магнитная индукция;

l – активная длина проводника;

v - скорость движения проводника;

α - угол между направлением движения проводника и магнитной индукцией.

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

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

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

$$f = \frac{n}{60}, [\text{Гц}]$$

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

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

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

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

Синусоидальному току соответствует непрерывное вращение вектора длиной I_m

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

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

аналогичным образом можно записать выражения для синусоидальных напряжений и ЭДС:

$$\begin{aligned} U &= U_m \sin(\omega t + \psi_u), \text{ В,} \\ E &= E_m \sin(\omega t + \psi_e), \text{ В.} \end{aligned}$$

где i, u, e - мгновенное значение;

I_m, U_m, E_m - амплитудное значение;

ψ_i, ψ_u, ψ_e - начальная фаза.

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

Среднее и действующее значения синусоидальной величины

Пусть закон изменения тока имеет вид:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Приравняем эти выражения:

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

и найдем действующее значение синусоидального тока:

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

Установим связь между действующим и амплитудным значением:

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

3 Методика расчета цепи переменного тока с помощью комплексных чисел. Простейшие цепи переменного тока с идеальным активным, индуктивным и емкостным элементом.

Любой вектор может быть представлен комплексным числом:

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

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

$e^{j\psi_i}$ - оператор поворота;

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

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

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

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

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

Перепишем показательную форму записи:

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

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

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

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

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

Определение аргумента КЧ.

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

Операции с комплексными числами. Сложение.

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

$$\begin{aligned} i_1 &= 10 \cdot \sin(\omega t + 45^\circ), \text{ А;} \\ i_2 &= 5 \cdot \sin(\omega - 135^\circ), \text{ А.} \end{aligned}$$

Перейдем от выражения для мгновенных значений к комплексным амплитудам токов:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{1m} &= 10 \cdot e^{j45^\circ} = 10 \cdot \cos 45^\circ + j \cdot 10 \cdot \sin 45^\circ = 10 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + j \cdot 10 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} = 5\sqrt{2} + j5\sqrt{2}. \\ \dot{I}_{2m} &= 5 \cdot e^{-j135^\circ} = 5 \cdot \cos(-135^\circ) + j \cdot 5 \cdot \sin(-135^\circ) \\ &= -5 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - j \cdot 5 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} = -2,5\sqrt{2} - j2,5\sqrt{2} \end{aligned}$$

Сложение двух комплексных чисел удобнее производить в алгебраической форме записи:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{1m} + \dot{I}_{2m} &= (5\sqrt{2} + j5\sqrt{2}) + (-2,5\sqrt{2} - j2,5\sqrt{2}) = \\ &= (5\sqrt{2} - 2,5\sqrt{2}) + j(5\sqrt{2} - 2,5\sqrt{2}) = \\ &= 2,5\sqrt{2}(2-1) + j2,5\sqrt{2}(2-1) = \\ &= 2,5\sqrt{2} + j2,5\sqrt{2} = \sqrt{(2,5\sqrt{2})^2 + (2,5\sqrt{2})^2} \cdot e^{j\operatorname{arctg}\left(\frac{2,5\sqrt{2}}{2,5\sqrt{2}}\right)} = \\ &= \sqrt{(2,5\sqrt{2})^2 \cdot (1+1)} \cdot e^{j\operatorname{arctg}(1)} = \end{aligned}$$

$$= 2,5\sqrt{2}\sqrt{2} \cdot e^{j45^0} = 5 \cdot e^{j45^0}$$

Обратный переход к мгновенным значениям:

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

Операции с комплексными числами. Вычитание.

$$\begin{aligned} i_{1m} - i_{2m} &= (5\sqrt{2} + j5\sqrt{2}) - (-2,5\sqrt{2} - j2,5\sqrt{2}) = \\ &= (5\sqrt{2} + 2,5\sqrt{2}) + j(5\sqrt{2} + 2,5\sqrt{2}) = \\ &= 2,5\sqrt{2}(2+1) + j2,5\sqrt{2}(2+1) = \\ &= 7,5\sqrt{2} + j7,5\sqrt{2} = \sqrt{(7,5\sqrt{2})^2 + (7,5\sqrt{2})^2} \cdot e^{j\arctg\left(\frac{7,5\sqrt{2}}{7,5\sqrt{2}}\right)} = \sqrt{(7,5\sqrt{2})^2 \cdot (1+1)} \cdot e^{j\arctg(1)} = \\ &= 7,5\sqrt{2}\sqrt{2} \cdot e^{j45^0} = 15 \cdot e^{j45^0} \end{aligned}$$

Обратный переход к мгновенным значениям:

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

Операции с комплексными числами. Деление.

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

Делить комплексные числа удобнее в показательной форме записи.

Комплексные амплитуды напряжения и тока имеют следующий вид:

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

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

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

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

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

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

$$R + jX = Z$$

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

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

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

Величина, обратная полному комплексному сопротивлению называется полной комплексной проводимостью:

$$\frac{Y}{Z} = \frac{1}{R+jX} = \frac{R-jX}{(R+jX) \cdot (R-jX)} = \frac{R-jX}{R^2+X^2}$$

$$= \frac{R}{R^2+X^2} - j \frac{X}{R^2+X^2}$$

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

Резистор

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

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

Определим закон изменения напряжения на его зажимах:

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

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

Индуктивный элемент

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

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

Тогда величина ЭДС самоиндукции:

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

$$= -E_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

ЭДС самоиндукции всегда направлено навстречу напряжению, а значит:

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

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

Емкостный элемент

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

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

Ток и напряжение связаны законом Ома в дифференциальной форме записи:

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

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

4 Активная, реактивная и полная мощности. Коэффициент мощности

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

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

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

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

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

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

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

Мощность в цепи с резистивным элементом.

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

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

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

Мощность в цепи с индуктивным элементом.

Рассмотрим двухполюсник, в который включен индуктивный элемент. Ток индуктивности отстает от напряжения на угол 90° . Таким образом, мгновенная мощность

на индуктивности имеет только гармоническую составляющую, изменяющуюся с двойной частотой. Когда ток возрастает, происходит накопление энергии в магнитном поле индуктивности. Когда ток убывает, его магнитное поле в индуктивности распадается, а энергия, при посредстве ЭДС самоиндукции вся возвращается назад в источник.

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

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

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

$$Q = I^2 \cdot X_L, [\text{вар}].$$

Мощность в цепи с емкостным элементом.

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

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

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

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

1. 5 Лекция № 8,9(4 часа).

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

1.5.1 Вопросы лекции:

1. Линейная цепь переменного тока с последовательным соединением элементов
 2. Треугольник напряжений, сопротивлений и мощностей. Резонанс напряжений
 3. Разветвление цепи переменного тока. Метод проводимостей и эквивалентных преобразований. Резонанс токов. Частотные характеристики
-

1.5.2 Краткое содержание вопросов:

1 Линейная цепь переменного тока с последовательным соединением элементов.

Если к зажимам цепи приложить синусоидальное напряжение, то в ней протекает синусоидальный ток:

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

Согласно второму закону Кирхгофа, напряжение на входных зажимах определится как сумма напряжений на каждом отдельном элементе:

$$u = u_C + u_R + u_L \text{ - для мгновенных значений,}$$

или

$$U = U_C + U_R + U_L \text{ - для комплексов действующих значений.}$$

Векторная диаграмма

Построим векторную диаграмму напряжений для данной цепи. Построение начинаем с вектора действующего значения тока. Строим векторы напряжений на элементах с учетом из фазовых соотношений. Напряжение на емкости отстает от тока, т.е. вектор повернут на угол 90° в направлении по часовой стрелке. Вектор напряжения на резисторе совпадает с вектором тока. Затем строим вектор напряжения на емкости, опережающий вектор тока на угол 90° . Складываем векторы по правилу параллелограмма, и получаем вектор напряжения на зажимах цепи.

Причем, если реактивное емкостное сопротивление больше реактивного индуктивного: $X_C > X_L$ имеет место активно-емкостный характер нагрузки. И тогда, напряжение в цепи отстает от тока. В случае, когда $X_C < X_L$ (активно-индуктивный характер нагрузки) напряжение опережает ток на угол φ .

Разность векторов напряжений на емкости и индуктивности представляет собой, в общем случае, реактивное напряжение: $U_p = U_C - U_L$.

2 Треугольник напряжений, сопротивлений и мощностей. Резонанс напряжений.

Совпадение частоты вынужденных колебаний, сообщаемых физической системе извне, с частотой собственных свободных колебаний называется резонансом.

В ЭЦ переменного тока резонанс возникает при совпадении частот источника и собственных свободных колебаний колебательного контура, т.е. когда в ЭЦ происходит разряд емкости на индуктивность. А это значит, что напряжение на емкости и индуктивности должны быть равны:

$$U_L = U_C, \text{ или } I \cdot X_L = I \cdot X_C.$$

Условием резонанса напряжений можно считать равенство реактивных сопротивлений элементов цепи.

$$X_L = X_C \text{ или } \omega L = \frac{1}{\omega C}.$$

Векторная диаграмма резонансной цепи выглядит следующим образом: Вектор напряжения на резисторе совпадает с вектором тока, а векторы напряжений на емкости и индуктивности сдвинуты, относительно вектора тока на 90° , длины их равны. Следовательно, их геометрическая сумма равна нулю, а напряжение на входных зажимах цепи равна по величине и совпадает по фазе с напряжением на резисторе = U .

Так как мгновенная мощность есть произведение мгновенного напряжения на мгновенный ток, то, очевидно, мгновенные значения мощностей на индуктивности и емкости будут равны по величине и противоположны по знаку.

Энергия электрического поля конденсатора при его разряде переходит в энергию магнитного поля катушки и наоборот. Таким образом, происходят колебания энергии между катушкой и емкостным элементом без участия энергии генератора. Генератор же

сообщив первоначальный заряд конденсатору, впоследствии компенсирует только потери энергии в активном сопротивлении.

Полное сопротивление цепи, содержащей резистивный, емкостный и индуктивный элементы, определяется по теореме Пифагора. Так как в резонансном режиме реактивные сопротивления равны, то их разность равна нулю. Следовательно, полное сопротивление цепи равно активному сопротивлению резистивного элемента.

Ток в цепи определяется выражением:

$$I = \frac{U}{R} \text{ и имеет максимальное значение}$$

Запишем уравнение по второму закону Кирхгофа для данной цепи с учетом (2):

$$\dot{U} = \frac{\dot{U}}{R} \cdot R + \frac{\dot{U}}{R} \cdot jX_L - \frac{\dot{U}}{R} \cdot jX_C = \dot{U} + j\dot{U} \frac{X_L}{R} - j\dot{U} \frac{X_C}{R}$$

И в случае, если реактивные сопротивления катушки и емкости много больше, чем активное сопротивление резистора $X_L = X_C \gg R$; то частичные напряжения на катушке и емкости будут больше, чем напряжение на входе цепи $\dot{U}_L = \dot{U}_C \gg \dot{U}$. В этом случае, большое частичное напряжение на емкости может привести к пробою слоя диэлектрика, а на катушке – к пробою изоляции. По этой причине к технике сильных токов резонанс напряжений считается нежелательным явлением, а в технике слабых токов нашел широкое применение.

Отношение реактивной составляющей напряжения к напряжению, приложенному к цепи, называется добротностью контура, или коэффициентом резонанса. Он показывает, во сколько раз напряжение на катушке или емкости больше, чем напряжение на входе цепи.

$$\frac{\dot{U}_L}{\dot{U}} = \frac{\dot{U}_C}{\dot{U}} = Q$$

Условия резонанса

Как настроить цепь в режим резонанса.

При известных значениях L и C , подобрать резонансную частоту. Используя равенство реактивных сопротивлений, выразим резонансную частоту:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \Rightarrow \omega^2 LC = 1 \Rightarrow \omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Для заданного значения частоты изменять значения L и C .

Мы уже говорили, что индуктивность катушки увеличивается, если поместить внутрь катушки ферромагнитный сердечник. В автомобильных приемниках настраивают колебательный контур, изменения индуктивность. Изменять емкость конденсатора можно, увеличивая площадь пластин.

$$L_p = \frac{1}{\omega^2 C}; \quad C_p = \frac{1}{\omega^2 L}$$

Частотные характеристики

Зависимость полного сопротивления от частоты

Рассмотрим зависимость сопротивлений элементов от частоты. На величину активного сопротивления резистивного элемента частота не влияет, поэтому график представляет собой прямую линию, параллельную оси частоты.

Реактивное индуктивное сопротивление прямо пропорционально частоте, поэтому при увеличении частоты увеличивается и сопротивление. Реактивное емкостное же сопротивление обратно пропорционально частоте, т.е. при частоте, стремящейся к нулю, сопротивление стремится к бесконечности, и, наоборот, при увеличении частоты сопротивление стремится к нулю. Эквивалентное реактивное сопротивление определяется как равность реактивного индуктивного и реактивного емкостного, поэтому, при частоте, меньшей резонансной, эквивалентное будет меньше нуля, а при частоте, больше резонансной – больше нуля. И соответственно при частоте, равной резонансной – эквивалентное будет равно нулю.

Проанализируем, как зависит входное (полное) сопротивление, которое определяется как геометрическая сумма активного и реактивного сопротивлений. При частоте, равной нулю, полное сопротивление равно бесконечности, при резонансной частоте, реактивная составляющая равна нулю, следовательно, полное сопротивление будет равным только активному сопротивлению резистору. И при дальнейшем увеличении частоты, полное сопротивление будет увеличиваться.

Фазо-частотная характеристика.

Зависимость фазы (угла сдвига фаз) от частоты:

$$\varphi = (\varphi).$$

Пусть двухполюсник состоит только из элементов, обладающих реактивным сопротивлением, тогда полное сопротивление цепи авно:

$$Z = X$$

В интервале частот от нуля до резонансной, характер нагрузки емкостный, угол сдвига фаз между напряжением и током равен -90° . После резонансной частоты характер нагрузки индуктивный, а значит, угол сдвига фаз равен 90° . Таким образом, в чисто реактивном двухполюснике фазовый сдвиг меняется от -90° до $+90^\circ$. Если в двухполюсник включить активное сопротивление, то график ФЧХ будет не ступенчатым, а плавно возрастающим, причем, чем больше добротность контура, чем ФЧХ ближе к ступенчатой.

Амплитудно-частотная характеристика.

Сначала рассмотрим цепь при частоте близкой к нулю. Реактивное емкостное сопротивление стремится к бесконечности, а значит, ток в цепи равен нулю. Реактивное индуктивное сопротивление прямо пропорционально частоте и равно нулю, напряжение на этом элементе тоже будет равным нулю.

При токе, равном нулю, напряжение на активном сопротивлении равно нулю. Из всего вышесказанного следует, что все напряжение источника приложено к емкости.

При резонансной частоте реактивные сопротивления равны, а их сумма равна нулю. Характер нагрузки чисто активный, ток имеет максимальное значение. Напряжения на индуктивности и емкости равны, а их величина зависит от добротности контура. Таким образом, напряжение на активном сопротивлении равно напряжению источника.

При дальнейшем увеличении частоты до бесконечности реактивное индуктивное сопротивление стремится к бесконечности, что соответствует обрыву цепи, ток стремится к нулю. Напряжение на резисторе равно нулю. Напряжения на емкости и индуктивности также стремятся к нулю.

3 Разветвленные цепи переменного тока. Метод проводимостей и эквивалентных преобразований. Резонанс токов . Частотные характеристики

В цепи с параллельным соединением элементов R, L, C (параллельный колебательный контур, рис.) возникает *резонанс токов*.

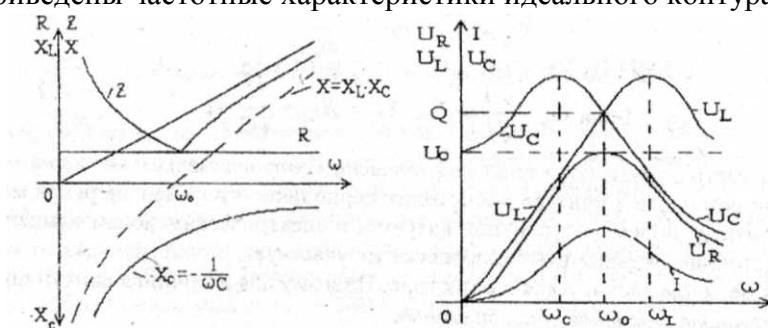
Комплексная входная проводимость цепи

$$Y_{BX} = Y_R + Y_L + Y_C = G - j(B_L - B_C) = G - jB = ye^{-j\phi}.$$

Условие резонанса – равенство нулю входной реактивной проводимости цепи:

$$\underline{B} = \underline{B}_L - \underline{B}_C = 0; \frac{1}{\omega L} = \omega C; \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

На рис. приведены частотные характеристики идеального контура, для которого $G = 1/R$

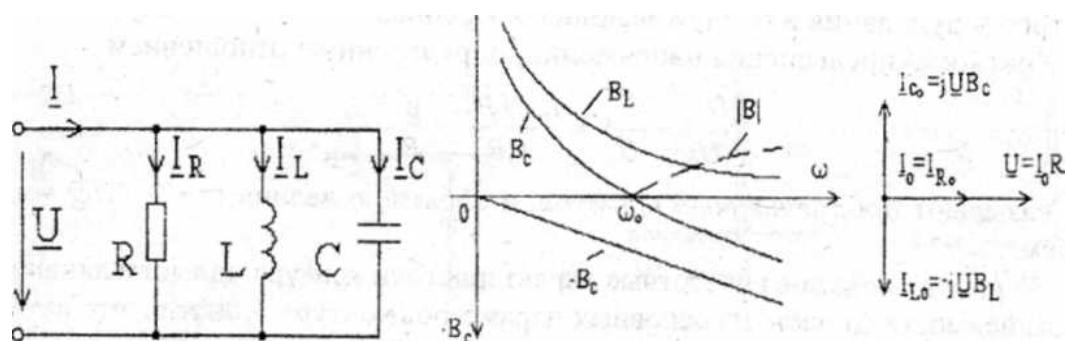


$= Q$. При угловых частотах $\omega < \omega_0$ цепь имеет индуктивный характер, а при $\omega > \omega_0$ – емкостный.

На рис. Показана векторная диаграмма цепи при резонансе. Общий ток I_0 в момент резонанса минимален и определяется напряжением на входе цепи и ее активной проводимостью:

$$I_0 = I_{R0} = \underline{U}G = \underline{U}/R$$

В зависимости от соотношения между G и B ($\underline{B}_L = \underline{B}_C$), равные между собой при резонансе тока $I_{L0} = I_{C0}$ могут превышать общий ток $I_0 = I_{R0}$! Кратность превышения тока характеризуется добротностью контура:



$$Q = \frac{I_0'}{I_0} = \frac{C_0'}{I_0} = \frac{U\omega_0 C}{UG} = \omega_0 \frac{C}{G} = \frac{C}{G\sqrt{LC}} = \frac{1}{G_0},$$

Где $G = I/R$; $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$

1. 6 Лекция №10 (2 часа).

Тема: «Основы электроники»

1.6.1 Вопросы лекции:

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

1.6.2 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 полупроводника 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 (донорная 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,ываемых 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 инжеектированными носителями:

$$I_K = I_{обр} + I_{p,инж}$$

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. 7 Лекция №11,12 (4 часа).

Тема: «Основы электроники»

1.7.1 Вопросы лекции:

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

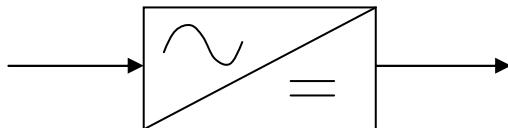
1.7.2 Краткое содержание вопросов:

1 Источники вторичного электропитания: выпрямители, фильтры, стабилизаторы напряжения

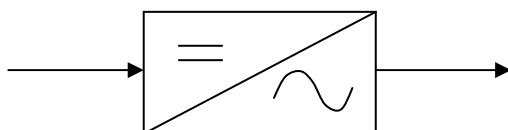
В качестве первичных источников электропитания для ЭУ и систем обычно используют либо промышленную сеть переменного тока, либо автономные источники переменного (генераторы) или постоянного (аккумуляторы, химические батареи и т.д.) тока.

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 однонаправленные напряжение и ток, для сглаживания пульсаций которых применяют фильтры.

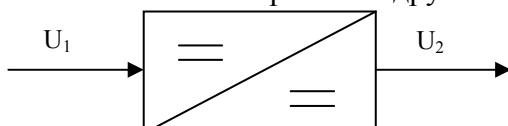


2. Инвертор – устройство преобразования постоянного тока в переменный. Обычно представляет собой генератор периодического напряжения, по форме приближённого к синусоиде.

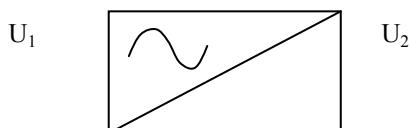


3. Преобразователь частоты – преобразователь переменного напряжения одной частоты в переменное напряжение другой частоты.

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, длящихся 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. 8 Лекция №13 (2 часа).

Тема: «Электронные устройства»

1.8.1 Вопросы лекции:

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

1.8.2 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.

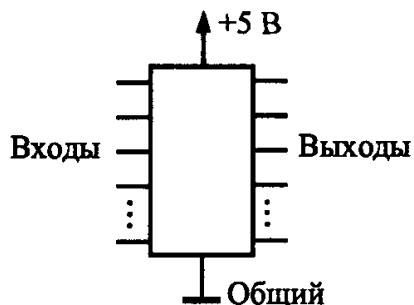
Аналоговый сигнал – это сигнал, который может принимать любые значения в определенных пределах (например, напряжение может плавно меняться в пределах от нуля до десяти вольт). Устройства, работающие только с аналоговыми сигналами, называются аналоговыми устройствами.

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.

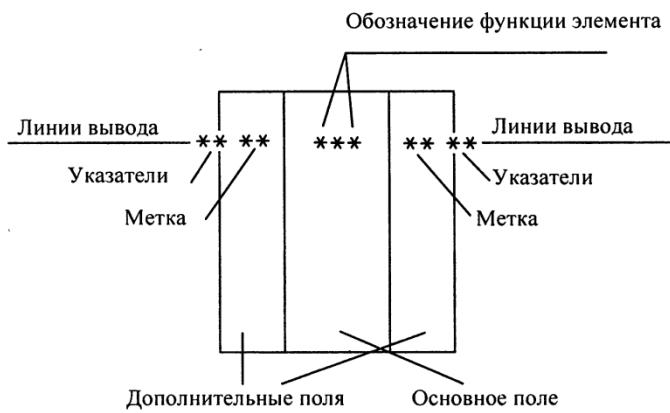
Все цифровые устройства строятся из логических микросхем, каждая из которых обязательно имеет следующие выводы:

- 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.

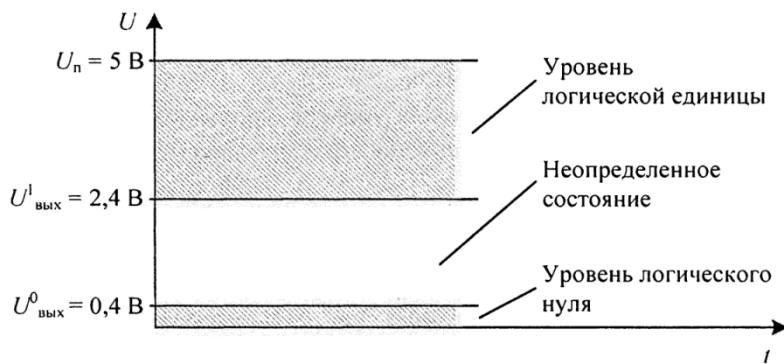


УГО цифровых микросхем

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.

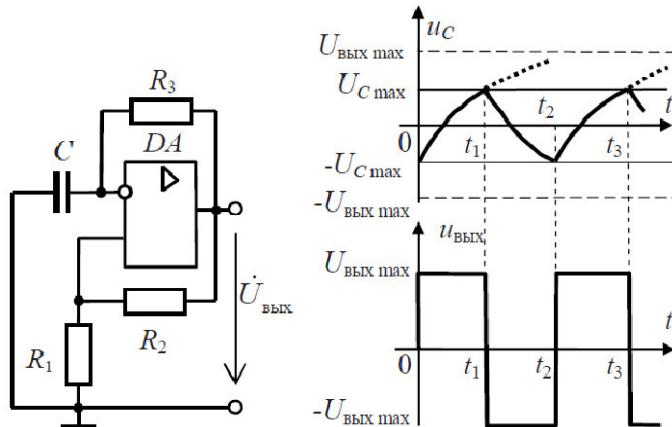
Практически все цифровые устройства без памяти (комбинаторные устройства) могут быть построены на основе трех простейших логических элементов. Все более сложные системы реализуются из этих простейших логических элементов как из кубиков. Остановимся на описании простейших логических элементов.

2 Импульсные устройства

Мультивибратор — релаксационный генератор электрических колебаний

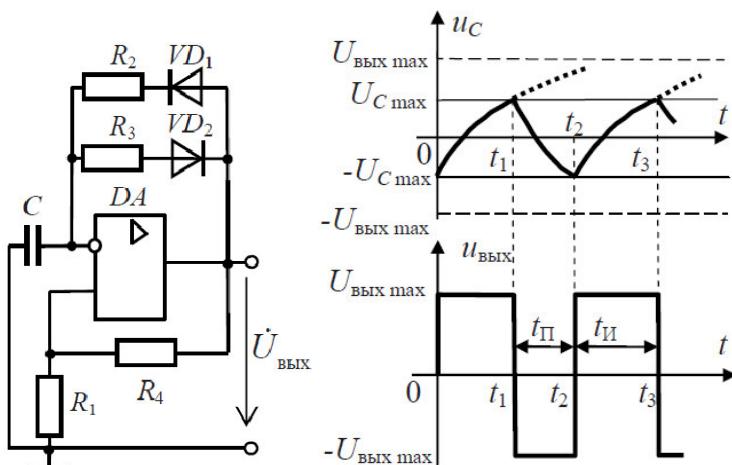
прямоугольного типа с крутыми фронтами. Термин предложен голландским физиком ван дер Полем, так как в спектре мультивибратора присутствует множество гармоник — в отличие от генератора синусоидальных колебаний («моновибратора»).

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.



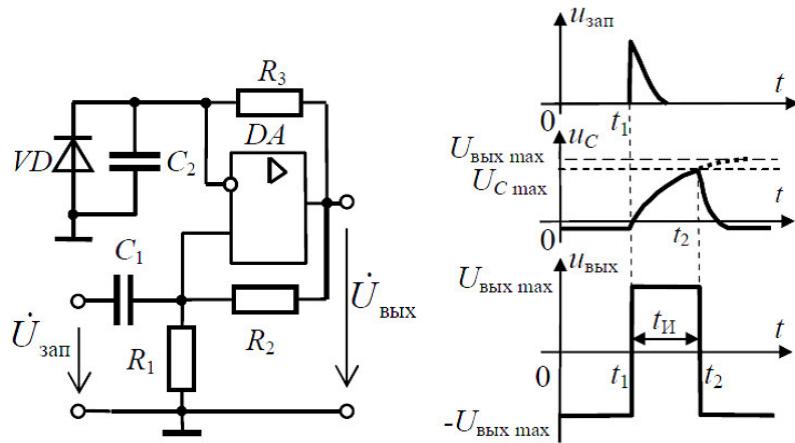
Мультивибратор симметричных колебаний

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 $f_o=1/2\pi CR$.

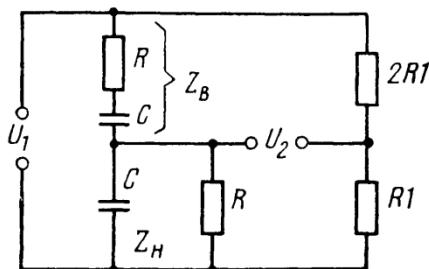
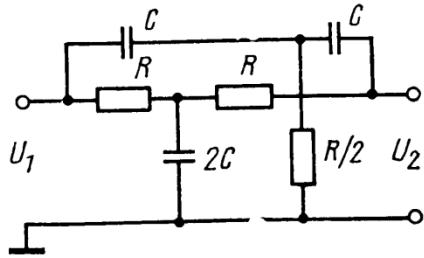


Схема моста Вина

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 $f_0 = 1/2\pi CR$. 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.

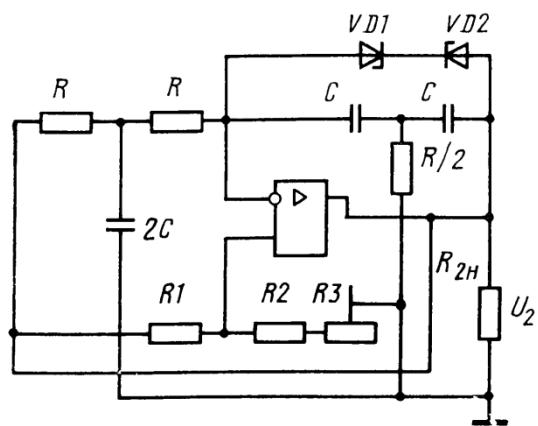


Схема генератора синусоидальных колебаний

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 предназначены для повышения действенности защиты входа, содержащейся в ОУ.

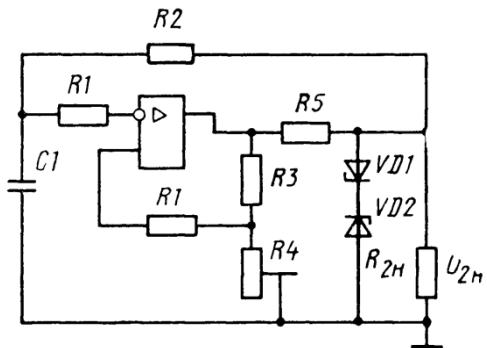


Схема генератора симметричных
прямоугольных импульсов

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:

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

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

$$x + 1 = 1;$$

$$x + x = x;$$

$$x + 0 = x;$$

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

$$x * x = x;$$

$$x * 0 = 0;$$

$$\bar{0} = 1 \quad 0 + 0 = 0 \quad 0 \cdot 0 = 0$$

$$\bar{1} = 0 \quad 0 + 1 = 1 \quad 0 \cdot 1 = 0$$

$$1 + 0 = 1 \quad 1 \cdot 0 = 0$$

$$1 + 1 = 1 \quad 1 \cdot 1 = 1$$

$$x * 1 = x;$$

Функция «не», инвертор

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

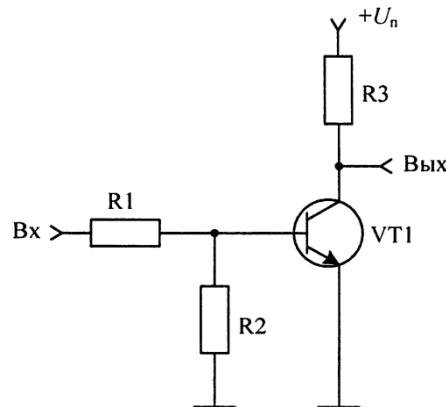
$$F = \overline{X}$$

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.

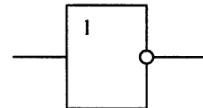


Рис. 21.4. УГО логического инвертора

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»:

$$F = X \wedge Y$$

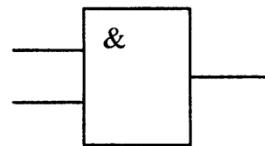
Где символ \wedge обозначает функцию логического умножения (конъюнкцию). Иногда эта же функция записывается в другом виде:

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

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.

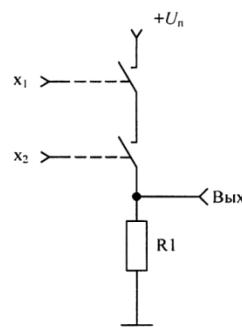
X	Y	F
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

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»:

$$F = X \vee Y$$

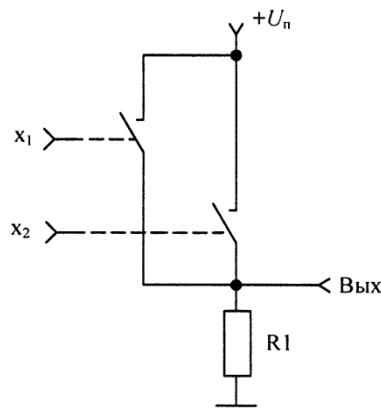
Где символ \vee обозначает функцию логического сложения (дизъюнкция). Иногда эта же функция записывается в другом виде:

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

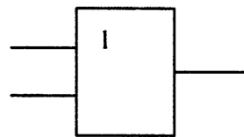
Таблица истинности для данного элемента:

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*:

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

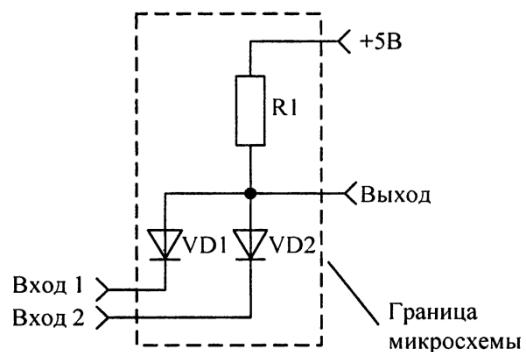
а логического произведения – *штрихом Шеффера*:

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

В настоящее время используется несколько технологий схемотехнического построения логических элементов:

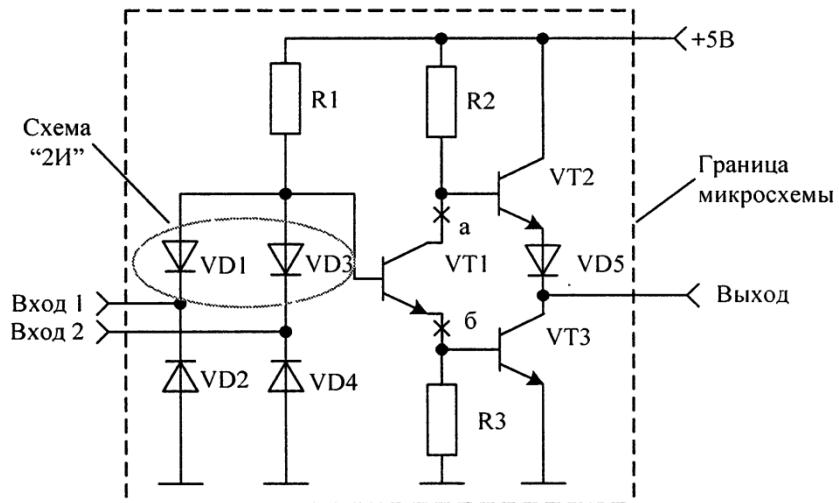
- диодно-транзисторная логика (ДТЛ);
- транзисторно-транзисторная логика (ТТЛ);
- логика на основе комплементарных МОП-транзисторов (КМОП);
- логика на основе сочетания комплементарных МОП и биполярных транзисторов (BiCMOS).

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

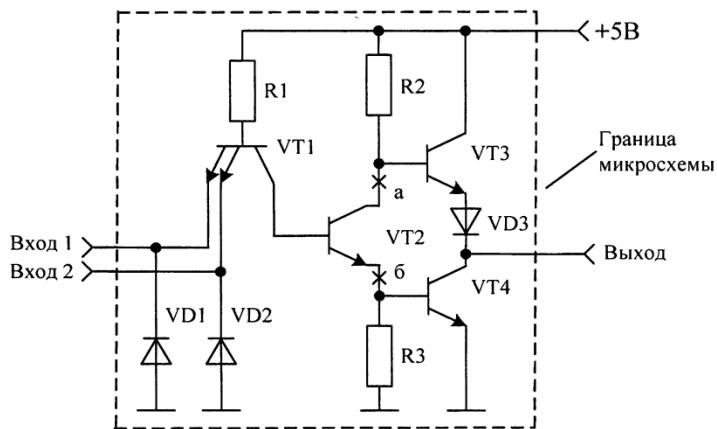
На рисунке приведена схема построения логического элемента «2И-НЕ». В этой схеме транзистор VT1 инвертирует сигнал на выходе элемента «И». То есть вместо логической единицы на выходе этой схемы присутствует логический ноль. И, наоборот, вместо логического нуля на выходе схемы присутствует логическая 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.

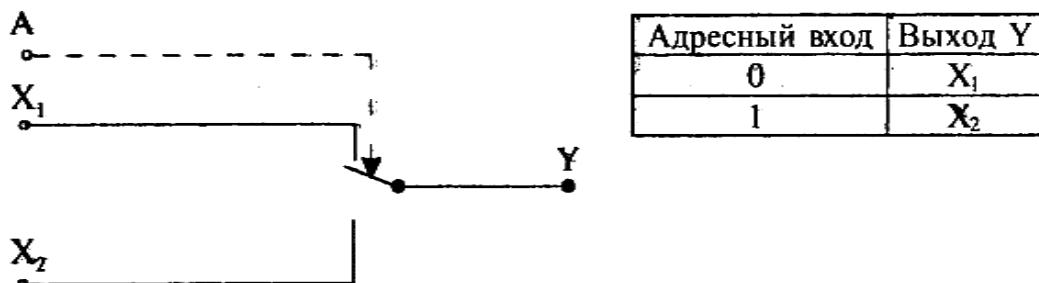


Принципиальная схема типового элемента ТТЛ-микросхемы («2И-НЕ»)

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

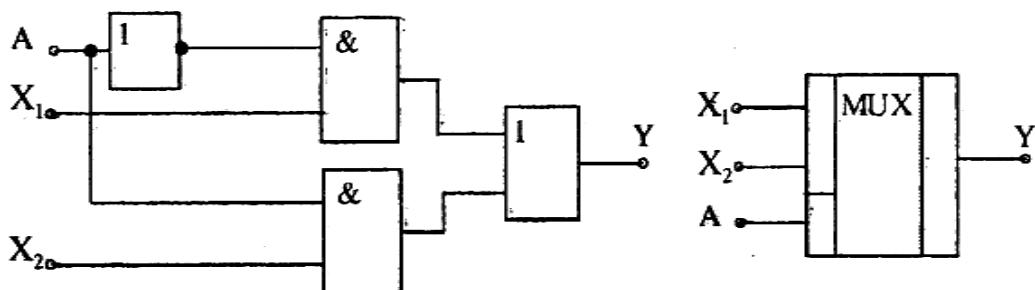


Двухвходовый мультиплексор

Исходя из таблицы, можно записать следующее уравнение:

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

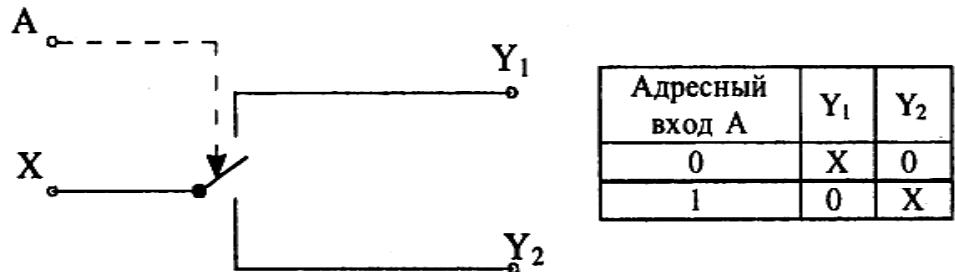
На рисунке показаны реализация такого устройства и его условное графическое обозначение. Основой данной схемы является явленияся две схемы совпадения на элементах И, которые при логическом уровне «1» на одном из своих входов повторяют на выходе то, что есть на другом входе.



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.

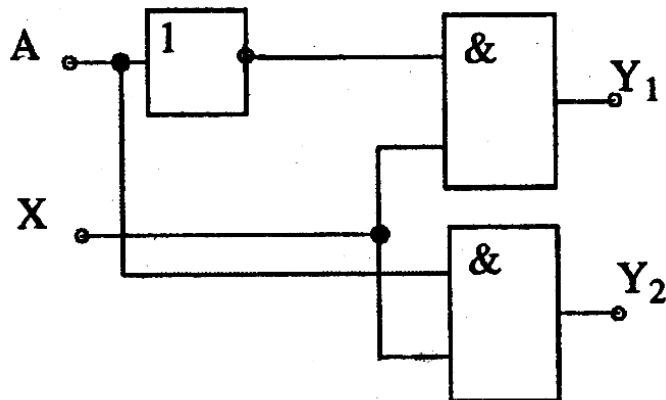
Демультиплексором называют устройство, в котором сигналы с одного информационного входа поступают в желаемой последовательности по нескольким выходам в зависимости от кода на адресных шинах. Таким образом, демультиплексор в функциональном отношении противоположен мультиплексору. Демультиплексоры обозначают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

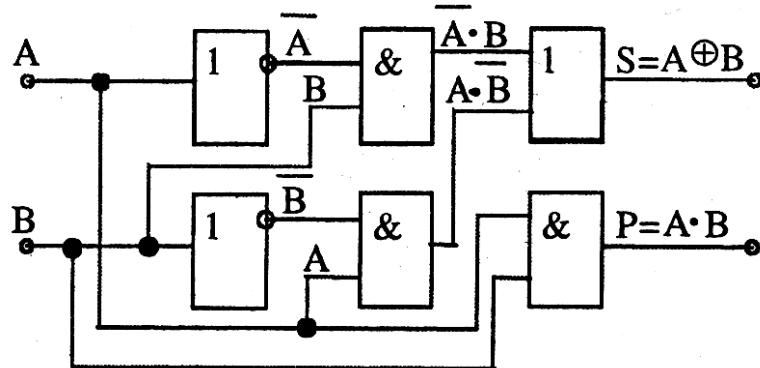


Схема полусумматора

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

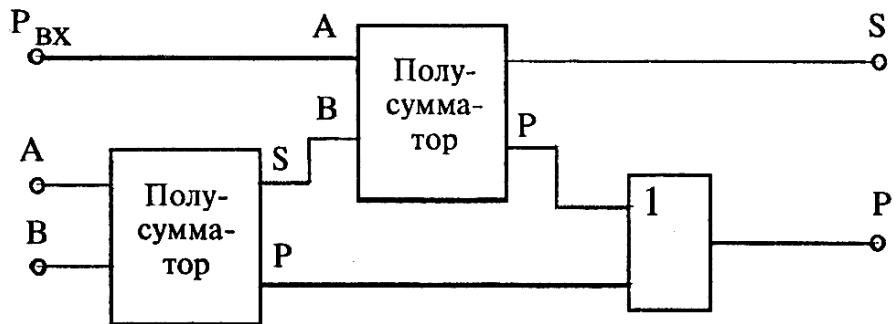


Схема полного сумматора

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.

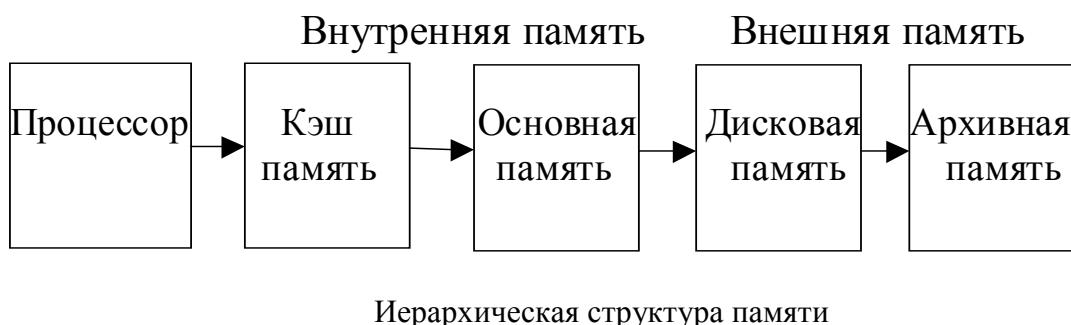
Расширение измерительных возможностей путем широкого использования косвенных и совокупных измерений, воспринимаемых оператором в этом случае как прямые (поскольку результат обработки появляется на индикаторе сразу после проведения измерения). Напомним, что косвенные измерения включают в себя вычисления 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, типом 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

1. 9 Лекция № 14 (2 часа).

Тема: «Переходные процессы в электрических цепях»

1.9.1 Вопросы лекции:

1. Законы коммутации
2. Принужденный и свободный процесс

1.9.2 Краткое содержание вопросов:

1 Законы коммутации

Установившиеся процессы в линейных электрических цепях, т. е. такие процессы, при которых напряжения и токи либо неизменны во времени (цепи постоянного тока), либо представляют собой периодические функции времени (цепи переменного тока). Наступлению установившегося процесса, отличного от первоначального режима работы цепи, предшествует, как правило, переходный процесс, при котором напряжения и токи изменяются непериодически.

Переход от одного режима работы цепи к другому может быть вызван изменением параметров или схемы цепи, называемым в общем случае в электротехнике коммутацией. Можно теоретически считать, что коммутация цепи производится мгновенно, - т. е. на включение, выключение или переключение цепи время не расходуется. Тем не менее переход от исходного режима работы цепи к последующему установившемуся процессу происходит не мгновенно, а в течение некоторого времени. Объясняется это тем, что каждому состоянию цепи соответствует определенный запас энергии электрических и магнитных полей. Переход к новому режиму связан с нарастанием или убыванием

энергии этих полей. Энергия $w_L = \frac{Li_L^2}{2}$, запасаемая в магнитном поле индуктивности L,

и энергия $w_C = \frac{Cu_C^2}{2}$, запасаемая в электрическом поле емкости C, не могут изменяться мгновенно: энергия может изменяться непрерывно, без скачков, так как в противном случае мощность, равная, производной энергии по времени, достигала бы бесконечных значений, что физически невозможно. Именно поэтому, например, в случае размыкания ветви с индуктивной катушкой в месте размыкания неизбежно возникает искра, в сопротивлении которой расходуется энергия, накопленная в магнитном поле индуктивной катушки. Аналогично если замкнуть накоротко зажимы конденсатора, который был предварительно заряжен, то запасенная в нем электрическая энергия рассеется в сопротивлении соединяющего провода и между контактами.

Если исключить случаи размыкания индуктивности и замыкания накоротко емкости и рассматривать цепи, в которых энергия, накапливаемая в магнитном или электрическом поле, может рассеиваться в виде тепла в сопротивлениях, то, считая, что коммутация происходит мгновенно, можно искрообразование не учитывать.

Для завершения переходного и наступления установившегося процессов теоретически требуется бесконечно большое время. Практически, однако, время переходного процесса определяется малым интервалом, по истечении которого токи и напряжения настолько приближаются к установившимся значениям, что разница оказывается практически

неощутимой. Чем интенсивнее происходит рассеивание энергии в сопротивлениях, тем быстрее протекает переходный процесс.

Если бы электрическая цепь состояла только из сопротивлений, и не содержала индуктивностей и емкостей, то переход от одного установившегося состояния к другому совершился бы мгновенно, без затраты времени. В реальных электротехнических устройствах тепловые потери, обусловленные током, магнитные и электрические поля сопутствуют друг другу. Применяя специальные схемы и подбирая соответствующие параметры цепи, можно в зависимости от необходимости ускорить или замедлить переходный процесс.

В одних случаях переходные процессы в электрических цепях нежелательны и опасны (например, при коротких замыканиях в энергетических системах). В других случаях переходный процесс представляет собой естественный, нормальный режим работы цепи, как это, например, имеет место в радиопередающих и радиоприемных устройствах, системах автоматического регулирования и других цепях.

Существуют различные методы расчета переходных процессов в линейных электрических цепях. Настоящая глава посвящена классическому методу решения дифференциальных уравнений, описывающих переходные процессы.

ЗАКОНЫ КОММУТАЦИИ И НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ

Высказанные выше положения о том, что запас энергии магнитного или электрического поля может изменяться только плавно, без скачков, выражают принцип непрерывности во времени потокосцепления индуктивности и электрического заряда емкости и называются законами коммутации.

Невозможность скачкообразного изменения потокосцепления следует из того, что в противном случае на индуктивности появилось бы бесконечно большое напряжение $u_L = \frac{d\Psi}{dt} = \infty$, что лишено физического смысла. Ввиду равенства $\Psi = Li$ принцип непрерывности потокосцепления означает, что при неизменном L ток i не может изменяться скачком. *Итак, в начальный момент после коммутации ток в индуктивности остается таким же, каким он был непосредственно перед коммутацией, а затем плавно изменяется.*

Аналогично невозможность скачкообразного изменения электрического заряда q следует из того, что в противном случае через емкость проходил бы бесконечно большой ток $i_c = \frac{dq}{dt} = \infty$, что также лишено физического смысла. Ввиду равенства $q = C \cdot u_c$ принцип непрерывности электрического заряда означает, что при неизменном C напряжение u_c не

может изменяться скачком. Итак, в начальный момент после коммутации напряжение на емкости остается таким же, каким оно было непосредственно перед коммутацией, а затем плавно изменяется.

При этом следует отметить, что в цепях с идеализированными сосредоточенными параметрами скачкообразно могут изменяться: 1) токи в сопротивлениях и емкостях и 2) напряжения на сопротивлениях и индуктивностях

Значения тока в индуктивности и напряжения на емкости в момент коммутации называются независимыми начальными условиями.

Обычно принимают, что коммутация происходит в момент времени $t = 0$; тогда ток в индуктивности и напряжение на емкости в момент времени непосредственно перед коммутацией обозначаются через $i_L(0-)$ и $u_c(0-)$, а в начальный момент переходного процесса после коммутации—через $i_L(0)$ и $u_c(0)$.

На основании законов коммутации:

$$\left. \begin{array}{l} i_L(0-) = i_L(0), \\ u_c(0-) = u_c(0). \end{array} \right\}$$

Эти равенства выражают начальные условия цепи, в которых происходит коммутация.

При нулевых начальных условиях, т. е. когда $i_L(0-) = 0$ и $u_c(0-) = 0$, индуктивность в начальный момент после коммутации равносильна разрыву цепи, а емкость равносильна короткому замыканию.

В случае ненулевых начальных условий, т. е. когда $i_L(0) \neq 0$ и $u_c(0) \neq 0$, индуктивность в первый момент равносильна источнику тока $i_L(0)$, а емкость равносильна источнику э. д. с. $u_c(0)$.

Независимые начальные условия характеризуют энергию магнитного и электрического полей, запасенную к моменту коммутации, и для расчета переходного процесса обязательно требуется знание этих начальных условий, причем совершенно безразлично, каким образом эти условия в цепи были созданы.

При расчете переходных процессов в разветвленных электрических цепях наряду с независимыми начальными условиями используются так называемые зависимые начальные условия, а именно: значения токов, напряжений и их производных в начальный момент времени ($t=0$).

До сих пор нами исключались из рассмотрения случаи коммутации, при которых неизбежно между контактами возникает искра или дуга. Один из таких случаев показан на

рис. 1,а. До коммутации ток проходит через индуктивность L_1 и контакт, шунтирующий индуктивность L_2 ; ток в L_2 равен нулю. В момент $t = 0$ контакт размыкается и индуктивности L_1 и L_2 оказываются включенными последовательно; ток в них принудительно становится одинаковым. Поскольку в момент коммутации ток не изменяется, а ток в L_2 равен нулю, в силу первого закона Кирхгофа ток должен замкнуться через дугу, образовавшуюся между контактами. Кроме того, если под L_2 подразумевать реальную индуктивную катушку, то ток может частично замкнуться и через межвитковую емкость. После быстрого погасания дуги токи в L_1 и L_2 уравниваются. Эта начальная стадия переходного процесса протекает столь быстро, что ею практически можно пренебречь, считая, что токи в L_1 и L_2 уравниваются мгновенно. Именно в этом смысле можно условно говорить о скачкообразном

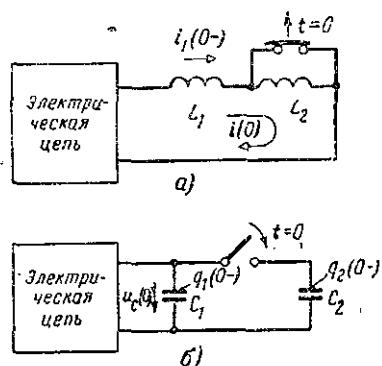


Рисунок1.. Случай размыкания (а)

или замыкания (б) при частичной потере энергии.

изменении токов в индуктивностях, которое предшествует исследуемому переходному процессу в цепи. При этом для расчета переходного процесса используется принцип непрерывности суммарного потокосцепления при коммутации, т. е. $L_1 \cdot i(0-) = (L_1 + L_2) \cdot i(0)$. Скачкообразное изменение токов и соответствующих им потоков в L_1 и L_2 в момент коммутации не сопряжено в данном случае с наведением бесконечно большой суммарной э. д. с. самоиндукции, поскольку суммарное потокосцепление не претерпевает скачкообразного изменения. При новых значениях токов в L_1 и L_2 магнитная энергия, запасенная в катушках, будет меньше энергии, запасенной в первой катушке до коммутации. Часть энергии превратится в тепло в искре, а также излучится.

Найденный таким образом ток $i(0)$ в L_1 и L_2 может рассматриваться как независимое начальное условие для расчета переходного процесса во всей цепи на рисунке 1,а после разрыва дуги.

При коммутациях в цепях с емкостями при отсутствии сопротивлений также возможны весьма быстрые перераспределения зарядов, условно рассматриваемые как мгновенные. В этом случае применим принцип непрерывности суммарного заряда. Полученные при этом значения зарядов и напряжений на отдельных емкостях используются в расчете последующего переходного процесса как независимые начальные условия. Например, в случае схемы на рисунке 1,б принцип непрерывности суммарного заряда до и после коммутации выражается равенством

$$q_1(0-) + q_2(0-) = q_1(0) + q_2(0) = u_C(0)(C_1 + C_2).$$

При сделанном допущении в остальной электрической цепи, соединенной с емкостями, не возникает бесконечно большого тока', так как суммарный заряд не изменяется скачкообразно при $t = 0$.

В процессе рассматриваемой коммутации энергия электрического поля уменьшится, так как часть ее превратится в тепло в очень малом сопротивлении проводника при очень большом' токе, а также сможет выделиться в. искре и излучиться.

2 ПРИНУЖДЕННЫЙ И СВОБОДНЫЙ ПРОЦЕСС

В общем случае анализ переходного процесса в линейной цепи с сосредоточенными параметрами r , L , C и M сводится к решению обыкновенных линейных неоднородных дифференциальных уравнений, выражающих законы Кирхгофа. Эти уравнения представляют собой линейную комбинацию напряжений, токов, их первых производных и интегралов по времени.

Например, если какая-нибудь э. д. с. $e(t)$ включается в цепь, состоящую из последовательно соединенных r , L и C , то интегродифференциальное уравнение имеет вид:

$$ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt = e(t).$$

Это уравнение после дифференцирования приводится к неоднородному дифференциальному уравнению второго порядка

$$L \frac{d^2i}{dt^2} + r \frac{di}{dt} + \frac{i}{C} = \frac{de}{dt}$$

Как известно, общий интеграл такого уравнения равен сумме частного решения неоднородного уравнения и общего решения однородного уравнения.

Частное решение выражает принужденный режим, задаваемый источником. Если воздействующая функция, стоящая в правой части уравнения, постоянна или является периодической функцией времени, то принужденный ток будет одновременно и установившимся.

Общее решение физически определяет поведение цепи при отсутствии внешних источников электрической энергии и заданных начальных условиях, Функции, определяемые общим решением, называются свободными составляющими (токов, напряжений и пр.).

$$L \frac{d^2i}{dt^2} + r \frac{di}{dt} + \frac{i}{C} = 0$$

и соответствующее ему характеристическое уравнение

$$Lp^2 + rp + \frac{1}{C} = 0.$$

Если корни характеристического уравнения обозначить через p_1 и p_2 , то общее решение запишется в виде:

$$i_{cb}(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}$$

В случае, рассмотренном выше, однородное уравнение имеет вид:

где A_1 и A_2 — постоянные интегрирования, которые определяются из начальных условий.

Полный переходный ток в цепи равен сумме принужденного и свободного токов:

$$i(t) = i_{np}(t) + i_{cb}(t).$$

Аналогично напряжение, заряд, магнитный поток и другие функции на любом участке цепи в переходном режиме состоят из принужденной и свободной составляющих.

На основании законов коммутации (см. § 14-2) можно найти начальные независимые условия $i_L(0)$ и $u_C(0)$. После этого можно написать согласно

$$\begin{aligned} i_L(0) &= i_{L_{np}}(0) + i_{L_{cb}}(0); \\ u_C(0) &= u_{C_{np}}(0) + u_{C_{cb}}(0), \end{aligned}$$

откуда

$$\left. \begin{array}{l} i_{L_{\text{св}}}(0) = i_L(0) - i_{L_{\text{пр}}}(0); \\ u_{C_{\text{св}}}(0) = u_C(0) - u_{C_{\text{пр}}}(0). \end{array} \right\}$$

Итак, начальные значения свободных функций $i_{L_{\text{св}}}(0)$ и $u_{C_{\text{св}}}(0)$ определяются изменениями в момент коммутации соответствующих принужденных функций.

В частном случае при нулевых начальных условиях:

$$\left. \begin{array}{l} i_{L_{\text{св}}}(0) = -i_{L_{\text{пр}}}(0); \\ u_{C_{\text{св}}}(0) = -u_{C_{\text{пр}}}(0). \end{array} \right.$$

В зависимости от порядка дифференциальных уравнений, описывающих исследуемые переходные процессы, различают цепи первого, второго и более высокого порядков.

В цепях первого порядка накопление энергии происходит только в одном элементе, L или C в форме магнитной энергии (в цепи с индуктивностью), или электрической энергии (в цепи с емкостью). Одноконтурная цепь, содержащая элементы, в которых накапливается энергия обоих видов — магнитная и электрическая, представляет собой цепь второго порядка (цепь r, L, C). Разветвленные цепи могут быть более высокого порядка.

1. 10 Лекция № 15,16(4 часа).

Тема: «Основные методы расчета переходных процессов»

1.10.1 Вопросы лекции:

1. Классический метод расчета переходных процессов
 2. Переходные процессы в RL и RC цепях на постоянном напряжении
 3. Операторный метод расчета переходных процессов
-

1.10.2 Краткое содержание вопросов:

1 Классический метод расчета переходных процессов

При расчете переходных процессов классическим методом составляют систему интегродифференциальных уравнений цепи, используя для этого законы Кирхгофа и уравнения для отдельных элементов:

$$u_r = ri_r; \quad u_L = L di_L/dt; \quad i_c = C du_c/dt$$

Затем эту систему уравнений путем замены переменных сводят к дифференциальному уравнению n-го порядка относительно искомой величины, в качестве которой обычно используют одну из переменных состояния, т. е. тока в любой индуктивности или напряжения на одной из емкостей. Общее решение полученного линейного дифференциального уравнения ищут в виде суммы двух членов:

$$i_L = i_{L_{cb}} + i_{L_{np}}$$

или

$$u_C = u_{C_{cb}} + u_{C_{np}}$$

где $i_{L_{cb}}$, $u_{C_{cb}}$ — соответствуют общим решениям однородных уравнений (т.е. без независимых источников энергии) и поэтому называются свободными составляющими тока в индуктивности или напряжения на емкости;

$i_{L_{np}}$, $u_{C_{np}}$ — соответствуют частным решениям неоднородных уравнений (т.е. уравнений с независимыми источниками энергии) и поэтому называются принужденными составляющими тока в индуктивности или напряжения на емкости.

Решения для свободных составляющих ищут в виде суммы n слагаемых:

$$i_{L_{cb}} = \sum_{k=1}^n A_k e^{p_k t}$$

или

$$u_{C_{cb}} = \sum_{k=1}^n B_k e^{p_k t},$$

где A_k и B_k — постоянные интегрирования однородных дифференциальных уравнений, которые определяются из начальных условий при помощи законов коммутации цепи; p_k — корни соответствующих характеристических уравнений цепи, которые получают из дифференциальных уравнений путем замены производных операторами p_k .

Поскольку для линейных электрических цепей с потерями корни характеристических уравнений имеют отрицательные вещественные части, то с увеличением времени (все свободные составляющие решений стремятся к нулю, т.е. затухают). Это связано с тем, что запасы энергии в реактивных элементах ограничены, и при наличии потерь в цепи они уменьшаются, стремясь к нулю при $t \rightarrow \infty$.

При этом в решениях остаются только принужденные составляющие, которые характеризуют установившийся режим после коммутации. Для определения принужденных составляющих рассматривают установившийся режим после коммутации (т.е при $t \rightarrow \infty$)

Таким образом, расчет переходных процессов классическим методом сводится к определению трех величин:

постоянных интегрирования A_k и B_k

корней характеристического уравнения p_k

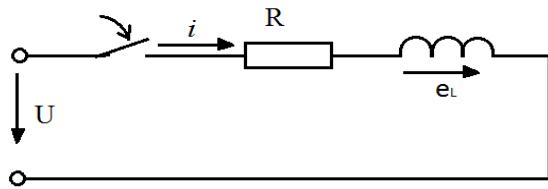
принужденных составляющих $i_{L_{np}}$, или $u_{C_{np}}$.

2 Переходные процессы в RL и RC цепях на постоянном напряжении.

Переходные процессы в RL – цепи.

Включение RL – цепи на постоянное напряжение.

Рассмотрим переходный процесс при подключении индуктивности к источнику постоянного напряжения.



Запишем уравнение контура по второму закону Кирхгофа:

$$R_i + L \frac{di}{dt} - U = 0$$

отсюда:

$$R_i + L \frac{di}{dt} = U$$

Решение этого уравнения имеет вид:

$$i = i_y + i_{ce}$$

Установившийся ток в этой цепи:

$$i_y = \frac{U}{R}$$

Так как установившись к в режиме $X_L = 0$

Определим свободную составляющую тока:

$$L \frac{di_{ce}}{dt} + Ri_{ce} = 0$$

Решение этого уравнения имеет вид:

$$i_{ce} = Ae^{pt}$$

Корень характеристического уравнения Р:

$$Rp + R = 0, \text{ откуда } P = -\frac{R}{L} = -\frac{1}{\tau}$$

Постоянную интегрирования А определим, используя первый закон коммутации. Так как, до коммутации ток в цепи был равен нулю, следовательно, в начальный момент времени после коммутации он также равен нулю.

$$i(0_-) = i(0_+) = i_y(0) + i_{ce}(0) = 0$$

или

$$\frac{U}{R} + A = 0 \quad \text{откуда } A = -\frac{U}{R}$$

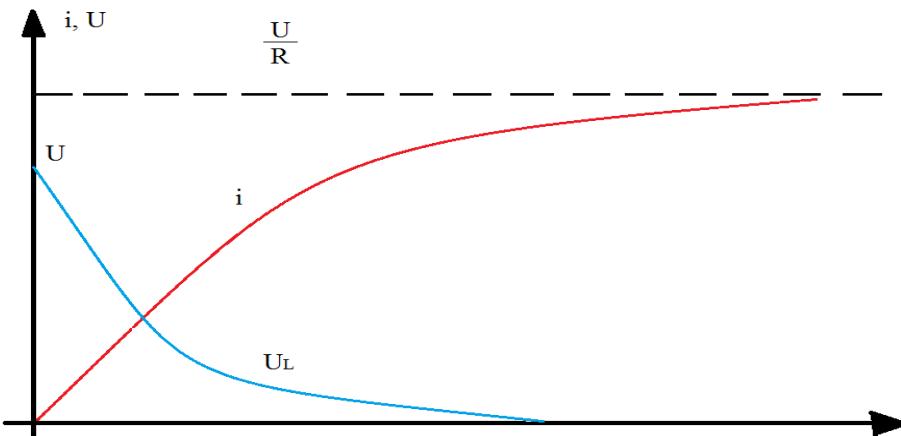
Окончательное выражение для переходного тока:

$$i = i_y + i_{ce} = \frac{U}{R} - \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

Напряжение на индуктивности определяется выражением:

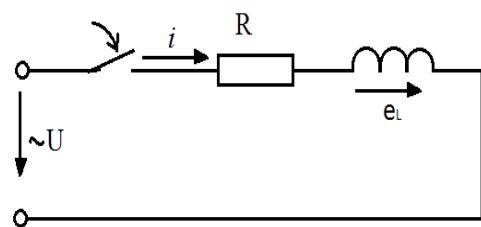
$$U_L = L \frac{di}{dt} = U - Ri = U - U \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) = U e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Законы изменения переходного тока и напряжения можно представить графиками:



Из полученных выражений следует, что ток в цепи с индуктивностью при включении её на постоянное напряжение, плавно возрастает от нуля до $I=U/R$. Напряжение же наоборот, плавно уменьшается от U до нуля. Реально ток и напряжение достигают установившихся значений по истечении времени $t=(4\%5)\tau$.

1.2 Включение RL-цепи на синусоидальное напряжение.



Пусть напряжение источника в момент включения $U = U_m \sin(\omega t + \Psi)$
Тогда установившийся ток катушки

$$i_y = \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t + \Psi - \phi)$$

где $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ – полное сопротивление катушки

$\phi = \arctg \frac{\omega L}{R}$ – угол сдвига между током и напряжением

Свободная составляющая:

$$i_{cs} = A l^{pt} \quad \text{где } \tau = \frac{L}{R}$$

Переходный ток:

$$i = i_y + i_{cs}$$

или

$$i = \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t + \Psi - \phi) + A e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Используя первый закон коммутации, получим:

$$i(0-) = i(0+) = 0, \quad \text{или}$$

$$\frac{U_m}{Z} \sin(\Psi - \phi) + A = 0$$

$$\text{откуда } A = -\frac{U_m}{Z} \sin(\Psi - \phi)$$

Тогда переходный ток:

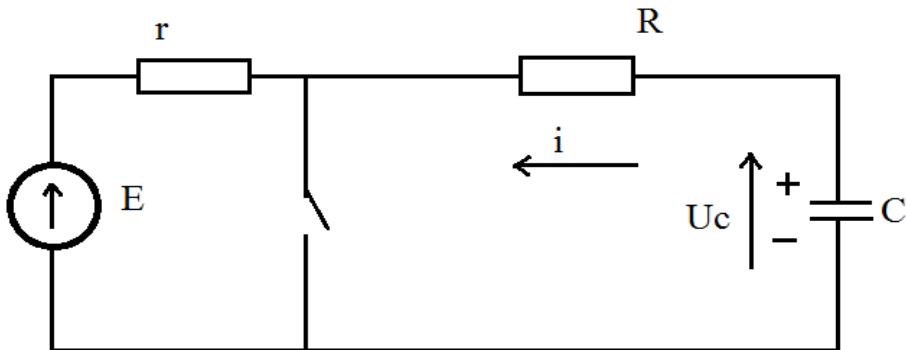
$$i_y = \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t + \Psi - \phi) - \frac{U_m}{Z} \sin(\Psi - \phi) e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Выводы:

Если в момент включения установившийся ток равен нулю,
то свободный ток не возникает и в цепи сразу наступает установившийся режим.
Если в момент включения установившийся ток имеет наибольшее значение, то
переходящий ток достигает максимального значения через четверть периода.

Переходные процессы в RC – цепи.

Короткое замыкание в RC – цепи.(Разряд конденсатора)



Будем считать, что до коммутации конденсатор заряжен до напряжения $U_c(0_-) = U_0 = E$.

Установившийся ток и напряжение в цепи после коммутации равны нулю(конденсатор полностью разряжен)

Уравнение свободных составляющих имеет вид:

$$Ri_{cb} + U_{c_{cb}} = 0$$

т.к $i_{cb} = \frac{dq_{cb}}{dt} = C \frac{dU_{cb}}{dt}$

то $RC \frac{dU_{c_{cb}}}{dt} + U_{c_{cb}} = 0$

Решение этого уравнения имеет вид:

$$U_{c_{cb}} = Ae^{pt}$$

Решаем характеристическое уравнение и определяем Р.

$$RCp + 1 = 0, \quad p = -\frac{1}{RC} = -\frac{1}{\tau}$$

где $\tau = RC$ – постоянная времени

Используя второй закон коммутации определяем постоянную интегрирования:

$$U_c(0_-) = U_c(0_+) = U_0, \quad \text{но } U_{c_{cb}}(0) = A$$

$$\text{следовательно } A = U_0.$$

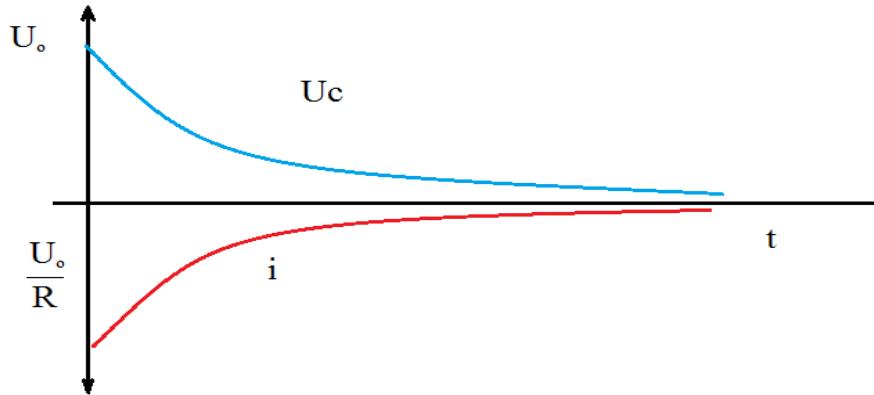
Запишем выражение переходного напряжения на конденсаторе:

$$U_c = U_{c_y} + U_{c_{cb}} = 0 + U_0 e^{-\frac{t}{\tau}} = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Переходный ток в цепи конденсатора:

$$i = C \frac{dU_C}{dt} = -\frac{1}{\tau} C U_0 e^{-\frac{t}{\tau}} = -\frac{U_0}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

График изменения напряжения и тока:

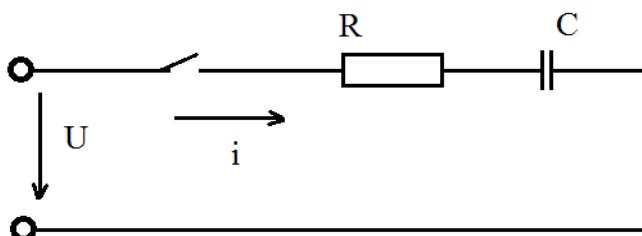


С энергетической точки зрения, переходный процесс характеризует переход энергии электрического поля конденсатора в тепловую энергию, выделяемую на резисторе. При этом, сопротивление на резисторе не влияет на количество выделяемого тепла, а определяет лишь длительность разряда и начальный ток.

Включение RC – цепи на постоянное напряжение.

3. Операторный метод расчета переходных процессов.

Рассмотрим переходный процесс при подключении конденсатора к источнику постоянного напряжения.



Из приведённой схемы следует, что установившееся напряжение на конденсаторе:

$$U_{C_y} = U$$

Свободная составляющая напряжения:

$$U_{C_{CB}} = Ae^{-\frac{t}{\tau}}, \text{ где } \tau = CR,$$

Согласно второму закону коммутации:

$$U_C(0_-) = U_C(0_+) = 0$$

Следовательно:

$$U_C(0) = U_{C_y}(0) + U_{C_{CB}}(0) = U + A = 0$$

Постоянная интегрирования:

$$A = -U$$

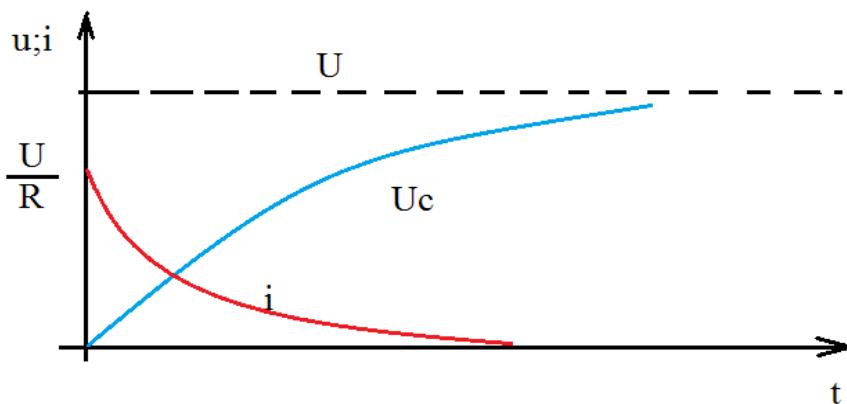
Переходное напряжение на конденсаторе:

$$U_C = U_{C_y} + U_{C_{CB}} = U + U_0 e^{-\frac{t}{\tau}} = U(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

Переходный ток в цепи конденсатора:

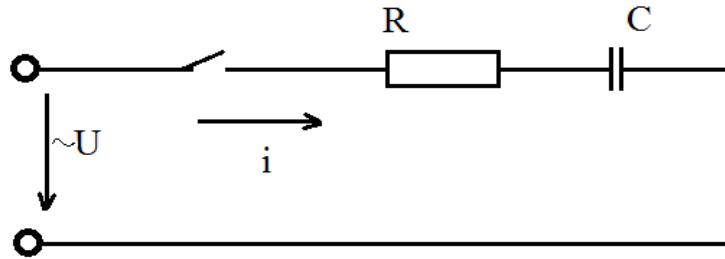
$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{dCU_C}{dt} = CU(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})' = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Представим ток и напряжение графиками:



Из полученных выражений и графиков видно, что напряжение на конденсаторе возрастает по экспоненте от нуля до напряжения источника U , а ток уменьшается от начального максимального значения до нулевого.

Включение RC – цепи на синусоидальное напряжение.



Пусть напряжение источника в момент включения ключа:

$$U = U_m \sin(\omega t + \Psi).$$

Тогда установившийся ток цепи определяется выражением:

$$i_y = \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t + \Psi + \phi)$$

$Z = \sqrt{R^2 + Xc^2}$ – полное сопротивление

$\phi = \arctg \frac{Xc}{R}$ – угол сдвига между током и напряжением

Установившееся напряжение на конденсаторе:

$$U_{cy} = Xc \cdot i_y = \frac{U_m}{Z} Xc \sin(\omega t + \Psi + \phi - \frac{\pi}{2})$$

Свободная составляющая напряжения на конденсаторе:

$$U_{cb} = Ae^{-\frac{t}{\tau}}, \text{ где } \tau = CR$$

Переходное напряжение на конденсаторе:

$$U_c = U_{cy} + U_{cb} = \frac{U_m}{Z\omega C} \sin(\omega t + \Psi + \phi - \frac{\pi}{2}) + Ae^{-\frac{t}{\tau}}$$

Согласно второму закону коммутации:

$$U_c(0_-) = U_c(0_+) = U_0$$

Следовательно:

$$U_c(0) = U_{cy}(0) + U_{cb}(0) = \frac{U_m}{Z\omega C} \sin(\omega t + \Psi + \phi - \frac{\pi}{2}) + A$$

Отсюда:

$$A = -\frac{U_m}{Z\omega C} \sin(\omega t + \Psi + \phi - \frac{\pi}{2})$$

Окончательное переходное напряжение на конденсаторе:

$$U_C = \frac{Um}{Z\omega C} \sin(\omega t + \Psi + \phi - \frac{\pi}{2}) - \frac{Um}{Z\omega C} \sin(\omega t + \Psi + \phi - \frac{\pi}{2}) e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Ток цепи определяется:

$$i = \frac{Um}{R} [\cos \phi \sin(\omega t + \Psi + \phi) - \sin \phi \sin(\Psi + \phi - \frac{\pi}{2}) e^{-\frac{t}{\tau}}]$$

Анализ полученных выражений позволяет сделать следующие выводы:

Если в момент включения установившееся напряжение на конденсаторе равно нулю, т.е.

$(\Psi + \phi - \frac{\pi}{2} = 0)$, то свободное напряжение равно нулю, и в цепи сразу наступает установившийся режим.

Если в момент включения установившееся напряжение имеет наибольшее значение, т.е.

$(\Psi + \phi - \frac{\pi}{2} = \frac{\pi}{2})$, то переходное напряжение достигает наибольшего значения через четверть периода.

Расчет переходных процессов в разветвлённых цепях.

В разветвлённой цепи, содержащей одновременно параметры R, L и C расчёт усложняется из-за увеличения числа неизвестных и повышения порядка дифференциального уравнения.

Последовательность расчёта:

Рассчитать цепь до коммутации с целью определения независимых начальных условий.

Рассчитать цепь после коммутации с целью определения установившихся составляющих токов и напряжений.

Составить систему уравнений по законам Кирхгофа для свободных составляющих токов и напряжений.

Решить систему уравнений с целью расчёта корней характеристического уравнения.

По полученным корням найти общее решение для свободных составляющих и записать решение как сумму установившихся и свободных составляющих.

Найти постоянную интегрирования.

Записать переходные напряжения и токи.

Система уравнения для определения постоянных интегрирования имеет вид:

$$i(0) = i_y(0) + A_1 + A_2 + A_3 \dots$$

$$i'(0) = i'_y(0) + P_1 A_1 + P_2 A_2 + P_3 A_3 \dots$$

$$i''(0) = i''_y(0) + P_1^2 A_1 + P_2^2 A_2 + P_3^2 A_3 \dots$$

Начальные значения $i(0)$, $i'(0)$, $i''(0)$ находят путём решения уравнений, составленных по закону Кирхгофа, с использованием законов коммутации.

1. 11 Лекция № 17 (2 часа).

Тема: «Электрические цепи несинусоидального тока»

1.11.1 Вопросы лекции:

1. Общие положения
2. Характеристики несинусоидальной периодической функции
3. Мощность цепи несинусоидального тока.
4. Основные положения для расчета цепи.

1.11.2 Краткое содержание вопросов

1. Общие положения

До сих пор мы рассматривали цепи с синусоидально изменяющимися ЭДС, напряжением и токами. На практике часто форма кривых тока и напряжения в той или иной степени отличается от синусоиды. В электронных устройствах, в электросвязи и пр. широко используются сигналы несинусоидальной формы

Форма кривой тока и напряжения может отличаться от синусоидальной по нескольким причинам:

- a) Кривая распределения магнитной индукции вдоль воздушного зазора в генераторе переменного тока отлична от синусоиды в силу несовершенства его конструкции
- б) Наличие в цепи нелинейных элементов: катушек с магнитопроводом, конденсаторов, ламп накаливания, выпрямительных устройств и т.п.
- в) Намеренное использование генераторов сигналов несинусоидальной формы
- г) работа в общей сети генераторов с разными частотами

Разложение периодических несинусоидальных кривых в ряд Фурье.

Расчет цепей с несинусоидальными напряжениями и токами ведется теми же методами, что и синусоидальные. При этом периодическая несинусоидальная функция раскладывается в тригонометрический ряд (ряд Фурье)

$$f(wt) = A_0 + \sum_{m=1}^{\infty} A_{1m} \sin(wt + \psi_1) + A_{2m} \sin(2wt + \psi_2) + \cdots + A_{km} \sin(kwt + \psi_k) =$$
$$\sum_{k=0}^{\infty} A_{km} \sin(kwt + \psi_k)$$

1. Где A_0 – постоянная составляющая,

2. $A_{1m} \sin(wt + \psi_1)$ – основная гармоника,

3. $A_{km} \sin(kwt + \psi_k)$ – высшая гармоника,

4. $\omega = 2\pi f$ – основная частота

Сочетание амплитуды, частот, начальных фаз гармоник определяет спектральный состав исследуемой функции.

Гармоники с четным номером k называют четными гармониками
Если k – нечетные – нечетными гармониками.

Таким образом, разложение несинусоидальной периодической функции в ряд Фурье сводится к определению амплитуд и начальных фаз каждой из гармоник.

Если кривая функции имеет правильную геометрическую форму (треугольную, прямоугольную, пилообразную и т.д.), то она может быть разложена в ряд аналитически. Кривые произвольной формы задаются, как правило, в виде графиков и разлагаются в ряд Фурье графоаналитическими методами.

2. Характеристики несинусоидальной периодической функции.

Любая периодическая функция может характеризоваться:

5. 1) Амплитудным значением A_m ;
6. 2) Действующим (среднеквадратичным) значением A ;
7. 3) Средним значением A_{cp}

Если функция задана аналитически в виде ряда Фурье, то амплитуды всех гармоник присутствуют в выражении функции.

Действующее значение функции, согласно определению – это среднеквадратичное значение за период, т.е.

$$A = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left[\sum A_{km} \sin(kwt + \psi_k) \right]^2 dt} = \sqrt{A_0^2 + A_1^2 + \dots + A_k^2}$$

Действующее значение несинусоидальной функции равно корню квадратному из суммы квадратов действующих значений всех гармоник, включая постоянную составляющую. Оно не зависит от начальных фаз отдельных гармоник

Так может быть определено действующее значение несинусоидального тока и напряжения в цепи

Под средним значением функции понимается среднее значение модуля этой функции за период:

$$A_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T [f(t)] dt$$

Если кривая симметрична относительно оси абсцисс, то ее среднее значение определяют за половину периода:

$$A_{cp} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} [f(t)] dt$$

Для количественной оценки степени отличия исследуемой функции от синусоидальной используются следующие коэффициенты:

1. Коэффициент амплитуды $k_a = \frac{A_m}{A_{\text{действ}}}$
2. Коэффициент формы $k_\phi = \frac{A}{A_{cp}}$
3. Коэффициент искажений $k_u = \frac{A_1}{A}$

Для идеальной синусоиды эти коэффициенты имеют значения:

1. Коэффициент амплитуды $k_a = \frac{A_m}{A_{\text{действ}}} = \sqrt{2}$
2. Коэффициент формы $k_\phi = \frac{A}{A_{cp}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11$
3. Коэффициент искажений $k_u = \frac{A_1}{A} = 1,$

$$\text{т. к. } A_1 = A$$

3 Мощность цепи несинусоидального тока

Под активной мощностью электрической цепи понимают среднее значение мощности за период:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T ui \, dt$$

Для несинусоидальной функции напряжения и тока имеют вид (нагрузка индуктивная):

$$u = U_0 + U_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} U_{km} \sin(k\omega t + \psi_k)$$

$$i = I_0 + I_{1m} \sin(\omega t + \psi_1 - \varphi_1) + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} I_{km} \sin(k\omega t + \psi_k - \varphi_1)$$

Подставим эти ряды под знак интеграла

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T \left[\sum_{k=0}^{\infty} U_{km} \sin(k\omega t + \psi_k) \right] \cdot \left[\sum_{k=0}^{\infty} I_{km} \sin(k\omega t + \psi_k - \varphi_1) \right] dt$$

$$= U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos \varphi_1 + \dots + U_k I_k \cos \varphi_k = P_0 + P_1 + \dots + P_k =$$

$$= \sum_{k=0}^{\infty} P_k$$

Таким образом, активная мощность несинусоидального тока равна сумме активных мощностей отдельных гармоник.

Аналогичное соотношение можно получить и для реактивной мощности:

$$Q = U_1 I_1 \sin \varphi_1 + U_2 I_2 \sin \varphi_2 + \dots + U_k I_k \sin \varphi_k = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_k = \sum_{k=0}^{\infty} Q_k$$

Реактивная мощность постоянной составляющей равна нулю.

Полная мощность цепи определяется выражением $S = UI$,

$$\text{где } U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_k^2}$$

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_k^2}$$

Это действующее значение тока и напряжения

Так как, в общем случае, кривая тока может по форме отличаться от кривой напряжения, то

$$S \neq \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Для количественной оценки степени отличия форм кривых тока и напряжения вводится понятие мощности искажений T :

$$T = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}$$

4 . Основные положения для расчета цепи

В основе расчета цепи несинусоидального тока лежит принцип наложения. Согласно этому принципу, мгновенное значение тока в любой ветви равно сумме мгновенных значений токов отдельных гармоник. Расчет производится для каждой из гармоник в отдельности любым известным методом расчета. (как правило в комплексной форме)

1. 12 Лекция № 18,19 (4 часа).

Тема: «Соединение трехфазных цепей звездой и треугольником»

1.12.1 Вопросы лекции:

1. Получение трехфазной ЭДС Основные характеристики трехфазной цепи.
2. Способы соединения фаз генератора и нагрузки.
3. Методика расчета цепи трехфазного переменного тока при соединении нагрузки треугольником, звездой с нейтральным проводом, звездой без нейтрального провода.

1.12.2 Краткое содержание вопросов: (тезисно изложить основное содержание рассматриваемых вопросов)

1 Получение трехфазной системы ЭДС . Основные характеристики трехфазной цепи.

В 80-х годах XIX века талантливый русский инженер Доливо-Добровольский разработал систему трехфазного тока, изобрел трехфазный генератор, и трехфазный асинхронный двигатель. Он впервые осуществил передачу энергии трехфазным током на значительное для того времени расстояние. (170 км, 15 кВ)

Трехфазный ток имеет следующие преимущества:

- экономия до 25 % цветных металлов на сооружение линий электропередачи;
- возможность применения трехфазных асинхронных двигателей, простых по конструкции, удобных и надежных в эксплуатации;
- наличие двух эксплуатационных режимов напряжений.

Представим себе неподвижный кольцевой цилиндр из стали (статор), на внутренней стороне которого размещены три отдельные обмотки с одинаковым числом витков из изолированной проволоки. Плоскости обмоток располагают под углом 120^0 друг относительно друга. Начала обмоток обозначают буквами А, В и С, а концы Х, Y, Z.

Внутри статора поместим вращающийся электромагнит (ротор), обмотку которого будем питать постоянным током. При вращении ротора с помощью теплового или гидравлического двигателя его магнитные силовые линии будут пересекать проводники обмоток статора, вследствие чего в них, согласно закону электромагнитной индукции, будут индуцироваться ЭДС.

Симметричная система ЭДС

Так как магнитное поле ротора пересекает обмотки не одновременно, ЭДС обмоток достигают своего максимального значения также не одновременно. В обмотке В индуцированная ЭДС достигнет своего максимума тогда, когда ротор повернется на $1/3$ оборота, т.е. ЭДС обмотки В отстает от ЭДС обмотки А на $1/3$ периода или на 120^0 . Аналогично в обмотке С ЭДС достигает максимума, когда ротор повернется еще на $1/3$ оборота, а значит, ЭДС этой обмотки отстает от ЭДС обмотки В на $1/3$ периода, а от ЭДС обмотки А на $2/3$ периода. При синусоидальном изменении магнитной индукции в воздушном зазоре генератора, индуцированные ЭДС также будут изменяться по закону синуса. Поэтому ЭДС могут быть представлены тремя синусоидами, смещенными друг относительно друга на угол 120^0 по фазе или на $1/3$ периода по времени.

Поскольку конструкция трех обмоток имеют одинаковую конструкцию, т.е. количество витков, диаметр провода, расстояние между витками, то амплитудные значения ЭДС будут одинаковы и представлять собой симметричную систему ЭДС, которую можно аналитически представить выражениями для мгновенных значений:

$$e_A = E_m \sin \omega t; \\ e_B = E_m \sin(\omega t - 120^\circ); \\ e_C = E_m \sin(\omega t - 240^\circ) = E_m \sin(\omega t + 120^\circ),$$

или графиками мгновенных значений. Основное уравнение симметричной системы ЭДС - сумма мгновенных значений ЭДС в любой момент времени равна нулю:

$$e_A + e_B + e_C = 0.$$

По выражениям для мгновенных значений запишем комплексы действующих значений ЭДС. Представим симметричную систему ЭДС векторами на комплексной плоскости. Комплексная плоскость при этом повернута на 90° и чаще всего не изображается. Таким образом, вектор действующего значения ЭДС обмотки А располагается вертикально вверх, вектор действующего значения ЭДС обмотки В повернута на угол 120° по часовой стрелке, относительно вектора \dot{E}_A . И, соответственно, вектор действующего значения ЭДС \dot{E}_C повернут на угол 120° в направлении против хода часовой стрелки.

2 Способы соединения фаз генератора и нагрузки.

Представляет собой совокупность трех одинаковых по амплитуде и частоте источника, ЭДС которых сдвинута друг относительно друга на угол 120 градусов. Если соединить три конца обмоток генератора в одну общую точку, то получится соединение звездой, при этом условимся считать положительными направления ЭДС и токов в обмотках, если они будут направлены от концов к началам обмоток, общую точку называют нейтралью.

Совокупность источника ЭДС, нагрузки и соединяющих их проводов называют фазой. Таким образом, термин «фаза» в электротехнике обозначает в одних случаях аргумент синуса ($\omega t + \psi$), а в других случаях – одну из обмоток трехфазного генератора или потребитель. Провода, соединяющие фазы генератора с фазами нагрузки называют линейными, а протекающие в них токи – линейными. Провод, соединяющий нейтрали генератора и нагрузки называется нейтральным или нулевым, и, соответственно, ток в нем – током нейтрали. Токи протекающие в фазах нагрузки или генератора называют фазными.

Напряжения между началом и концом каждой фазы называют *фазными* и обозначают буквами: U_A, U_B, U_C - генератора и U_a, U_b, U_c - нагрузки.

Если активным сопротивлением обмоток пренебречь, то фазные напряжения генератора будут равны фазным ЭДС:

$$\dot{U}_A = \dot{E}_A = E; \\ \dot{U}_B = \dot{E}_B = E \cdot e^{-j120^\circ}; \\ \dot{U}_C = \dot{E}_C = E \cdot e^{j120^\circ}.$$

Напряжения между линейными проводами называют линейными: $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}, U_{ab}$, U_{ba}, U_{ca} .

Построение векторной диаграммы напряжений в ТФЦ начинают с построения векторов фазных напряжений генератора. Получить векторы линейных напряжений можно геометрическим вычитанием векторов фазных напряжений, т.е. соединив концы векторов фазных напряжений, получим векторы линейных напряжений, причем, этот вектор будет направлен от конца вычитаемого вектора к концу уменьшаемого.

$$\dot{U}_{AB} = \dot{\phi}_A - \dot{\phi}_B = \dot{U}_A - \dot{U}_B$$

Рассмотрим соотношение между фазными и линейными напряжениями. Рассмотрим треугольник, образованный векторами фазных напряжений фазы В и С и вектором линейного напряжения \dot{U}_{BC} . Опустим перпендикуляр из начала координат на вектор линейного напряжения, который разделит вектор на две равные части. Угол сдвига между векторами равен 120^0 , тогда угол между вектором фазного напряжения и отрезком NM будет равен 60^0 . Определим длину отрезка MB:

$$\frac{U_{\text{л}}}{2} = U_{\phi} \cdot \sin 60^0 = U_{\phi} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \quad \text{Тогда } U_{\text{л}} = U_{\phi} \sqrt{3}$$

Линейное напряжение в $\sqrt{3}$ раз больше фазного.

Запишем комплексы действующих значений линейных напряжений генератора:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{AB} &= U_{\text{л}} \cdot e^{j30^0}; \\ \dot{U}_{BC} &= U_{\text{л}} \cdot e^{-j90^0}; \\ \dot{U}_{CA} &= U_{\text{л}} \cdot e^{j150^0}\end{aligned}$$

3 Методика расчета цепи трехфазного переменного тока при соединении нагрузки треугольником, звездой с нейтральным проводом, звездой без нейтрального провода

Рассмотрим ТФЦ с нейтральным проводом. Если сопротивлением линейных проводов и нейтрального провода пренебречь, то фазные напряжения генератора и нагрузки равны:

$$U_{\Phi\Gamma} = U_{\Phi H}; \quad \dot{U}_A = \dot{U}_a; \quad \dot{U}_B = \dot{U}_b; \quad \dot{U}_C = \dot{U}_c$$

Нулевой провод служит для выравнивания фазных напряжений нагрузки.

Расчет такой цепи сводится к расчету токов. В такой ТФ цепи только два узла – нейтраль генератора и нейтраль нагрузки, следовательно, ток, протекающий в фазе генератора и нагрузки, а также в линейном проводе имеет одно и тоже значение. Таким образом, в цепи, при соединении фаз генератора и нагрузки звездой, фазные токи равны линейным. Линейные токи определяются по закону Ома:

$$\dot{I}_{\Phi} = \dot{I}_{\text{л}}; \quad \dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{Z_a}; \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{Z_b}; \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{Z_c}$$

Ток нейтрального провода определяется по первому закону Кирхгофа:

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C.$$

Векторная диаграмма напряжений и токов в трехфазной четырехпроводной цепи. Построим векторы фазных напряжений генератора и векторы линейных токов. Просуммируем векторы токов, используя правило параллелограмма, и получим вектор тока нейтрального провода.

Если комплексные сопротивления всех фаз нагрузки равны (равны активные и реактивные составляющие), нагрузка считается симметричной.

$$Z_a = Z_b = Z_c$$

В случае симметричной нагрузки линейные токи равны, и представляют собой симметричную систему токов (угол сдвига фаз между токами равен 120^0), тогда комплекс тока в нейтральном проводе равен нулю.

$$\dot{I}_A = \dot{I}_B = \dot{I}_C; \quad \dot{I}_N = 0.$$

Расчет трехпроводной ТФЦ при соединении звездой

Рассмотрим трехпроводную ТФЦ, в которой отсутствует нейтральный провод. В такой цепи фазные напряжения нагрузки не равны фазным напряжениям генератора, вследствие возникновения напряжения смещения нейтрали. Напряжение смещения нейтрали определяется по методу двух узлов. Запишем уравнение по второму закону Кирхгофа для контура, образованного фазными напряжениями генератора, нагрузки и напряжением смещения нейтрали. Тогда фазные напряжения нагрузки можно определить как разность фазного напряжения генератора и напряжения смещения нейтрали для каждой фазы соответственно.

Строится симметричная система векторов фазных напряжений генератора. Затем строим вектор напряжения смещения нейтрали, соединив конец этого вектора с концами векторов фазных напряжений генератора, получим векторы фазных напряжений нагрузки. В трехпроводной цепи, также как и в четырехпроводной, фазные и линейные токи равны, и определяются по закону Ома. Согласно первому закону Кирхгофа, геометрическая сумма векторов линейных токов равна нулю.

При симметричной нагрузке, напряжение смещения нейтрали равно нулю. Следовательно, фазные напряжения генератора и нагрузки равны, а линейные токи равны по величине, и представляют собой симметричную систему. Таким образом, симметричный режим трехпроводной и четырехпроводной цепи одинаков. В случае, когда гарантирована симметричная нагрузка целесообразнее использовать только три провода, как, например, в высоковольтных линиях электропередач.

3 Расчет ТФЦ при соединении нагрузки треугольником

Если конец первой фазы нагрузки соединить с началом второй фазы, конец второй фазы соединить с началом третьей, а конец третьей соединить с началом первой, то получится соединение треугольник. Таким образом, три фазы нагрузки образуют замкнутый контур. Если сопротивлениями линейных проводов пренебречь, то можно считать, что потенциалы точек А, В, С (начала фаз генератора) равны потенциалам точек а, в и с (начала фаз нагрузки).

$$\dot{\phi}_A = \dot{\phi}_a; \quad \dot{\phi}_B = \dot{\phi}_b; \quad \dot{\phi}_C = \dot{\phi}_c$$

Тогда линейные напряжения генератора, представляющие собой разность соответствующих потенциалов равны линейным напряжениям нагрузки:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{AB} &= \dot{\phi}_A - \dot{\phi}_B = \dot{U}_{ab}; \\ \dot{U}_{BC} &= \dot{\phi}_B - \dot{\phi}_C = \dot{U}_{bc}; \\ \dot{U}_{CA} &= \dot{\phi}_C - \dot{\phi}_A = \dot{U}_{ca}; \\ \dot{U}_{\text{ЛГ}} &= \dot{U}_{\text{ЛН}}; \end{aligned}$$

Напряжения, между началами и концами одной фазы и напряжения между линейными проводами одинаковы, т.е. в нагрузке, соединенной треугольником, один уровень напряжений.

$$U_{\Phi\text{Н}} = U_{\text{ЛН}},$$

но, в отличие от нагрузки, соединенной по схеме звезда, два уровня токов, токи в фазах нагрузки и, токи в линейных проводах.

$$\dot{I}_{\text{Л}} \neq \dot{I}_{\Phi}$$

Расчет такой цепи сводится к определению шести токов. При известном фазном, или линейном, напряжении генератора, можно определить напряжения на фазах нагрузки. Фазные токи рассчитываются по закону Ома:

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{AB}}{Z_{ab}}; \quad \dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{BC}}{Z_{bc}}; \quad \dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{CA}}{Z_{ca}}.$$

Для определения соотношения между линейными и фазными токами, запишем уравнения по первому закону Кирхгофа для комплексов действующих значений токов в узловых точках приемника:

$$\begin{aligned}\dot{I}_A + \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{ab} &= 0 \quad \dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}; \\ \dot{I}_B + \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{bc} &= 0 \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}; \\ \dot{I}_C + \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ca} &= 0 \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}.\end{aligned}$$

Из уравнений следует, что:

- каждый линейный ток равен геометрической разности фазных токов;
- уменьшающим является фазный ток, имеющий одинаковое положительное направление с линейным;
- при любых значениях фазных токов геометрическая сумма линейных токов равна нулю.

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$$

Векторная диаграмма.

При симметричной нагрузке

$$Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca}$$

фазные и линейные токи равны по величине и сдвинуты друг относительно друга на угол 120° , т.е. представляют собой симметричную систему фазных и линейных токов:

$$\begin{aligned}\dot{I}_{ab} &= I_\Phi \cdot e^{j\psi}; \quad \dot{I}_{bc} = I_\Phi \cdot e^{j\psi} \cdot e^{-j120^\circ} = \dot{I}_{ab} \cdot e^{-j120^\circ}; \\ \dot{I}_{ca} &= I_\Phi \cdot e^{j\psi} \cdot e^{j120^\circ} = \dot{I}_{ab} \cdot e^{j120^\circ}. \\ \dot{I}_A &= I_\Pi \cdot e^{j\psi}; \quad \dot{I}_B = I_\Pi \cdot e^{j\psi} \cdot e^{-j120^\circ} = \dot{I}_A \cdot e^{-j120^\circ}; \\ \dot{I}_C &= I_\Pi \cdot e^{j\psi} \cdot e^{j120^\circ} = \dot{I}_A \cdot e^{j120^\circ}.\end{aligned}$$

Векторная диаграмма.

Соотношение между фазными и линейными токами. Рассмотрим треугольник, образованный вектором линейного тока и векторами фазных токов. Биссектриса угла делит вектор линейного напряжения на две равные части, таким образом:

$$\frac{I_\Pi}{2} = I_\Phi \cdot \cos 30^\circ = I_\Phi \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

1. 13 Лекция № 20,21 (4 часа).

Тема: «Аварийные режимы в трехфазных цепях»

1.13.1 Вопросы лекции:

1. Холостой ход и короткое замыкание при соединении нагрузки по схеме «звезда» и по схеме «треугольник»
2. Мощность в трехфазных цепях. Измерение мощности в трехфазных цепях

1.13.2 Краткое содержание вопросов:

1 Холостой ход и короткое замыкание при соединении нагрузки по схеме «звезда» и по схеме «треугольник»

Рассмотрим простейший случай, когда нагрузка состоит из активных сопротивлений и два их этих сопротивлений равны, а третья изменяется от нуля до бесконечности, т.е. режим фазы изменяется от короткого замыкания фазы до холостого хода.

Короткое замыкание при соединении нагрузки по схеме «звезда»

$$\underline{Z}_b = \underline{Z}_c = R, \underline{Z}_a \rightarrow 0 g_a \rightarrow \infty - \text{короткого замыкания}$$

Напряжение смещения нейтрали в этом случае определится:

$$\dot{U}_{nN} = \frac{\frac{\dot{U}_A}{\underline{Z}_a} + \frac{\dot{U}_B}{R} + \frac{\dot{U}_C}{R}}{\frac{1}{\underline{Z}_a} + \frac{1}{R} + \frac{1}{R}} \times \underline{Z}_a = \frac{\frac{\dot{U}_A \underline{Z}_a}{\underline{Z}_a} + \frac{\dot{U}_B \underline{Z}_a}{R} + \frac{\dot{U}_C \underline{Z}_a}{R}}{\frac{\underline{Z}_a}{\underline{Z}_a} + \frac{\underline{Z}_a}{R} + \frac{\underline{Z}_a}{R}} = \dot{U}_A$$

Фазные напряжения нагрузки

$$\begin{aligned}\dot{U}_a &= \dot{U}_A - \dot{U}_{Nn} = \dot{U}_A - \dot{U}_A = 0; \\ \dot{U}_b &= \dot{U}_B - \dot{U}_A = -(\dot{U}_A - \dot{U}_B) = -\dot{U}_{AB} \\ \dot{U}_c &= \dot{U}_C - \dot{U}_{Nn} = \dot{U}_C - \dot{U}_A = \dot{U}_{CA}\end{aligned}$$

Таким образом, в короткого замыкания в фазе А, фазное напряжение нагрузки в этой фазе будет равно нулю, а два других фазных напряжения увеличается до величины линейных.

Векторная диаграмма напряжений.

Строим симметричную систему векторов фазных и линейных напряжений генератора. Затем строим вектор напряжения смещения нейтрали, совпадающий с вектором фазного напряжения фазы А. таким образом получили положение точки нейтрали нагрузки на векторной диаграмме. Соединив точку нейтрали нагрузки с концами векторов фазных напряжений фаз В и С, получим векторы фазных напряжений нагрузки, которые по величине равны векторам линейных напряжений и совпадают с ними по фазе ($\dot{U}_c = \dot{U}_{CA}$), либо находятся с ними в противофазе ($\dot{U}_b = -\dot{U}_{AB}$).

Линейные токи. Линейные токи в фазах В и С определяются по закону Ома в комплексной форме:

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_b}{R} = -\frac{\dot{U}_{AB}}{R}; \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_c}{R} = \frac{\dot{U}_{CA}}{R},$$

из чего следует, что при коротком замыкании два линейных тока увеличиваются, и становятся в $\sqrt{3}$ раз больше, чем эти же токи при симметричной нагрузке.

А линейный ток фазы А определяется по первому закону Кирхгофа:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_B + \dot{I}_C,$$

и, очевидно, он также увеличивается в $\sqrt{3}$ раз.

Холостой ход при соединении нагрузки по схеме «звезда»

Режим холостого хода характеризуется резким увеличением сопротивления, который может возникнуть либо при нарушении изоляции, либо при обрыве линейного провода. Рассмотрим пример, когда сопротивление фазы А увеличивается неограниченно, а проводимость уменьшается до нуля, т.е. происходит обрыв фазы:

$$\underline{Z}_a \rightarrow \infty \quad g_a \rightarrow 0$$

Определим напряжение смещения нейтрали:

$$\dot{U}_{nN} = \frac{\frac{\dot{U}_A}{\underline{Z}_a} + \frac{\dot{U}_B}{R} + \frac{\dot{U}_C}{R}}{\frac{1}{\underline{Z}_a} + \frac{1}{R} + \frac{1}{R}} = \frac{\frac{1}{R}(\dot{U}_B + \dot{U}_C)}{\frac{1}{R} \cdot 2} = \frac{(\dot{U}_B + \dot{U}_C)}{2} = -\frac{\dot{U}_A}{2}$$

Получаем, что напряжение смещения нейтрали по величине равно половине фазного напряжения генератора, и отстает от него по фазе на угол 180° .

Фазные напряжения в нагрузке при этом будут равны:

$$\begin{aligned} \dot{U}_a &= \dot{U}_A - \left(-\frac{\dot{U}_A}{2} \right) = \frac{3}{2} \dot{U}_A; \\ \dot{U}_b &= \dot{U}_B - \left(-\frac{\dot{U}_A}{2} \right) = U_\Phi \cdot e^{-j120^\circ} - \frac{1}{2} U_\Phi \cdot e^{j180^\circ} \\ &= U_\Phi \cdot \cos(-120^\circ) + j U_\Phi \cdot \sin(-120^\circ) - \frac{1}{2} U_\Phi \cdot \cos(180^\circ) \\ &= -\frac{1}{2} U_\Phi - j U_\Phi \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{2} U_\Phi = -j U_\Phi \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = -j \cdot \frac{U_\Pi}{2} = \frac{U_\Pi}{2} \cdot e^{-j90^\circ}. \\ \dot{U}_c &= \dot{U}_C - \left(-\frac{\dot{U}_A}{2} \right) = U_\Phi \cdot e^{j120^\circ} - \frac{1}{2} U_\Phi \cdot e^{j180^\circ} \\ &= U_\Phi \cdot \cos(120^\circ) + j U_\Phi \cdot \sin(120^\circ) - \frac{1}{2} U_\Phi \cdot \cos(180^\circ) - j \frac{1}{2} U_\Phi \cdot \sin(180^\circ) \\ &= -\frac{1}{2} U_\Phi j U_\Phi \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{2} U_\Phi = j U_\Phi \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = j \cdot \frac{U_\Pi}{2} = \frac{U_\Pi}{2} \cdot e^{j90^\circ}. \end{aligned}$$

Итак, при обрыве фазы, фазное напряжение в этой фазе увеличивается в полтора раза, т.е. на векторной диаграмме точка нейтрали нагрузки смещается из начала координат на вектор линейного напряжения. А фазные напряжения двух других фаз уменьшаются, и становятся равными половине линейного напряжения.

Векторная диаграмма напряжений

Очевидно, что при обрыве фазы или линейного провода, ток в этой фазе будет равен нулю.

$$\dot{I}_A = 0$$

Линейные токи двух других фаз определяются по закону Ома:

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_b}{R} = \frac{U_\Phi \sqrt{3}}{2R} \cdot e^{-j90^\circ}; \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_c}{R} = \frac{U_\Phi \sqrt{3}}{2R} \cdot e^{j90^\circ},$$

из чего следует, что при холостом ходе два линейных тока уменьшаются, и сдвинуты друг относительно друга на π , а их векторы на векторной диаграмме находятся в противофазе.

Достоинства:

- схема не является аварийной при коротком замыкании;
- имеет малое количество проводов;

Недостатки:

- несимметрия приводит к перекосу фазных напряжений, могут возникнуть напряжения в фазах нагрузки, большие, чем номинальные и выход из строя оборудования

Холостой ход при соединении нагрузки по схеме «треугольник»

Считаем, что сопротивления линейных проводом много меньше сопротивлений нагрузки, тогда можно считать, линейные напряжения генератора и нагрузки равными.

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{ab};$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_{bc};$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_{ca};$$

Холостой ход характеризуется увеличением сопротивления, различают два режима ХХ: обрыв фазы нагрузки и обрыв линейного провода.

Рассмотрим режим ХХ при обрыве фазы, предположим, фазы ab .

$$\underline{Z}_{ab} \rightarrow \infty; \quad g_{ab} \rightarrow 0.$$

Фазный ток этой фазы определится:

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{AB}}{\underline{Z}_{ab}} = 0.$$

Если сопротивления двух других фаз не изменилось, то их фазные токи остались такими же, как и до увеличения сопротивления фазы ab :

$$\dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{BC}}{R}; \quad \dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{CA}}{R},$$

таким образом, можно считать, что две другие фазы работают независимо. Изменение сопротивления одной фазы влияет на режим работы только данной фазы и на два линейных тока, они станут равными фазным:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca} = -\dot{I}_{ca};$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab} = \dot{I}_{bc},$$

Величина тока линейного провода С не изменится при изменении сопротивления фазы ab .

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}$$

Рассмотрим режим ХХ при обрыве линейного провода, предположим А.

Ток в этом проводе равен нулю:

$$\dot{I}_A = 0.$$

Начало фазы нагрузки точка a перестает быть узлом, и, следовательно, фазные токи фаз ab и ca равны:

$$\dot{I}_{ab} = \dot{I}_{ca}.$$

В этом случае, при равных комплексных сопротивлениях фаз $\underline{Z}_{ca} = \underline{Z}_{ab} = R$, каждое из фазных напряжений равно половине линейного:

$$\dot{U}_{ca} = \dot{U}_{ab} = -\frac{\dot{U}_{bc}}{2}$$

Тогда, фазный ток, согласно закону Ома:

$$\dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{Z_{bc}}.$$

Оставшиеся два линейных тока определяются:

$$\begin{aligned}\dot{I}_B &= \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}; \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{bc} = -\dot{I}_B\end{aligned}$$

Векторная диаграмма.

Режим короткого замыкания в нагрузке, соединенной треугольником, является аварийным.

2. Мощность в трехфазных цепях. Измерение мощности в трехфазных цепях.

Активная мощность или просто мощность определяется как произведение действующего значения фазного напряжения на действующее значение фазного тока и на косинус угла сдвига фаз между этими параметрами, т.е. в общем случае:

$$P_{\Phi\Gamma} = U_{\Phi\Gamma} \cdot I_{\Phi} \cdot \cos \varphi.$$

Активная мощность нагрузки может быть определена либо по той же формуле через фазное напряжение нагрузки и фазный ток:

$$P_{\Phi H} = U_{\Phi H} \cdot I_{\Phi} \cdot \cos \varphi,$$

либо как мощность потребителей: произведение квадрата действующего значения фазного тока на активное сопротивление фазы:

$$P_{\Phi H} = I_{\Phi}^2 \cdot R_{\Phi}.$$

В несимметричной нагрузке мощности одной фазы генератора и нагрузки могут не совпадать, т.е.

$$P_A \neq P_a; \quad P_B \neq P_b; \quad P_C \neq P_c,$$

поэтому выполнение баланса мощностей проверяют по сумме мощностей всех фаз:

$$P_{\Gamma} = P_A + P_B + P_C \quad P_H = P_a + P_b + P_c \text{ - для соединения нагрузки звездой}$$

$$P_H = P_{ab} + P_{bc} + P_{ca} \text{ - для соединения нагрузки треугольником}$$

При симметричной нагрузке все фазные напряжения, фазные токи и сопротивления фаз равны, следовательно, активная мощность может быть определена следующим выражением:

$$P_{\Gamma} = 3 \cdot U_{\Phi\Gamma} \cdot I_{\Phi} \cdot \cos \varphi;$$

$$P_H = 3 \cdot U_{\Phi H} \cdot I_{\Phi} \cdot \cos \varphi.$$

При соединении нагрузки звездой фазные и линейные напряжения связаны соотношением:

$$U_{\Phi} = \frac{U_{\Lambda}}{\sqrt{3}}, \text{ а токи равны } I_{\Phi} = I_{\Lambda}$$

Выражение мощности примет вид:

$$P_H = 3 \cdot \frac{U_{\Lambda}}{\sqrt{3}} \cdot I_{\Lambda} \cdot \cos \varphi \cdot \sqrt{3} = \sqrt{3} \cdot U_{\Lambda} \cdot I_{\Lambda} \cdot \cos \varphi$$

При соединении нагрузки треугольником фазные и линейные токи связаны соотношением:

$$I_{\text{Л}} = I_{\Phi} \cdot \sqrt{3}, \text{ а напряжения равны } U_{\Phi\text{H}} = U_{\text{ЛН}}$$

Выражение мощности нагрузки примет вид:

$$P_{\text{H}} = 3 \cdot U_{\text{ЛН}} \cdot \frac{I_{\text{Л}}}{\sqrt{3}} \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ЛН}} \cdot I_{\text{Л}} \cdot \cos \varphi.$$

Таким образом, вне зависимости от схемы соединения симметричной нагрузки, формула мощности нагрузки одинакова.

Реактивная мощность создается колебаниями энергии электромагнитных полей цепи, если эти колебания во всех фазах трехфазной цепи протекают одинаково, то реактивной мощностью трехфазной цепи можно считать сумму трех фазных реактивных мощностей, одинаковых по величине:

$$Q_{\Gamma} = 3 \cdot U_{\Phi\Gamma} \cdot I_{\Phi} \cdot \sin \varphi;$$

$$Q_{\text{H}} = 3 \cdot U_{\Phi\text{H}} \cdot I_{\Phi} \cdot \sin \varphi.$$

или, выразив фазные величины через линейные:

$$Q_{\text{H}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{Л}} \cdot I_{\text{Л}} \cdot \sin \varphi.$$

Тогда полная мощность ТФЦ цепи

$$S = \sqrt{3} \cdot U_{\text{Л}} \cdot I_{\text{Л}}$$

Схема соединения трехфазной нагрузки не зависит от схемы соединения обмоток генератора. Возможность переключения фаз нагрузки с соединения звезда на соединение треугольник часто используется для регулирования величины тока и мощности, например, для уменьшения пусковых токов трехфазных двигателей, для изменения температуры трехфазных электрических печей.

Рассмотрим, как изменяются токи симметричной нагрузки, имеющей постоянное фазное сопротивление \underline{Z}_{Φ} , при переключении звезды на треугольник трехполюсным переключателем.

При соединении звездой фазный ток $I_{\Phi\perp}$ равен линейному $I_{\text{Л}\perp}$, и, на основании закона Ома:

$$I_{\Phi\perp} = I_{\text{Л}\perp} = \frac{U_{\Phi\perp}}{\underline{Z}_{\Phi}},$$

а так, как при соединении звездой линейное напряжение больше фазного в $\sqrt{3}$ раз, то и величина линейного тока:

$$I_{\text{Л}\perp} = \frac{U_{\text{Л}\perp}}{\sqrt{3} \cdot \underline{Z}_{\Phi}}.$$

При соединении треугольником на основании закона Ома:

$$I_{\Phi\Delta} = \frac{U_{\text{Л}\Delta}}{\underline{Z}_{\Phi}},$$

но линейный ток больше фазного в $\sqrt{3}$ раз:

$$I_{\text{Л}\Delta} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\text{Л}\Delta}}{\underline{Z}_{\Phi}}$$

Сопоставим выражения линейных токов звезды и треугольника, получим, что при одном и том же линейном напряжении и одинаковом сопротивлении:

$$\frac{U_{\text{Л}\perp}}{Z_{\Phi}} = \sqrt{3} \cdot I_{\text{Л}\perp}; \quad \frac{U_{\text{Л}\Delta}}{Z_{\Phi}} = \frac{I_{\text{Л}\Delta}}{\sqrt{3}}; \quad \sqrt{3} \cdot I_{\text{Л}\perp} = \frac{I_{\text{Л}\Delta}}{\sqrt{3}}; \quad I_{\text{Л}\Delta} = 3 \cdot I_{\text{Л}\perp},$$

а для фазных

$$I_{\Phi\Delta} = \sqrt{3} \cdot I_{\Phi\perp}.$$

Линейный ток при соединении нагрузки треугольником больше линейного тока нагрузки, соединенной звездой в три раза.

Если мощность цепи

$$P = \sqrt{3} \cdot U_{\text{Л}} \cdot I_{\text{Л}} \cdot \cos \varphi,$$

то, очевидно, что при переключении с треугольника на звезду, уменьшение линейного тока приведет к уменьшению потребляемой мощности также в три раза.

У наиболее распространенного трехфазного асинхронного двигателя пусковой ток больше его номинального рабочего тока примерно в 6 раз. Если на время пуска двигателя временно его обмотки соединить звездой, то пусковой ток будет больше номинального уже не в 6, а в 2 раза.

Сравним условия для двух случаев, когда одну и ту же фазную мощность нужно получить при одном и том же линейном напряжении.

$$U_{\text{Л}\perp} = U_{\text{Л}\Delta} P_{\Phi} = U_{\Phi} \cdot I_{\Phi} \cdot \cos \varphi$$

При соединении звездой фазное напряжение в $\sqrt{3}$ раз меньше линейного, следовательно, чтобы получить такую же мощность при соединении звездой, фазный ток должен быть в $\sqrt{3}$ раз больше.

$$P_{\Phi\perp} = U_{\Phi} \cdot \sqrt{3} \cdot I_{\Phi} \cdot \cos \varphi; \quad P_{\Phi\Delta} = U_{\Phi} \cdot I_{\Phi} \cdot \cos \varphi$$

Выразим мощность через фазное активное сопротивление:

$$P_{\Phi} = I_{\Phi}^2 \cdot R_{\Phi}$$

Так как в обоих случаях мы должны получить одну мощность, то

$$I_{\Phi\perp}^2 \cdot R_{\Phi\perp} = I_{\Phi\Delta}^2 \cdot R_{\Phi\Delta},$$

Так как $I_{\Phi\Delta} = \sqrt{3} \cdot I_{\Phi\perp}$, то

$$I_{\Phi\perp}^2 \cdot R_{\Phi\perp} = (\sqrt{3})^2 \cdot I_{\Phi\perp}^2 \cdot R_{\Phi\Delta} \quad R_{\Phi\perp} = 3 \cdot R_{\Phi\Delta} \quad R_{\Phi\perp} = \frac{R_{\Phi\Delta}}{3},$$

получаем, что активное сопротивление фазы при соединении звездой должно быть в три раза меньше активного сопротивления, при соединении треугольником. Предположим, что это активное сопротивление провода, из которого намотана катушка приемника энергии. При соединении звездой сечение провода должно быть в $\sqrt{3}$ раз больше, чтобы пропускать ток, больший в $\sqrt{3}$ раз. А длина его должна быть в $\sqrt{3}$ раз меньше. Таким образом, общая масса катушек при обоих способах соединения будет одинакова, но для звезды понадобится более толстый и короткий провод, что дешевле и механически прочнее. Кроме того, расчет изоляции проводника будет вестись на меньшее, в $\sqrt{3}$ раз, фазное напряжение.

1. 14 Лекция № 22 (2 часа).

Тема: «Трансформаторы. Электромагнитные устройства.»

1.14.1 Вопросы лекции:

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

1.14.2 Краткое содержание вопросов:

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

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

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

Трансформатор простейшего типа состоит из ферромагнитного сердечника 1 и двух обмоток, связанных магнитной связью, исключение составляет автотрансформатор. Обмотка трансформатора, соединенная с источником электроэнергии 2, называется первичной, и, соответственно, первичными именуются все параметры этой обмотки: число витков w_1 ; подведенное напряжение U_1 ; ток I_1 .

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

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

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

Величину индуцированных ЭДС можно определить, воспользовавшись уравнением трансформаторной ЭДС:

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

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

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

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

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

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

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

Ток ПО в этом режиме называется током ХХ и обозначается I_{10} , составляет 3-10 % от тока номинального режима, вследствие чего потерями в катушке можно пренебречь. Активная мощность, измеренная в этом режиме, составляет потери в стали магнитопровода. По показаниям вольтметров уточняют коэффициент трансформации. Опыт ХХ обязателен при заводском испытании готового трансформатора, а также периодически проводят в период эксплуатации.

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

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

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

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

Энергетическая диаграмма потерь. КПД

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

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

3 Особенности трехфазных трансформаторов. Специальные трансформаторы

Для трансформирования трехфазной системы токов, возможно использовать три одинаковых однофазных трансформатора, что часто используют для трансформирования

больших напряжений. Большинство трансформаторов малой и средней мощности выполняют трехфазными.

Представим себе три однофазных трансформатора, соединенных частью сердечника, другие же части сердечника остаются без изменения. Это соединение можно сравнить с трехфазной электрической цепью, с нулевым проводом, роль которого выполняет средний стержень. В случае симметричной нагрузки нулевой провод можно исключить, и заменить симметричный сердечник несимметричным. Стержни несимметричного магнитопровода располагают в одной плоскости. Первичной или вторичной обмоткой называется совокупность трех фазных обмоток одного уровня напряжения. Зажимы трехфазного трансформатора должны размещаться в порядке чередования фаз: на стороне высшего напряжения зажимы маркируются прописными буквами, на стороне низшего напряжения – строчными буквами.

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

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

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

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

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

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

Трансформаторы тока со стороны первичной обмотки включаются в линию, как амперметр, последовательно с контролируемым объектом, а его вторичная обмотка замыкается непосредственно на амперметр или цепи тока других измерительных приборов (например, токовую обмотку ваттметра). Все измерительные приборы включены последовательно, их суммарное сопротивление мало (приблизительно 2 Ом),

поэтому трансформатор тока работает в условиях, близких к условиям опыта короткого замыкания силового трансформатора. Токи первичной и вторичной обмоток связаны постоянным соотношением, равным коэффициенту трансформации, следовательно, для определения первичного тока вторичный ток умножают на коэффициент трансформации:

$$I_1 = k \cdot I_2.$$

Автотрансформаторы

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

Мощность автотрансформатора

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

складывается из мощности, передаваемой электрическим путем

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

и трансформируемой мощности

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

Размеры и вес автотрансформатора определяются трансформируемой мощностью.

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

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

Сварочный трансформатор

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

1. 15 Лекция № 23 (2 часа).

Тема: «Асинхронные машины переменного тока»

1.15.1 Вопросы лекции:

1. Конструкция, принцип работы в режиме двигателя
2. Основные характеристики асинхронного двигателя
3. Особенности пуска и способы регулирования частоты вращения
4. Однофазные асинхронные двигатели
5. Паспортные характеристики

1.15.2 Краткое содержание вопросов:

1 Конструкция, принцип работы в режиме двигателя.

Асинхронным двигателем называется машина, которая преобразует электрическую энергию переменного тока в механическую и у которой скорость вращения ротора и магнитного поля статора различны.

Асинхронные двигатели получили широкое распространение благодаря следующим достоинствам:
простоте устройства;
высокой надежности в эксплуатации;
низкой стоимости.

С помощью асинхронных двигателей приводятся в движение подъемные краны, лебедки, лифты, эскалаторы, насосы, вентиляторы и другие механизмы.

К недостаткам асинхронных двигателей относятся:

ток при пуске асинхронного двигателя в 5-7 раз превышает ток в номинальном режиме $I_n = (5\dots7)I_h$;

пусковой вращающий момент относительно момента в номинальном режиме мал $M_n = (1,2\dots1,6)M_h$;

затруднено регулирование скорости вращения ротора.

Конструкция, принцип работы в режиме двигателя. Основные характеристики асинхронного двигателя. Получение вращающегося магнитного поля

Основными конструктивными элементами асинхронного двигателя являются: статор и ротор.

Неподвижный литой корпус, внутри которого расположен, сборный из штампованных листов электротехнической стали, сердечник или магнитопровод. В пазы сердечника укладывается трехфазная статорная обмотка. Равномерно распределенная по его окружности. Таким образом, каждая фаза занимает несколько пазов статора. Соединение обмотки статора осуществляется в коробке, в которую выведены начала фаз C_1, C_2, C_3 и концы фаз C_4, C_5, C_6 .

В АД обмотки статора, подобно первичной обмотке трансформатора, получают энергию от трехфазной сети и возбуждают вращающееся магнитное поле.

Короткозамкнутый ротор

Ротор АД – вращающаяся часть – состоит из стального вала, сборного сердечника ротора, на внешней поверхности которого в пазах размещается роторная обмотка,

замкнутая накоротко или на пусковой реостат. Она не имеет электрического соединения с сетью или с обмоткой статора, токи в ней индукируются вращающимся магнитным полем. Взаимодействие токов ротора с вращающимся магнитным полем статора вынуждает ротор вращаться по направлению поля.

Роторы асинхронных двигателей изготавливаются двух видов: короткозамкнутые и с контактными кольцами (100-200 кВт).

Обмотка короткозамкнутого ротора представляет собой цилиндрическую клетку («беличье колесо») из медных шин или алюминиевых стержней, замкнутых накоротко на торцах двумя кольцами. Стержни этой обмотки вставляются без изоляции в пазы магнитопровода. Торцевые концы стержней замыкаются кольцами из такого же материала («беличье колесо»).

Применяется также способ заливки пазов магнитопровода ротора расплавленным алюминием с одновременной отливкой и замыкающих колец.

Такой ротор значительно дешевле и обслуживание двигателя проще.

Фазный ротор (с контактными кольцами)

Обмотка фазного ротора выполняется изолированным проводом. В большинстве случаев она трехфазная, с тем же числом катушек, что и обмотка статора. Три фазные обмотки ротора соединяются на самом роторе в звезду, а свободные концы их соединяются с тремя контактными кольцами, укрепленными на валу, но изолированными от него. На кольца наложены щетки, установленные в неподвижных щеткодержателях. Через кольца и щетки обмотка ротора замыкается на трехфазный реостат, что дает возможность существенно улучшить пусковые условия двигателя – уменьшить пусковой ток и увеличить пусковой момент, а также с помощью реостата можно плавно регулировать скорость двигателя.

Получение вращающегося магнитного поля

Наибольшее распространение получили трехфазные асинхронные двигатели, работа которых основана на использовании вращающегося магнитного поля, постоянного по величине и меняющего свое направление в пространстве. При подключении статорной обмотки к трехфазной цепи, в их пойдет ток:

$$i_A = I_m \cdot \sin \omega t;$$

$$i_B = I_m \cdot \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$i_C = I_m \cdot \sin(\omega t + 120^\circ)$$

Эти токи создают магнитодвижущие силы

$$F_A = i_A \cdot w; \quad F_B = i_B \cdot w; \quad F_C = i_C \cdot w.$$

Определим величины и направления магнитодвижущих сил в различные моменты времени.

При $t=0$.

$$i_A = 0; \quad F_A = 0$$

$$i_B = I_m \cdot \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \right); \quad F_B = -\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_m \cdot w$$

$$i_C = I_m \cdot \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \right); \quad F_C = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_m \cdot w$$

Ток в обмотке A равен нулю. Мгновенное значение тока в обмотке B имеет знак минус, следовательно, его направление от конца обмотки к началу, а, в обмотке C направление тока от начала – к концу. Направление силовых линий магнитного поля статора, образованного вокруг одной стороны витков обмоток – по часовой стрелки, а, образованного вокруг другой стороны витков обмоток – против часовой стрелки, но внутрь статора.

Векторы МДС перпендикулярны плоскости катушки и расположены по ее оси. Вектор суммарной МДС определится как геометрическая сумма.

Векторы МДС F_B и F_C образуют равнобедренный треугольник.

$$F_{\Sigma} = 2 \cdot F_B \cdot \cos 30^0 = 2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_m \cdot w \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{3}{2} \cdot I_m \cdot w.$$

В момент времени t , при котором $\omega t = 30^0$.

$$\begin{aligned} i_A &= I_m \cdot \sin 30^0 = \frac{1}{2} \cdot I_m; & F_A &= \frac{1}{2} \cdot I_m \cdot w \\ i_B &= I_m \cdot \sin(30^0 - 120^0) = -I_m; & F_B &= -I_m \cdot w \\ i_C &= I_m \cdot \sin(30^0 + 120^0) = \frac{1}{2} \cdot I_m; & F_C &= \frac{1}{2} \cdot I_m \cdot w \end{aligned}$$

Определим геометрическую сумму МДС F_A и F_B :

$$F_A + F_B = 2 \cdot F \cdot \cos 60^0 = 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot I_m \cdot w \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{2} \cdot I_m \cdot w.$$

Суммарная МДС:

$$F_{\Sigma} = (F_A + F_B) + F_C = \frac{1}{2} \cdot I_m \cdot w + I_m \cdot w = \frac{3}{2} \cdot I_m \cdot w.$$

Из расчетов видно, что вектор суммарной магнитодвижущей силы не изменился по величине, но изменил свое направление на 30^0 , относительно положения, соответствующего моменту времени, равному нулю.

Продолжая аналогичные построения для других значений времени, можно убедиться, что величина суммарной МДС будет постоянной, и за время одного периода колебания тока, вектор магнитодвижущей силы совершил один полный оборот.

Таким образом, частота вращения магнитного поля будет равна частоте тока:

$$n_1 = f \text{ [об/с]} = 60 \cdot f \text{ [об/мин].}$$

При стандартной частоте питающей сети 50 Гц поле вращается со скоростью 3000 об/мин. Мы рассмотрели двухполюсное исполнение ($p = 2$).

$$n_1 = 3000 \text{ [об/мин]}$$

Если же требуется скорость вращения меньше, чем 3000, то используют многополюсные обмотки. Например, шестиполюсное исполнение статорной обмотки содержит 3 пары полюсов: северных и южных. В данной обмотке по три витка на каждую фазу. Если в двухполюсной обмотке стороны витка одной фазы расположены под углом 180^0 , то в шестиполюсной витки одной фазы расположены под углом 60^0 относительно друг друга. За время одного периода колебания тока, магнитное поле повернется на одну треть периода или на 120^0 , а скорость вращения магнитного поля определится по формуле:

$$n_1 = \frac{60 \cdot f}{p}$$

Электромагнитное взаимодействие между статором и ротором возникает только при неравенстве скорости вращения поля статора и скорости вращения ротора. Разность скоростей поля и ротора характеризуется величиной – скольжением:

$$S = \frac{n_1 - n}{n_1}.$$

откуда, частота вращения ротора:

$$n = n_1 - S \cdot n_1 = n_1 \cdot (1 - S).$$

В зависимости от соотношения между скоростью вращения поля и ротора различают три режима работы асинхронной машины: генераторный ($n > n_1$); двигательный ($n < n_1$); электромагнитного тормоза.

2 Основные характеристики асинхронного двигателя

Магнитное поле статора вращается по часовой стрелке, и по отношению к ротору тоже по часовой стрелке. Скорость ротора зависит, в том числе, и от его нагрузки, т.е. от статического момента. При холостом ходе, скорости вращения поля и ротора практически равны, магнитный поток, пересекающий обмотки ротора практически не изменяется, и, следовательно, ЭДС и токи в роторной обмотке не индуцируются. Вращающий момент создается благодаря электромагнитному взаимодействию поля и токов, и если токи равны нулю, то и вращающий момент равен нулю. Таким образом, асинхронная машина может работать в двигательном режиме, если скорость вращения ротора лежит в пределах от нуля, до скорости вращения магнитного поля

$$0 < n < n_1 \text{ или } 0 < S < 1$$

Предположим, что статорная обмотка создает вращающееся магнитное поле, а вал двигателя дополнительно приводится во вращение со скоростью большей, чем скорость поля. Скольжение в этом случае будет отрицательным, индуктированные ЭДС и токи в роторной обмотке изменят свое направление. И момент, создаваемый на валу, становиться тормозящим, по отношению к вращающему моменту, создаваемому при двигательном режиме. Механическая энергия, подведенная к ротору асинхронной машины, преобразуется в электрическую энергию, и отдается в сеть. Таким образом, машина может работать в режиме генератора параллельно с сетью в пределах:

$$n_1 < n < +\infty \text{ или } -\infty < S < 0$$

Рассмотрим пример, когда вал ротора приводится во вращение против направления магнитного поля статора. В этом случае к асинхронной машине подводится энергия с двух сторон: электрическая от сети, и механическая от первичного двигателя. Такой режим называется режимом электромагнитного тормоза. Он лежит в пределах изменения скольжения:

$$1 < S < +\infty.$$

Примером практического применения режима электромагнитного тормоза является опускание груза в подъемно-транспортных устройствах.

3.3 Особенности пуска и способы регулирования частоты вращения ротора

При пуске АД в ход возникает вращающийся магнитный поток, но ротор в первый момент еще неподвижен. В роторе появляется пусковой ток, величина которого в 5-7 раз больше тока номинального режима. Поэтому при пуске двигателя необходимо

предусмотреть меры для уменьшения пускового тока. У двигателей с фазным ротором предусматривают введение в цепь ротора пускового реостата. Пуск двигателя можно проследить по механической характеристике.

Механической характеристикой двигателя называют зависимость частоты вращения ротора от момента на валу

$$n = f(M).$$

Механическую характеристику можно получить из зависимости $M = f(S)$. Так как скольжение обратно пропорционально скольжению, то:

- при скольжении $S = 0$, скорость вращения ротора $n = n_1$;
- при скольжении $S = 1$, скорость вращения ротора $n = 0$.

Кривая 1 называется естественной механической характеристикой, она соответствует короткозамкнутой обмотке, т.е. без введения добавочного сопротивления. Включение добавочного сопротивления в цепь ротора увеличивает пусковой момент и уменьшает пусковой ток (кривая 2). Дальнейшее увеличение приводит к увеличению пускового момента до критического значения. После чего увеличение сопротивление приводит уменьшению пускового момента.

3 Паспортные данные

Каждый электродвигатель снабжается техническим паспортом в виде приклепанной металлической таблички (шильдика), на которой приведены основные характеристики электрической машины. Необходимо отметить, что Советский ГОСТ не предусматривал паспорт электродвигателя в бумажном виде. Российский ГОСТ Р 51689-2000 требует от производителя типографский паспорт, но все основные данные указаны на шильдике.

В паспорте указан тип двигателя. Например, электродвигатель типа АИР 10082УЗ: асинхронный электродвигатель серии АИР закрытого исполнения с высотой оси вращения 100 мм, с короткой длиной корпуса, двухполюсный, климатического исполнения У, категории 3.

Заводской номер дает возможность отличить электрическую машину среди однотипных.

Далее приведены цифры и символы, которые расшифровываются следующим образом:

3 ~ — двигатель трехфазного переменного тока;

50 Hz — частота переменного тока (50 Гц), при которой электрический двигатель должен работать;

4,0 KW — номинальная полезная мощность на валу электродвигателя;

косинус фи = 0,89 — коэффициент мощности;

220/380V, 13,6/7,8 A — при соединении обмотки статора в треугольник она должна включаться на напряжение 220 В, а при соединении в звезду — на напряжение 380 В. При этом электрическая машина, работающая с номинальной нагрузкой, потребляет 13,6 А при включении на треугольник и 7,8 А — при включении на звезду;

S1 — двигатель предназначен для длительного режима работы;

2880 об/мин — частота вращения электродвигателя при номинальной нагрузке и частоте сети 50 Гц.

Если электродвигатель работает вхолостую, частота вращения ротора приближается к частоте вращения магнитного поля статора;

к. п. д. = 86,5 % — номинальный коэффициент полезного действия двигателя, соответствующий номинальной нагрузке на его валу;

IP44 — степень защиты электрической машины по ГОСТ 14254-96 (Степени защиты, обеспечиваемые оболочками. (Код IP).

F — класс нагревостойкости изоляции по ГОСТ 8865-93. (Системы электрической изоляции. Оценка нагревостойкости и классификация.)

В паспорте (на шильдике) указан также ГОСТ, которому соответствует электродвигатель, масса машины и год выпуска.

4 Особенности пуска и способы регулирования частоты вращения

При пуске АД в ход возникает вращающийся магнитный поток, но ротор в первый момент еще неподвижен. В роторе появляется пусковой ток, величина которого в 5-7 раз больше тока номинального режима. Поэтому при пуске двигателя необходимо предусмотреть меры для уменьшения пускового тока. У двигателей с фазным ротором предусматривают введение в цепь ротора пускового реостата. Пуск двигателя можно проследить по механической характеристике.

В цепь ротора с короткозамкнутой роторной обмоткой нельзя включить добавочное сопротивление. Поэтому для пуска двигателей большой мощности необходимо предусмотреть шунтирование измерительной аппаратуры и различной защиты, установленной в цепи двигателя. Одной из мер понижения пускового тока является понижение напряжения в момент пуска. Это возможно путем введения пускового реостата в цепь статора. С уменьшением напряжения, уменьшится и магнитный поток, и индуцируемые им ЭДС и ток ротора. Если напряжение уменьшится в 2 раза, то пусковой ток ротора уменьшится также в два раза, а пусковой момент в 4 раза. Применение автотрансформатора, включенного в цепь статора, дает более выгодные пусковые условия. Однако наибольшее распространение получил пуск двигателя путем переключения обмотки статора со звезды на треугольник.

$$n = n_1 - S \cdot n_1 = n_1 \cdot (1 - S) = \frac{60 \cdot f}{p} \cdot (1 - S).$$

Из чего следует, что регулировать скорость вращения двигателя можно, изменения:

- число пар полюсов;
- частоты тока питающего статор;
- скольжение.

Число пар полюсов можно изменять, меняя количество и способ соединения катушек в каждой фазе обмотки статора. Две скорости вращения двигателя с одной обмоткой получают переключением катушке одной фазы обмотки с последовательного на параллельное соединение.

Регулирование скорости вращения переключением числа пар полюсов производится только у двигателей с короткозамкнутым ротором.

Недостатками такого способа регулирования являются ступенчатое изменение скорости вращения, наличие громоздкого многоконтактного переключателя, увеличение габаритных размеров двигателя.

Регулирование скорости вращения изменением частоты можно в случае, когда статорная обмотка питается от отдельного синхронного генератора или от преобразователя частоты. Используется крайне редко, в связи с громоздкостью и высокой стоимостью.

Регулирование скорости вращения путем изменения применяется только для двигателей с фазным ротором, работающих в кратковременном и повторно-

кратковременном режиме. Скольжение зависит от активного сопротивления роторной обмотки. Введение в цепь ротора регулировочного реостата позволяет изменять скольжение. Однако этот способ регулирования снижает КПД двигателя.

5 Однофазный асинхронный двигатель

Однофазный асинхронный двигатель как следует из названия, питается от однофазной сети. От трех фазного двигателя он отличается статором. На котором в общем случае находится одна обмотка. На самом деле их как правило две но может быть и три. Ротор же однофазного двигателя ничем не отличается от ротора трех фазного двигателя. Это короткозамкнутая обмотка.

Статорная обмотка однофазного двигателя занимает две трети окружности статора. То есть формируется пара полюсов. При прохождении через нее переменного синусоидального тока образуется неподвижное магнитное поле. Статор не заполняется обмоткой полностью, так как это экономически не выгодно. Мощность при этом увеличится на 12 процентов а затраты и вес значительно.

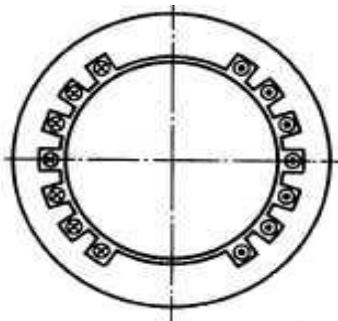


Рисунок 1 . Статор однофазного асинхронного двигателя

Поле статора неподвижно оно как бы пульсирует. При этом формируются два момента вращения направленные в противоположные стороны. Одна часть статорной обмотки тянет ротор в одну сторону другая же в противоположную. Таким образом, при подаче тока на статорную обмотку ротор вращаться не будет. Для этого необходим начальный момент, который повернет ротор в какую-либо сторону.

Пуск такого двигателя можно совершить и вручную крутнув вал. Но чаще для пуска двигателя применяют дополнительную обмотку, которая находится на статоре и называется пусковой. Она подключается к той же фазе что и рабочая, но через фазосдвигающую цепь. В качестве такой цепи может выступать емкость резистор или катушка.

При подключении пусковой обмотки к питающей сети через конденсатор ток в пусковой обмотке сдвигается на 90 градусов. Также на 90 градусов сдвигается и магнитное поле. Вообще говоря угол смещения тока можно регулировать подобрав величину емкости. Таки образом будет регулироваться пусковой момент.

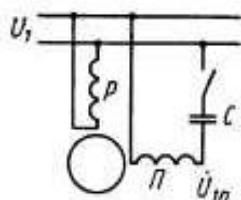


Рисунок 2. Фазосдвигающая цепь в виде пускового конденсатора

В момент пуска фазосдвигающая цепь подключается к пусковой обмотке, тем самым обеспечивая вращающееся магнитное поле. Которое, взаимодействуя с короткозамкнутым ротором, начинает его раскручивать. Время в течении которого пусковая обмотка подключена к питающей сети достаточно мало. Обычно оно составляет около трех секунд. За это время ротор выходит почти на полную скорость вращения и необходимость в пусковой обмотке отпадает. Пусковая емкость отключается от обмотки.

Так как время работы пусковой обмотки невелико ее, как правило, выполняют проводом меньшего сечения и меньшим числом витков. Иногда пусковую обмотку выполняют тем же проводом что и рабочую. Тогда при использовании фазосдвигающей цепи можно улучшить механические характеристики двигателя. В этом случае параллельно пусковой емкости включается рабочая. Эта ёмкость по величине меньше пусковой и, следовательно, обладает большим сопротивлением. Таки образом ток, протекающий во второй обмотке, будет меньше пускового.

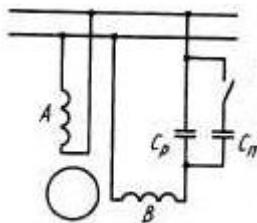


Рисунок 3 . Использование второй обмотки в качестве рабочей

После отключения пусковой емкости дающей пусковой момент вращения она отключается, а вот рабочая емкость остается, обеспечивая вращающееся магнитное поле и во время работы.

Основным недостатком однофазного асинхронного двигателя является то что он не обладает пусковым моментом. И, следовательно, необходимо применять какие либо меры по его пуску. Также в однофазном двигателе частота вращения ниже, чем у трех фазного. Так как встречное поле, формируемое второй половиной статорной обмотки, тормозит ротор.

Также из-за тормозящего поля падает и КПД двигателя. У однофазного двигателя такого же габарита, как и трех фазный мощность будет на одну треть меньше.

1. 16 Лекция № 24,25 (4 часа).

Тема: «Электрические машины постоянного тока. Коллекторные машины»

1.16.1 Вопросы лекции:

1. Принцип действия и конструкция
2. ЭДС якоря и электромагнитный момент. Реакция якоря. Коммутация
3. Работа машины в режиме генератора.

4. Работа машины в режиме двигателя. Характеристики двигателей с различным способом возбуждения

5. Пуск двигателя и регулирование частоты вращения.

1.16.2 Краткое содержание вопросов:

1 Принцип действия и конструкция.

Классификация электрических машин

По роду потребляемого или вырабатываемого напряжения и тока, различают электрические машины постоянного и переменного тока. По характеру преобразования энергии и те, и другие ЭМ классифицируются на генераторы, вырабатывающие ЭЭ, и двигатели, потребляющие ЭЭ. Машины переменного тока различают синхронные и асинхронные.

Рассмотрим основные рабочие узлы машины постоянного тока. Корпус или станина машины выполнена литой из чугуна или сварной из стали. На внутренней поверхности станины, с помощью винтов, крепятся, сборные из изолированных листов электротехнической стали, полюсные наконечники. На наконечниках расположены катушки, выполненные из медных изолированных проводов. Катушки соединяют между собой последовательно, образуя обмотку возбуждения. На рисунке изображена одна пара полюсов, служащая для возбуждения основного магнитного потока, промышленность изготавливает машины с большим числом пар полюсов (дополнительные), служащими для хорошей коммутации.

Внутри станины с индуктором расположена вращающая часть машины – якорь. Он состоит из вала, сердечника с якорной обмоткой и коллектора.

Вал крепится посредством подшипниковых узлов к крышкам станины. На валу якоря запрессован наборный сердечник, изготовленный из штампованных листов электротехнической стали, в пазы которого уложена якорная обмотка. Секции якорной обмотки, выполненные изолированным медным проводом, могут соединяться между собой как последовательно, так и параллельно, образуя петлевую или волновую обмотки. Особенностью обмотки машин постоянного тока является их замкнутость, создаваемая путем присоединения начал и концов секций к коллектору.

Коллектор представляет собой цилиндр из медных пластин трапециевидной формы (ламелей), изолированных друг от друга и от вала. К пластинам припаиваются начала и концы секций якорной обмотки. Для снятия постоянного напряжения или подвода напряжения на якорную обмотку служат щетки. Угольные или медные щетки, установленные в щеткодержателях, накладываются на поверхность коллектора и прижимаются пружиной.

Совокупность магнитных полюсов и обмоток возбуждения называется индуктором. Назначение индуктора - создавать магнитный поток. Станина машины также служит частью магнитопровода (ярмом) машины, обеспечивая замкнутость магнитного потока. Назначение якоря – создавать ЭДС в обмотках якоря при его вращении в магнитном поле полюсов индуктора (генераторный режим) или электромагнитный вращающий момент при взаимодействии тока якоря с магнитным полем полюсов (двигательный режим).

Назначение коллектора – выпрямлять индуцированную в обмотках якоря ЭДС, т.е. обеспечивать постоянную полярность напряжения на щетках генератора постоянного напряжения, или сохранять неизменным направление тока во внешней цепи. Таким

образом, коллектор является механическим выпрямителем переменного тока. При работе машины в двигательном режиме к якорю подводят постоянный ток из сети. В этом случае роль коллектора – обеспечивать создание постоянного по знаку врачающего момента путем изменения направления тока в проводниках якорной обмотки.

Рассмотрим принцип действия коллектора как выпрямителя переменной ЭДС. Пусть между полюсами расположен якорь с одним витком. Проводники присоединены к простейшему коллектору, состоящему из двух полуколец. На коллектор наложены щетки, полярность которых обозначена знаками «+» и «-». Вращаем виток с угловой скоростью ω .

В витке индуцируется ЭДС, равная:

$$e_\vartheta = 2e_1,$$

где e_1 - ЭДС, индуцируемая в каждом из проводников витка.

При повороте витка на 90° , индуцируемая ЭДС достигнет своего максимального значения. Во внешней цепи появляется ток, направление которого к щетке, обозначенной знаком «+». При повороте витка на 180° величина ЭДС будет равна нулю. Дальнейший поворот витка приводит к индуктированию в нем ЭДС и появлению тока. При этом, направление тока к щетке со знаком «+» сохраняется. При повороте витка на 360° ЭДС в нем равна нулю. Таким образом, полярность на щетках, при вращении витка всегда одинакова.

Если увеличить число витков в два раза и расположить их со сдвигом на 90° , то амплитуда колебаний напряжения на щетках уменьшается. Таким образом, увеличение числа секций якорной обмотки и ламелей коллектора приводит к уменьшению пульсации ЭДС и тока.

2 ЭДС якоря и электромагнитный момент

Для всех машин ПТ основными являются уравнения: ЭДС, индуцируемой в якоре; и электромагнитного момента взаимодействия магнитного поля машины и тока якоря.

Величина ЭДС, индуцированной в проводнике якорной обмотки, пропорциональна магнитной индукции, длине проводника и окружной скорости якоря.

$$e = Blv.$$

Чтобы определить среднее значение этой ЭДС подставим среднее значение магнитной индукции под полюсом в пределах полюсного деления

$$E_{1cp} = B_{cp}lv.$$

Окружную скорость можно выразить через частоту вращения якоря, ширину полюсного деления и число полюсов:

$$v = \frac{2p\pi n}{60}$$

$$E_{1cp} = \frac{2p\tau}{60} n B_{cp} l = \frac{2p}{60} n \Phi_0$$

где $2p$ - число полюсов машины;

Φ_0 - магнитный поток одного полюса, В·сек;

n - скорость вращения якоря, об/мин.

Обмотка якоря делится щетками, скользящими по ламелям, на параллельные ветви. ЭДС на щетках, или ЭДС машины равна ЭДС одной параллельной ветви. Следовательно,

для определения величины ЭДС машины достаточно определить значение ЭДС любой параллельной ветви.

Если полное число проводников якорной обмотки обозначить N , а число параллельных ветвей обмотки якоря $2a$, то ЭДС машины при холостом ходе выразится:

$$E_0 = E_{1cp} \cdot \frac{N}{2a} = \frac{pN}{60a} \cdot n \cdot \Phi_0 = k_e \cdot n \cdot \Phi_0.$$

где $k_e = \frac{pN}{60a}$ - конструктивная постоянная для данной машины.

Таким образом, из уравнения следует, что величина ЭДС машины зависит от скорости вращения якоря машины, магнитного потока, или от величины тока обмотки возбуждения, создающей этот магнитный поток. Поэтому величину ЭДС можно изменять за счет изменения скорости вращения ротора или тока обмотки возбуждения. Второй способ получил широкое применение как более удобный.

Данное уравнение ЭДС справедливо при холостом ходе, т.е. когда ток якоря равен нулю, существует только магнитный поток полюсов. При этом щетки расположены на геометрической нейтрали, т.е. линии, перпендикулярной оси магнитного потока основных полюсов (линия АВ).

Также значение ЭДС зависит от положения щеток. Полученное выражение ЭДС справедливо, если щетки расположены на геометрической линии, перпендикулярной оси магнитных полюсов. При смещении щеток относительно геометрической линии машины в другое положение, например CD, ЭДС машины будет уменьшаться.

При подключении к цепи якоря нагрузки, в ней проходит ток I_α , создающий свой магнитный поток якоря Φ_α . Воздействие магнитного потока якоря на основной магнитный поток называют реакцией якоря. Магнитный поток машины является результатом наложения потоков магнитных полюсов и якоря:

$$\Phi = \Phi_0 + \Phi_\alpha.$$

Таким образом, реакция якоря при работе машины в генераторном режиме, искаивает основное магнитное поле, и уменьшает индуцируемую ЭДС. Для сохранения величины ЭДС необходимо увеличить основной поток, т.е. увеличить ток обмотки возбуждения.

Электромагнитный момент

При работе машины в двигательном режиме, взаимодействие тока якоря с магнитным полем машины создает вращающий момент.

На каждый из N активных проводников обмотки якоря действует электромагнитная сила:

$$F_k = BIl.$$

Сумма этих сил создает вращающий электромагнитный момент:

$$M_{\text{эм}} = \frac{D}{2} \sum_{k=1}^N F_k.$$

Воспользовавшись понятием среднего значения индукции под полюсом, получим:

$$M_{\text{эм}} = \frac{D}{2} \sum_{k=1}^N F_k = \frac{D}{2} NB_{1cp} Il$$

Окружность якоря выразим через ширину полюсного деления $\pi D = 2p\tau$, а затем перейдем от магнитной индукции к магнитному потоку:

$$M_{\mathcal{E}M} = \frac{2p\tau}{2\pi} NB_{1cp} Il = \frac{p}{\pi} NI\Phi$$

Наконец, вместо тока одного проводника введем в выражение момента общую силу тока якоря: $I_{\mathcal{A}} = 2aI$

$$M_{\mathcal{E}M} = \frac{p}{2a\pi} N\Phi I_{\mathcal{A}} = C_M \Phi I_{\mathcal{A}},$$

$$C_M = \frac{pN}{2a\pi}$$

- величина, постоянная для данной машины.

Для двигателей постоянного тока также важной характеристикой является скорость вращения. Ток якоря подается в обмотки якоря из внешней цепи, и его величина определяется отношением разности приложенного напряжения сети и противоЭДС к сопротивлению якорной обмотки:

$$I_{\mathcal{A}} = \frac{U - E}{R_{\mathcal{A}}}.$$

Выражение для скорости вращения двигателя постоянного тока может быть получено из уравнения напряжения:

$$U = E + I_{\mathcal{A}} R_{\mathcal{A}} = k_e \cdot n \cdot \Phi_0 + I_{\mathcal{A}} R_{\mathcal{A}}$$

$$n = \frac{U - I_{\mathcal{A}} R_{\mathcal{A}}}{k_e \cdot \Phi_0}.$$

Коммутация тока и способы ее улучшения

Под коммутацией понимается комплекс явлений, имеющих место при переключении секции обмотки якоря из одной параллельной ветви в другую.

Это явление связано: с изменением направления тока одной секции обмотки на обратное; коротким замыканием коммутируемой секции щеткой через две соседние коллекторные пластины в момент их перемещения под щеткой и другими явлениями.

Так как процесс коммутации каждой секции протекает в очень короткий промежуток времени (одна или несколько миллисекунд), то в секции происходит резкое изменение тока и, следовательно, магнитного потока. Отсюда – наведение в секции значительной ЭДС самоиндукции e_L , которая вызывает в замкнутой через щетку секции большой по величине добавочный ток I_d . Добавочный ток, налагаясь на ток якоря, проходящий через щетку, изменяет плотность тока в последней, что приводит к искрению между щеткой и коллектором. Искрение может перерастти в круговой огонь по коллектору – огневую ленту. Механическая причина искрения – ухудшение контакта между ламелью и щеткой, возникающего вследствие неровности поверхности коллектора или ослабления прижимной пружины. Искрение вызывает чрезмерное нагревание и обгорание щеток и пластин коллектора.

Так как основной причиной искрения является добавочная ЭДС самоиндукции, возникающая в секции при ее коммутации, то для получения безыскровой работы машины необходимо ввести в секцию еще одну ЭДС e_k , которая компенсирует ЭДС самоиндукции. Следствие нормальной коммутации является равенство двух ЭДС:

$$e_k = -e_L.$$

Существует два способа получения компенсационной ЭДС:

1 Смещение щеток за положение физической нейтрали;

2 Установка дополнительных полюсов, создающих добавочное магнитное поле в зоне коммутации.

Следовательно, изменяя величину магнитного потока за счет смещения щеток на больший или меньший угол или устанавливая дополнительные полюса на геометрической нейтрали машины и включая их обмотку возбуждения последовательно с обмоткой якоря, можно, можно получить нормальную безыскровую коммутацию.

Угол смещения щеток относительно физической нейтрали зависит от нагрузки во внешней цепи, что предоставляет определенные сложности при эксплуатации машины. Поэтому второй способ является предпочтительным, т.к. последовательное соединение обмоток возбуждения дополнительных полюсов и якоря характеризуется одним током. Изменение нагрузки во внешней цепи влияет на ток якоря, и как следствие, на магнитное поле дополнительных полюсов.

При работе машины в генераторном режиме полярность дополнительного полюса должна быть как у главного полюса, следующего по направлению вращения якоря.

При работе машины в двигательном режиме полярность дополнительного полюса должна быть как у главного полюса, предыдущего по направлению вращения якоря.

Достоинства и недостатки

Машины постоянного тока (**МПТ**) являются обратимыми, т. е. они могут работать в качестве генератора (**ГПТ**) или двигателя (**ДПТ**) без изменения схемы.

Широкое применение **ДПТ** обусловлено следующими причинами:

возможность плавного регулирования частоты вращения вала;

хорошие пусковые свойства: большой пусковой момент при сравнительно небольшом пусковом токе.

Основной недостаток **МПТ** - наличие щеточно-коллекторного узла, который требует тщательного ухода в эксплуатации и снижает надёжность машин. Кроме того, для питания **ДПТ** требуются источники постоянного тока (**ГПТ** или выпрямители). Напомним, что основным видом электроснабжения промышленных предприятий является электроэнергия переменного тока, передаваемая по трёхфазной сети.

ДПТ применяют в электротранспорте, в приводах прокатных станов, в системах автоматического регулирования и др. **ГПТ** используют в качестве возбудителей для питания обмоток возбуждения мощных синхронных машин, цеховых сетей постоянного тока, в частности, для питания **ДПТ**, электромагнитов, для питания электролитических ванн, зарядки аккумуляторов, сварки, в качестве датчиков частоты вращения и др.

3. Работа машины в режиме генератора

ГПТ по способу их возбуждения делятся на две основные группы: генераторы с независимым возбуждением и генераторы с самовозбуждением.

У генераторов с независимым возбуждением обмотка возбуждения имеет электрического соединения с обмоткой якоря и питается от постороннего источника постоянного тока.

Генераторы с самовозбуждением не нуждаются в постороннем источнике возбуждения, получая ток возбуждения от своего якоря. Принцип самовозбуждения основан на остаточном магнетизме, т.е. на остаточной магнитной индукции в полюсах машины, сохранившейся в них после работы.

Вольтметр, подключенный к якорю фиксируют величину ЭДС от остаточного магнитного поля. В цепь возбуждения включают реостат с большим сопротивлением. При вращении якоря первичным двигателем величина ЭДС увеличивается до номинального

значения, при этом реостат постепенно выводят из цепи возбуждения (уменьшают сопротивление).

Если при вращении якоря величина ЭДС будет уменьшаться, необходимо увеличить сопротивление пускового реостата и сменить полярность обмоток возбуждения, т.к. в данном случае происходит размагничивание машины. Генераторы с самовозбуждением получили широкое применение.

По способу соединения обмоток возбуждения с обмоткой якоря генераторы с самовозбуждением делятся на три типа: с параллельным возбуждением (шунтовые); с последовательным возбуждением (серийные); со смешанным возбуждением (компаундные).

В генераторах со смешанным возбуждением имеются две обмотки – последовательная и параллельная, наложенные на главные полюса генератора.

Характеристики генераторов ПТ

Основными характеристиками ГПТ являются:
характеристика холостого хода;
внешняя характеристика;
регулировочная характеристика.

Характеристика ХХ – зависимость напряжения на зажимах генератора от тока возбуждения $U_0 = f(I_b)$ при постоянном числе оборотов якоря $n = const$ и отключенной внешней цепи. У генераторов с независимым возбуждением $I_a = 0$. У генераторов с самовозбуждением ток нагрузки $I_h = 0$, следовательно $I_a = I_b$, однако ток возбуждения составляет 2-5 % от номинального значения, следовательно, можно считать, что он равен нулю. Эта характеристика дает возможность оценить магнитные свойства или магнитное состояние машины. При холостом ходе напряжение равно ЭДС самоиндукции от остаточного намагничивания. Первый участок практически прямолинеен, что свидетельствует о ненасыщенном состоянии машины. По мере увеличения тока магнитопровод генератора насыщается - на характеристике средняя часть (колено). При дальнейшем увеличении тока происходит насыщение и характеристики описывается уравнением прямой линии.

Генератор должен быть рассчитан так, чтобы при нормальных условиях эксплуатации его магнитная система была в состоянии среднего насыщения, т.е. значение номинального значения напряжения должно находиться на участке колена характеристики ХХ.

Внешняя характеристика – зависимость напряжения генератора от тока якоря $U = f(I_a)$ при постоянной скорости вращения и постоянном значении тока возбуждения $I_b = const$ для генераторов с независимым возбуждением. Для генераторов с самовозбуждением последнее условие заменяется требованием постоянства сопротивления цепи возбуждения $R_b = const$. Внешняя характеристика позволяет судить об электрических свойствах генератора.

При увеличении тока якоря напряжение уменьшается, возрастает реакция якоря, что приводит к уменьшению ЭДС, индуцированную основным магнитным потоком. Эти две причины вызывают уменьшение напряжения генератора независимого возбуждения (кривая 1).

В генераторах с параллельным возбуждением к двум причинам уменьшения напряжения добавляется еще одна: ток обмотки возбуждения будет уменьшаться, что приводит к уменьшению основного магнитного потока, и как следствие уменьшению

ЭДС. Изменение напряжения в шунтовых генераторах происходит сильнее, чем в генераторах с независимым возбуждением (кривая 2).

В генераторах со смешанным возбуждением изменение напряжения при изменении тока якоря значительно меньше, чем у генераторов с независимым и параллельным возбуждением. Это объясняется действие последовательной обмотки, магнитный поток которой увеличивается с увеличением тока якоря и, суммируется с магнитным потоком параллельной обмотки, обеспечивая увеличение основного магнитного потока. Поэтому в начале характеристики увеличение ЭДС перекрывает падение напряжения в цепи якоря. При дальнейшем увеличении тока напряжение уменьшается, вследствие незначительного возрастания магнитного потока.

Регулировочная характеристика – для всех типов генераторов является зависимостью тока возбуждения от тока якоря $I_b = f(I_a)$ при постоянной скорости $n = const$ и напряжении $U = const$.

Регулировочная характеристика показывает, как следует изменять ток возбуждения при различных нагрузках, т.е. при различных значениях тока якоря, чтобы получить неизменной величину напряжения генератора.

Регулировочные характеристики снимают также как и внешние характеристики.

4 Работа машины в режиме двигателя. Характеристики двигателей с различным способом возбуждения

Двигатели ПТ, так же как и генераторы, по способу соединения обмоток возбуждения и якоря подразделяются на 3 типа: с последовательным, параллельным и смешанным возбуждением.

Пуск двигателей ПТ производится при помощи пускового реостата, включаемого последовательно в цепь якоря. При включении неподвижного двигателя ток якоря может достигать значения тока короткого замыкания, превышающего в десятки раз величину тока номинального режима, вследствие малого сопротивления обмотки якоря. Сопротивление пускового реостата ограничивает величину пускового тока. По мере разгона двигателя происходит увеличение противо-ЭДС, что позволяет, постепенно уменьшая сопротивление пускового реостата, вывести его в конце пускового из цепи якоря.

Характеристики ДПТ

Основные свойства ДПТ определяют по рабочим характеристикам, на которых изображаются зависимости скорости вращения, врачающего момента и КПД от тока якоря:

$$n = f(I_a); \quad M = f(I_a); \quad \eta = f(I_a),$$

при неизменных напряжении и токе возбуждения: $U = const$, $I_b = const$.

ДПТ с параллельным возбуждением.

Скоростная характеристика представляет собой линейную зависимость, при увеличении тока якоря до номинального значения скорость вращения уменьшается на 2-8%.

Моментная характеристика двигателя также линейна, при увеличении тока электромагнитный момент также возрастает.

Кривая КПД растет сначала линейно, затем при токе $0,8 I_{aH}$ достигает максимального значения, после чего начинает уменьшаться.

Характеристики ДПТ с последовательным возбуждением

В двигателях с последовательным возбуждением ток якоря равен току возбуждения, следовательно, при увеличении тока происходит увеличение магнитного потока. При ненасыщенном состоянии машины, магнитный поток будет пропорционален току якоря, и если учесть, что потери напряжения на сопротивлении якоря малы, тогда выражение скорости вращения будет иметь следующий вид. Непостоянство магнитного потока приводит к гиперболической форме скоростной характеристики, такая характеристика называется мягкой. При нагрузках двигателя, меньших 25 % от номинальной, скорость возрастает настолько, что становится опасной для механической целостности двигателя. Поэтому ДПТ с последовательным возбуждением нельзя пускать вхолостую или с небольшой нагрузкой.

По этой же причине моментная характеристика прямопропорциональна квадрату тока якоря, и представляет параболическую кривую.

Рабочие характеристики двигателя со смешанным возбуждением являются кривыми, средними между соответствующими характеристиками двух предыдущих типов двигателей.

5 Пуск двигателя и регулирование частоты вращения

Механические характеристики ДПТ

Правильный выбор электродвигателя для привода той или иной технологической машины требует согласования его механических характеристик.

Механической характеристикой двигателя называется зависимость скорости вращения от момента на валу $n = f(M)$

Для двигателей с параллельным возбуждением уравнение механической характеристики имеет вид:

$$n = \frac{U}{k_e \Phi_0} - M_{\text{эм}} \frac{R_{\text{я}}}{k_e C_M \Phi_0^2}.$$

При постоянных значениях напряжения, магнитного потока и сопротивления якоря, данная зависимость линейна. При увеличении электромагнитного момента скорость уменьшается.

В двигателях с последовательным возбуждением механическая характеристика представляет гиперболическую кривую.

1. 17 Лекция № 26 (2 часа).

Тема: «Основы электропривода»

1.17.1 Вопросы лекции:

1. Классификация аппаратуры управления и защиты электродвигателей.
2. Магнитные пускатели, автоматические выключатели, тепловые реле.
3. Приводные характеристики рабочих машин.
4. Принципы подбора электродвигателя к рабочей машине.

1.17.2 Краткое содержание вопросов:

1 Классификация аппаратуры управления и защиты электродвигателей

Аппаратура управления и защиты, являющаяся составной частью электропривода, предназначенного для управления электроприводом (пуск, остановка, реверсирование), защиты электродвигателей при аварийных режимах и для обеспечения работы электродвигателя в заданных режимах в соответствии с требованиями технологического процесса.

По способу управления ее можно разделить на аппаратуру неавтоматического (ручного) и автоматического управления.

2. Магнитные пускатели, автоматические выключатели, тепловые реле.

Аппаратура неавтоматического управления.

Аппаратура неавтоматического управления применяется для осуществления коммутации электрических цепей переменного тока (напряжением до 500В) и приводится в действие вручную. К ней относятся: рубильники, пакетные выключатели, контролеры, кнопочные станции, автоматы и т.д.

Рубильники - простейшие аппараты ручного управления изготавливаются одно- двух- и трехполюсными, с центральной или боковой ручкой, с боковым или центральным рычажным приводом.

Рубильники с центральной рукояткой используют для размыкания обесточенных цепей, с боковой ручкой - могут применяться и для управления цепями под нагрузкой.

Промышленность выпускает рубильники типа Р, РП, РПБ, РПЦ (привод центральный), РБ-31 (трехфазный, 100А)

Аппараты автоматического управления

Аппаратура автоматического управления применяется для пуска, остановки, торможения и регулирования частоты вращения электроприводов, их защиты при возникновении аварийных режимов, а также для осуществления дистанционного управления.

Для автоматического управления электроприводами в настоящее время широко используют как контактную аппаратуру (контакторы, магнитные пускатели, промежуточные реле и т.д.), так и бесконтактную. Контакторы герметизированные (герсионы) силовые КМГ17Д8 до 3 кВт, 380В.

Магнитные пускатели предназначены для дистанционного управления нагрузкой. Они являются наиболее распространенными коммутационными устройствами.

Магнитные пускатели осуществляют автоматическое управление электроустановками, служат для защиты электродвигателей от перегрузок или самопроизвольного включения после снятия напряжения.

Контакторы могут выпускаться на напряжение 220В и 380В. применяют габариты контакторов (магнитных пускателей) в зависимости от мощности двигателя.

Магнитный пускатель состоит из кнопочной станции и четырехполюсного контактора, одна пара контактов служит для блокирования кнопки «Пуск». Магнитные пускатели выпускают реверсивными и нереверсивными. Реверсивные служат для изменения направления вращения электропривода (после его остановки), состоят из двух нереверсивных магнитных пускателей, блокированных между собой.

Кнопочные станции магнитных пускателей можно установить на значительном расстоянии от пускателя.

Магнитные пускатели обеспечивают защиту от исчезновения напряжения в сети или его снижения на 10-50% от Ш. Термовые реле защищают электродвигатель от продолжительных перегрузок. (ПМЕ < 10 кВт и ПА > 10 кВт).

Аппаратура защиты электроприводов

Для защиты электродвигателей от токов короткого замыкания-(аварийный режим) служат предохранители и автоматы, от перегрузки (ненормальный режим) - повышение тока в обмотках двигателя - тепловые реле магнитных пускателей.

Тепловые реле встраиваются в магнитный пускатель.

Основной рабочий орган теплового реле - биметаллическая пластинка, состоящая из двух слоев прочно соединенных между собой разнородных металлов, имеющих различные коэффициенты линейного расширения. При нагреве биметаллическая пластинка изгибается и при помощи соответствующих устройств разрывает электрическую цепь. Предохранители - простая и недорогая защита токоприемников от токов короткого замыкания. Наиболее часто применяют пробочные и трубчатые предохранители. Пробочные - ПРС.

Трубчатые предохранители (ПР) состоят из разборного патрона, плавкой вставки и контактных стоек. Для ускорения гашения дуги, возникающей при горении плавкой вставки, внутрь патрона засыпается наполнитель (кварцевый песок, меловая пыль смешанная с асбестом и т.д.). В некоторых предохранителях дугогасительная среда создается газогенерирующим материалом (фиброй), из которой сделан патрон предохранителя. Плавкая вставка, которая размещается внутри патрона, имеет несколько сужений, в которых она расплавляется при токах, превышающих номинальные. Время расплавления плавкой вставки тем меньше, чем больше кратность тока, т.е. отношение протекающего тока к номинальному. Плавкая вставка не защищает электрооборудование от токовых перегрузок.

Номинальный ток плавкой вставки выбирают на 25% выше максимального длительного тока нагрузки:

$$I_{\text{дв}} > 1.25 I_{\text{нагр}}$$

Автоматические воздушные выключатели (автоматы).

Служат для ручного включения и отключения электрических цепей и автоматического отключения при коротких замыканиях или значительных перегрузках токоприемников. В настоящее время наиболее распространены автоматы типа А63, АК50, АП50, АЗ 100, АЗ700, АЕ2000 и т.д.

Они могут изготавливаться с электромагнитными расцепителями (для отключения токоприемников от токов к.з.), с тепловыми (для защиты от тепловых перегрузок, или с электромагнитными и тепловыми расцепителями). Кроме того, автоматы АП50 могут изготавливаться с расцепителями минимального 15 и максимального тока в нулевом проводе.

Электромагнитные расцепители срабатывают мгновенно при токах, больше тока уставки $I_y = 1.25 I_{\text{пуск}}$ и отключают все три фазы одновременно.

Действия реле заключается в следующем: катушка, включенная последовательно в силовую цепь двигателя при токе 200-250% от номинального притягивает якорь реле, преодолевая сопротивление пружины. На конце якоря находится штанга, которая упирается в рычаг. Отходя влево под действием штанги, рычаг разрывает контакты цепи управления и контактора.

Поскольку все устройства вышеперечисленные являются устройствами косвенного действия, они не всегда отражают истинный температурный режим обмотки электродвигателя. Поэтому промышленность стала выпускать устройства встроенной температурной защиты типа УЗ-1 А, УВТЗ-1, и др. В качестве датчика температуры служит позистор или термистр, встраиваемый в лобовые части обмотки статора.

Современные электродвигатели различают по принципу действия и конструкции, имеют в качестве выходного элемента вал, который вращается с определенной частотой. Во многих случаях частота вращения двигателя можно регулировать, но частота вращения рабочих машин изменяется в более широком диапазоне. Поэтому между двигателем и рабочей машиной, как правило, устанавливают передаточный механизм или трансмиссию. В качестве трансмиссии применяют редукторы, муфты, ременные передачи и др.

В современном производстве, работа двигателя не мыслима без применения различных средств управления, обеспечивающих его коммутацию, защиту, изменение частоты вращения и режима работы.

Совокупность двигателя, трансмиссии и управляющего устройства получила название привода. Привод, основным элементом которого является электрический двигатель, называют электроприводом. В общем случае электропривод, кроме указанных элементов может включать и преобразовательное устройство. Электропривод, управляющее устройство которого имеют элементы автоматического управления называют автоматизированным. В животноводстве автоматизированный электропривод применяют в таких процессах, как приготовление и раздача кормов, водоснабжение, уборка навоза, вентиляция и д.р.

3 Приводные характеристики рабочих машин.

Для правильного выбора электропривода к рабочей машине необходимо знать ее принцип действия, конструкцию, происходящий в ней технологический процесс. Важно знать характер изменения нагрузки на валу ротора машины от времени, связь между механическими величинами.

Совокупность сведений о рабочей машине, необходимых для разработки ее привода, принято объединять термин «приводные характеристики рабочей машины». К ним относятся технологические, кинематические, энергетические, механические, нагрузочные и т.д.

Технологические - определяют требования к электроприводу со стороны технологического процесса, т.е. его производительность, качества сырья и готового продукта, условий окружающей среды.

Благодаря знанию кинематических схем можно составить представление о частоте вращения или поступательной скорости любого элемента машины или механизма.

Энергетические характеристики позволяют выявить распределение мощностей между отдельными узлами или рабочими органами машины.

Механические характеристики представляют собой графическое изображение зависимости моментов или сил сопротивления от частоты вращения вала рабочей машины.

Нагрузочные диаграммы характеризуют зависимость момента на валу рабочей машины и подводимой к ней мощности от времени. Они отражают режим работы электродвигателя в динамике. Нагрузка рабочей машины может быть постоянной и переменной. С постоянной нагрузкой работают установки, имеющие постоянную подачу материала, его равномерную загрузку. При неравномерной подаче материала переменной оказывается и нагрузка.

Постоянную нагрузку имеют вентиляторы, насосы при постоянной производительности и напоре, ленточные транспортеры, кормораздатчики.

С переменной нагрузкой работают не только механизмы, которые не удается загрузить равномерно, но и механизмы, имеющие специфическую кинематику. Сюда относятся поршневые насосы, крошильно-шатунные, кулачковые механизмы.

Режимы работы электропривода.

Одной из важнейших приводных характеристик рабочей машины является ее нагрузочная диаграмма. Нагрузочная диаграмма позволяет сделать предварительный выбор электродвигателя и в первую очередь выбрать режим его работы, т.к. каждый двигатель рассчитан на работу в определенном режиме.

Номинальным режимом работы электродвигателя называют режим, на который он рассчитан и для которого предназначен заводом-изготовителем.

Имеют место три номинальных режима электродвигателей:
продолжительный, кратковременный и повторно-кратковременный с частыми пусками.
Продолжительными называют режимы работы при постоянной нагрузке, характеризующейся тем, что за время его работы превышения температуры двигателя над температурой окружающей среды практически достигает установившегося значения (A). В таком режиме работают центробежные насосы, вентиляторы, измельчители корма. Кратковременным называют режим работы, при котором за период постоянной нагрузки превышение температуры двигателя над температурой окружающей среды не достигает установившегося значения, а за период отключения все части двигателя охлаждаются до исходного состояния. В кратковременном режиме работают двигатели поворота лотков в инкубаторе, транспортеров уборки навоза, раздачи корма, сбора яиц.

При повторно-кратковременном режиме кратковременные нагрузки чередуются с кратковременными перерывами в работе, причем за время работы превышение температуры над температурой окружающей среды не достигает установившегося значения, а во время паузы оно не снижается до нуля. Повторно-кратковременный режим характеризуется длительностью цикла и коэффициентом относительной продолжительности включения. В соответствии с ГОСТом промышленность выпускает двигатели, рассчитанные на ПВ 15, 25, 40, 60%.

В П-К режиме работают двигатели подъемно-транспортных механизмов

4. Принципы подбора электродвигателя к рабочей машине

Выбор электропривода для рабочей машины включает выбор электродвигателя к рабочей машине, системы управления и при необходимости преобразователя. Выбор двигателя включает в себя выбор номинальной частоты вращения, номинальной мощности, конструктивного исполнения. Последнее определяется условиями окружающей среды, а также условиями крепления электродвигателя к рабочей машине.

По условиям защиты от воздействия окружающей среды промышленность выпускает электродвигатели защищенные, закрытые обдуваемые, продуваемые, взрывозащищенные. В двигателях зашитенного исполнения закрыты все токоведущие и врачающиеся части. Тем самым предотвращается попадание к ним капель и посторонних предметов и случайное прикосновение с ним. Воздух, необходимый для охлаждения, попадает внутрь двигателя через вентиляционные окна. У двигателей закрытого обдуваемого исполнения эти окна отсутствуют, а охлаждение осуществляется вентилятором, установленным снаружи на валу двигателя, и закрытым специальным кожухом. Этот вентилятор засасывает воздух через отверстия в кожухе и направляет его вдоль ребер статора, предназначенных для улучшения охлаждения. Кроме того, предусмотрена вентиляция внутри корпуса электродвигателя. При выборе двигателя необходимо знать характер помещения, в котором он будет установлен. Согласно ПУЭ, помещения подразделяют на ряд классов. В сухих помещениях рекомендуется применять электродвигатели серий А, А2, АЛ, АЛ2. Если влажность не выше 60% - целесообразно применять электродвигатели новой серии 4А, которые по сравнению с серией А2 имеют еще меньшую массу и габариты, меньший уровень шума, большие пусковые моменты, более высокий КПД и надежность. Во влажных помещениях (относительная влажность < 75%) применяют закрытые обдуваемые двигатели АО, А02, АО Л и А0Л2. Высокую надежность во влажных помещениях показали и двигатели серии 4А. В сырых помещениях влажность > 75% применяют двигатели закрытые, обдуваемые, во влагостойком исполнении, например А02-СХ, а также 4АР Особо сырье - влажность -100% - А02-СХ и 4АР. Эти же двигатели применяются и для работы на открытом воздухе.

В жарких помещениях (температура больше 30 градусов) используют двигатели защищенного исполнения. В пыльных помещениях - АО, А02, А02-СХ, 4АР и Д специальной модификации.

При выборе двигателя по частоте надо стремиться к тому, чтобы двигатель имел такую же частоту вращения, что и рабочая машина, так как это избавляет от промежуточной передачи.

В общем же случае задача выбора двигателя по частоте вращения - это задача экономическая. С увеличением частоты вращения двигателя, его габариты снижаются, а значит падает стоимость и снижается расход материалов. Кроме того высокоскоростные двигатели имеют более высокий КПД и cos ф по сравнению с тихоходными. С другой стороны большинство рабочих машин тихоходные, поэтому между двигателем и рабочей машиной необходима механическая передача. С увеличением передаточного числа стоимость передачи растет. Таким образом для каждой конкретной рабочей машины имеется своя оптимальная частота вращения. Вместе с тем определяющим элементом затрат является все-таки стоимость двигателя. Поэтому основное применение имеют двигатели 1500 обмин.

Выбор двигателя по мощности.

От правильного выбора мощности двигателя зависит надежность его работы и экономическая эффективность. При продолжительной перегрузке двигателя его изоляция перегревается, что ускоряет ее старение и снижает срок службы двигателя. Следовательно, применять двигатели заниженной мощности недопустимо. С другой стороны, завышение мощности двигателя увеличивает капитальные затраты, амортизационные отчисления и потери энергии, снижает коэффициент мощности.

Различают работу двигателя при постоянной и переменной нагрузке. При постоянной нагрузке мощность двигателя Рдв должна определяться в зависимости от мощности на валу машины Ррм, по формуле:

$$Р_{дв} > Р_{рм}$$

Знак $>$ говорит о том, что выбирается двигатель ближайшей большей стандартной мощности.

Если двигатель работает при температуре, отличной от 40 С, то он допускает степень загрузки, приблизительно равную:

При переменной нагрузке мощность электродвигателя выбирают по нагрузочной диаграмме, которая может представлять собой график изменения вращающегося момента, мощности или тока в зависимости от времени работы.

По нагрузочной диаграмме определяют эквивалентную мощность как среднеквадратичное значение. Эквивалентная мощность - это такая постоянная длительная мощность, которая вызывает такой же нагрев, как и действительная нагрузка.

Схема управления водонасосным агрегатом.

В животноводстве применяют автоматические насосные станции двух типов с воздушным водяным котлом и водонапорной башней. При надежном электроснабжении обычно пользуются безбашенными автоматическими водокачками. Для подъема воды чаще применяют водоструйные насосы, однако в случае использования колодцев их можно заменить вихревыми и лопастными насосами, а при использовании скважин -погружными насосами. При отсутствии воды в воздушно-водяном кotle контакты реле давления РД замкнуты. Магнитный пускателъ насоса К включает двигатель М, который подает воду потребителю. При уменьшении расхода воды - она поступает в котел, и давление воздуха в нем повышается. При достижении заданного значения давления контакты реле РД размыкаются и двигатель

отключается. Максимальное рабочее давление в системе 150 кПа. Для автоматизации башенных водокачек выпускают комплекты оборудования ПЭТ. При включении автоматического выключателя АВ напряжение подается на контакты МП-«К». О наличии напряжения свидетельствует лампа ЛЗ. Если вода в баке отсутствует, то контакты датчиков нижнего и верхнего уровней ДНУ и ДВУ открыты, реле Р обесточено, его контакты в цепи катушки «К» замкнуты. Магнитный пускатель К включается, а насос подает воду в водонапорную башню или бак. Об этом сигнализирует загорание красной Л К и погасание зеленой ЛЗ сигнальной лампы. По мере заполнения бака сначала запускаются контакты датчика нижнего уровня ДНУ. При дальнейшем заполнении бака замкнутся контакты датчика нижнего уровня ДНУ, что приведет к срабатыванию катушки реле Р, отключению магнитного пускателя К и остановке электродвигателя М насоса.

При заборе воды из бака вначале выходят из воды контакты ДВУ. Дальнейшее снижение уровня воды в баке вызывает разрыв в цепи контактов ДНУ, отключается катушка реле Р и замыкание его контактов в цепи обмотки магнитного пускателя К. электродвигатель М включается вновь.

НЭ - для подогрева электродов датчика уровня.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

2.1 Лабораторная работа № 1 (2 часа).

Тема: «Электробезопасность. Техника безопасности при эксплуатации электроустановок»

2.1.1 Цель работы: Ознакомиться с техникой безопасности при эксплуатации электроустановок

2.1.2 Задачи работы: изучить вопросы-

1. Опасность поражения электрическим током. Факторы, влияющие на степень поражения человека и животных.
2. Защита от поражения электрическим током. Заземление и зануление. Защитное отключение
3. Приемы оказания первой помощи пострадавшему от электрического тока
4. Электробезопасность на животноводческих фермах.

2.1.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Мультимедиа-проектор XD26U

2. Фильм по технике безопасности

2.1.4 Описание (ход) работы:

Переменный ток частотой 50 Гц и величиной 100 мА, протекая через тело человека более 3 с, может парализовать деятельность сердца. Большие токи парализуют деятельность сердца за доли секунды. Дыхание может быть парализовано уже при длительном токе 30 - 80 мА. Токи в 10 - 25 мА, протекающие между руками или между рукой и ногами; вызывают судорогу мышц (неотпускающий ток).

При расчетах электробезопасности принимают допустимыми:

Ток, мА.....	250	65	6
Продолжительность, с	0,2	1	30

Длительно допустимыми токи менее 0,8 - 1 мА. В зависимости от состояния кожи, пути тока и величины напряжения сопротивление тела составляет от 100 кОм до 1000 - 500 Ом.

Электроустановки по степени опасности поражения током подразделяют на две группы: до и выше 1000 В. Напряжение в 36, 24 и 12 В считают относительно безопасными.

В зависимости от характера окружающей среды помещения разделяют на три класса:

1. С повышенной опасностью, к которым относят: а) сырье с относительной влажностью воздуха, длительно превышающей 75%; б) с проводящей пылью, выделяющейся по условиям производства в таком количестве, что она может проникать внутрь машин и аппаратов, оседать на поверхности изоляции; в) с токопроводящими земляными, железобетонными, сырыми деревянными полами; г) жаркие с температурой более 30 С (длительно); д) с возможностью одновременного прикосновения человека к металлическим корпусам электрооборудования и к соединенным с землей металлоконструкциям здания или механизмам.

2. Особо опасные. Имеющие один из признаков: а) особо сырье с относительной влажностью воздуха, близкой к 100% (потолок, стены, все предметы покрыты влагой); б) с химически активной разрушающей изоляцию средой; в) имеющие одновременно два (или более) признака помещений с повышенной опасностью.

3. Без повышенной опасности (когда нет признаков, определяющих два первых класса).

2. Защита от поражения электрическим током.

Важнейшим средством защиты от прикосновения к частям электроустановки, normally находящимся под напряжением, служит электрическая изоляция. Ее сопротивление измеряют мегомметром на 1000 В не реже одного раза в 2 года у электропроводки в обычных помещениях и ежегодно в помещениях с едкими парами, сырых, особо сырых, взрыва- и пожароопасных. Если сопротивление между проводом одной из фаз и землей или между фазами на участке между последовательно

включенными плавкими предохранителями или за последним предохранителем менее 0,5 МОм, то изоляцию надо испытать в течение 1 мин напряжением 1000 В переменного тока или мегомметром на напряжение 2500 В. Для электродвигателей в холодном состоянии норма сопротивления изоляции 1 МОм.

Оголенные токоведущие части, которые невозможно расположить на высоте, недопустимой для прикосновения, защищают кожухами, сплошными или сетчатыми ограждениями.

Под проводами воздушных электрических линий работа экскаватором, стреловых кранов и стогометателей запрещена. Работу вблизи линий разрешают только при условии, что расстояние между крайней точкой машины и ближайшим проводом составляет не менее 1,5 м при напряжении линий до 1 кВ, 2 м - при напряжении 1 - 20 кВ и 4 м при 35 и 110 кВ. При передвижении крупных машин под проводами высоковольтных линий расстояние по вертикале между высшей точкой машины или груза и низшим проводом линии должно быть не менее 1 м при напряжении до 1 кВ, 2 м при напряжении 1 - 20 кВ и 2,5 м при 35 - 220 кВ.

Для защиты от прикосновения к нормально находящимся под напряжением частям электроустановок используют защитные изолирующие средства и инструменты, указатели напряжения, предупредительные плакаты. Последние подразделяют на предостерегающие, запрещающие, разрешающие, напоминающие.

Для защиты от поражения электрическим током при соприкосновении с частями электроустановок, которые нормально не находятся под напряжением, но при повреждении изоляции приобретают опасный потенциал, проводят порознь или в сочетании следующие защитные мероприятия: защитное заземление, зануление, защитное отключение, а также применяют двойную изоляцию, разделяющие трансформаторы; пониженное напряжение; выравнивание потенциалов.

Двойная изоляция заключается в наложении двух изоляционных слоев, каждый из которых длительно и надежно выдерживает рабочее напряжение.

Например, рукоятку ручного переносного светильника делают из диэлектрического материала с таким расчетом, чтобы обеспечивалась надежная изоляция на тот случай, если произойдет повреждение рабочей изоляции проводов внутри рукоятки. С двойной изоляцией, изготавливают некоторые типы электросверлилок (ГОСТ 8524 - 63). Поэтому, хотя корпус у них металлический, заземлять или занулять их не требуется, но надо периодически проверять мегомметром на 500. В сопротивлении рабочей изоляции между обмоткой и сердечником статора, а также защитную изоляцию между статором и металлическими деталями корпуса. При сопротивлении изоляции менее 0,7 МОм пользоваться сверлилкой запрещено.

В разделяющем трансформаторе первичное напряжение - до 1000 В, вторичное - до 4000 В. Надежность конструкции и изоляции такого трансформатора повышенная. Его защитное действие основано на отделении электроприемника от первичной сети заземления. Благодаря этому прикосновение к корпусу электроприемника, на которой произошел пробой изоляции, практически безопасно. Изоляцию испытывают в течение 1 мин напряжением в 4 кВ переменного тока 50 Гц между первичной и вторичной обмотками, а также между обмотками и корпусом. От разделяющего трансформатора можно питать только один электроприемник по сравнительно коротким

проводам с надежной изоляцией. Если электроприемник переносный, провод должен быть шлангового типа.

Мощности электроприемника и самого трансформатора должны быть такими, чтобы с первичной стороны трансформатор защищался плавким предохранителем с номинальным током вставки не более 15 А или автоматом с таким же током уставки, то есть трехфазный трансформатор с первичным номинальным напряжением 380 В не может иметь мощность более 10 кВА.

Запрещается заземлять или занулять вторичную обмотку разделяющего трансформатора или питающейся от него электроприемник, но корпус самого трансформатора должен быть заземлен или занулен в зависимости от режима работы нейтрали питающейся сети.

Пониженное напряжение (12 - 36 В) обычно получают от разделяющего трансформатора, например, для питания ручного переносного светильника. Пониженное напряжение является дополнительной гарантией безопасности. Пониженное напряжение можно применять и как самостоятельное защитное мероприятие. При питании от однородного общего понижающего трансформатора разветвленной сети 36 В для местного освещения на станках трансформатор нельзя считать разделяющим и нужно занулять не только его корпус, но и нейтраль или один из выводов вторичной обмотки.

3. Заземление и зануление.

Заземлением называют соединение частей электроустановки с заземляющим устройством (совокупность заземления и заземляющих проводников). Заземлитель - проводник или группа электрически соединенных проводников, находящихся в непосредственном соприкосновении с землей. Заземляющие проводники - металлические проводники, соединяющие заземляемые части электроустановки с заземлителем.

Защитное заземление применяют во всех электроустановках до 1000 В с незаземленной нейтралью.

В сельских сетях напряжением 380 В с наглухо заземленной нейтралью применяют зануление. Под занулением понимают соединение корпусов электроприемников, каркасов распределительных щитов и шкафов, стальных труб электропроводки, металлических оболочек кабелей и проводок, станины станков с заземленной нейтральной точкой (нулевой точкой) генератора или вторичной обмотки трансформатора, питающего сеть.

В качестве зануляющих обычно используют рабочие нулевые провода. К однофазным электроприемникам (например, светильникам и электроинструменту) прокладывают отдельный (третий) зануляющий проводник. При замыкании фазы на зануленный корпус электроприемника или другие детали установки происходит однофазное короткое замыкание (к. з.), которое должно вызывать достаточно быстрое (несколько секунд или доли секунды) отключение поврежденного участка электроустановки или электроприемника.

Применение в электроустановках напряжением до 1000 В с глухозаземленной нейтралью защитного заземления без связи с нулевой точкой источника запрещено. На случай обрыва нулевого провода на воздушных линиях и для снижения напряжения на зануленном оборудовании при повреждении изоляции в нем (в том числе при целом нулевом проводе) по концам линии или ответвленной длиной

более 200 м, а также в промежуточных точках не реже чем через 250 м делают повторные заземления нулевого провода. В помещениях без повышенной опасности поражения электрическим током при напряжении 380/220 В, а также во всех помещениях (кроме взрывоопасных) при напряжении 36 В и ниже переменного тока или 110 В и ниже постоянного тока зануление и защитное заземление не применяют.

Сопротивление заземлений повторных заземлителей нулевого провода не должно превышать 10 Ом. Если сеть питается от подстанции или электростанции с суммарной мощностью агрегатов до 100 кВа, то сопротивление каждого повторного заземлителя при их количестве не менее трех на линию может достигать 30 Ом.

Наименьшие допустимые размеры стальных зануляющих проводников указаны в таблице. На воздушных линиях стальные однопроволочные нулевые провода, используемые в качестве зануляющих, могут быть того же диаметра, что и фазные (наименьший - 4 мм на линии и 3 мм на ответвлении для ввода в дом).

Стальные элементы заземлителей и зануляющих (зануляющих)проводников

Проводимость зануляющих проводников из цветных металлов - не менее 0,5 от проводимости фазных проводников на данном участке (кроме воздушных линий,

<u>Тип проводников</u> <u>Наименьшие размеры</u>	В зданиях	в наружных установках	в земле
Круглые, диаметр мм	5	6	6
Прямоугольные:			
Сечение, мм ²	24	48	48
Толщина, мм	3	4	4
Угловые, толщина полок, мм	2	2,5	4
Трубчатые (газопроводные), толщина стенок, мм	2,5	2,5	3,5
Трубчатые (тонкостенные), толщина стенок, мм	1,5	не допускается	

питающих животноводческие фермы, и их внутренних проволок, где проводимости нулевых проводов должны быть не менее проводимости фазных). Наименьшие допустимые по механической прочности сечения зануляющих проводников из цветных металлов указаны в таблице.

В качестве зануляющих проводников в дополнение к ним, а когда достаточно по проводимости, то и вместо них следует применять так называемые естественные зануляющие проводники: металлические трубопроводы (кроме газопроводов и труб, содержащих горючие жидкости и газы), а также стальные конструкции зданий, подкрановые пути.

Металлические оболочки кабелей (но не проводов). Исключением являются взрывоопасные помещения класса В-1, где в электропроводках во всех случаях должен быть отдельный зануляющий проводник или специальная кабельная жила. Быстрое автоматическое отключение поврежденного участка или электроприемника обеспечивает ток металлического однофазного к. з. только при величине не менее трехкратного номинального тока плавкой вставки предохранителя или номинального тока расцепителя автомата с зависимой от тока характеристикой.

Во взрывоопасных наружных электроустановках или помещениях необходимая кратность - 4 для предохранителя и 6 для автомата с зависимой характеристикой. При установке автоматов с расцепителями, имеющими независимую характеристику электромагнитный без теплового реле или часовогого механизма), ток однофазного короткого замыкания должен в -1,4 раза превышать ток срабатывания расцепителя при номинальном токе автомата до 100 А, или в 1,25 раза при большем номинальном токе.

Защитное отключение

Защитное отключение происходит автоматически не более чем за 0,2 с. При повреждении изоляции относительно корпуса оборудования и для уменьшения вероятности поражения при однофазном прикосновении человека к сети 380/220 В. Применяют его вместо зануления или в дополнение к нему. Защитное отключение по току утечки уменьшает опасность поражения при прикосновении к токоведущим частям.

Защитное отключение по напряжению осуществляют при помощи реле напряжения типа РН-60 или ЭН-500. Вспомогательное заземление, к которому присоединена катушка автомата, должно иметь сопротивление не более нескольких сотен Ом (вместо 10 или 30 Ом, которое должно было бы иметь повторное заземление при использования зануления). Если корпус защищаемого оборудования связан с землей, помимо цепи через катушку автомата, то вспомогательное заземление должно отстоять от защищаемого оборудования не менее чем на 10 м.

Для защитного отключения по току утечки служит специальный автоматический выключатель, например типа **F1** котором применен трансформаторный фильтр токов нулевой последовательности с первичными обмотками для всех 4 проводов сети и с одной вторичной обмоткой, замкнутой на отключающую катушку автомата. Пока в защищаемых токоприемниках нет утечки тока через изоляцию на землю, в магнитопроводе трансформаторного фильтра сумма мгновенных значений магнитных потоков от всех четырех катушек равна нулю. Появление тока утечки определенной величины приводит к появлению во вторичной обмотке тока, достаточного для отключения автомата. Вместо вспомогательного заземления здесь можно использовать и зануление, но присоединять защищаемые металлические предметы к нулевому проводу надо до автомата по ходу энергии, а не после автомата. Иначе ток утечки будет проходить через фильтр и к месту повреждения и обратно, отчего автомат не сработает. Автоматы *F1* имеют токи срабатывания от 30 до 300 мА.

Разработаны для сельскохозяйственных установок защитно - отключающие устройства (ЗОУ) с токами срабатывания 10 и 20 мА. Надо помнить, что их нельзя применять для одновременной защиты большой группы электроприемников: в этом случае происходят ложные срабатывания из-за токов утечки, которые всегда есть даже в практически исправной электрической сети (например, на вводе фермы они иногда превышают 10 мА). ЗОУ применяют для индивидуальной защиты цепи одного электроприемника или группы из двух - трех приемников. Для обеспечения высокой чувствительности эти устройства снабжены полупроводниковыми усилителями между вторичной катушкой трансформаторного фильтра токов нулевой последовательности и катушкой магнитного пускателя или автомата, отключающего сеть.

Защитно-отключающее устройство ЗОУП-25 для передвижных электроустановок состоит из магнитного пускателя ПМЕ-236 и блока защитного устройства, встроенного в корпус пускателя вместо термобиметаллических реле. Оно применимо и для стационарных электроприемников в сети с заземленной нейтралью.

Реле утечки серии РУД-02 бывают двух исполнений: для однофазных двухпроводных цепей РУД-022 (применяют в жилых и вспомогательных помещениях; контакты обеспечивают непосредственное отключение и включение защищаемой цепи); для четырехпроводной сети с заземленной нейтралью - РУД-024 (применяют в комплекте с пускателем или автоматом, уже имеющимся в установке; контакты воздействуют на катушку пускателя или независимого расцепителя автомата). Реле РУД-024 допустимо к установке в помещениях с запыленной или агрессивной средой только в специальном защитном кожухе (например, в аппаратном ящике ЯАП-1 сборных распределительных устройств серии РУС).

4. Приемы оказания первой помощи пострадавшему от электрического тока

Пострадавшего нужно как можно быстрее освободить от действия тока. Для этого отключают ту часть электроустановки, которой касается пострадавший. При напряжении до 400 Вт. Для этого можно воспользоваться любыми не проводящими ток предметами: встать на сверток сухой одежды или на доску, обмотать шарфом руку, которой затем оттащить пострадавшего. Даже голой рукой можно взять пострадавшего за сухую одежду, но нельзя касаться его голого тела или обуви, которая может быть влажной или имеет металлические детали. Если пострадавший касается одного из проводов, то прервать ток можно, подсунув под пострадавшего сухую доску или оттянуть ноги от земли палкой ли с помощью сухой веревки. Иногда быстрее перерубить провода инструментом с изолированными ручками (рубить их - по одному, чтобы не появилась электрическая дуга из-за короткого замыкания).

Если напряжение установки более 400 В и быстрое отключение невозможно, то следует либо оттащить пострадавшего от частей установки под напряжением, пользуясь изолирующими защитными средствами, рассчитанными на это напряжение (штанги, клещи для предохранителей, а также диэлектрические боты и перчатки), либо вызвать автоматическое отключение установки, устройств в ней короткое замыкание на безопасном расстоянии от пострадавшего. Например, на воздушной линии набрасывают голый провод

на 2-3 фазы линии, предварительно присоединив этот провод какому-либо заземлителю. Набрасываемый провод после соприкосновения с проводами линии не должен касаться бросавшего или других людей, и никто не должен стоять ближе 5 метров от заземлителя.

После отключения линии напряжением выше 1000 В на ней может сохраниться опасный для жизни емкостный заряд. Лишь после надежного ее заземления к пострадавшему можно прикасаться без изолирующих штанг, клещей и т.п.

Прежде всего, надо постараться вызвать скорую медицинскую помощь, и, не теряя времени, одновременно оказать первую помощь пострадавшему.

Если пострадавший не дышит совсем или, находясь в бессознательном состоянии, дышит редко и судорожно, то нужно делать искусственное дыхание. Перед этим надо быстро расстегнуть одежду пострадавшего, стесняющую дыхание (галстук, пояс), но не следует раздевать его, так как это бесполезно отнимает время, а вероятность успеха тем меньше, чем позже начато искусственное дыхание. Нужно также раскрыть рот пострадавшего и удалить все, что может мешать дыханию (сместившиеся зубные протезы и т.д.).

Наиболее эффективным способом искусственного дыхания является следующее: Пострадавшего кладут на спину, подложив под лопатки что-либо мягкое так, чтобы голова запрокинулась назад как можно больше, зажимают

ему нос и, глубоко вдохнув, выдыхают воздух в рот пострадавшего. Назад воздух выходит сам.

Если у пострадавшего расширены зрачки и пульс не прощупывается даже на шее, то у него парализовано не только дыхание, но и сердце. Тогда искусственное дыхание чередуют с массажем сердца путем надавливания на нижнюю треть грудной клетки пострадавшего быстрыми толчками положенных одна на другую ладоней спасателя (там, где грудине выдается мечевидным отростком в виде угла над животом, но не «под ложечкой»). Делают 4-5 толчков со скоростью примерно раз в секунду так, чтобы грудине смешалась в направлении к позвоночнику на 4-5 см. Затем дважды спасатель делает глубокий вдох и, зажав ноздри пострадавшего, вдувает воздух ему в рот. Затем опять делает 4-5 нажатий на грудину и т.д.

Когда пострадавший пошевелит губами, веками или сделает глотательное движение горлом, нужно проверить, не начнет ли он дышать самостоятельно и равномерно. Искусственное дыхание прекращают, иначе оно может только повредить. Если же после нескольких мгновений ожидания окажется, что пострадавший не дышит, искусственное дыхание немедленно возобновляют. Летальным исходом несчастного случая можно считать только в том случае, если после часа искусственного дыхания в сочетании с массажем собственное дыхание у пострадавшего не появляется и резко расширенные зрачки не суживаются.

5. Электробезопасность на животноводческих фермах.

Большинство помещений животноводческих ферм по степени опасности поражения электрическим током относятся к особо опасным. В них запрещена работа на токоведущих частях, находящихся под напряжением, и замена под напряжением ламп. Сечение и марка нулевого провода на линии, питающей животноводческие

помещения, а также во внутренней проводке должны быть такими же, как и у фазных проводов. Электролампы следует равномерно распределить по фазным проводам и включать их трехполюсными выключателями. Однополюсные выключатели - только для светильников суммарной мощностью не более 20% от общей мощности освещения фермы. Все другие однофазные токоприемники, кроме имеющих мощность не более 0,6 кВт, включать на линейное напряжение, причем и в этом случае их мощность не должна быть более 1,3 кВт (иначе надо применять трехфазные).

Выключатели и предохранители размещают в соседних с сырьими сухих помещениях. Кнопки управления пусковой аппаратурой устанавливают у рабочих мест.

Троллейные провода или шины для электротранспорта или для облучательных и других установок в животноводческих помещениях подвешивают на высоте не менее 3 м. от уровня поля. Напряжение на них подают только на время работы.

Корпуса стригальных агрегатов, рубильников, чугунные крышки выключателей зануляют. В качестве заземляющих электродов передвижного электростригального пункта применяют два отрезка двухдюймовой трубы, заглубленных в землю не менее чем на 1,5 м. Электромонтер, обслуживающий электрооборудование, должен иметь III квалификационную группу; он может менять плавкие предохранители, делать переключения на щитах и сборках. Участие второго лица требуется только при работах на высоте более двух метров, с лестниц или подмостей или при работах без снятия напряжения (в помещениях без повышенной опасности).

Персонал, обслуживающий установки для ультрафиолетового облучения животных или птицы, должен иметь квалификацию по III группе, пользоваться очками с дымчатыми или бесцветными, но толстыми стеклами (не менее 3 мм.) и по возможности не находится в зоне действия ультрафиолетовых лучей.

При использовании электроизгороди запрещается браться за проволоку, осматривать и исправлять ее, когда она находится под напряжением. Не следует включать пульсатор до присоединения к проволоке изгороди и открывать крышку включенного пульсатора в сырую погоду. Строго запрещается подключать батарейную электроизгородь к электросети. Наиболее эффективным мероприятием для обеспечения электробезопасности крупного рогатого скота, является применение выравнивания потенциалов путем заложения в пол под передними и задними ногами коров (на расстоянии 1,2-1,4 м.) стальной катанки диаметром 6-8 мм., соединенной со всеми металлоконструкциями и трубопроводами, доступными для прикосновения животных. Раз в полгода целостность выравнивающих проводников проверяется измерением сопротивления петли из двух проводников. Оно должно быть не более 1 Ом.

Если стойловое помещение не содержит металлоконструкций или транспортеров, вместо выравнивания потенциалов можно применять изоляционные вставки длиной не менее 1 м. Ими отделяют автопоилки от водопроводной магистрали, электрически связанной с корпусом электронасоса, электроводонагревателя. Длину вставки определяют по номограмме. Изолирующую вставку длиной 20-25 см., включают в вакуумпровод доильной установки. Этим защищают коров от заноса опасного потенциала.

Электропроводку в помещениях для скота прокладывают на высоте не менее 2,5 м. Если это требование выполнить невозможно, проводку прокладывают в стальных трубах

или выполняют защищенными проводами. Между электропроводкой и трубопроводами внутри здания выдерживают расстояние не менее 10 см.

Для изоляции электродвигателей и электрических аппаратов на машинах и механизмах доступных прикосновению животных, между корпусами электрооборудования и этими машинами применяют изолирующие муфты, прокладки или звенья, которые должны выдерживать в течение 1 мин., испытательное напряжение 4 кВ., переменного тока частотой 50 Гц.

Электродные водонагреватели допустимы к эксплуатации только с блокировкой, исключающей открытие водоразборного крана до отключения нагревателя от электросети. Кроме того, электродные водонагреватели должны быть трехфазными, с незануленным и незаземленным корпусом, который зануляют. В зануляющий провод включают катушку токового реле или расцепителя автомата, срабатывающего при токе в 20% от номинального тока водонагревателя. Трубопроводы для электропроводки и для воды зануляют. Последние присоединяют к корпусу водонагревателя через изолирующие вставки с сопротивлением столба воды не менее 2000 Ом при расчетном удельном сопротивлении воды не более 2 Ом.

Электрифицированные передвижные машины и аппараты (или стационарные, но с питанием по гибкому кабелю), если они не перемещаются сами, на время передвижения отключают от источника питания, а кабель отсоединяют от неподвижного щитка (для предотвращения чрезмерного натяжения, отчего может повредиться изоляция или оборваться зануляющая жила). Для присоединения передвижных и переносных электроприемников в помещениях ферм размещают штепсельные соединения в герметизированном исполнении с зануляющим контактом.

2.2 Лабораторная работа № 2,3 (4 часа).

Тема: «Электрические измерения и приборы»

2.2.1 Цель работы: Ознакомиться и научиться использовать электрические измерительные приборы. Обучиться решению задач

2.2.2 Задачи работы: изучить вопросы-

1. Основные системы механизмов электроизмерительных приборов
2. Схемы включения приборов для измерения тока, напряжения, сопротивления, мощности
3. Основные погрешности измерения
4. Способы расширения пределов измерения.

2.2.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Источник питания ИП 1
2. амперметр $\pm 23\text{A}$ (4 шт.), $\pm 20\text{A}$
3. вольтметр $\pm 150\text{V}$ (3 шт.); $\pm 300\text{V}$

4. лампы накаливания 250В 150 Вт (4 шт.), 250В 100 Вт (10 шт.);
5. резистор ПЭВ25 (4 шт.), ПЭВ 10 (3шт.)

2.2.4 Описание (ход) работы:

Электрические измерительные приборы - необходимые элементы электрических цепей при контроле режимов работы электрооборудования, учете электроэнергии, при экспериментальном исследовании электрических цепей, при получении достоверной информации для систем автоматического управления.

Электрические измерительные приборы измеряют как электрические величины (ток, напряжение, мощность, $\cos \phi$, частоту, электрическую энергию и т.д.), так и неэлектрические величины (температуру, давление и др.).

Электрические и измерительные приборы отличаются высокой чувствительностью, простой конструкцией и надежностью. Показания электрических измерительных приборов относительно просто передавать на дальние расстояния (телеизмерения) при автоматизации и управлении технологическими процессами.

Недостатком электрических измерительных приборов является невозможность их применения на взрывоопасных и пожароопасных помещениях.

1. Системы электрических измерительных приборов

Электрический измерительный прибор состоит из подвижной и неподвижной частей. По перемещению подвижной части измеряют значения измеряемых величин.

В зависимости от принципа действия различают системы: магнитоэлектрическую, электромагнитную, электродинамическую, тепловую, индукционную и др.

Таблица 1. - Системы электрических измерительных приборов и их условные обозначения

N п/п	Система прибора	Обозначение
1	Магнитоэлектрическая	
2	Электромагнитная	
3	Электродинамическая	
4	Тепловая	
5	Индукционная	

В таблице 1 приведены условные обозначения наиболее широко применяемых систем приборов. Эти обозначения и другие важнейшие характеристики приборов указываются на лицевой панели электрических измерительных приборов (рис. 1).

Работа приборов магнитоэлектрической системы основана на взаимодействии поля постоянного магнита и подвижной катушки.

На рисунке 2 показана основная часть магнитоэлектрического измерительного механизма; подвижная катушка, расположенная в сильном равномерном радиальном магнитном поле.

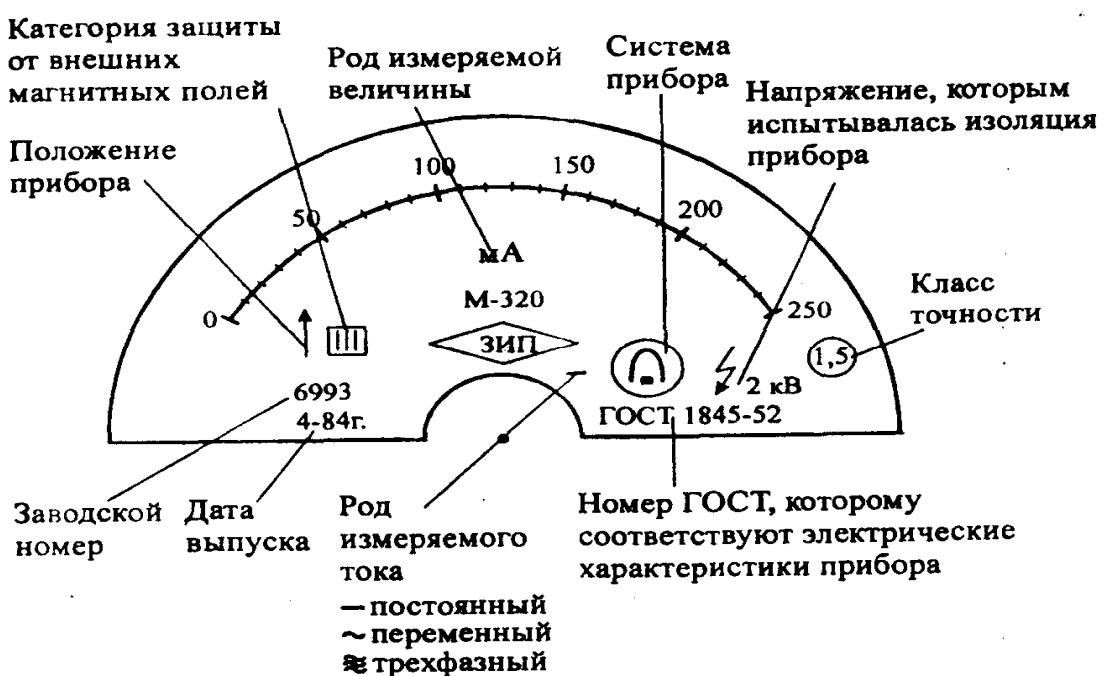


Рисунок 1 - Шкала измерительного прибора

Подвижная катушка из тонкого медного или алюминиевого провода намотана на каркас (или без него). На оси подвижной части прибора укреплена стрелка, конец которой перемещается по шкале электрического измерительного прибора.

При протекании по катушке электрического тока согласно закону Ампера возникают силы F , стремящиеся повернуть катушку. При равенстве врачающего Мвр и противодействующего Мпр моментов катушка останавливается.

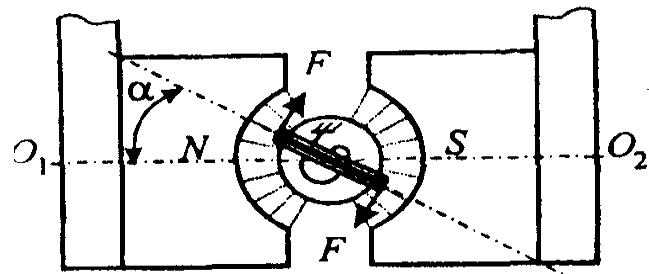


Рисунок 2. подвижная катушка в радиальном магнитном поле

Для создания противодействующего момента Мпр одновременно для подвода тока в катушку служат две спирали.

Общее выражение для врачающего момента имеет вид:

(1.)

$$M_{\text{вр}} = dW/d\alpha$$

где W - энергия электромагнитного поля, сосредоточенная в измерительном механизме;

α - угол поворота подвижной части.

Энергия электромагнитного поля W равна работе g при перемещению активной части провода катушки в постоянном магнитном поле с индукцией B

Согласно закона Ампера сила F , действующая часть провода катушки при протекании по ней тока I равны:

$$F = I \times B \times \sin \phi \quad (2)$$

где ϕ - угол между направлением тока в активной части провода и индукцией магнитного поля;

l - длина активной части катушки.

В нашем случае $\phi = \pi/2 \sin \phi = 1$. Следовательно, работа по перемещению двух активных частей провода катушки, перпендикулярных плоскости чертежа (рис. 2), равна

$$A = W = 2F \times X = 2I \times B \times l \times r, \quad (3)$$

где $X = rx$ α - длина траектории активной части провода;

r - радиус траектории;

α - угол поворота катушки. Подставляя (3) в (1) получаем:

dW

$$M_{\text{вр}} = \frac{dW}{d\alpha} = 2I \times B \times l \times r.$$

Так как противодействующий момент $M_{\text{вр}}$ создается упругими элементами, то для установившегося режима

$$M_{\text{пр}} = M_{\text{вр}} \text{ или } W \cdot \phi = 2I \times B \times l \times r,$$

где W - удельный противодействующий момент, зависящий от свойств упругого элемента. Следовательно, угол поворота катушки α пропорционален току I :

$$\alpha = \frac{2B \cdot l \cdot r}{W} \cdot I = S \cdot I, \quad (4)$$

где S - чувствительность измерительного механизма.

Как видно из (6.4) при изменении направления тока в катушке меняется на обратное и направление отклонения подвижной части и указателя (стрелки).

Для получения отклонения указателя в нужную сторону необходимо при включении прибора соблюдать указанную на приборе полярность

Достоинства приборов магнитоэлектрической системы: высокая чувствительность к измеряемой величине, высокая точность (класс точности 0,05 малое потребление мощности, малая чувствительность к внешним магнитным полям). Недостаток - возможность применения только в цепях постоянного тока.

В приборах электромагнитной системы в неподвижной катушке, по которой протекает измеряемый ток, создает магнитное поле, в которое втягивается, поворачиваясь на оси, ферромагнитный сердечник, намагничиваемый этим же полем. Причем втягивающее происходит как при постоянном, так и при переменном магнитном поле, а угол поворота α пропорционален квадрату силы измеряемого тока. Поэтому:

а) приборы электромагнитной системы могут применяться в цепях постоянного и переменного тока;

б) шкала прибора неравномерна, сильно сжата в начальной части.

Достоинства электрических измерительных приборов электромагнитной системы: простота и надежность конструкции, небольшое потребление мощности.

Недостатки: невысокая чувствительность к измеряемой величине, относительно низкая точность (класс точности до 1.0), большая чувствительность к внешним магнитным полям.

Вращающий момент электромагнитного измерительного механизма

$$M_{sp} = \frac{dW_e}{d\alpha} = \frac{d\left(\frac{L \cdot I^2}{2}\right)}{d\alpha} = \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot \frac{dL}{d\alpha}.$$

Если противодействующий момент создается с помощью упругих элементов, то для режима установившегося отклонения

$$M = Wa \quad \text{и} \quad a = \frac{1}{2W} \cdot I^2 \cdot \frac{dL}{d\alpha}. \quad (5.)$$

2 Основные характеристики электрических измерительных приборов

2.1 Статическая характеристика. Статическая характеристика измерительного прибора - зависимость выходного сигнала y от входного сигнала x в статическом режиме работы указанного прибора.

Статическая характеристика в общем случае описывается нелинейным уравнением

$$y = f(x),$$

Так, например, для электронных измерительных приборов магнитоэлектрической системы статической характеристикой будет являться уравнение (3), в котором входным сигналом будет являться электрический

$$A = SI,$$

Поскольку

$$S = \frac{2 \cdot B \cdot L \cdot r}{W} = const$$

то статическая характеристика электроизмерительного прибора магнитоэлектрической системы линейная.

2.2. Погрешность. Абсолютная погрешность прибора в данной точке диапазона измерения равен:

$$\Delta = x - x_u$$

где x - показание прибора;

x_u – истинное значение измеряемой величины.

Однако в связи с тем, что истинное значение чаще всего неизвестно, вместо него используется действительное значение: x_d , в качестве которого применяют либо среднее арифметическое значение ряда измерений, либо показания образцового прибора.

Очевидно, что абсолютная погрешность прибора выражается в тех же единицах, что и измеряемая величина.

Абсолютная погрешность прибора не характеризует в полной мере точность измерения, поэтому при измерениях определяется также *относительная погрешность* - отношение абсолютной погрешности к истинному (действительному) значению измеряемой величины

$$\delta = \frac{\Delta}{x_u} = \frac{\Delta}{x_d}, \quad (7.)$$

или в процентах

$$\delta(\%) = \frac{\Delta}{x_d} 100\%. \quad (8.)$$

Приведенная погрешность у электрического измерительного прибора равна отношению абсолютной погрешности к нормирующему значению x_N , которое принимается равным верхнему пределу измерений (если нулевая отметка находится на краю или вне шкалы) или диапазону измерения (если нулевая отметка находится внутри диапазона измерения)

$$\gamma = \frac{\Delta}{x_N}, \quad (9)$$

или в процентах

$$\gamma(\%) = \frac{\Delta}{x_N} \cdot 100\% \quad (9)$$

Погрешность электроизмерительного прибора зависит от условий проведения измерений. Различают *основную и дополнительную* погрешности.

Основная погрешность - это погрешность, существующая при нормальных условиях, которые указаны в нормативных документах, регламентирующих правила испытания и эксплуатации электроизмерительных приборов.

Под нормальными условиями, например, могут пониматься: температура окружающей среды ($+20 \pm 2$) С;

положение прибора горизонтальное, с отклонением от горизонтального не превышающим ± 2 С; относительная влажность (65 ± 15)%; практическое отсутствие внешних магнитных и электрических полей; частота питающей сети (50 ± 1) Гц и так далее.

Дополнительная погрешность возникает при отклонении условий испытания и эксплуатации прибора от нормальных.

Например, приведенная погрешность электронных измерительных приборов при нормальных условиях не превышает 1%. Если же температура окружающей среды лежит вне указанного в нормальных условиях диапазона, то приведенная погрешность может превышать 1%.

2.3 Класс точности. *Класс точности* электронных измерительных приборов - обобщенная метрологическая характеристика, определяемая пределами допустимых основной и дополнительной погрешностей.

Класс точности K стрелочных и самопищущих приборов, как правило, обозначается одним числом, равным максимально допустимому значению основной приведенной погрешности, выраженной в процентах:

$$\Delta \\ K(\%) = \frac{K}{X_N} \cdot 100 = \gamma \cdot 100 \\ (10.)$$

Электронные измерительные приборы делятся на 8 классов точности: 0.05; 0.1; 0.2; 0.5; 1.0; 1.5; 2.5; 4.0.

Пример: Милливольтметр со шкалой до 50 мВ имеет класс точности К = 0.5.

Определить максимальную абсолютную погрешность электронного измерительного прибора.

Решение:

Из (10) следует, что максимальная абсолютная погрешность при измерениях во всем диапазоне равна

$$\Delta = \frac{K \cdot X_N}{100} = \frac{0.5 \cdot 50}{100} = \pm 0.25 \text{ мВ}$$

2.4 Вариация. *Вариация* показаний электроизмерительного прибора - это наибольшая разность его показаний при одном и том же значении измеряемой величины.

Основной причиной вариации является трение в опорах подвижной части прибора.

Вариацию определяют, сравнивая показания электроизмерительного прибора, считанные один раз после установки требуемого значения измеряемой величины подходом снизу (со стороны меньших значений), а другой раз - подходом сверху (со стороны больших значений).

2.5 Цена деления. *Цена деления* электроизмерительных приборов численно равна изменению измеряемой величины, вызывающему перемещение указателя (стрелки) на одно деление.

При равномерной шкале цена деления равна отношению предела измерения электроизмерительного прибора x_m к числу делений шкалы n :

$$c = x_m/n$$

2.6 Предел измерения *Предел измерения* электроизмерительного приборы значение измеряемой величины, при котором стрелка прибора отклоняется до конца шкалы. Электроизмерительные приборы могут иметь несколько пределов измерения (многопредельные приборы). При измерениях такими приборами на различных пределах цена деления будет различна.

2.7 Чувствительность. *Чувствительность* S электроизмерительного прибора - это отношение изменения сигнала на выходе электроизмерительного прибора Δy к вызвавшему его изменению измеряемой величины Δx :

$$S = \Delta y / \Delta x \quad (12)$$

В общем случае чувствительность

$$S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx} \quad (13)$$

Следовательно, при нелинейной статической характеристике чувствительность зависит от x , а при линейной статической характеристике -чувствительность постоянна.

У электроизмерительных приборов при постоянной чувствительности шкала равномерная, то есть длина всех делений одинакова.

3 Измерение тока, напряжения и мощности

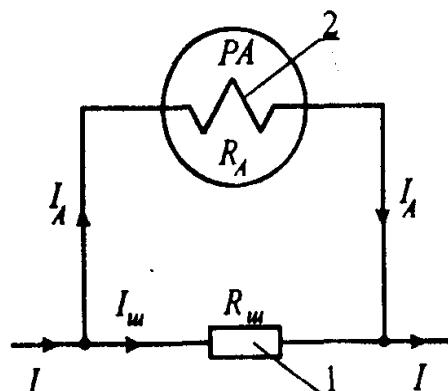
3.1 Измерение тока. Для измерения тока служат амперметры, миллиамперметры и микроамперметры. Эти приборы включаются последовательно в участок электрической цепи.

При этом необходимо, чтобы внутреннее сопротивление амперметра было мало по сравнению с сопротивлением участка электрической цепи, в которой он включен. В противном случае включение прибора вызовет существенное изменение сопротивления и тока на данном участке электрической цепи, а так же изменение режима работы всей цепи.

Сопротивления катушек (рамок) электроизмерительных приборов составляют 1 ...2 кОм рассчитаны на полное отклонение стрелки при токе 100...500 мА(что соответствует падению напряжения на приборе 0,1..1 мВ). Следовательно, непосредственное включение электроизмерительного прибора возможно только при измерении малых токов до 500 мА в высокоомных электрических цепях.

Чтобы использовать данный прибор для измерения токов больших значений и снизить его внутреннее сопротивление применяют *шунты*.

Шунт представляет собой манганиновые пластины или стержни, впаянные в медные или латунные наконечники. Сопротивление шунта значительно меньше сопротивления рамки прибора. Шунт включается в электрическую цепь последовательно, а параллельно ему подключается рамки (катушка) прибора.



1 - шунт; 2 - рамка (катушка) прибора; I - измеряемый ток; $I_{\text{ш}}$ - ток через шунт; I_A - ток через рамку прибора.

Рисунок 3 - Схема включения прибора с шунтом

По 1 закону Кирхгофа измеряемый ток в электрической цепи

$$I = I_A + I_{\text{ш}}$$

где I_A - ток через рамку прибора, А;

$I_{\text{ш}}$ - ток через шунт, А.

Так как $r_A \gg r_{\text{ш}}$, то $I_A \ll I_{\text{ш}}$, так что $I_{\text{ш}} = I$.

При параллельном соединении $I_A \times r_A = I_{\text{ш}} \times r_{\text{ш}}$ или

$$I_A / I_{\text{ш}} = r_{\text{ш}} / r_A$$

$$r_A \\ r_{\text{ш}} = \frac{r_A}{n - 1}, \quad (6.14)$$

I

где $n = \frac{r_A}{r_{\text{ш}}}$ - коэффициент шунтирования.

$$I_A$$

Пример: Рамка прибора магнитоэлектрической системы имеет сопротивление $r_A = 1500$ Ом и рассчитана на максимальное отклонение при токе $I = 250$ мкА. Определить сопротивление шунта $r_{ш}$ для измерения токов до 50 мА. **Решение:**

1. Определим коэффициент шунтирования :

$$n = \frac{I}{I_A} = \frac{50 \times 10^{-3}}{250 \times 10^{-6}} = 200$$

2. Определяем сопротивление шунта

$$r_{ш} = \frac{r_A}{n - 1} = \frac{1500}{200 - 1} = 7,54 \text{ Ом}$$

В амперметрах, предназначенных для измерения токов до 100 А, шунты вмонтированы в корпус прибора и присоединены к контактным выводным зажимам.

В амперметрах, предназначенных для измерения токов более 100 А, шунты делаются наружными и присоединяются к ним при помощи специальных калиброванных проводников, так как иначе распределение токов будет неправильным.

Для расширения пределов измерения амперметров в цепях синусоидального (переменного) тока применяются *трансформаторы тока*, которые служат для преобразования больших токов в малые.

Первичная обмотка трансформатора тока, состоящая из малого числа витков, включается последовательно в цепь с измеряемым током.

Вторичная обмотка состоит из большого числа витков и в нее включаются измерительные приборы (амперметры), изолированные от высоковольтных и сильноточных проводов.

На паспорте в виде дроби указывается коэффициент трансформации трансформатора тока:

$$K = \frac{I_1 w_2}{I_2 w_1}$$

где I_1 - ток первичной обмотки, А;

I_2 - ток вторичной обмотки, А;

w_1 - число витков первичной обмотки;

w_2 - число витков вторичной обмотки.

Например, $100/5$ А означает, что данный трансформатор тока рассчитан на первичный ток 100 А и вторичный ток - 5 А. Коэффициент трансформации этого трансформатора $K = 100/5 = 20$.

Зная K и получив показания амперметра во вторичной цепи трансформатора тока I_2 можно определить первичный ток

$$I_1 = K I_2$$

Большинство трансформаторов тока выпускаются с номинальным вторичным током 5 А.

3.2 Измерение напряжения. Для измерения напряжения служат вольтметры. Они подключаются параллельно участку, на котором необходимо измерить напряжение.

Внутреннее сопротивление вольтметра должно быть значительно больше сопротивления участка, к которому он подключается, так как в противном случае вольтметр будет оказывать влияние на токораспределение в электрической цепи и результаты измерения будут содержать большую погрешность.

Для расширения пределов измерений вольтметров последовательно с ними включают *добавочные сопротивления*.

В приборах на напряжение до 300 В, добавочные сопротивления вмонтированы в корпус приборов или укреплены снаружи приборов.

Для измерения напряжений свыше 300 В добавочные сопротивления присоединяют к одному из выводных зажимов прибора.

Добавочные сопротивления рассчитывают так, чтобы в цепи с увеличенным напряжением по обмотке (рамке) вольтметра проходил тот же ток, что и при номинальном напряжении, на которое рассчитана обмотка.

Обмотка рассчитана на ток

$$I_V = U/r_V,$$

где I_V - ток, протекающий через рамку вольтметра, А;

U - напряжение на рамке, В;

r_V - сопротивление рамки, Ом.

При увеличении напряжения в цепи в n раз, ток I_V должен остаться прежним

$$I_V = \frac{nU}{r_V + r_{\text{доб}}r_V}$$

Отсюда

$$r_{\text{доб}} = r_V \times (n - 1) \quad (14)$$

Пример. Вольтметром на 15 В необходимо измерить напряжение 150 В. Определить добавочное сопротивление, если внутреннее сопротивление вольтметра 900 Ом.

Решение:

1. Определим отношение измеряемого напряжения к напряжению вольтметра

$$n = 150/15 = 10$$

2. Добавочное сопротивление

$$r_{\text{доб}} = r_V \times (n - 1) = 900 \times 9 = 8100 \text{ Ом}$$

Для измерения высоких напряжений синусоидального тока применяют трансформаторы напряжения.

Первичная обмотка трансформатора напряжения включается параллельно потребителю и имеет большое число витков.

В паспорте трансформатора напряжения указывается отношение напряжений первичной и вторичной обмоток. Например 5000/100 означает, что номинальное напряжение первичной обмотки 5000 В, вторичной - 100 В.

Коэффициент трансформации напряжения

$$K = 5000/100 = 50$$

Зная K и напряжение вторичной обмотки U_2 , можно определить первичное напряжение:

$$U_1 = KU_2$$

Большинство трансформаторов напряжения выпускается с номинальным вторичным напряжением 100 В.

3.3 Измерение мощности электрического тока. Для измерения мощности в цепях постоянного и в цепях синусоидального тока промышленной частоты применяются ваттметры, обеспечивающий непосредственный отсчет мощности по шкале.

Ваттметр электродинамической системы состоит из двух катушек (рамок):

- неподвижной, токовой из толстого провода, включаемой последовательно с потребителем;
- подвижной обмотки напряжения, выполненной из тонкого провода и включаемой параллельно потребителю.

При постоянном токе вращающий момент электродинамического прибора пропорционален произведению токов в его обмотках:

$$M_{bp} = kI_h I_n$$

где I_h - ток в неподвижной катушке, А;

I_n - ток в подвижной катушке, А.

В ваттметре ток подвижной обмотки прямо пропорционален приложенному напряжению

$$I_n = U/R_n$$

где R_n - сопротивление подвижной катушки, Ом.

Следовательно, вращающий момент прямо пропорционален мощности. Поэтому электродинамический ваттметр имеет равномерную шкалу, то есть.

$$M_{bp} = kI_h U/R_n = kP$$

Вращающий момент электродинамического прибора, включенного в цепь синусоидального тока

$$M_{bp} = kI_h I_n \cos\phi$$

то есть показания ваттметра пропорциональны току, напряжению и $\cos\phi$, то есть активной мощности цепи P .

Ваттметр имеет четыре зажима, к двум выводится токовая обмотка, к другим двум - обмотка напряжения. Первая пара зажимов включается в измеряемую цепь последовательно, вторая - параллельно. Начала обмоток обозначаются звездочками (*) и соединяются вместе. Это необходимо, чтобы токи в катушках пропускались в определенном направлении.

На шкале ваттметра указываются верхние пределы измерений тока и напряжения. Если, например на шкале ваттметра обозначено $I=5$ А и $U=100$ В, это значит, что верхний предел измерения ваттметра $P = 500$ Вт, то есть им можно измерять мощности до 500 Вт.

Очевидно, что цена деления ваттметра равна

$$c = P/n = IU/n$$

где n - число делений шкалы.

2.2.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1.Методическое указание

2.Вольтметры, амперметры, трансформатор тока

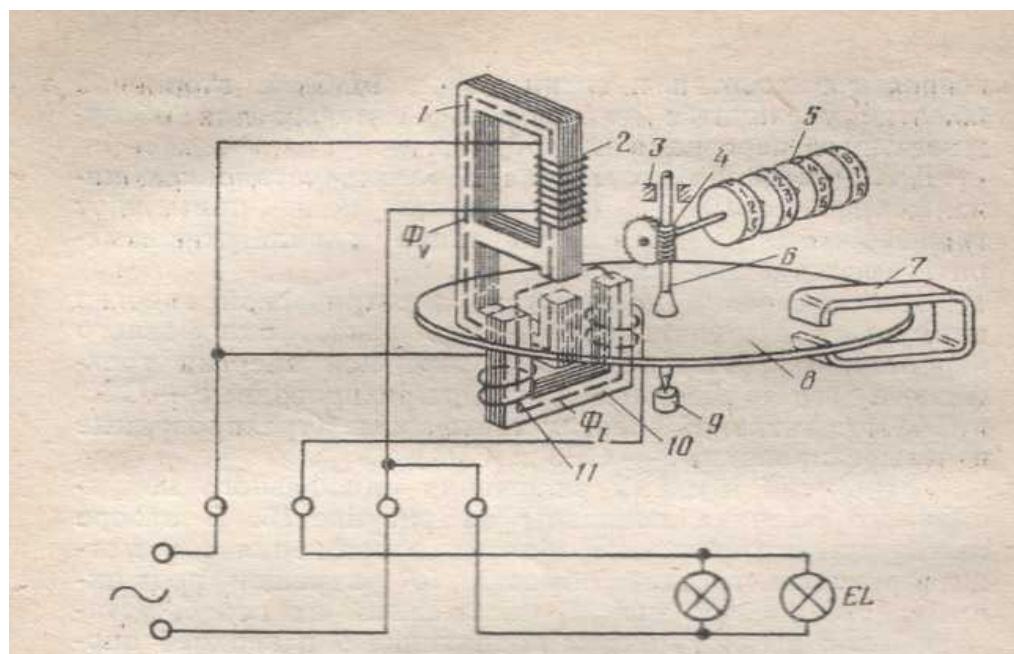
2.2.4 Описание (ход) работы:

1.Работа с приборами

2. Оформление конспекта.

Счетчик:

2.3Лабораторная работа № 4,5 (4 часа).
Тема:
«Исследование законов Кирхгофа и принципа наложения в сложной электрической цепи постоянного тока»



2.3.1 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.

2.3.2 Задачи работы:

Освоить расчет сложной электрической цепи постоянного тока методом контурных токов

2.3.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Компьютер «Пентиум-4», ПО Multisim

2.3.4 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.

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 E_1						
3	Действует источник E_2						
4	Действует источник E_3						

Таблица 3

Результаты расчетов

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						

2.4.Лабораторная работа № 6,7 (4 часа).

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

2.4.1 Цель работы:

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

2.4.2 Задачи работы:

- 1.Освоить методы расчета простых электрических цепей.
- 2.Научиться включать в цепь электроизмерительные приборы, выбирать и устанавливать пределы измерений и производить измерения.

2.4.3 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 250В 150 Вт (4 шт.), 250В 100 Вт (10 шт.);
5. резистор ПЭВ25 (4 шт.), ПЭВ 10 (3шт.).

2.4.4 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 (Ватт)

Таблица измеренных величин.

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

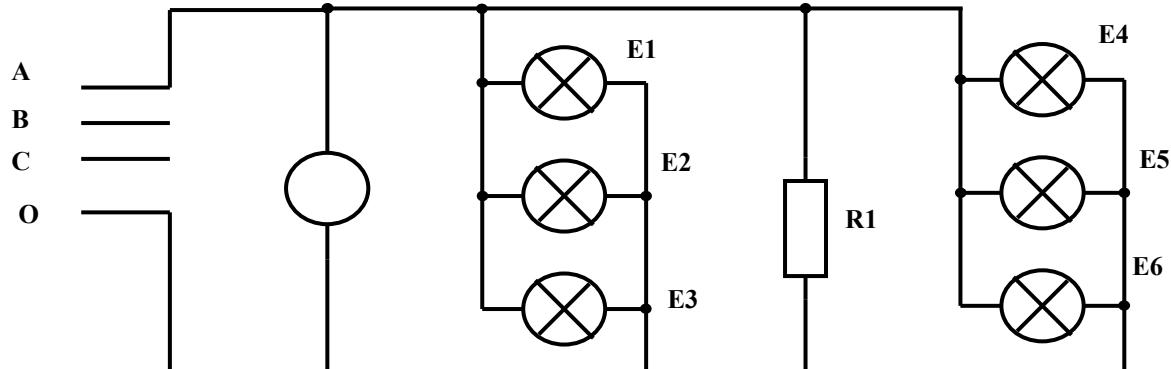


Рис. 1

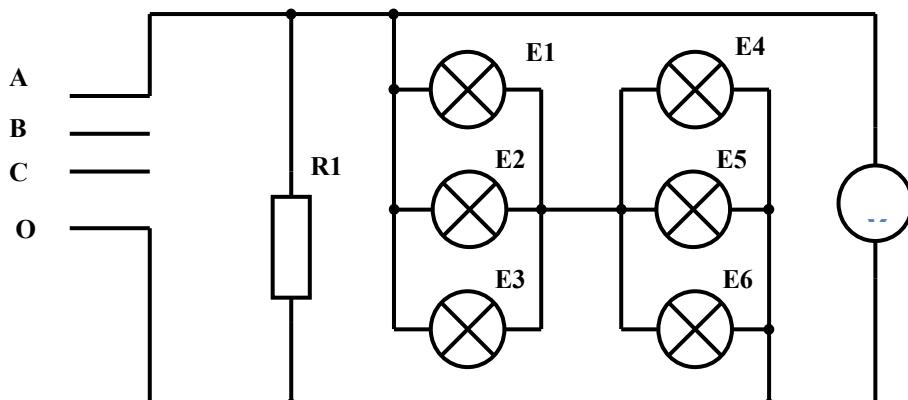


Рис. 2

2.5Лабораторная работа № 5 (2 часа).

Тема: «Исследование цепи постоянного тока со сложным включением элементов»

2.5.1 Цель работы:

1. Уяснить принципы графического изображения электрической цепи.

2. Научиться собирать электрические цепи.

устанавливать пределы измерений и производить измерения.

2.5.2 Задачи работы:

1. Освоить методы расчета простых электрических цепей.

2. Научиться включать в цепь электроизмерительные приборы, выбирать и

устанавливать пределы измерений и производить измерения

2.5.3 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 250В 150 Вт (4 шт.), 250В 100 Вт (10 шт.);

5. резистор ПЭВ25 (4 шт.), ПЭВ 10 (3 шт.).

2.5.4 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 начертенной 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: 30 В.

Лампа накаливания Е1: 36 В, 60 Вт.

Лампа накаливания Е2: 36 В, 63 Вт.
 Лампа накаливания Е3: 36 В, 68 Вт.
 Резистор R1: 15 Ом.

Таблица расчетных величин.

U (Вольт)	I (Ампер)	P (Ватт)

Таблица измеренных величин.

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

Схемы электрических цепей

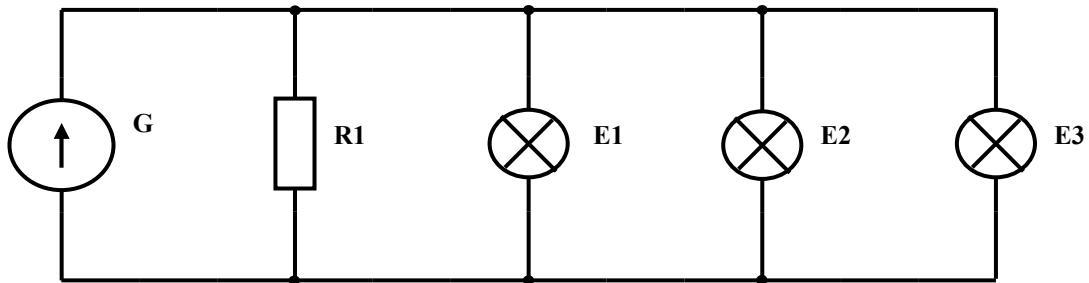


Рис. 1

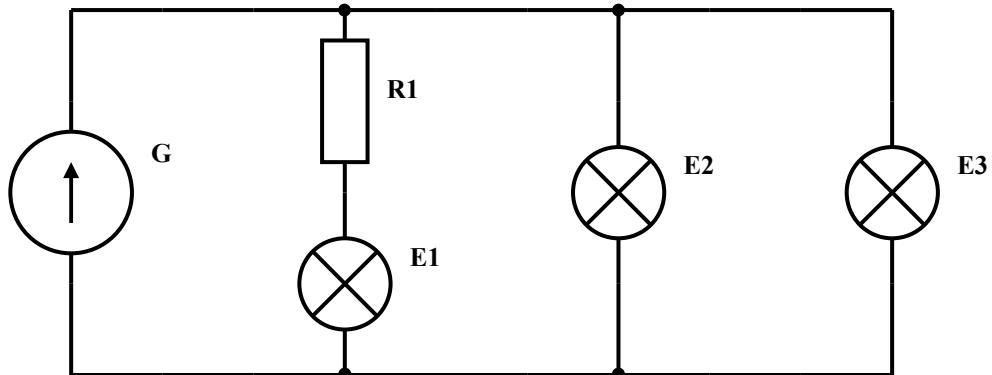


Рис. 2

2.5Лабораторная работа № 8,9 (4 часа).
Тема: «Элементы в цепях переменного тока»

2.5.1 Цель работы:

1. Ознакомиться со свойствами элементов электрической цепи синусоидального переменного тока.

2.5.2 Задачи работы:

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

2.1.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Компьютер «Пентиум-4»

2.5.4 Описание (ход) работы:

Собрать электрическую цепь, используя рис. 1. Установить параметры элементов цепи в соответствии с техническими характеристиками выписанными из таблицы 1 по варианту, указанному преподавателем. Амперметр и вольтметры перевести в режим АС.

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

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

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

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

Результат занести в таблицу 2.

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

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

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

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

Результат занести в таблицу 2.

Используя параметры элементов электрической цепи, определить круговую частоту ω , индуктивное и емкостное сопротивление. Рассчитать угол ϕ между вектором тока и напряжения на всей цепи для опыта с индуктивной и емкостной нагрузкой. Рассчитать полное сопротивление цепей и, используя закон Ома, определить силу тока цепи в каждом опыте. Определить напряжения на индуктивности, емкости и активном сопротивлении.

Результат занести в таблицу 3.

Сравнить результаты расчетов с результатами измерений.

Используя результаты расчетов построить в масштабе векторные диаграммы цепей.

Объект и средства исследования

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

Электрические схемы

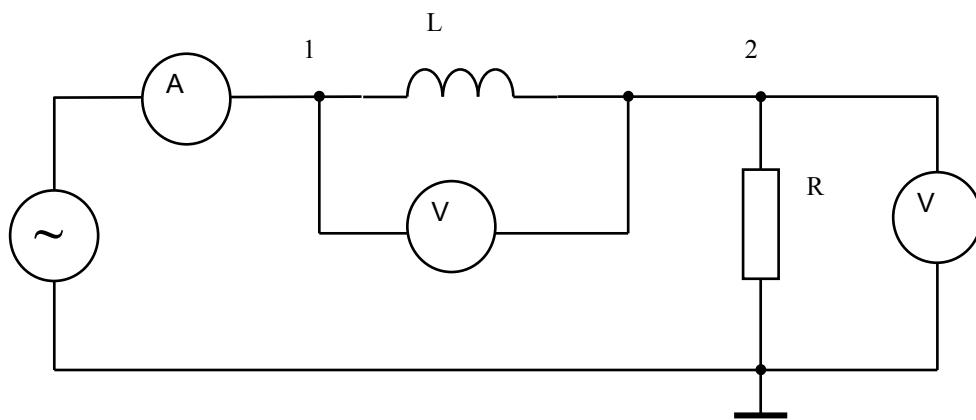


Рис 1

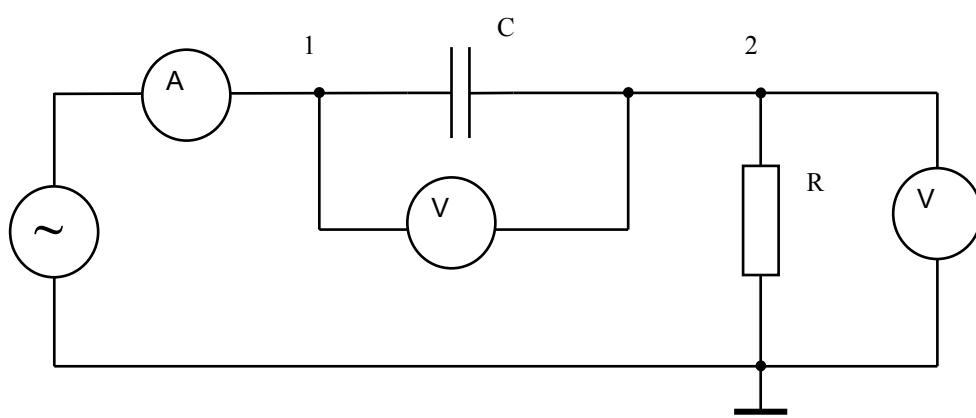


Рис 2

Таблица 2

Результаты экспериментов

Режим работы цепи	I, A	U _R , В	U _L , В	U _C , В	ΔT, С	φ, градус
Индуктивная нагрузка				—		
Емкостная нагрузка			—			

Таблица 3

Результаты расчетов

Режим работы цепи	ω, рад/С	X _L , Ом	X _C , Ом	φ, градус	Z, Ом	I, A	U _L , В	U _C , В	U _R , В
Индуктивная нагрузка			—					—	
Емкостная нагрузка		—					—		

№ Вар.	U, Вольт	f, Герц	R, Ом	L, мГн	C, мкФ	Y _A , В/дел	Y _B , В/дел	X _T , мС/дел
1	220	50	100	500	20	100	100	2
2	220	100	100	200	15	100	100	1
3	127	60	80	300	25	100	50	2
4	127	100	70	150	22	100	50	1
5	380	100	150	350	7	200	100	1
6	380	50	160	450	17	200	200	2
7	220	150	120	180	8	100	100	1
8	110	400	60	30	5	50	50	0,2

2.6 Лабораторная работа № 10,11 (4 часа).

Тема: «Исследование цепи переменного тока с последовательным включением элементов»

2.6.1 Цель работы:

1. Ознакомиться со свойствами элементов электрической цепи синусоидального переменного тока.

2.6.2 Задачи работы:

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

2.1.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Компьютер «Пентиум-4»

2.6.4 Описание (ход) работы:

Собрать электрическую цепь, используя рис. 1. Установить параметры элементов цепи в соответствии с техническими характеристиками выписанными из таблицы 1 по варианту, указанному преподавателем. Амперметр и вольтметры перевести в режим AC.

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

Подключить к цепи осциллограф. При этом канал A подключить параллельно всей цепи (к точке 1), а канал B – параллельно активному сопротивлению (к точке 2). Установить чувствительность канала A – YA , чувствительность канала B – YB и частоту развертки XT в соответствии с таблицей 1. Включить режим ZOOM на осциллографе.

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

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

Результат занести в таблицу 2.

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

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

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

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

Результат занести в таблицу 2.

Используя параметры элементов электрической цепи, определить круговую частоту ω , индуктивное и емкостное сопротивление. Рассчитать угол ϕ между вектором тока и напряжения на всей цепи для опыта с индуктивной и емкостной нагрузкой. Рассчитать полное сопротивление цепей и, используя закон Ома, определить силу тока цепи в каждом опыте. Определить напряжения на индуктивности, емкости и активном сопротивлении.

Результат занести в таблицу 3.

Сравнить результаты расчетов с результатами измерений.

Используя результаты расчетов построить в масштабе векторные диаграммы цепей.

Объект и средства исследования

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

Электрические схемы

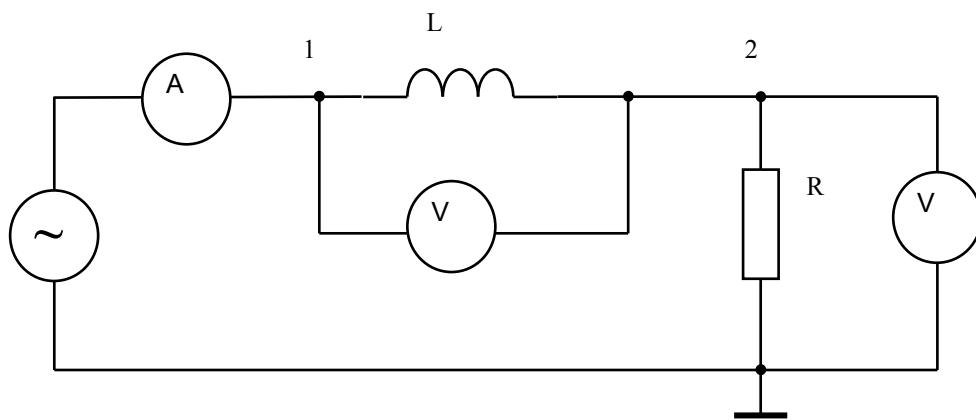


Рис 1

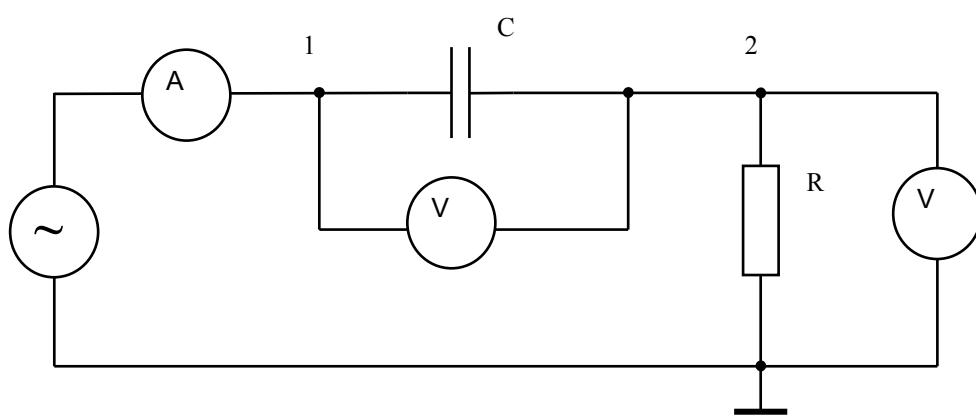


Рис 2

Таблица 2

Результаты экспериментов

Режим работы цепи	I, A	U _R , В	U _L , В	U _C , В	ΔT, С	φ, градус
Индуктивная нагрузка				—		
Емкостная нагрузка			—			

Таблица 3

Результаты расчетов

Режим работы цепи	ω, рад/С	X _L , Ом	X _C , Ом	φ, градус	Z, Ом	I, А	U _L , В	U _C , В	U _R , В
Индуктивная нагрузка			—					—	
Емкостная нагрузка		—					—		

№ Вар.	U, Вольт	f, Герц	R, Ом	L, мГн	C, мкФ	Y _A , В/дел	Y _B , В/дел	X _T , мС/дел
1	220	50	100	500	20	100	100	2
2	220	100	100	200	15	100	100	1
3	127	60	80	300	25	100	50	2
4	127	100	70	150	22	100	50	1
5	380	100	150	350	7	200	100	1
6	380	50	160	450	17	200	200	2
7	220	150	120	180	8	100	100	1
8	110	400	60	30	5	50	50	0,2

2.7Лабораторная работа № 12,13 (4 часа).

Тема: «Исследование резонансных явлений в цепи переменного тока Резонанс напряжения»

2.7.1 Цель работы:

1. Изучение режима резонанса напряжений в неразветвленной цепи переменного тока.

2.7.2 Задачи работы:

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

2.7.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

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

2.7.4 Описание (ход) работы:

1. Собрать электрическую цепь по рисунку 1.
2. Используя параметры элементов цепи (технические характеристики элементов выписать из таблицы 1 по варианту, указанному преподавателем), рассчитать резонансную частоту переменного тока в данной цепи . Заполнить вторую колонку таблицы 2.
3. Установить параметры элементов цепи в соответствии с техническими характеристиками. Измерительные приборы перевести в режим АС.
4. Подключить к цепи осциллограф. При этом канал А подключить параллельно всей цепи (к точке 1), а канал В – параллельно активному сопротивлению (к точке 2). Установить чувствительность канала А – YA , чувствительность канала В – YB и частоту развертки XT в соответствии с таблицей 1. Включить режим ZOOM на осциллографе.
5. Устанавливая частоту источника ЭДС в соответствии со второй колонкой таблицы 2, снять показания приборов в каждом опыте. При помощи визирных линий на экране осциллографа определить временной сдвиг по фазе между напряжением на резисторе и напряжением на всей цепи в каждом опыте. Для этого красную визирную линию совместить с точкой пересечения кривой напряжения на резисторе с осью абсцисс, а

синюю линию – с ближайшей точкой пересечения кривой напряжения на всей цепи с осью абсцисс. Результаты измерений занести в таблицу 2.

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

7. Используя параметры элементов электрической цепи, для каждого значения частоты источника определить: круговую частоту ω , индуктивное сопротивление XL , емкостное сопротивление XC , полное сопротивление Z , ток цепи I , напряжение на индуктивности, емкости и активном сопротивлении, а также угол ϕ между вектором тока и напряжения на всей цепи. Результаты расчетов занести в таблицу 3.

8. Сравнить результаты расчетов с результатами измерений.

9. В одной системе координат построить зависимости I , ϕ , UL , UC от частоты.

10. Для частоты $0,5fp$ построить в масштабе векторную диаграмму цепи.

Объект и средства исследования

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

Электрическая схема

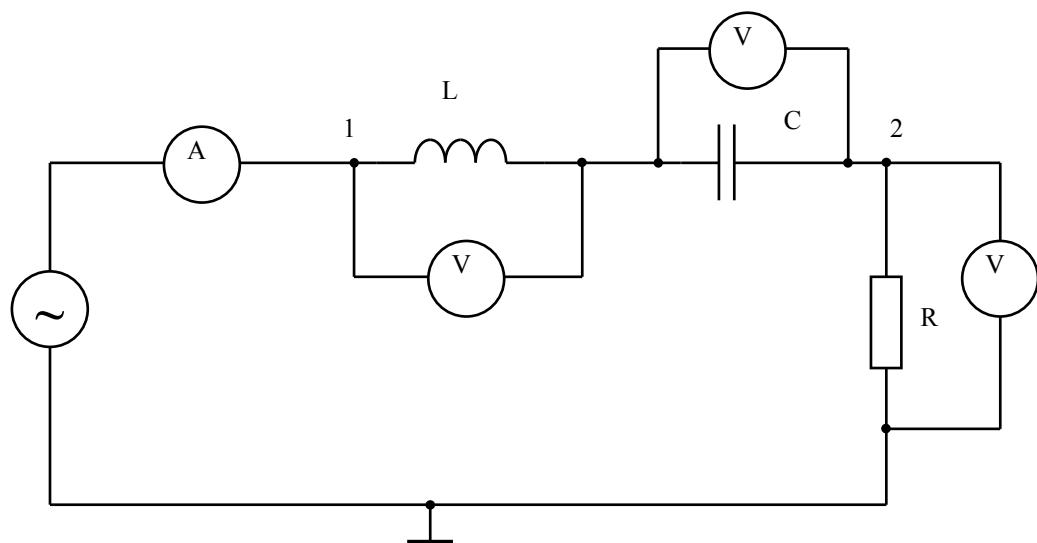


Рис 1

Таблица 1

Параметры элементов цепи

№ Вар.	U, Вольт	L, мГн	C, мкФ	R, Ом	Y _A , В/дел	Y _B , В/дел	X _T , МС/дел
1	100	20	9,8	40	50	50	0,5
2	150	30	5,3	50	100	100	0,2
3	127	50	12,7	60	100	100	0,5
4	220	40	7	70	100	100	0,2
5	380	100	25,3	150	200	200	1
6	160	60	21,5	55	100	100	1
7	200	35	10,7	90	100	100	0,5
8	110	70	14,1	30	50	50	0,5

Таблица 2

Результаты экспериментов

k	f = kf _p , Герц	I, A	U _R , B	U _L , B	U _C , B	ΔT, C	φ, градус
0,5							
0,75							
1							
1,25							
1,5							

Таблица 3

Результаты расчетов

2.8 Лабораторная работа № 14,15 (4 часа).

Тема: «Исследование резонансных явлений в цепи переменного тока Резонанс тока»

2.8.1 Цель работы:

1. Изучение режима резонанса токов в разветвленной цепи переменного тока.

2.8.2 Задачи работы:

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

2.8.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

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

2.8.4 Описание (ход) работы:

1. Собрать электрическую цепь по рисунку 1.
2. Используя параметры элементов цепи (технические характеристики элементов выписать из таблицы 1 по варианту, указанному преподавателем), рассчитать резонансную частоту переменного тока в данной цепи.
Заполнить в таблице 2 вторую колонку.
3. Установить параметры элементов цепи в соответствии с техническими характеристиками. Измерительные приборы перевести в режим АС.
4. Подключить к цепи осциллограф. При этом канал А подключить к правому по схеме выводу резистора RI (к точке 1), а канал В – параллельно всей цепи (к точке 2). В результате такого подключения канал А будет регистрировать кривую изменения тока цепи, а канал В – кривую напряжения на этой цепи. Установить чувствительность канала А – YA , чувствительность канала В – YB и частоту развертки XT в соответствии с таблицей 1. Включить режим ZOOM на осциллографе.
5. Устанавливая частоту источника ЭДС в соответствии со второй колонкой таблицы 2, снять показания приборов в каждом опыте. При помощи визирных линий на экране осциллографа определить временной сдвиг по фазе между током цепи и напряжением на всей цепи для каждой частоты. Для этого красную визирную линию совместить с точкой пересечения кривой тока с осью абсцисс, а синюю линию – с ближайшей точкой пересечения кривой напряжения с осью абсцисс. Результаты измерений занести в таблицу 2.

6. Рассчитать угол сдвига фаз тока и напряжения на всей цепи ϕ , используя временной сдвиг по фазе между напряжением на резисторе R_1 и напряжением на всей цепи ($\phi = 360f\Delta T$). Результат занести в таблицу 2.
7. Используя параметры элементов электрической цепи, для каждого значения частоты источника определить: круговую частоту ω , полные сопротивления ветвей Z_1 и Z_2 , реактивные проводимости ветвей b_1 и b_2 , токи ветвей I_1 и I_2 , ток всей цепи I , а также угол ϕ между вектором тока и напряжения на всей цепи. Результаты расчетов занести в таблицу 3.
8. Сравнить результаты расчетов с результатами измерений.
9. В одной системе координат построить зависимости I , ϕ , I_1 , I_2 от частоты тока f .
10. Для частот 0,5fp построить в масштабе векторную диаграмму цепи.

Объект и средства исследования

Объектом исследования является простая разветвленная электрическая цепь переменного тока. Исследования выполняются на компьютере с использованием программы Multisim

Электрическая схема

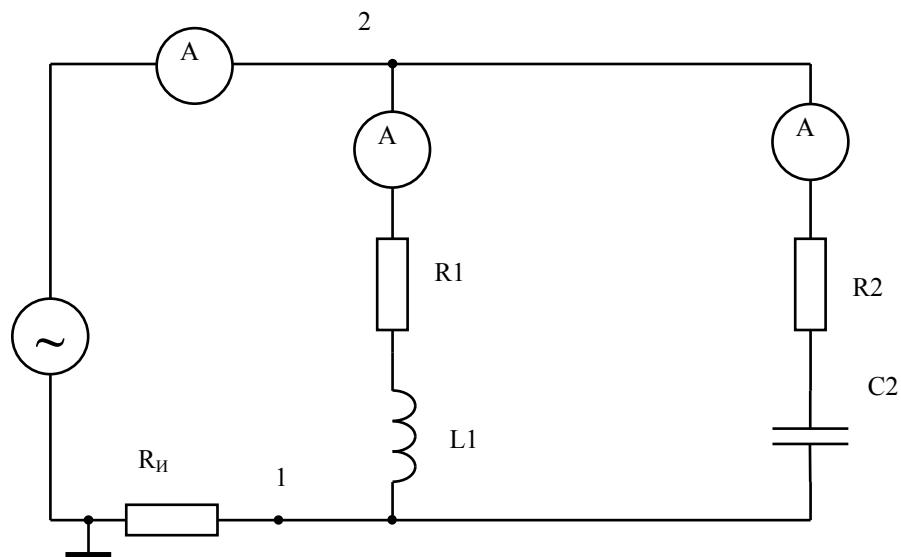


Рис 1

Таблица 1

Параметры элементов цепи

№ Вар.	U, Вольт	R ₁ , Ом	L ₁ , мГн	R ₂ , Ом	C ₂ , мКФ	R _И , Ом	Y _A , мВ/дел	Y _B , В/дел	X _T , мС/дел
1	90	20	30	15	30	0,001	1	50	0,5
2	100	30	50	10	20	0,001	1	50	0,5
3	110	10	60	25	50	0,001	1	50	0,5
4	120	15	70	20	18	0,001	1	50	0,5
5	130	25	40	17	35	0,001	1	100	1,0
6	140	35	80	30	15	0,001	1	100	0,5
7	150	27	75	22	24	0,001	2	100	1,0
8	160	23	85	25	16	0,001	2	100	1,0

Таблица 2

Результаты экспериментов

k	$f = kf_p$, Герц	I, A	I_1 , A	I_2 , A	ΔT , C	φ , градус
0,5						
0,75						
1						
1,25						
1,5						

Таблица 3

Результаты расчетов

2.9 Лабораторная работа № 16,17 (4 часа).

Тема: «Расчет цепи переменного тока с параллельным включением элементов»

2.9.1 Цель работы:

1. Исследование режима работы цепи переменного тока с активными, индуктивными и емкостными элементами.
2. Освоение методов расчета электрической цепи переменного тока с активными, индуктивными и емкостными элементами и экспериментального определения параметров ее элементов.

2.9.2 Задачи работы:

1. Освоение методов расчета электрической цепи переменного тока с активными, индуктивными и емкостными элементами

2.9.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

. В качестве источника тока используется сеть переменного тока 127 В, включаемая при помощи трехфазного автоматического выключателя. Регулировка напряжения выполняется потенциометром. Для измерения электрических величин используются измерительные приборы: вольтметр с пределами измерения 150 и 300 В, амперметр с пределами измерения 2,5 и 5 А, ваттметр с пределами измерения по напряжению 75; 150; 300; 600 В, по току 0,25; 0,5 А и измерительный трансформатор тока.

2.9.4 Описание (ход) работы:

1. Собрать электрическую цепь.
2. Используя технические характеристики элементов цепи, рассчитать действующие значения напряжения и силы тока каждого потребителя.
3. Используя результаты расчетов, построить в масштабе векторные диаграммы, соответствующие режиму работы цепи в опытах по пункту 5.
4. Выбрать и установить на измерительных приборах пределы измерения в соответствии с расчетами и векторными диаграммами.
5. После проверки схемы преподавателем и получения разрешения включить источник тока, при отключенных потребителях отрегулировать оптический указатель ваттметра. При помощи потенциометра установить напряжение в соответствии с расчетом. Выполнить следующие опыты:
 - a. С помощью вилки поочередно подключить лампу накаливания, конденсатор и дроссель, записать показания измерительных приборов в каждом опыте. Во всех опытах напряжение должно быть равным расчетному значению (устанавливается потенциометром).

- b. Включить вилками одновременно дроссель и конденсатор, при необходимости подкорректировать напряжение, записать показания всех измерительных приборов.
- c. Включить одновременно лампу и конденсатор, подкорректировать напряжение, записать показания всех измерительных приборов.
- d. Включить одновременно лампу и дроссель, подкорректировать напряжение, записать показания всех измерительных приборов
6. Полученные данные обработать и заполнить таблицу измеренных величин.
7. Используя результаты опытов по пункту 5.1, рассчитать полное, активное, реактивное сопротивление и коэффициент мощности каждого потребителя (лампы, конденсатора и дросселя).
8. В опыте указанном преподавателем рассчитать силу тока, активную мощность, полное, активное и реактивное сопротивление цепи, используя результаты опытов по пункту 5.1. Рассчитанное значение тока сравнить с показанием амперметра, а мощность – с показаниями ваттметра в указанном опыте.
9. Оформить отчет по лабораторной работе.

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

Объект и средства исследования

Техническая характеристика элементов цепи:

$$\text{Лампы накаливания} \quad u = 113 \sin\omega t; \quad i = 0,23 \sin\omega t.$$

$$\text{Конденсатор} \quad u = 113 \sin\omega t; \quad i = 0,4 \sin(\omega t + 77^\circ).$$

$$\text{Дроссель} \quad u = 113 \sin\omega t; \quad i = 0,46 \sin(\omega t - 63^\circ).$$

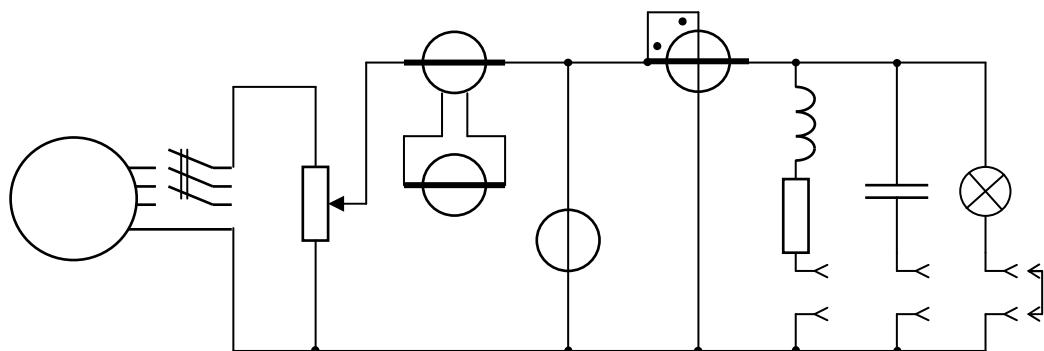


Таблица измеренных величин

Опыт №	PV		PA		PW	
	C =		C =		C =	
	Дел.	B	Дел.	A	Дел.	Bт

2.10 Лабораторная работа № 18 (2 часа).

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

2.10.1 Цель работы: Изучить свойства и характеристики диодов и стабилитронов

2.10.2 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 $\Delta I_{ст} / \Delta U_{ст}$ (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.

2.10.3 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).

2.10.4 Описание (ход) работы:

Схема исследований прямой ветви ВАХ диодов, стабисторов

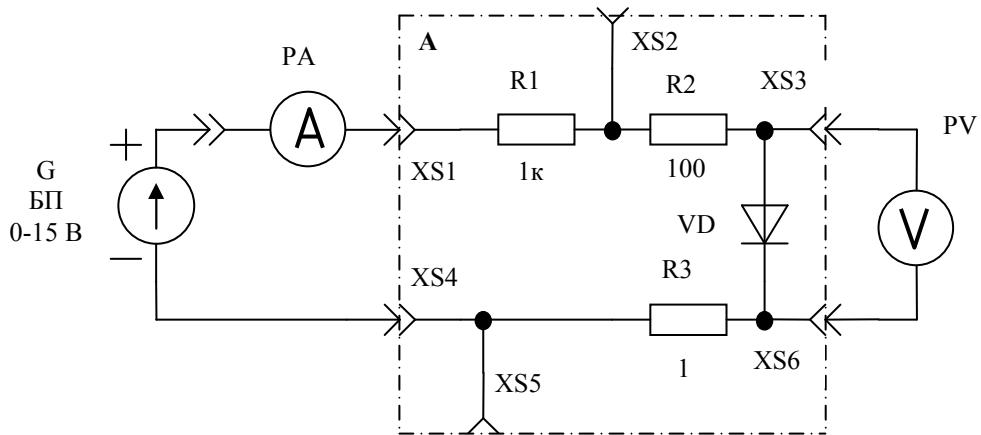


Рис. 1.1. Схема измерения прямой ветви ВАХ диодов

Порядок выполнения эксперимента

1. Собрать схему.
 2. Установить на измерительных приборах необходимые пределы измерений в соответствии с исследуемым прибором. На блоке питания ручку регулировки выходного напряжения установить в 0 В.
 3. После проверки схемы преподавателем включить схему.
 4. 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 R1+R2). При необходимости увеличить прямой ток, напряжение «+ БП» (подается через амперметр РА) переключить с гнезда «XS1» на гнездо «XS2», предварительно отключив БП. Следить, чтобы прямой ток не превышал предельно допустимый ток для прибора.
 5. 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.

Таблица. Результаты измерений прямой ветви ВАХ стабисторов типа КС113А.

Представление и обработка результатов измерений

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

Таблица. Экспериментальные характеристики приборов.

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

Схема исследований обратной ветви ВАХ стабилитронов

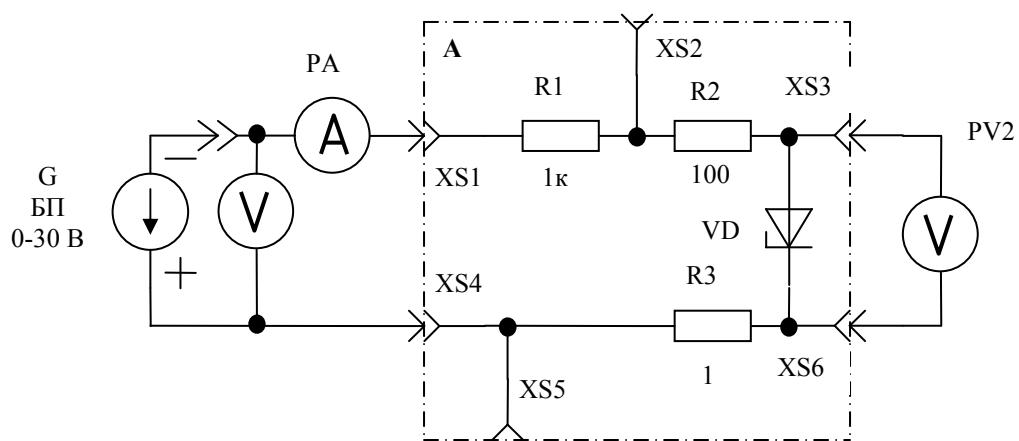


Рис. 1.2. Схема измерения обратной ветви ВАХ стабилитронов

Порядок выполнения эксперимента

1. Собрать схему.
2. Установить на измерительных приборах необходимые пределы измерений в соответствии с исследуемым прибором. На блоке питания ручку регулировки выходного напряжения установить в 0 В.
3. 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.

U_{bx}	В										
I_{ct}	мА										
U_{ct}	В										

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

Таблица. Результаты измерений обратной ветви ВАХ стабилитронов типа Д814А.

U_{bx}	В	0									
I_{ct}	мА	0	0,5	1	2	3	5	10	15	20	25
U_{ct}	В										

Таблица. Результаты измерений обратной ветви ВАХ стабилитронов типа КС139А.

U_{bx}	В	0									
I_{ct}	мА	0	0,5	1	2	3	5	10	15	20	30
U_{ct}	В										

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, $P_{бал} = (U_{bx} - U_{cm})I_{cm}$ (при начальном установившемся напряжении стабилизации, при среднем и наибольшем обратном токе стабилизации);

- дифференциальное сопротивление стабилитрона при обратном постоянном токе $r_{\text{диф}} = \Delta U_{cm} / \Delta I_{cm}$ (при начальном установившемся напряжении стабилизации, при среднем и наибольшем обратном токе стабилизации);
 - результаты занести в таблицу;
- Привести паспортные данные основных характеристик исследуемых приборов;
 - Сравнить полученные результаты исследований с паспортными данными на приборы.

Таблица. Экспериментальные характеристики приборов.

№	I_{cm}	U_{cm}	ΔI_{cm}	ΔU_{cm}	$r_{\text{диф}}$	P_{cm}	$P_{бал}$	Прим.
пп	мА	В	мА	В	Ом	Вт	Вт	-
1								
2								
3								

2.11 Лабораторная работа № 19 (2 часа).

Тема: «Исследование биполярных транзисторов»

2.11.1 Цель работы: свойства и характеристики транзисторов

2.11.2 Задачи работы:

- Привести полную схему лабораторного стенда исследований характеристик транзисторов. Для исследуемых схем входных и выходных характеристик ниже указать положение всех тумблеров схемы (включено/выключено). Привести упрощенную итоговую схему исследований.
- На одном графике построить входные вольт-амперные характеристики транзисторов $I_B = f(U_{B\bar{E}})$.
- На другом графике построить семейство выходных вольт-амперных характеристик транзисторов $I_C = f(U_{C\bar{E}})$ при разных токах базы I_B .
- Определить и вычислить:
 - статическое входное сопротивление транзистора при фиксированном напряжении $U_{C\bar{E}} = 4$ В и токе базы $I_B = 75$ мкА г. $r_{\text{вх}} = U_{B\bar{E}} / I_B$;
 - дифференциальное входное сопротивление транзистора при фиксированном напряжении $U_{C\bar{E}} = 4$ В и токе базы $I_B = 75$ мкА г. $r_{\text{дифвх}} = \Delta U_{B\bar{E}} / \Delta I_B$;
 - статический коэффициент передачи транзистора при фиксированном напряжении $U_{C\bar{E}} = 4$ В и токе базы $I_B = 75$ мкА К. $\beta_{\text{стат}} = I_C / I_B$;

- динамический коэффициент передачи тока транзистора при фиксированном напряжении $U_{k\beta} = 4$ В и токе базы $I_b = 75$ мкА $K_I = \beta = \Delta I_k / \Delta I_b$;
 - произвести аналогичные вычисления для двух других точек, выбранных самостоятельно;
 - результаты занести в таблицу;
5. Привести паспортные данные основных характеристик исследуемых приборов.
6. Сравнить полученные результаты исследований с паспортными данными на приборы.

2.11.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Мультиметр, используется как PV1 ($U_{b\beta}$).

2.11.4 Описание (ход) работы:

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

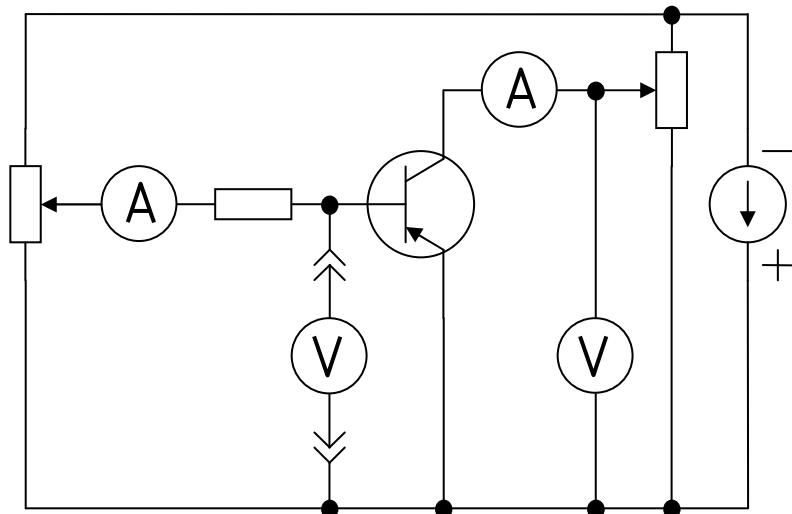


Рис. 3.1. Схема измерения входных и выходных ВАХ транзисторов в схеме с ОЭ

Порядок выполнения эксперимента

1. Собрать схему.
2. Установить на измерительных приборах необходимые пределы измерений в соответствии с исследуемым прибором (на PV1 1 - 2 В). На потенциометрах R1 и R3, подключенных к блоку питания, ручки регулировки выходного напряжения установить в 0 В.
3. После проверки схемы преподавателем включить схему.
4. Произвести измерения входных характеристик транзистора. Следить, чтобы стрелки приборов не зашкаливали.

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

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

- Произвести измерения выходных характеристик транзистора. Следить, чтобы стрелки приборов не зашкаливали.

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

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

Повторить п. 5.2.

- Отключить схему.

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

Таблица. Результаты измерений входных ВАХ транзистора типа МП42.

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

Таблица. Результаты измерений выходных ВАХ транзистора МП42.

I_b , мкА	U_k	В	0	0,25	0,5	1	2	4	6	8	10
0	I_k	мА									
25	I_k	мА									
50	I_k	мА									
75	I_k	мА									
100	I_k	мА									
125	I_k	мА									
150	I_k	мА									
175	I_k	мА									
200	I_k	мА									

Представление и обработка результатов измерений

- Привести полную схему лабораторного стенда исследований характеристик транзисторов. Для исследуемых схем входных и выходных характеристик ниже указать положение всех тумблеров схемы (включено/выключено). Привести упрощенную итоговую схему исследований.
- На одном графике построить входные вольт-амперные характеристики транзисторов $I_b = f(U_{b3})$.

3. На другом графике построить семейство выходных вольт-амперных характеристик транзисторов $I_k = f(U_{k\alpha})$ при разных токах базы I_b .
4. Определить и вычислить:
 - статическое входное сопротивление транзистора при фиксированном напряжении $U_{k\alpha} = 4$ В и токе базы $I_b = 75 \text{ мА}$ $r_{статвх} = U_{б\alpha}/I_b$;
 - дифференциальное входное сопротивление транзистора при фиксированном напряжении $U_{k\alpha} = 4$ В и токе базы $I_b = 75 \text{ мА}$ $r_{дифвх} = \Delta U_{б\alpha}/\Delta I_b$;
 - статический коэффициент передачи транзистора при фиксированном напряжении $U_{k\alpha} = 4$ В и токе базы $I_b = 75 \text{ мА}$ $K_{I_{стам}} = \beta_{стам} = I_k/I_b$;
 - динамический коэффициент передачи тока транзистора при фиксированном напряжении $U_{k\alpha} = 4$ В и токе базы $I_b = 75 \text{ мА}$ $K_I = \beta = \Delta I_k/\Delta I_b$;
 - произвести аналогичные вычисления для двух других точек, выбранных самостоятельно;
 - результаты занести в таблицу;
5. Привести паспортные данные основных характеристик исследуемых приборов.
6. Сравнить полученные результаты исследований с паспортными данными на приборы.

Таблица. Экспериментальные входные характеристики приборов.

№	I_b	$U_{б\alpha}$	ΔI_b	$\Delta U_{б\alpha}$	$r_{статвх}$	$r_{дифвх}$		Прим.
пп	мкА	мВ	мкА	мВ	Ом	Ом		-
1								
2								
3								

Таблица. Экспериментальные выходные и передаточные характеристики приборов.

№	I_b	$U_{k\alpha}$	ΔI_b	I_k	ΔI_k	$\beta_{стам}$	β	Прим.
пп	мкА	В	мкА	мА	мА	о.е.	о.е.	-
1								
2								
3								

(По данной форме необходимо представить все лабораторные работы)

2.12 Лабораторная работа № 20(2 часа).

Тема: «Двухполупериодный неуправляемый выпрямитель»

2.12.1 Цель работы:

1. Изучить принцип действия диода.
2. Изучить схемы двухполупериодных выпрямителей и принцип действия сглаживающих фильтров.

2.12.2 Задачи работы:

1. Исследовать работу сглаживающего фильтра при двухполупериодном выпрямлении.
2. Записать выводы по результатам.

2.12.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Компьютер «Пентиум-4»

2. программа Multisim

2.12.4 Описание (ход) работы:

Для преобразования (выпрямления) переменного тока в постоянный ток используют выпрямители. Схемы выпрямления бывают одно- или двухполупериодные. После выпрямления в нагрузке протекает пульсирующий ток. Для сглаживания пульсаций применяют фильтры.

В схемах двухполупериодных выпрямителей (рисунки 1,2 и 3) диоды VD1-VD10 преобразуют синусоидальное напряжение источника в пульсирующее. Нагрузкой служит резистор $R=1$ кОм. Параллельно ему подключен конденсатор C – простейший сглаживающий фильтр. Вольтметр PV показывает среднее значение выпрямленного напряжения $U_{ср.}$ на нагрузке. Для измерения максимальных значений выпрямленного напряжений в работе используется осциллограф.

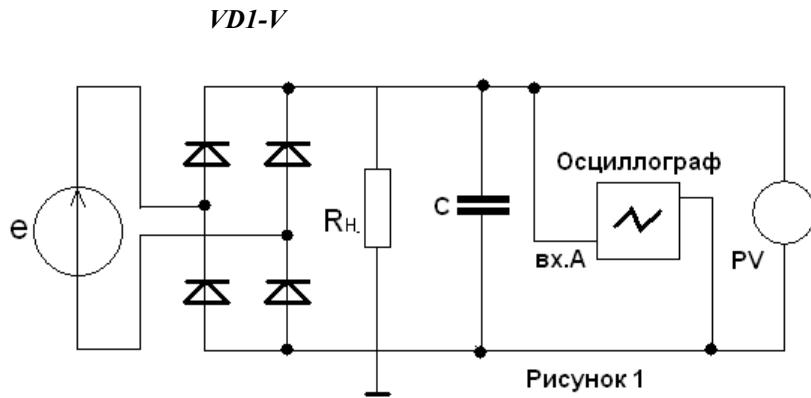
Работа на компьютере

Поочередно «собрать» схемы выпрямителей (рисунки 1,2 и 3).

Для выбора диода двойным нажатием клавиши «мыши» на его изображении открыть окно параметров (см. рисунок 1 «Инструкции пользователю программой ...»). В окне DiodeProperties выбрать Models, затем в окне Library – Philips, а в окне Model – выбрать сверху по порядку номер диода, который соответствует Вашему номеру в журнале группы.

Выбрать следующие параметры источника синусоидального напряжения: $e=10$ В; частота $f=50$ Гц; начальная фаза ψ_e ЭДС однофазного источника равна 0, в трёхфазном – отличаются в фазах на 120, а в пятифазном – на 72, начиная с 0. Сопротивление вольтметра (**типа «DC»**) не изменять.

Для выбора осциллографа открыть на панели инструментов окно  , а затем  . На рабочем столе появится осциллограф  (см. рас положение контактов).



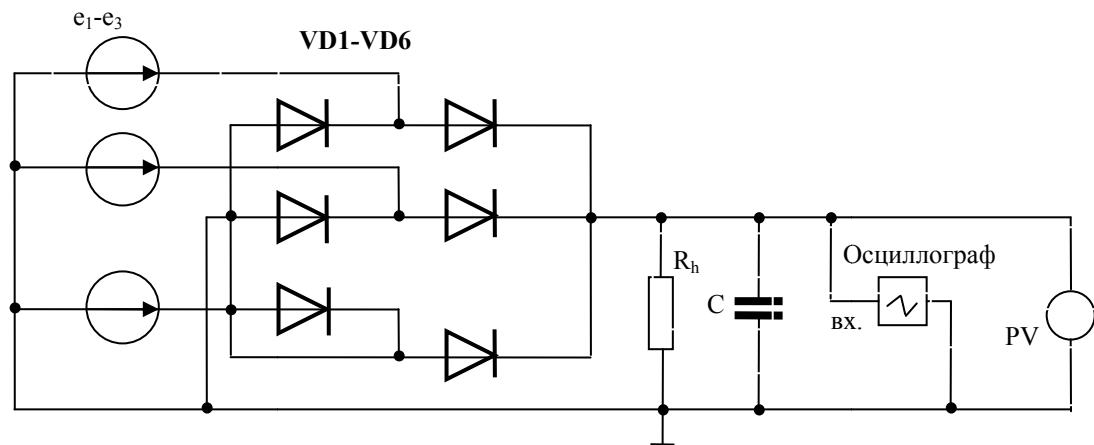
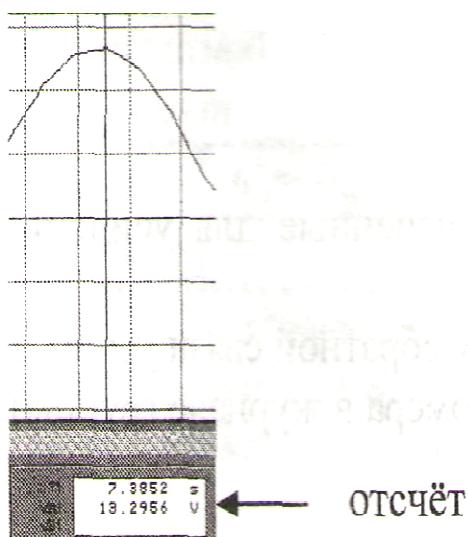
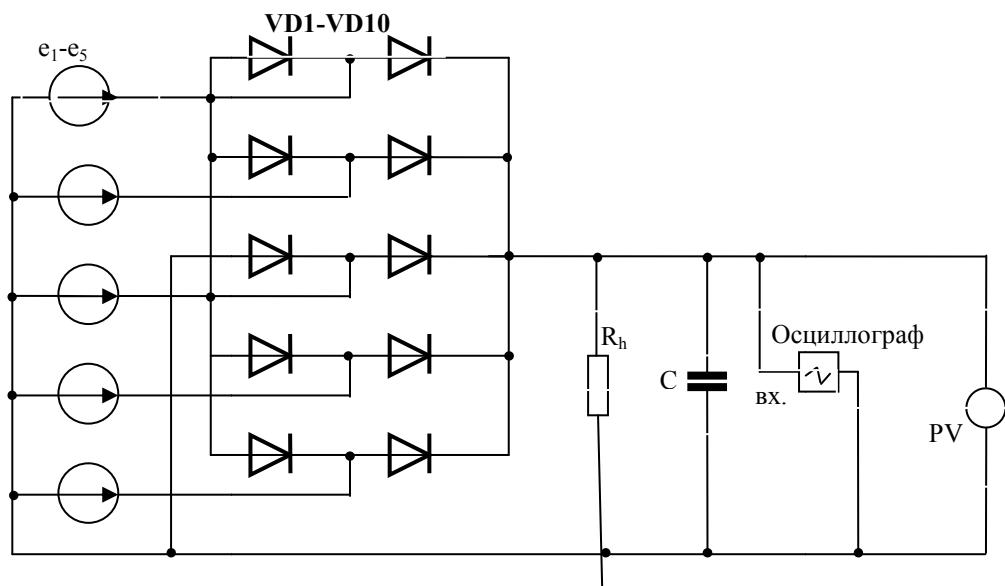


Рисунок 2



2.2.2 Поочередно собирать схемы (рисунки 1...3).

2.2.3 «Включить схему и, изменяя емкость конденсатора в соответствии с заданием в таблице ($C=0,0000001, 10, 50, 100, 200$ и 300 мкФ), записать в таблицу показания вольтметра PV

(средние значения U_{cp}). Для измерения максимального значения напряжения U_m использовать осциллограф. Двойным нажатием левой клавиши «мыши» на изображении осциллографа открыть его лицевую панель и, нажав Expand, увеличить окно. Установить усиление каналов Channel «A»-10V/Div, а развертку Timebase-5 ms/div для наблюдения на экране двух- трех периодов напряжения. Максимальное напряжение измерять с помощью визирной вертикальной линии

(красного или синего цвета). Перемещая линию по горизонтали каждый раз её следует устанавливать на максимальном значении кривой выпрямленного напряжения. Отсчитывать напряжение можно в окне осциллографа (рисунок 4)

3. по результатам работы

- 3.1 Рассчитать коэффициенты пульсаций выпрямленного напряжения по формуле $q = U_m / C_p$ при $C=0, 10, 50, 100, 200$ и 300 мкФ. Результаты записать в таблицу.
- 3.2 Построить в одной системе координат графики $q(C)$.
- 3.3. Записать выводы о влиянии схем выпрямления и ёмкости конденсатора на коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения.

Схема выпрямителя	Параметры	Без Фильтра ($C=0$)	С конденсатором, мкФ				
			10	50	100	200	300
Однофазный	изм	$U_{cp} B$					
		$U_m B$					
	расс	q					
Трехфазный	изм	$U_{cp} B$					
		$U_m B$					
	расс	q					
Пятифазный	изм	$U_{cp} B$					
		$U_m B$					
	расс	q					

4 Содержание отчета

- 4.1 Заполненная таблица и осцилограммы напряжений.
- 4.2 Графики зависимости $q(C)$.
- 4.3 Выводы.

2.13 Лабораторная работа № 21,22 (4 часа).

Тема: «Усилитель постоянного тока»

2.13.1 Цель работы:

Изучить схемы и характеристики усилителей постоянного тока.

2.13.2 Задачи работы:

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

1.3 Записать выводы по результатам.

2.13.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

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

2.13.4 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).

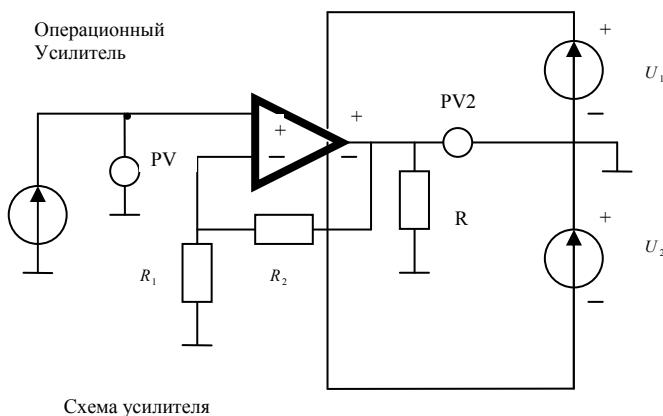
Результаты записать в таблицы 1 и 2

.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	$\beta = R_1 / (R_1 + R_2)$	$R_1 + 10 \cdot N, \text{kOm}$							
		$R_1 + 30 \cdot N, \text{kOm}$							
		$R_1 + 50 \cdot N, \text{kOm}$							
рассчитать	$K = U_{\text{вых.}} / U_{\text{вх.}} (\text{при } R_1 + 30 \cdot N, \text{kOm})$								
	$K_{o.c.} = K_u / (1 + \beta \cdot K_u)$								

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.

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

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

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.

2.14.Лабораторная работа № 23,24 (4 часа).

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

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

2.14.2 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.

2.14.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

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

2.14.4 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.

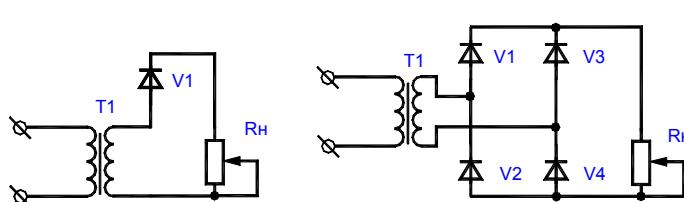
Среднее значение выпрямленного напряжения:

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

Если учесть, что действующее значение напряжения на вторичной обмотке E_2 связано с амплитудным соотношением:

можно получить простое соотношение для определения среднего значения $E_2m = E_2\sqrt{2}$

$$U_{cp} = 0,9 E_2$$



выпрямленного напряжения:

а)

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 V_1 и V_2 и трансформатор T_1 , имеющий две одинаковые вторичные обмотки, включенные последовательно и согласно. В положительный полупериод сетевого напряжения открыт вентиль V_1 . В отрицательный полупериод открыт вентиль V_2 . При этом ток обоих вентилей протекает через нагрузку в одном направлении. Формы напряжения и тока такие же, как и в мостовой схеме. Однако амплитудное значение обратного напряжения на вентиле в два раза больше, чем в схеме Греца. Недостатком схемы является плохое использование трансформатора, так как имеются две вторичные обмотки, работающие по полпериода каждая. Основная область применения данной схемы – низковольтные выпрямители. В ней последовательно с нагрузкой включен только один вентиль, что при низких выпрямленных напряжениях позволяет получить более высокий к.п.д.

Управляемые выпрямители

Управляемым называется такой выпрямитель, который, кроме выпрямления переменного напряжения, одновременно осуществляет регулирование напряжения. Управляемый выпрямитель (УВ) получается из обычного заменой в нем неуправляемых вентилей (диодов) управляемыми вентилями - тиристорами. Регулирование

осуществляется задержкой отпирания очередного тиристора в пределах полупериода сетевого напряжения. Угол задержки отпирания тиристора, называемый углом управления 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.

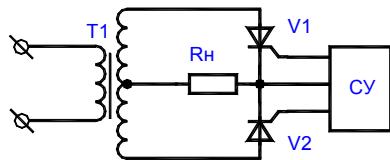


Рис. 4.2. Схема управляемого выпрямителя по схеме с нулевой точкой трансформатора

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

$$U_{cp} = U_{cp_0} * (1 + \cos \alpha) / 2$$

где $U_{cp_0} = 2E2m/\pi = 0,9E2$ - 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_{cp_0} 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 ($I_h = 100mA$) осцилограммы выпрямленного напряжения, напряжения на диоде, анодного тока диода, тока на выходе выпрямителя, тока вторичной и первичной обмоток трансформатора.

Осцилограммы 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. ($I_h = 200mA$).

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

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

Осцилограммы 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 осцилограмме выходного напряжения с помощью осциллографа.

10. Определить внутреннее сопротивление выпрямителя в номинальном режиме.

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

2.15 Лабораторная работа № 25 (2 часа).

Тема: «Исследование трехфазной электрической цепи переменного тока при соединении потребителей звездой »

2.15.1 Цель работы: Изучить способы соединения однофазных потребителей в трехфазных системах.

2.15.2 Задачи работы:

Освоить методы измерения и расчета электрических величин в системах трехфазного тока.

2.15.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Источник питания комбинированный ИПК 1 (8 шт.);
- 2.автотрансформатор лабораторный (6 шт.);
- 3.батарея конденсаторов 0,25....32 мкФ, 500В (2 шт.);
4. дроссель 1УБЕ-40/220В (3шт.);
- 5.ваттметр Ц301 ~1 кВт, 220В, 5А (4 шт.);
6. вольтметр Э377 ~ 500 В (8 шт.);
7. амперметр Э365 ~ 50А (8 шт.)

2.15.4 Описание (ход) работы:

1. В соответствии с техническими характеристиками элементов цепи выбрать схему включения потребителей в трехфазную сеть.
2. Перечертить схему в отчет и собрать ее на рабочем столе. При сборке цепи амперметры и вольтметры в схему не включать, вместо амперметров включить розетки, закороченные вилками. К амперметру подключить провода с вилкой, к вольтметру - провода со штекерами. При таком включении одним амперметром можно будет выполнить измерение всех токов, включая его в соответствующие розетки и одним вольтметром производить измерение напряжения на любых участках цепи. Ваттметры необходимо включить в схему непосредственно при сборке цепи.
3. Установить предел измерения вольтметра 300 В, амперметра – 2,5 А.
4. Установить симметричную нагрузку трехфазной системы, для этого включить все лампы во всех группах. Снять показания всех приборов и записать в таблицу.
5. Установить несимметричную нагрузку трехфазной системы, для этого в одной группе выключить одну лампу, в другой группе две лампы. Снять показания всех приборов и записать в таблицу.
6. По данным опыта для симметричной нагрузки определить полное, активное и реактивное сопротивление, полную, активную, реактивную мощность и коэффициент мощности каждой фазы.

7. По данным опыта для несимметричной нагрузки построить совмещенную векторную диаграмму напряжений и токов цепи.

Объект и средства исследования

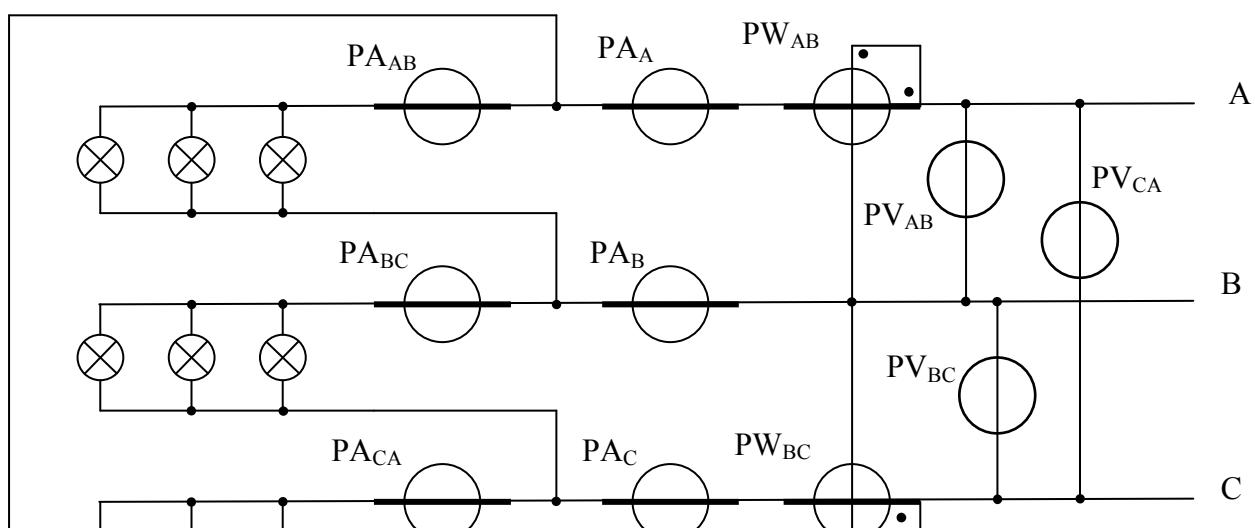
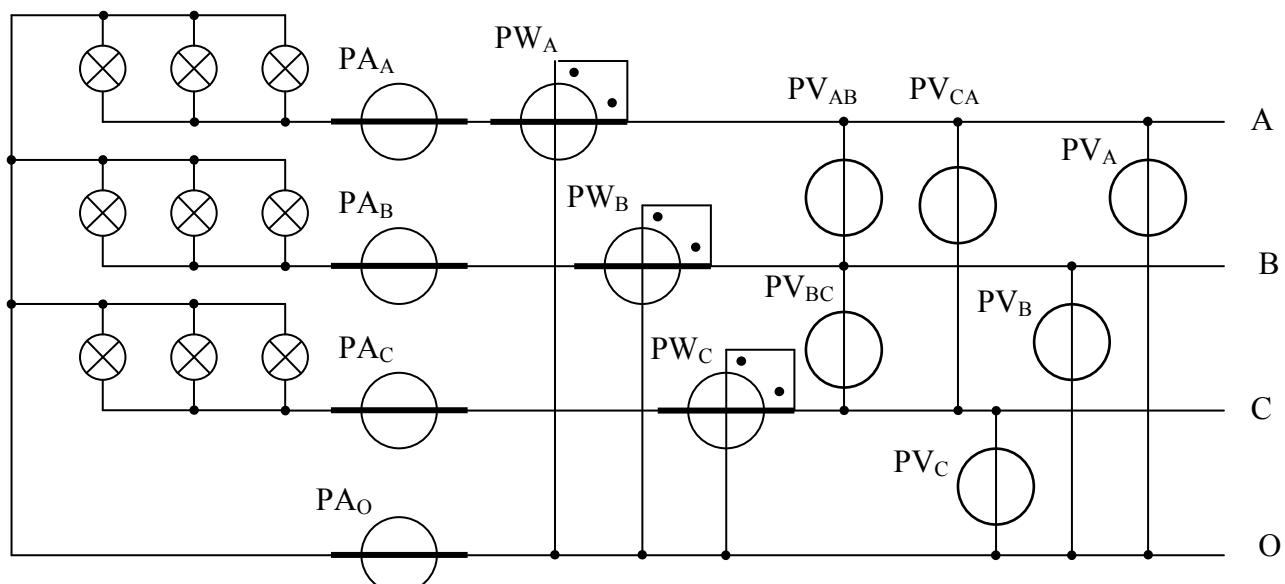
Исследуемая трехфазная цепь собирается из девяти ламп накаливания, включенных в три группы по три лампы в каждой. Параметры ламп и трехфазной сети указаны в технических характеристиках элементов цепи. Для измерения напряжения на рабочем месте имеется один вольтметр электромагнитной системы с пределами измерений 150 и 300 вольт. Для измерения тока имеется один амперметр электромагнитной системы с пределами измерения 2,5 и 5 ампер. Для измерения мощности имеются однофазные ваттметры типа Д307 с пределами измерений 220 вольт, 5 ампер.

Технические характеристики элементов цепи

Трехфазная сеть с напряжением 220/127 В.

Лампы накаливания (характеристика одной лампы) 220 В, 100 Вт.

Электрические схемы



2.16 Лабораторная работа № 26,27 (4 часа).

Тема: «Исследование трехфазной электрической цепи переменного тока при включении нагрузки звездой»

2.16.1 Цель работы:

1. Изучение режимов работы трехфазной цепи переменного тока при соединении потребителей звездой.

2.16.2 Задачи работы:

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

2.16.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

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

2.16.4 Описание (ход) работы:

1. Собрать электрическую цепь, используя рис. 1. Установить параметры элементов цепи в соответствии с техническими характеристиками по варианту, указанному преподавателем. Фазовые углы источников установить равными: EA - 0°, EB - 240°, EC - 120°. Амперметры перевести в режим AC.
2. Провести измерение токов. Результаты измерений занести в таблицу 2.
3. Подключить осциллограф к нагрузке фазы А. При этом канал А подключить параллельно всей нагрузке фазы (к точке 1), а канал В – параллельно активному сопротивлению (к точке 4). Установить чувствительность канала А – YA , чувствительность канала В – YB и частоту развертки XT в соответствии с таблицей 1. Включить режим ZOOM на осциллографе.
4. При помощи визирных линий на экране осциллографа определить временной сдвиг по фазе между напряжением на резисторе и напряжением на всей фазе (красную визирную линию совместить с точкой пересечения кривой напряжения на резисторе с осью абсцисс, а синюю линию – с ближайшей точкой пересечения кривой напряжения на всей фазе с осью абсцисс). Результат измерения занести в таблицу 2.
5. Аналогично подключить осциллограф к нагрузке фазы В. Канал А подключить к точке 2, а канал В – к точке 5. При помощи визирных линий на экране осциллографа определить временной сдвиг по фазе между напряжением на резисторе и напряжением на всей фазе. Результат измерения занести в таблицу 2.

6. Выполнить измерение сдвига по фазе между напряжением на всей нагрузке и напряжением на резисторе в фазе С (канал А подключить к точке 3, а канал В – к точке 6). Результат измерения занести в таблицу 2.
7. Установить симметричную нагрузку. Для этого индуктивности во всех фазах установить равными индуктивности в фазе А, а активное сопротивление всех фаз – равным активному сопротивлению в фазе В.
8. Провести измерение токов в цепи и временных сдвигов по фазе между напряжением на резисторе и напряжением на всей фазе. Результаты измерений занести в таблицу 2.
9. Рассчитать углы ϕ сдвига вектора тока по отношению к вектору напряжения для каждой фазы, используя временной сдвиг по фазе между напряжением на резисторе и напряжением на всей фазе ($\phi = 360f\Delta T$).
10. Используя результаты измерений, определить активную мощность каждой фазы и всей цепи для несимметричной и симметричной нагрузки. Результат расчета занести в таблицу 2.
11. Используя параметры элементов электрической цепи, рассчитать все токи, а также активную мощность каждой фазы и всей цепи при несимметричной и симметричной нагрузке. Результат занести в таблицу 3.
12. Сравнить результаты расчетов с результатами измерений.
13. Построить в масштабе векторную диаграмму цепи для несимметричной нагрузки.

Объект и средства исследования

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

Электрическая схема

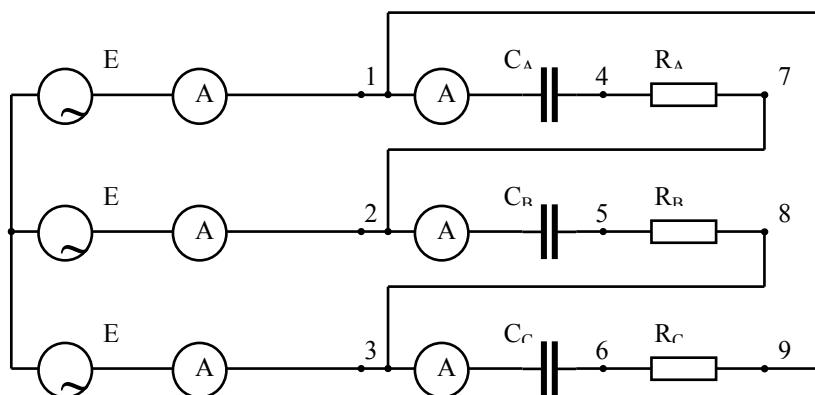


Таблица 1

Параметры элементов цепи

№ Вар.	U _ф , В	f, Гц	C _{AB} , мкФ	C _{BC} , мкФ	C _{CA} , мкФ	R _{AB} , Ом	R _{BC} , Ом	R _{CA} , Ом	Y _A , В/дел	Y _B , В/дел	X _T , мС/дел
1	220	60	100	110	120	25	35	45	200	200	2
2	220	110	40	30	15	50	70	60	200	200	1
3	127	50	80	70	90	35	55	25	100	100	2
4	127	160	40	50	30	13	18	20	100	100	0,5
5	380	210	5	10	6	130	120	140	500	500	0,5
6	380	140	10	8	4	120	140	170	500	200	1
7	110	260	20	40	25	45	25	35	100	100	0,5
8	110	320	15	12	10	35	55	45	100	100	0,5

Таблица 2

Результаты экспериментов

Режим работы цепи	I _A , А	I _B , А	I _C , А	I _{AB} , А	I _{BC} , А	I _{CA} , А	ΔT _{AB} , С	ΔT _{BC} , С	ΔT _{CA} , С	P, Вт
Несимметричная нагрузка										
Симметричная нагрузка										

Таблица 3

Результаты расчетов

Режим работы цепи	I _A , А	I _B , А	I _C , А	P _{AB} , Вт	P _{BC} , Вт	P _{CA} , Вт	P, Вт
Несимметричная нагрузка							
Симметричная нагрузка							

2.17 Лабораторная работа № 28 (2 часа).

Тема: «Исследование трехфазной электрической цепи переменного тока при включении нагрузки треугольником»

2.17.1 Цель работы:

1. Изучение режимов работы трехфазной цепи переменного тока при соединении потребителей треугольником.

2.17.2 Задачи работы:

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

2.17.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

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

2.17.4 Описание (ход) работы:

1. Собрать электрическую цепь, используя рис. 1. Установить параметры элементов цепи в соответствии с техническими характеристиками по варианту, указанному преподавателем. Фазовые углы источников установить равными: ЕА - 0°, ЕВ - 240°, ЕС - 120°. Амперметры перевести в режим АС.
2. Провести измерение токов. Результаты измерений занести в таблицу 2.
3. Подключить осциллограф к нагрузке фазы АВ. При этом канал А подключить параллельно всей нагрузке фазы (к точке 1), канал В – параллельно активному сопротивлению (к точке 4), общую шину подключить к точке 7. Установить чувствительность канала А – YA, чувствительность канала В – YB и частоту развертки XT в соответствии с таблицей 1. Включить режим ZOOM на осциллографе.
4. При помощи визирных линий на экране осциллографа определить временной сдвиг по фазе между напряжением на резисторе и напряжением на всей фазе (красную визирную линию совместить с точкой пересечения кривой напряжения на резисторе с осью абсцисс, а синюю линию – с ближайшей точкой пересечения кривой напряжения на всей фазе с осью абсцисс). Результат измерения занести в таблицу 2.
5. Аналогично подключить осциллограф к нагрузке фазы ВС. Канал А подключить к точке 2, канал В – к точке 5, общую шину подключить к точке 8. При помощи визирных линий на экране осциллографа определить временной сдвиг по фазе между напряжением на резисторе и напряжением на всей фазе. Результат измерения занести в таблицу 2.

6. Выполнить измерение сдвига по фазе между напряжением на всей нагрузке и напряжением на резисторе в фазе СА (канал А подключить к точке 3, канал В – к точке 6, общую шину – к точке 9). Результат занести в таблицу 2.
7. Установить симметричную нагрузку. Для этого емкости во всех фазах установить равными емкости в фазе АВ, а активное сопротивление всех фаз - равным активному сопротивлению в фазе ВС.
8. Провести измерение токов в цепи и временных сдвигов по фазе между напряжением на резисторе и напряжением на всей фазе. Результаты измерений занести в таблицу 2.
9. Рассчитать углы ϕ сдвига вектора тока по отношению к вектору напряжения для каждой фазы, используя временной сдвиг по фазе между напряжением на резисторе и напряжением на всей фазе ($\phi = 360f\Delta T$).
10. Используя результаты измерений, определить активную мощность каждой фазы и всей цепи для несимметричной и симметричной нагрузки. Результат расчета занести в таблицу 2.
11. Используя параметры элементов электрической цепи, рассчитать все токи при несимметричной и симметричной нагрузке, а также активную мощность каждой фазы и всей цепи при несимметричной и симметричной нагрузке. Результат занести в таблицу 3.
12. Сравнить результаты расчетов с результатами измерений.
13. Построить в масштабе векторную диаграмму цепи для несимметричной нагрузки.

Объект и средства исследования

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

Электрическая схема

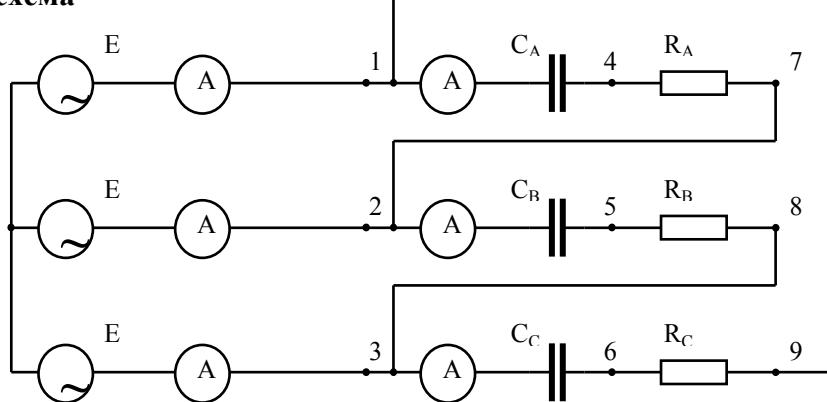


Таблица 1

Параметры элементов цепи

№ Вар.	U_ϕ , В	f , Гц	C_{AB} , мкФ	C_{BC} , мкФ	C_{CA} , мкФ	R_{AB} , Ом	R_{BC} , Ом	R_{CA} , Ом	Y_A , В/дел	Y_B , В/дел	X_T , мС/дел
1	220	60	100	110	120	25	35	45	200	200	2
2	220	110	40	30	15	50	70	60	200	200	1
3	127	50	80	70	90	35	55	25	100	100	2
4	127	160	40	50	30	13	18	20	100	100	0,5
5	380	210	5	10	6	130	120	140	500	500	0,5
6	380	140	10	8	4	120	140	170	500	200	1
7	110	260	20	40	25	45	25	35	100	100	0,5
8	110	320	15	12	10	35	55	45	100	100	0,5

Таблица 2

Результаты экспериментов

Режим работы цепи	I_A , А	I_B , А	I_C , А	I_{AB} , А	I_{BC} , А	I_{CA} , А	ΔT_{AB} , С	ΔT_{BC} , С	ΔT_{CA} , С	P , Вт
Несимметричная нагрузка										
Симметричная нагрузка										

Таблица 3

Результаты расчетов

Режим работы цепи	I_A , А	I_B , А	I_C , А	P_{AB} , Вт	P_{BC} , Вт	P_{CA} , Вт	P , Вт
Несимметричная нагрузка							
Симметричная нагрузка							

2.18Лабораторная работа № 29 (2 часа).

Тема: «Исследование трехфазной электрической цепи переменного тока при соединении потребителей треугольником и звездой»

2.18.1 Цель работы:

1. Изучить способы соединения трехфазных потребителей в трехфазных системах.

2.18.2 Задачи работы:

1. Освоить методы измерения и расчета электрических величин в системах трехфазного тока.

2.18.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Источник питания комбинированный ИПК 1 (8 шт.);
2. автотрансформатор лабораторный (6 шт.);
3. батарея конденсаторов 0,25....32 мкФ, 500В (2 шт.);
4. дроссель 1УБЕ-40/220В (3шт.);
5. ваттметр Ц301 ~1 кВт, 220В, 5А (4 шт.);
6. вольтметр Э377 ~ 500 В (8 шт.);
7. амперметр Э365 ~ 50А (8 шт.)

2.1.4 Описание (ход) работы:

1. В соответствии с техническими характеристиками элементов цепи выбрать схему включения потребителя в трехфазную сеть.
2. Перечертить схему в отчет и собрать ее на рабочем столе.
3. Установить пределы измерений многопредельных приборов.
4. После проверки схемы преподавателем и получения разрешения на включение, убедиться, что амперметры закорочены перемычками, включить сеть, после раскрутки ротора электродвигателя вынуть перемычки и снять показания амперметров. Записать показания вольтметра и ваттметра. Занести показания всех приборов в таблицу.
5. По данным опыта определить полное, активное и реактивное сопротивление фазы электродвигателя, полную мощность, реактивную мощность и коэффициент мощности электродвигателя.
6. Построить совмещенную векторную диаграмму напряжений и токов электродвигателя.

Объект и средства исследования

В качестве трехфазного потребителя используется асинхронный трехфазный электродвигатель с коротко замкнутым ротором. Параметры электродвигателя и

трехфазной сети указаны в технических характеристиках элементов цепи. Для измерения напряжения на рабочем месте имеется вольтметр электромагнитной системы с пределами измерения 150 и 300 вольт. Для измерения линейного и фазного тока имеются амперметры электромагнитной системы с пределом измерения 5 ампер. Амперметры снабжены перемычками, которыми закорачивают амперметры на время пуска электродвигателя для защиты их от перегрузки. Измерение активной мощности осуществляется двухэлементным трехфазным киловаттметром типа ВИТ с пределами измерения 220 вольт, 5 ампер.

Технические характеристики элементов цепи

Трехфазная сеть с напряжением

220/127 В.

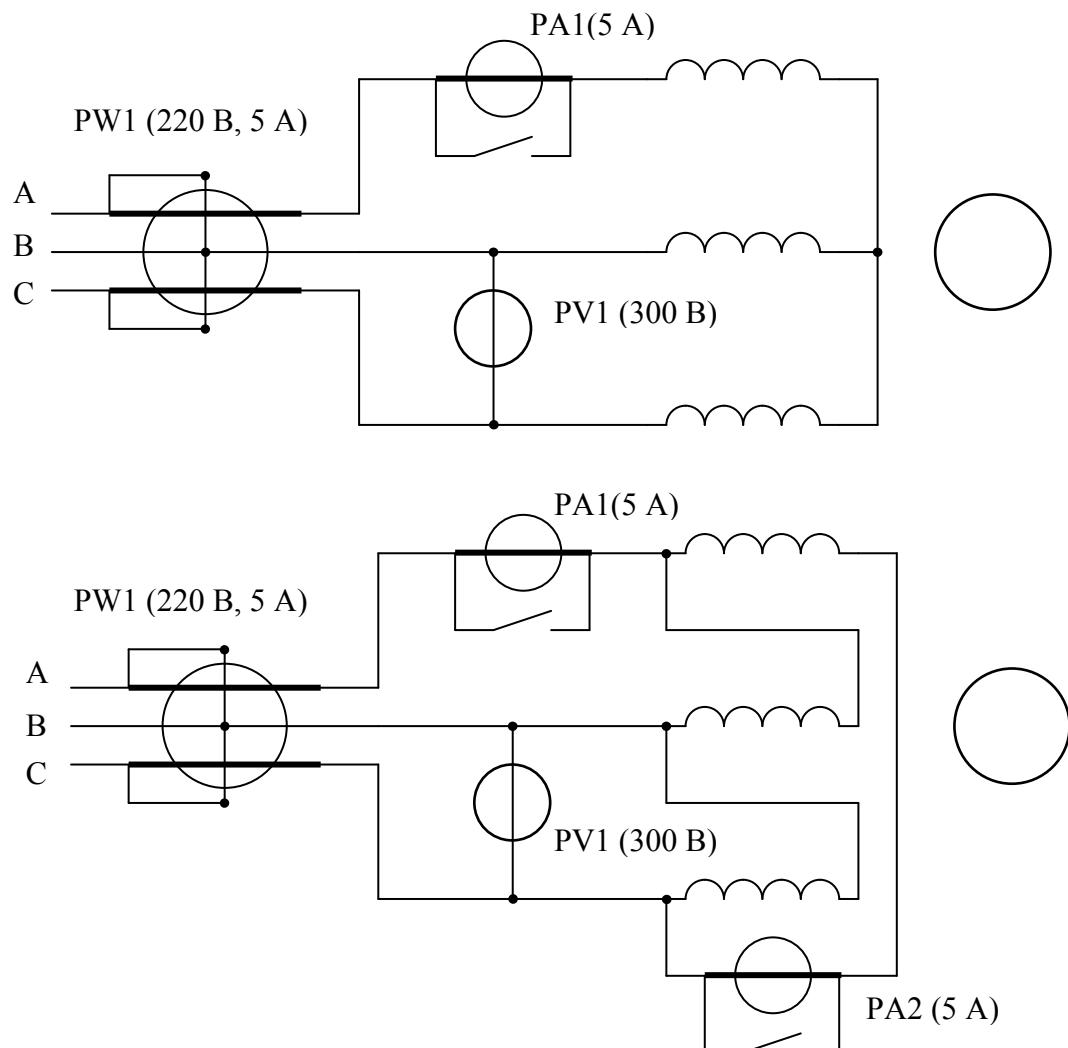
Электродвигатель на номинальное напряжение

220/380 В.

Таблица измеренных величин

PV1		PA1	PA2	PW1
C =		Ампер	Ампер	Ватт
Дел.	Вольт			

Электрические схемы



2.19 Лабораторная работа № 30,31 (2 часа).

Тема: «Включение трехфазного трансформатора в трехфазную систему»

2.19.1 Цель работы:

1. Изучить конструкцию трехфазного трансформатора.

2.19.2 Задачи работы:

2. Научиться маркировать выводы трехфазного трансформатора и включать его в трехфазную систему.

2.19.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Источник питания комбинированный ИПК 1;
2. автотрансформатор лабораторный (6 шт.);
3. батарея конденсаторов 0,25...32 мкФ, 500В (2 шт.);
4. дроссель 1УБЕ-40/220В (3шт.);

2.19.4 Описание (ход) работы:

- 1.Произвести эксперимент, позволяющий определить:

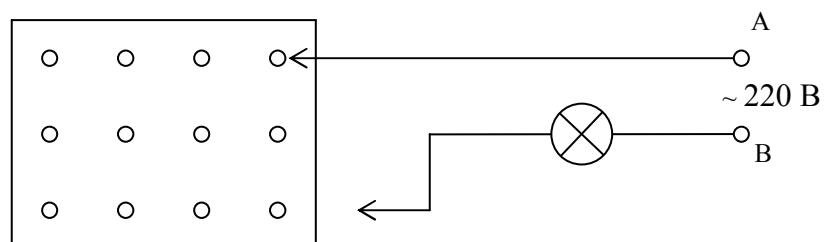
- 1.1. Выводы, принадлежащие обмоткам высшего и низшего напряжений.
- 1.2. Обмотки высшего и низшего напряжений, расположенные на одном стержне.
- 1.3. Начала и концы обмоток высшего напряжения.
- 1.4. Начала и концы обмоток низшего напряжения.

- 2.Произвести испытание трансформатора под нагрузкой.

Присоединить выводы клеммной колодки к выводам трансформатора на стенде (в произвольном порядке).

Начертить клеммную колодку в отчет (на половину страницы).

Используя источник переменного напряжения 220 вольт и контрольную лампу на то же напряжение, определить выводы, принадлежащие обмоткам высшего и низшего напряжения. Для этого подключить лампу, как показано на рисунке 2, и поочередно касаться свободным выводом лампы свободных выводов колодки пока лампа не загорится.



на чертеже колодки в отчете. Опыт повторять, изменяя подключение верхнего по схеме провода, пока не будут определены все пары выводов.

Определить обмотки высшего и низшего напряжения, расположенные на одном стержне. Для этого одну из обмоток **высшего** напряжения (например, с выводами A-X) подключить к источнику переменного напряжения 220 вольт. Вольтметром с пределом измерения 75 вольт измерить напряжение на всех трех обмотках низшего напряжения. Та обмотка, напряжение на которой наибольшее, расположена на одном стержне с включенной в сеть обмоткой высшего напряжения. При необходимости изменить маркировку выводов этой обмотки низшего напряжения (ее выводы должны иметь ту же маркировку, что и выводы подключенной к источнику обмотки высшего напряжения). Далее, подключить вторую обмотку высшего напряжения к источнику и повторить опыт, при необходимости, скорректировать обозначение выводов второй и третьей обмоток низшего напряжения.

Определить начало и конец каждой обмотки высшего напряжения. Для этого собрать цепь, изображенную на рисунке 3.

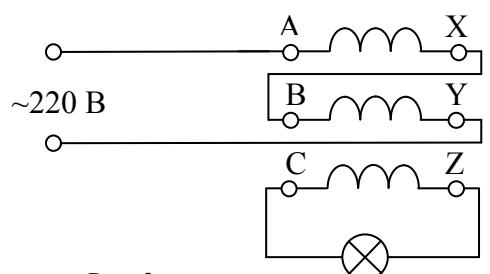


Рис. 3

Если при включении источника питания контрольная лампа загорается, выводы обмотки B-Y промаркованы верно, если не загорается - поменять местами маркировку выводов B и Y (на чертеже колодки в отчете). Далее, собрать цепь, изображенную на рисунке 4. Если при включении источника питания контрольная лампа загорается, выводы обмотки C-Z промаркованы верно, если не загорается - поменять местами маркировку выводов C и Z (на чертеже колодки в отчете).

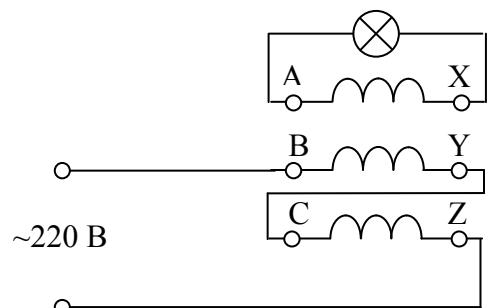
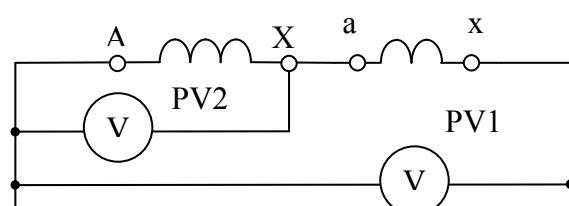


Рис. 4

и Z (на чертеже колодки в отчете).

Определить начало и конец каждой обмотки низшего напряжения. Для этого собрать цепь, изображенную на рисунке 5.



Если показания вольтметра PV1 больше показания вольтметра PV2, то обмотка а-х промаркирована верно, если наоборот, показания вольтметра PV2 больше показания вольтметра PV1, то необходимо поменять местами маркировку выводов а и х (на чертеже колодки в отчете). Далее собрать аналогичную схему со второй, а затем с третьей парой обмоток, расположенныхных на одном стержне и, выполнив опыты, скорректировать при необходимости маркировку выводов обмоток b-у и c-з.

Собрать схему, изображенную на рисунке 6 для испытания трансформатора, включить трехфазную сеть и произвести испытание. Все лампы должны гореть одинаковым накалом.

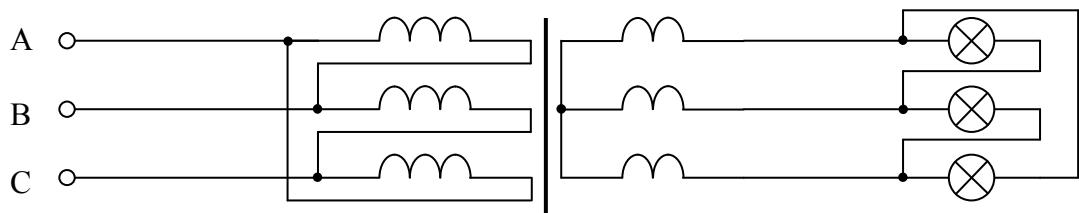


Рис. 6

2.20 Лабораторная работа № 32,33 (4 часа).

Тема: «Включение трехфазного асинхронного электродвигателя в трехфазную систему»

2.20.1 Цель работы:

1. Изучить конструкцию трехфазного асинхронного электродвигателя с коротко замкнутым ротором.
2. Исследовать работу электродвигателя в нормальном и аварийных режимах.

2. 20.2 Задачи работы:

1. Научиться маркировать выводы трехфазного асинхронного электродвигателя.

2. 20.3 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. 20.4 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).

2.21 Лабораторная работа № 34 (2 часа).

Тема: «Исследование однофазного воздушного трансформатора»

2.21.1 Цель работы:

1. Исследовать режимы работы воздушного трансформатора при активной нагрузке.

2.21.2 Задачи работы:

1. Научиться определять параметры трансформатора по результатам испытаний.

2.21.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

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

2.21.4 Описание (ход) работы:

Объект и средства исследования

Объектом исследования является двухобмоточный воздушный трансформатор.

Исследования выполняются на компьютере с использованием программы Multisim

1. Запустите программу Multisim
2. Откройте файл lab9_4 var_ в соответствии с вариантом, указанным преподавателем (например, lab9_4 var_01). Файлы находятся в папке Lab09_4.
3. Включить питание схемы и записать показания приборов в таблицу 1.

4. Подключить нижний по схеме вывод вторичной обмотки трансформатора к общей шине. Включить питание и записать показания приборов (переменный резистор нагрузки R_H должен иметь сопротивление в этом опыте 100%).
5. Уменьшая сопротивление нагрузки R_H с помощью клавиши R , записать показания приборов при всех значениях сопротивления (всего шесть значений).
6. Используя результаты измерений, определить потери в меди первичной и вторичной обмотки трансформатора в каждом опыте (P_{m1} и P_{m2}), сопротивление нагрузки R_H , напряжение на нагрузке U_2 , кпд трансформатора и коэффициент мощности в каждом опыте. Результаты расчета занести в таблицу 2.
7. По данным таблицы 2 в одной системе координат построить зависимости U_2 , η , $\cos \phi$ от тока нагрузки I_2 .

Электрическая схема

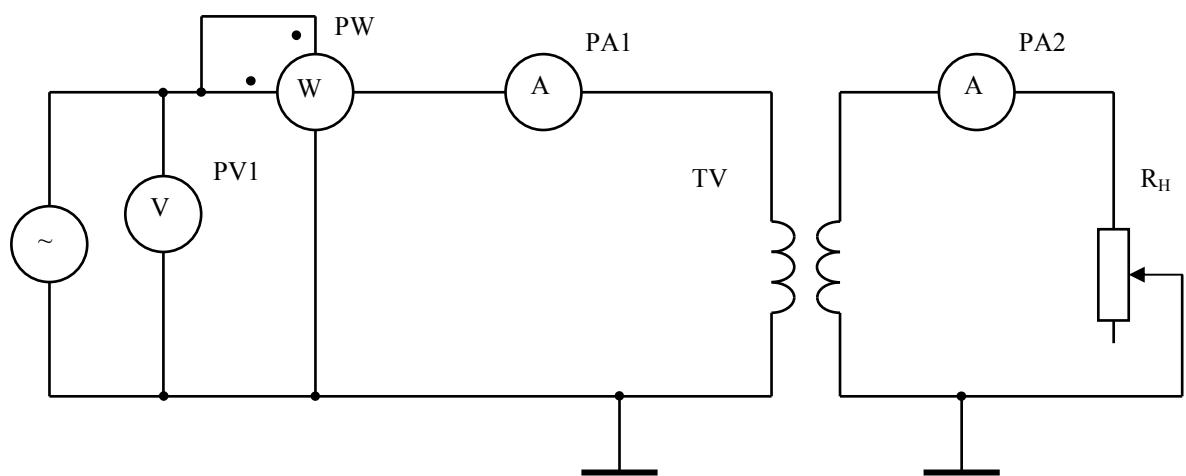


Рис 1

Таблица 1

Результаты экспериментов

№ опыта	R_H , %	U_1 , В	P , Вт	I_1 , А	I_2 , А
1	∞				
2	100				
3	80				
4	60				
5	40				
6	20				
7	0				

Таблица 2

Результаты расчетов

№ опыта	P_{M1} , Вт	P_{M2} , Вт	R_H , Ом	U_2 , В	η	$\cos \varphi$
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

3.1 Практическое занятие №1,2,3(6 часов).

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.

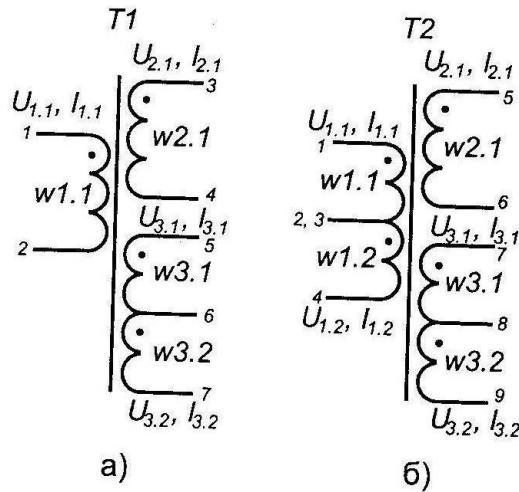


Рис. 1.1 – Электрическая схема силового трансформатора малой мощности

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 приближенно 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 1 кВ, 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

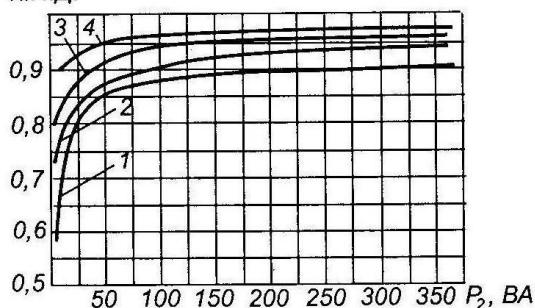
Толшина ленты δ_c , мм	Марка стали	Магнитные удельные потери $P_{уд}$, Вт/кг, не более		Магнитная индукция B_m , Тл, не менее, при напряженности		
		$B_m = 1,5 \text{ Тл}; f_c = 50 \text{ Гц} (P_{1,5/50})$	$B_m = 1,7 \text{ Тл}; f_c = 50 \text{ Гц} (P_{1,7/50})$	$H_{CT} = 80 \text{ А/м};$	$H_{CT} = 100 \text{ А/м};$	$H_{CT} = 2500 \text{ А/м};$
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	-
0,15	3421	-	-	-	-	-
	3422	-	-	-	-	-
	3423	-	-	-	-	-

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

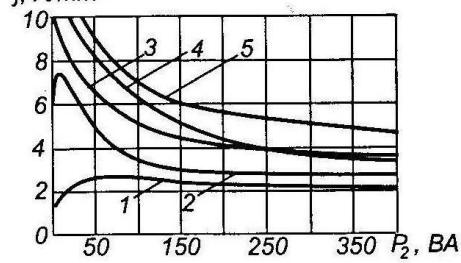
Толщина ленты δ_c , мм	0,5	0,35	0,15	0,1-0,08	0,05	0,02
Коэффициент заполнения сталью k_c	0,96	0,93	0,9	0,85	0,75-0,8	0,65-0,7

К.П.Д.

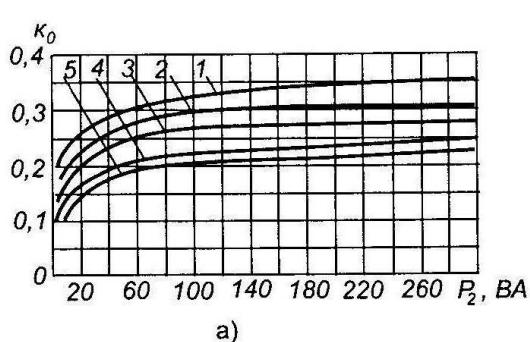


а)

$j, A/mm^2$

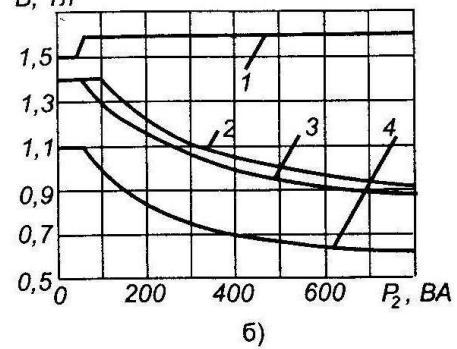


б)



а)

B, T_{pl}



б)

Рис. 1.3. а) зависимость коэффициента заполнения окна $k_o=f(P_{pac})$ 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 $\Delta T_{\text{пер}}=50^{\circ}\text{C}$: 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^4 ; P_{pac} – расчетная мощность трансформатора, ВА; B_m - максимальное значение индукции в сердечнике, Тл; j – плотность тока в проводах обмоток, $\text{А}/\text{мм}^2$; 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.

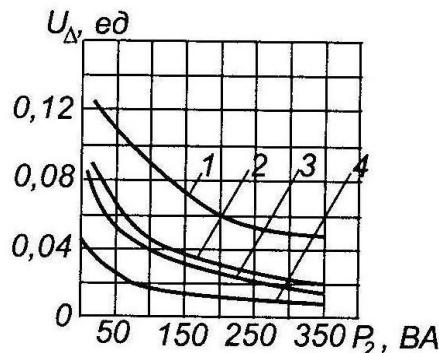


Рис. 1.4. Зависимость относительного падения напряжения $U\Delta=\Delta U/U=f(P_{pac})$, В на выходе, соответствующее изменению тока от нуля до номинального для трансформаторов: 1 – стержневых ленточных из стали 3412, $\delta=0,35$ мм, $f=50$ Гц.

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 $P_{УД}$ (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 $\eta_{ном}$, % 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
$\eta_{ном}$, %	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:

$$P_C = P_{y_0} G_C, \text{ Вт},$$

где G_C – масса магнитопровода в кг; P_{y_0} – 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)

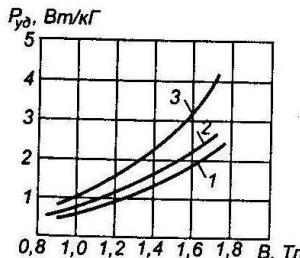


Рис. 1.5. Зависимость удельной мощности $P_{уд}$ потерь в сердечниках от максимальной индукции B_m : 1 – из стали 3413, $\delta=0,35$ мм, $f=50$ Гц; 2 – из стали 3412, $\delta=0,35$ мм, $f=50$ Гц; 3 - из стали 3412, $\delta=0,5$ мм, $f=50$ Гц.

Расчет действующего значения тока холостого хода первичной обмотки трансформатора

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

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

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:

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

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:

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

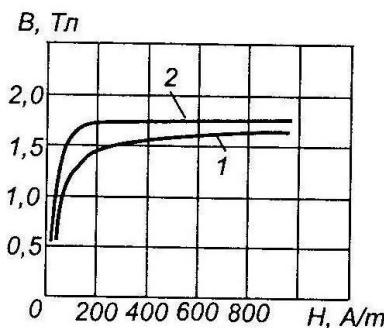


Рис. 1.6. Зависимость индукции в сердечнике от напряженности поля:
1 - для стали 3412; 2 – для стали 3423.

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:

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

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.

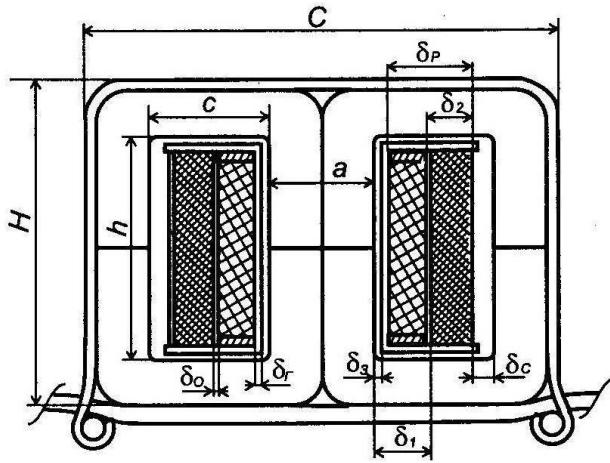


Рис. 1.7. Конструкция обмотки броневого трансформатора с ленточным магнитопроводом

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 $h_{\text{об}11}$ одного слоя обмотки равна:

$$h_{\text{об}11} = h - 2\delta_3 - 2\delta_{\text{щ}}$$

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:

$$w_{\text{СЛ}1} = \frac{h_{\text{об}11}k_y}{d_{11}}; \quad w_{\text{СЛ}2i} = \frac{h_{\text{об}2i}k_{y2i}}{d_{2i}}.$$

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:

$$n_{\text{СЛ}11} = \frac{P_1}{m_1} \cdot \left(w_{11} / w_{\text{СЛ}11} \right);$$

$$n_{\text{СЛ}2i} = \frac{P_{2i}}{m_1} \cdot \left(w_{2i} / w_{\text{СЛ}2i} \right),$$

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:

$$\delta_1 = 1,2 \cdot n_{CP1} \cdot d_{11}, \text{мм}$$

$$\delta_{2i} = 1,2 \cdot n_{CP2i} \cdot d_{2i}, \text{мм}$$

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:

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

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

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:

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

$$r_{2i} = \frac{l_{CP2i} w_{2i} k_t k_f}{57 q_{2i}}, \text{Ом}$$

где $k_t = 1 + 0,004(T_C + \Delta T - 20)$ – температурный коэффициент удельного сопротивления материала проводников; T_C – максимальная температура окружающей среды, °C; $\Delta T = 50$ °C – максимальная температура перегрева обмоток, °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:

3.2 Практическое занятие №4,5(4 часов).

Тема: Расчет схем выпрямителей

3.2.1 Задание для работы:

1. Общие понятия о выпрямительных устройствах
2. Расчет основных параметров выпрямителей
3. Графическое определение параметров выпрямителей

3.2.2 Краткое описание проводимого занятия:

1. Общие понятия о выпрямительных устройствах

Выпрямительными называются устройства преобразования электрической энергии переменного тока в энергию постоянного тока. Основным элементом выпрямительного устройства является диод, который представляет собой нелинейный прибор с односторонней проводимостью.

При расчетах выпрямителей необходимы следующие основные параметры диодов:

- $I_{ПрСрmax}$, $I_{Имmax}$ – максимально допустимый прямой средний ток и прямой импульсный ток (заданной скважности);
- $U_{Пр}$ – прямое падение напряжения на диоде;
- $U_{Обmax}$ – максимально допустимое обратное напряжение;
- $I_{Обmax}$ – максимальный обратный ток при максимально допустимом обратном напряжении;
- $r_{Диф}$ – дифференциальное внутреннее сопротивление диода;
- f_{max} – максимальная частота входного напряжения.

Режимы работы выпрямителей в значительной мере зависят от характера нагрузки, включенной на выходе выпрямителя и схемы сглаживающего фильтра. В источниках питания электронной аппаратуры наиболее широко распространены выпрямители с емкостной (активно-емкостной) нагрузкой и, следовательно, емкостной реакцией. В таких выпрямителях (наиболее дешевых и компактных) для сглаживания пульсаций параллельно нагрузке установлен конденсатор. Трансформаторы таких выпрямителей имеют несколько большую габаритную мощность по сравнению с выпрямителями с индуктивными фильтрами. К недостаткам выпрямителей с емкостным фильтром относится большая амплитуда тока через диод.

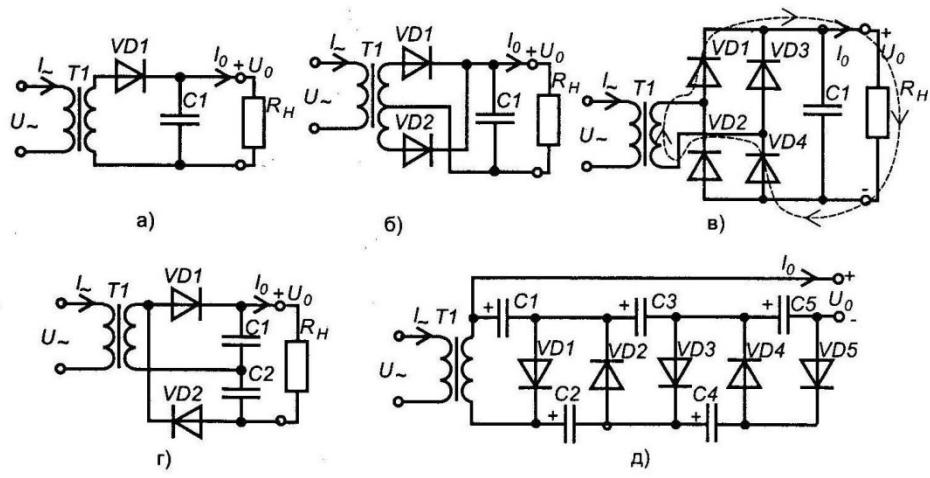


Рис. 2.1. Схемы однофазных выпрямителей с емкостным фильтром:

- а) однополупериодная; б) двухполупериодная схема со средним выводом вторичной обмотки; в) однофазная мостовая; г) симметричная схема удвоения напряжения;
д) несимметричная схема умножения

Выпрямители с индуктивной нагрузкой содержат фильтр, включающий достаточно большую по величине индуктивность. Такие выпрямители имеют меньшее внутреннее сопротивление по сравнению с выпрямителями с емкостным фильтром, что уменьшает зависимость выпрямленного напряжения от тока нагрузки. Применение индуктивного фильтра позволяет ограничить импульсы тока через диод, но приводит к перенапряжениям, возникающим на выходной емкости и на дросселе фильтра при включении, выключении выпрямителя и при скачкообразных изменениях тока нагрузки, что представляет опасность для элементов самого выпрямителя (диодов) и его нагрузки.

2. Расчет основных параметров выпрямителей

Основные параметры выпрямителей:

U_C – входное переменное напряжение и пределы его отклонения от нормы α_{\min} и α_{\max} ;

f_C – частота входного (переменного) напряжения;

m – число фазности (пульсности) схемы выпрямления: $m=pq$, где p – число тактов, т.е. полупериодов в течение которых энергия поступает из первичной сети в нагрузку, q – число фаз сетевого напряжения (однополупериодная схема и удвоения $m=1$, двухполупериодная схема и мостовая $m=2$, трехфазная схема $m=3$);

U_o – выпрямленное напряжение;

I_o – номинальное значение выпрямленного тока и его минимальное значение $I_{o\min}$;

$k_{PK}=U_{omk}/U_o$ – коэффициент пульсаций или отношение амплитуды U_{omk} -ой гармоники выпрямленного напряжения к его среднему значению U_o ;

η – коэффициент полезного действия выпрямителя;

$\Delta U_{\text{Пр}}$ – падение напряжения в выпрямителе;

Ψ – коэффициент мощности выпрямителя.

На основе заданных значений напряжения U_o и тока I_o определяем приближенные значения параметров, необходимых для выбора выпрямительных диодов: $U_{O\text{брт}}$, I_{PrCp} , I_{PrVD} (приложение 3).

Выбор диода выпрямителя производится на основании выполнения следующих условий:

- максимальное обратное напряжение диода $U_{O\text{брт}VD} > U_{O\text{брт}}$;
- максимальный прямой средний ток $I_{PrCpVD} > I_{PrCp}$;

- максимальный импульсный ток $I_{\text{ПРПВД}} > I_{\text{ПРМ}}$.

После выбора диода находится его сопротивление в открытом состоянии:

$$r_{\text{ПР}} = \frac{U_{\text{ПР}}}{I_{\text{ПРМ}}}, \text{ Ом}$$

Находим полное сопротивление фазы, т.е. обмоток трансформатора и диодов:

$$r = r_{\text{tp}} + r_{\text{ПРВД}} n, \text{ Ом}$$

где n – число последовательно включенных диодов (для мостовой схемы $n=2$).

Параметры схемы выпрямления с активно-емкостной нагрузкой:

$$U_2 = BU_o, \text{ В}$$

$$U_{\text{Обр}} = 1,5U_o, \text{ В}$$

$$I_{\text{ПРСР}} = 0,5I_o, \text{ А}$$

$$I_{\text{ПРМ}} = 3,5I_o, \text{ А}$$

$$I_{\text{ПРВД}} = DI_o, \text{ А}$$

$$I_2 = \frac{DI_o}{1,42}, \text{ А}$$

$$\frac{I_1 w_1}{I_o w_2} = \frac{D}{1,42}$$

$$S_{\text{tp}} = 1,5P_o, \text{ ВА}$$

$$k_{\text{П1}} = \frac{H}{rC}$$

$$f_{\text{П1}} = 2f_C, \text{ Гц}$$

$$S_2 = \frac{BDP_o}{1,42}, \text{ ВА}$$

$$S_1 = \frac{BDP_o}{1,42}, \text{ ВА}$$

где U_2, I_2 – действующие значения напряжения и тока фазы вторичной обмотки; $U_{\text{Обр}} – максимальное амплитудное значение обратного напряжения диода, В; I_{\text{ПРМ}}, I_{\text{ПРСР}} – соответственно максимальное и среднее значение тока диода, А; I_{\text{ПРВД}} – действующее значение тока диода, А; $\frac{I_1 w_1}{I_o w_2}$ – соотношение произведения первичного тока на число витков первичной обмотки и выпрямленного тока на число витков вторичной обмотки; S_{tp}, S_1, S_2 – мощность соответственно габаритная (расчетная), первичной и вторичной обмоток трансформатора, ВА; $k_{\text{П1}}, f_{\text{П1}}$ – соответственно коэффициент и частота пульсаций; r – прямое сопротивление выпрямителя, Ом.$

Определяем основной расчетный параметр:

$$A = \frac{\pi I_o r}{U_o m}$$

Находим приближенное значение угла ϕ , характеризующего сопротивление фазы выпрямителя:

$$\varphi = \arctg \left(\frac{2\pi f_C L_S}{r} \right)$$

где L_S – индуктивность рассеяния трансформатора, Гн.

$$L_s = \frac{k_L s U_o^4 \sqrt{\frac{U_o I_o}{s f_C B_m}}}{(p-1)^2 I_o f_C B_m}, \text{ Гн}$$

где k_L – коэффициент, определяемый схемой выпрямителя (для мостовой схемы равен $5 \cdot 10^{-3}$); p – число чередующихся секций обмоток: в случае размещения первичной обмотки между половинами вторичной $p=3$, в противном случае $p=2$; B_m – максимальное значение индукции в магнитопроводе, Тл; f_C – частота первичной электросети, Гц; U_o , I_o – напряжение и ток на выходе выпрямителя.

3.2.3 Результаты и выводы:

3.3 Практическое занятие № 6,7 (4 часов).

Тема: Расчет схем выпрямителей.

3.3.1 Задание для работы:

1. Общие понятия о выпрямительных устройствах
2. Расчет основных параметров выпрямителей
3. Графическое определение параметров выпрямителей

3.3.2 Краткое описание проводимого занятия:

3. Графическое определение параметров выпрямителей

С помощью графиков и параметров A и φ определяем вспомогательные расчетные параметры B , D и F .

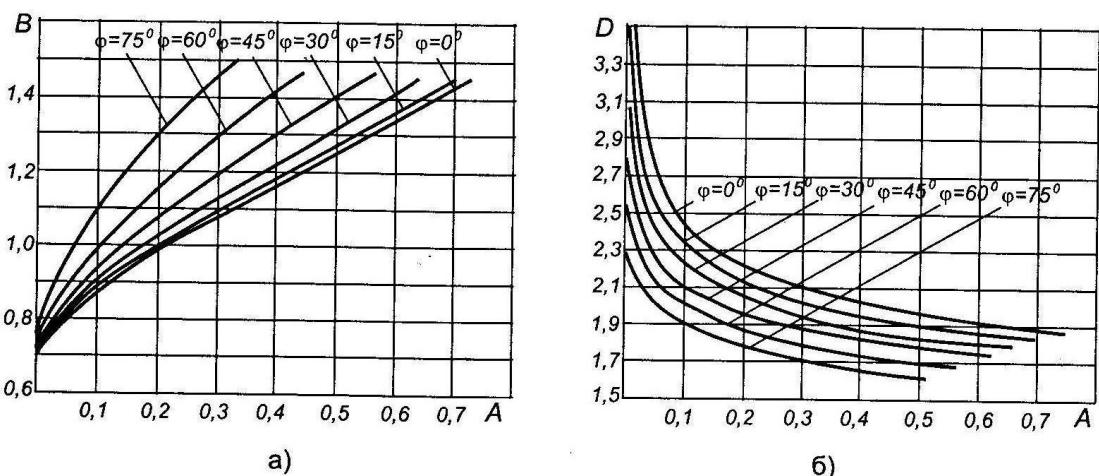


Рис. 2.2. Зависимость параметров B (рис. а) и D (рис. б) от расчетного параметра A

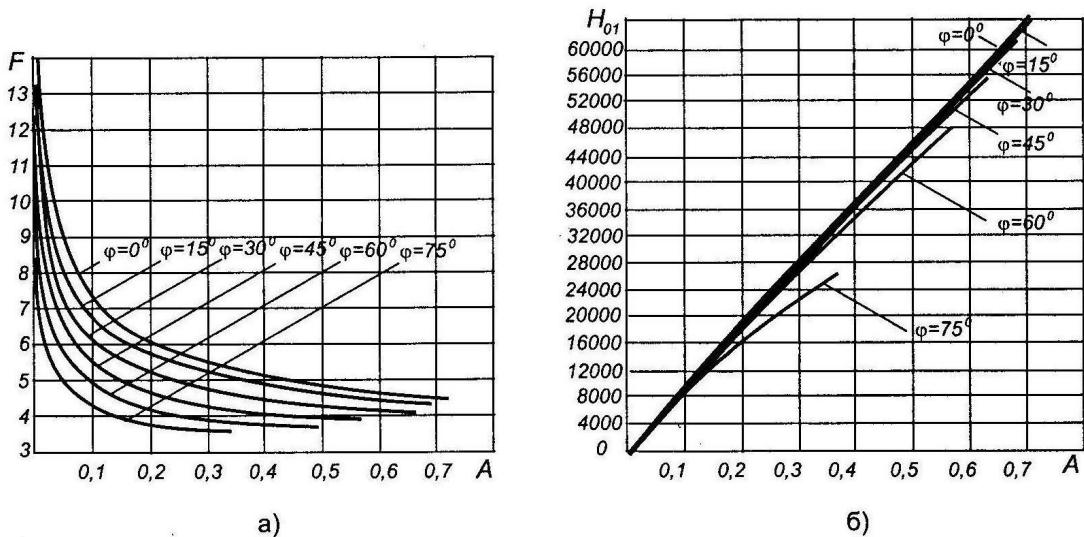


Рис. 2.3. Зависимость параметров F (рис. а) и H_{01} (рис. б) от расчетного параметра A

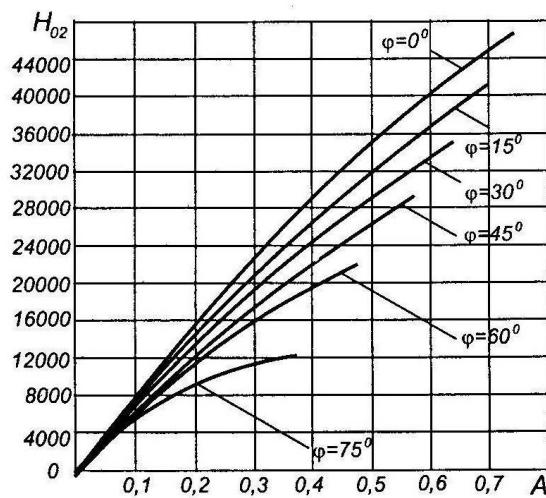


Рис. 2.4. Зависимость параметра H_{02} от расчетного параметра A

На основе параметров B , D и F с помощью соответствующих формул рассчитываются U_2 , I_2 , S_2 , I_1 , S_1 , U_{Obr} , I_{PrCp} , I_{Pr} , I_{PrVD} .

Определение емкости фильтра, обеспечивающего заданный коэффициент пульсаций, производится с помощью параметра H , значения которого можно найти по графикам рис. 3.3 б, 3.4. Параметр H_{02} предназначен для расчетов емкости фильтра двухтактных однофазных выпрямителей ($m=2$).

Величину емкости фильтра определяем по формуле:

$$C1 = \frac{100H_{02}}{rf_C k_{\pi}}$$

Из приложения 4 выбираем конденсатор соответствующей емкости и на соответствующее напряжение и записываем эти параметры.

3.3.3 Результаты и выводы:

3.4 Практическое занятие № 8,9 (4 часов).

Тема: Расчет схем интегральных стабилизаторов.

3.4.1 Задание для работы:

1. Общие понятия о линейных стабилизаторах
2. Основные параметры линейных стабилизаторов
3. Расчет схемы компенсационного стабилизатора

3.4.2 Краткое описание проводимого занятия:

1. Общие понятия о линейных стабилизаторах

Для питания электронных схем аппаратуры самого различного назначения необходима электрическая энергия, удовлетворяющая определенным требованиям, среди которых важнейшими являются стабильность напряжения питания (или тока), весьма малый уровень пульсаций и др. Обеспечение таких требований осуществляется с помощью стабилизаторов – устройств автоматически поддерживающих напряжение или ток на стороне нагрузки с заданной степенью точности.

Подавляющее большинство стабилизаторов составляют устройства с параметрическим и компенсационным принципом стабилизации. В параметрических стабилизаторах для стабилизации напряжения или тока используются элементы с нелинейной вольтамперной характеристикой (например, стабилитроны, стабисторы, полевые транзисторы и др.). Такие стабилизаторы обычно применяются в маломощных цепях с небольшим током нагрузки.

Компенсационные стабилизаторы представляют собой систему автоматического регулирования, содержащую регулирующий элемент и цепь отрицательной обратной связи. Как правило, регулирующим элементом компенсационных стабилизаторов напряжения является биполярный либо полевой транзистор (или группа транзисторов). Если этот транзистор работает в непрерывном активном режиме, то стабилизатор называют линейным (с непрерывным регулированием), а если регулирующий транзистор работает в ключевом режиме – импульсным. Вместе с этим в комбинированных стабилизаторах, которые называются непрерывно-импульсными, используют оба принципа регулирования энергии.

В настоящее время стабилизаторы с непрерывным регулированием напряжения или линейные строятся на основе интегральных стабилизаторов. Применимость интегральных стабилизаторов не ограничивается предельными значениями выходных токов и напряжений. В случаях необходимости обеспечения больших токов нагрузки интегральные стабилизаторы дополняются навесными транзисторами. При этом качественные параметры схем с интегральными стабилизаторами определяются, как правило, характеристиками интегральных стабилизаторов.

2. Основные параметры линейных стабилизаторов

Исходные данные для расчета стабилизатора:

- напряжение (первичное) питания стабилизатора U_{ex} , В;
- относительные отклонения напряжения питания, как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения α_{max} , α_{min} ;
- уровень пульсаций входного (первичного) напряжения $k_{PI}=U_{Bxmi}/U_{BxCp}$;
- номинальное значение выходного напряжения стабилизатора U_{Bxh} , В, пределы регулировки выходного напряжения стабилизатора U_{Bxhmax} , В, U_{Bxhmin} , В, если такая регулировка необходима;
- максимальный и минимальный токи нагрузки стабилизатора I_{Hmax} , I_{Hmin} , А;

- нестабильность выходного напряжения стабилизатора $\delta U_{Cm} = \Delta U_{Cm}/U_{Cm}$ или коэффициент стабилизации по входному напряжению k_{CmU} , внутреннее сопротивление стабилизатора r_i , Ом;
- амплитуда пульсации выходного напряжения стабилизатора $U_{B_{\text{ых}}m}$, В;
- пределы изменения температуры окружающей среды t_{max}, t_{min} , °C.

3. Расчет схемы компенсационного стабилизатора

Выберем схему компенсационного стабилизатора с последовательным включением регулирующего элемента. Схема позволяет получить выходное напряжение, большее, чем допустимое напряжение интегрального стабилизатора. Внешний регулирующий транзистор VT1 работает в активном режиме с изменяющимся напряжением коллектор-эмиттер $U_{K\bar{E}VT1}$.

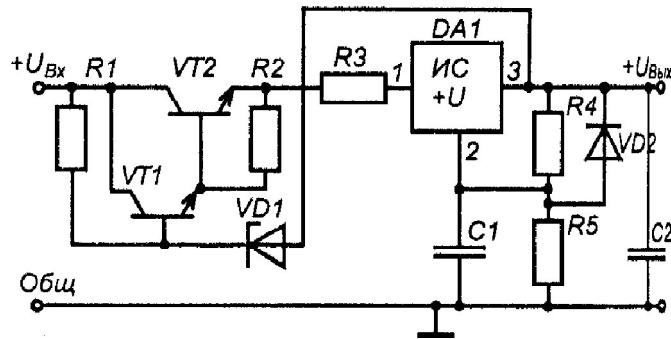


Рис. 3.1. Компенсационный стабилизатор напряжения

Минимально возможное первичное напряжение на входе стабилизатора:

$$U_{Bx\min\alpha} = U_{Bx}(1 - \alpha_{\min})$$

Минимально возможное напряжение на входе интегрального стабилизатора DA1 равно:

$$U_{BxIC\min} = U_{Bx\min\alpha} - U_{K\bar{E}VT2\min} - U_{Bxm1} - U_{R3au} - U_{BxI}$$

где $U_{K\bar{E}VT2\min}$ - минимальное падение напряжения на регулирующем транзисторе, обеспечивающее линейный режим работы, для биполярных транзисторов 1,5-2,5 В, для полевых транзисторов 1-2,5 В; U_{Bxm1} - амплитуда пульсаций входного напряжения, В $U_{Bxm1} = U_{Bx}k_{\pi 1}$; U_{R3au} - напряжение падения на резисторе схемы защиты от перегрузки по току, принимаем равным 0,6 В; $U_{BxI} = r_0 I_{H\max}$ - величина просадки входного напряжения при максимальном токе нагрузки, В; r_0 - внутреннее сопротивление первичного источника напряжения, принимаем 2,5 Ом.

Максимально возможное первичное напряжение на входе стабилизатора:

$$U_{Bx\max\alpha} = U_{Bx}(1 - \alpha_{\max})$$

$$U_{Bx\max H} = U_{Bx\max\alpha} + U_{Bxm1} + (I_{H\max} - I_{H\min})r_o$$

По полученным значениям минимального и максимального входного напряжения интегрального стабилизатора выбираем микросхему по приложению 8.

Ток регулирующего транзистора на начальном этапе расчета можно считать практически равным току нагрузки:

$$I_{K\bar{E}VT2\max} = I_{H\max}$$

Максимальное установившееся напряжение на транзисторе VT2 равно:

$$U_{K\bar{E}VT2\max} = U_{Bx\max H} - U_{B_{\text{ых}}\min} - \Delta U_{HC\min}$$

где $\Delta U_{HC\min}$ - минимальное падение напряжения на интегральном стабилизаторе,

В.

Максимальная мощность, выделяющаяся на регулирующем транзисторе равна:

$$P_{VT2\max} = U_{K\mathcal{E}VT2\max} \cdot I_{KVT2\max}$$

На основании полученных данных выбирается регулирующий элемент – транзистор VT2 и записываются его параметры (приложение 6).

Производим расчет остальных элементов схемы стабилизации.

Находим минимальную величину напряжения на стабилитроне VD1:

$$U_{VD1\min} = \Delta U_{Cm\min} + U_{R3} + U_{B\mathcal{E}VT1VT2}$$

По полученному значению напряжения выбираем стабилитрон VD1 (приложение 5). Задаемся минимальным значением тока стабилитрона $I_{VD1\min}$. При этом входной ток регулирующего транзистора может достигать значения:

$$I_{B\mathcal{E}VT1VT2\max} = \frac{I_{H\max}}{\beta_{VT1VT2}}$$

Рассчитываем величину сопротивления R1:

$$R_1 = \frac{U_{Bx\min\alpha} - U_{Bxm1} - U_{B\text{ых}}}{I_{VD1\min} + I_{B\mathcal{E}VT1VT2\max}}$$

Мощность резистора R1 составляет величину:

$$P_{R1} = (U_{Bx\max H} - U_{VD1} - U_{B\text{ых}}) \cdot (I_{VD1\min} + I_{B\mathcal{E}VT1VT2\max})$$

По результатам расчетов выбираем необходимый резистор R1 (приложение 7).

При увеличении входного напряжения стабилизатора и уменьшении тока нагрузки ток базы регулирующего транзистора уменьшается, а ток через стабилитрон возрастает до значения, А:

$$I_{VD1\max} = \frac{U_{Bx\max} - U_{B\text{ых}} - U_{VD1}}{R_1}$$

Именно такая величина является минимально допустимой для тока нагрузки. В противном случае выходной ток интегрального стабилизатора DA1 меняет свое направление (становится втекающим), что недопустимо.

Максимальная мощность, выделяющаяся на стабилитроне, Вт:

$$P_{VD1\max} = U_{VD1} I_{VD1\max}$$

Ток выходного (следящего) делителя должен отвечать требованию

$$I_{R4R5} \geq I_{VD1\max}$$

Исходя из этого условия, устанавливаем значение тока делителя.

Общее сопротивление делителя составляет величину, Ом:

$$R_4 + R_5 = \frac{U_{B\text{ых}HC}}{I_{R4R5}}$$

Соответственно величина сопротивления R_4 равна

$$R_4 = \frac{U_{B\text{ых}HC}}{I_{R4R5}}$$

Мощность резистора R4 равна, Вт:

$$P_{R4} = P_{R5} = I_{R4R5}^2 R_4$$

Величина сопротивления резистора защиты равна R3 равна:

$$R3 = \frac{U_{B\mathcal{E}VT1VT2}}{I_{H\max}}$$

Мощность на этом резисторе, Вт:

$$P_{R3} = U_{B\bar{E}VT1VT2} I_{H\max}$$

Для повышения коэффициента сглаживания пульсаций параллельно резистору R5 устанавливаем конденсатор C1. Расчет конденсатора проводится из условия $|X_C| \ll R5$ на основной нижней частоте пульсаций, как правило равной 100 Гц. Если задать $|X_C| = 0,1R5$, то

$$C = \frac{1}{0,1R5 \cdot 2\pi f}$$

По полученному результату выбираем конденсатор соответствующей емкости и на определенное напряжение (приложение 4).

3.4.3 Результаты и выводы: