

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

Кафедра «Электротехнологии и электрооборудование»

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ
ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ**

Б1.Б.15 Электроника и электротехника

**Направление подготовки (специальность) 20.03.01 Техносферная
безопасность**

**Профиль образовательной программы «Безопасность
жизнедеятельности в техносфере»**

Форма обучения заочная

СОДЕРЖАНИЕ

1. Конспект лекций	
1.1 Лекция № 1	<i>Электрические цепи постоянного тока.</i>
	Электромагнетизм.....
1.2 Лекция № 2	<i>Синусоидальный переменный электрический ток.</i>
	Трехфазный переменный электрический ток.....
1.3 Лекция № 3	<i>Асинхронные машины переменного тока.</i>
	Трансформаторы.....
1.4 Лекция № 4	<i>Основы электроники. Элементная база электронных устройств. Логические элементы.....</i>
53
2. Методические указания по выполнению лабораторных работ	
2.1 Лабораторная работа № ЛР-1	<i>Расчет цепей постоянного тока методом контурных токов и методом наложения.....</i>
97
2.2 Лабораторная работа № ЛР-2	<i>Исследование законов Кирхгофа и метода контурных токов.....</i>
98
2.3 Лабораторная работа № ЛР-3	<i>Исследование цепи переменного тока с последовательным включением элементов.....</i>
100
2.4 Лабораторная работа № ЛР-4	<i>Усилитель постоянного тока.....</i>
101
2.5 Лабораторная работа № ЛР-5	<i>Двухполупериодный неуправляемый выпрямитель.....</i>
103
3. Методические указания по проведению практических занятий	
3.1 Практическое занятие № ПЗ-1	<i>Расчет цепей постоянного тока методом контурных токов и методом наложения.....</i>
107

1. КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

1. 1 Лекция № 1 (2 часа).

Тема: «Электрические цепи постоянного тока»

1.1.1 Вопросы лекции:

1. Основные определения и топологические параметры электрических цепей.
- 2 Основные законы электрических цепей. Закон Ома.
- 3 Расчет простых цепей при последовательном, параллельном и смешанном включении элементов. Законы Кирхгофа
- 4 Термическое действие тока. Закон Джоуля-Ленца. Баланс мощностей
- 5 Методы расчета сложных электрических цепей
- 6 Расчет электрических цепей с нелинейными элементами

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:

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:

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 электродвижущую силу (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.

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:

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.

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.

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:

Выразим напряжение

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 ; внутреннее сопротивление и вольтамперная характеристика .

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

Выразим напряжение

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.

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.

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.

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.

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 б представляет собой сумму напряжений на отдельных элементах ветви:

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

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.

Закон Ома для активной ветви

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

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.

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

Первый закон Кирхгофа

Первый закон Кирхгофа применим для узла. Узлом ЭЦ называют место соединения ветвей ЭЦ, как минимум трех. Формулируется следующим образом: алгебраическая сумма токов узла равна нулю. Токи, направленные к узлу (входящие в узел), в алгебраической сумме учитываются с одним знаком, направленные от узла (выходящие) - с противоположным. Существует еще одна формулировка: сумма входящих в узел токов равна сумме выходящих токов.

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

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

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

Представим токи ветвей как отношение напряжения к сопротивлению соответствующего участка:

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

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

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

Эквивалентные преобразования (параллельное соединение)

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

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

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

$$R_{\text{экв}} = \frac{R}{n} .$$

Обе формулы получены в результате преобразования формулы определения эквивалентной проводимости.

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

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

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 определяться по следующим формулам:

$$\begin{aligned} R_{12} &= R_1 + R_2 + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_3} ; & R_{13} &= R_1 + R_3 + \frac{R_1 \cdot R_3}{R_2} ; \\ R_{23} &= R_2 + R_3 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1} . \end{aligned}$$

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 «+» водят произведения, если направление тока и НОК совпадают, аналогично учитывается знак в алгебраической сумме ЭДС.

Показания вольтметра

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

Потенциальная диаграмма

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

Примем потенциал одной из точек ЭЦПТ равным нулю $\phi_0 = 0$. 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 :

$$\begin{aligned} U_{10} &= \phi_1 - \phi_0 = E_1 \Rightarrow \phi_1 = \phi_0 + E_1 ; \\ U_{12} &= \phi_1 - \phi_2 = I_1 \cdot R_1 & U_{23} &= \phi_2 - \phi_3 = E_2 \\ \phi_2 &= \phi_1 - I_1 \cdot R_1 & \phi_3 &= \phi_2 - E_2 \\ U_{43} &= \phi_4 - \phi_3 = I_2 \cdot R_2 \\ \phi_4 &= \phi_3 + I_2 \cdot R_2 \\ U_{54} &= \phi_5 - \phi_4 = E_3 \Rightarrow \phi_5 = \phi_4 + E_3 \\ U_{50} &= \phi_5 - \phi_0 = I_3 \cdot R_3 \Rightarrow \phi_0 = \phi_5 + I_3 \cdot R_3 \end{aligned}$$

4 Тепловое действие тока. Закон Джоуля-Ленца. 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.

$$P_{\text{потр}} = P_{\text{ист}}$$

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

КПД

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

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

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

5 Методы расчета сложных 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.

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

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{E_1 + U_{bc}}{R_1 + r_{01}} = \frac{E_1 + \phi_b - \phi_c}{R_1 + r_{01}} = E_1 \cdot G_1 + \phi_b \cdot G_1 - \phi_c \cdot G_1 \\ I_2 &= \frac{U_{cd}}{R_2} = \frac{\phi_c - \phi_d}{R_2} = \phi_c \cdot G_2 - \phi_d \cdot G_2 \\ I_3 &= \frac{E_3 + U_{ca}}{R_3} = \frac{E_3 + \phi_c - \phi_a}{R_3} = E_3 \cdot G_3 + \phi_c \cdot G_3 - \phi_a \cdot G_3 \end{aligned}$$

Подставим полученные выражения токов в первое уравнение:

$$-E_1 \cdot G_1 - \phi_b \cdot G_1 + \phi_c \cdot G_1 + \phi_c \cdot G_2 - \phi_d \cdot G_2 + E_3 \cdot G_3 + \phi_c \cdot G_3 - \phi_a \cdot G_3 = 0$$

,

Сгруппируем уравнение:

$$\phi_c \cdot (G_1 + G_2 + G_3) - \phi_b \cdot G_1 - \phi_d \cdot G_2 - \phi_a \cdot G_3 = E_1 \cdot G_1 - E_3 \cdot G_2$$

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:

$$\begin{aligned} \phi_a \cdot (G_6 + G_3 + G_5) - \phi_b \cdot G_6 - \phi_c \cdot G_3 &= E_3 \cdot G_3, \\ -\phi_a \cdot G_6 + \phi_b \cdot (G_6 + G_1 + G_4) - \phi_c \cdot G_1 &= -E_1 \cdot G_1, \\ -\phi_a \cdot G_3 - \phi_b \cdot G_1 + \phi_c \cdot (G_1 + G_2 + G_3) &= E_1 \cdot G_1 - E_3 \cdot G_3 \end{aligned}$$

Выразим токи в ветвях по закону Ома:

$$I_4 = \frac{\phi_d - \phi_b}{R_4} = \frac{-\phi_b}{R_4}, \quad I_5 = \frac{\phi_d - \phi_a}{R_5} = \frac{-\phi_a}{R_5}, \quad I_6 = \frac{\phi_b - \phi_a}{R_6}$$

Метод двух узлов

Рассмотрим частный случай метода узловых потенциалов – метод двух узлов.

$$U_{ab} = \phi_a - \phi_b = \phi_a$$

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.

$$\begin{aligned} I_{\kappa 1} \cdot (R_3 + R_1 + r_{01} + R_6) - I_{\kappa 2} \cdot R_3 - I_{\kappa 3} \cdot R_6 &= E_1 + E_3 \\ -I_{\kappa 1} \cdot R_3 + I_{\kappa 2} \cdot (R_5 + R_3 + R_2) - I_{\kappa 3} \cdot R_5 &= -E_3 \\ -I_{\kappa 1} \cdot R_6 - I_{\kappa 2} \cdot R_5 + I_{\kappa 3} \cdot (R_6 + R_4 + R_5) &= 0 \end{aligned}$$

Метод эквивалентных преобразований

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

$$I_1 \cdot (R_1 + R_{\text{экв}}) = E_1 \pm E_{\text{экв}}$$

$$I_1 = \frac{E_1 \pm E_{\text{экв}}}{(R_1 + R_{\text{экв}})}$$

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

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

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

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

Ток первой ветви определиться:

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

6 Расчет электрических цепей 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 А 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 А с началом координат.

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

Последовательное соединение НЭ

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

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

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

$$U = U_1 + U_2 .$$

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

Параллельное соединение

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

$$I = I_1 + I_2 .$$

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

(По данной форме необходимо представить все лекционные занятия).

Тема: «Электромагнетизм»

1.2.1 Вопросы:

1. Основные характеристики магнитного поля. Закон электромагнитной индукции. Самоиндукция. Взаимодействие поля с электрическим током.

2. Характеристики ферромагнитных материалов

1.2.2 Краткое содержание вопросов

1. *Основные характеристики магнитного поля. Закон электромагнитной индукции. Самоиндукция. Взаимодействие поля с электрическим током.*

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 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, $[Tl]$;

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

$$\Phi = \int_S B dS, [Вб].$$

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.

$$F = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \alpha, [H]$$

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:

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

следовательно, магнитная индукция поля

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

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

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

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:

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

Индукцированная 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, сцепляться 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:

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

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

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

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:

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

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

$$e_{\kappa} = -w \frac{d\Psi}{dt}$$

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 ни 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.

1.2. Лекция № 2 (2 часа)

Тема: «Синусоидальный переменный электрический ток»

1.2.1 Вопросы лекции:

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

1.2.2 Краткое содержание вопросов

1. Способы представления синусоидальной функции. Получение переменного тока

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

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

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

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 времененная диаграмма, аналитическое представление синусоидальной функции (закон изменения) запишется в следующем виде:

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

аналогичным образом можно записать выражения для синусоидальных напряжений и ЭДС:

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

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

где i, u, e – мгновенное значение;

I_m , U_m , E_m - амплитудное значение;
 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 $\frac{\pi}{2}$.

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

т.е. среднее значение синусоидального тока составляет $0,638 I_m$.

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:

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

Приравняет эти выражения:

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

и найдем действующее значение синусоидального тока:

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

Установим связь между действующим и амплитудным значением:

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

3.Методика расчета цепи переменного тока с помощью комплексных чисел

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:

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

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

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

Перепишем показательную форму записи:

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

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

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

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

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

Определение аргумента КЧ.

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

Операции с комплексными числами. Сложение.

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

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

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

Перейдем от выражения для мгновенных значений к комплексным амплитудам токов:

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

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

Сложение двух комплексных чисел удобнее производить в алгебраической форме записи:

$$\begin{aligned}\dot{I}_{1m} + \dot{I}_{2m} &= (5\sqrt{2} + j5\sqrt{2}) + (-2,5\sqrt{2} - j2,5\sqrt{2}) = \\ &= (5\sqrt{2} - 2,5\sqrt{2}) + j(5\sqrt{2} - 2,5\sqrt{2}) = \\ &= 2,5\sqrt{2}(2-1) + j2,5\sqrt{2}(2-1) = \\ &= 2,5\sqrt{2} + j2,5\sqrt{2} = \sqrt{(2,5\sqrt{2})^2 + (2,5\sqrt{2})^2} \cdot e^{j\arctg\left(\frac{2,5\sqrt{2}}{2,5\sqrt{2}}\right)} = \\ &= \sqrt{(2,5\sqrt{2})^2 \cdot (1+1)} \cdot e^{j\arctg(1)} = \\ &= 2,5\sqrt{2}\sqrt{2} \cdot e^{j45^\circ} = 5 \cdot e^{j45^\circ}\end{aligned}$$

Обратный переход к мгновенным значениям:

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

Операции с комплексными числами. Вычитание.

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

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.

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

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 .

$$\begin{aligned} R &+ jX = Z \\ \dot{U}_m &= 100 \cdot e^{j90^\circ} \quad \text{B;} \\ \dot{I}_m &= 10 \cdot e^{-j135^\circ} \quad \text{A.} \\ \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m} &= \frac{100 \cdot e^{j90^\circ}}{10 \cdot e^{-j135^\circ}} = \frac{100}{10} \cdot e^{j(90^\circ + 135^\circ)} = 10 \cdot e^{j225^\circ} \\ &= 10 \cdot e^{-j135^\circ} \end{aligned}$$

Величина, обратная полному комплексному сопротивлению называется полной комплексной проводимостью:

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

Первая дробь (реальная часть) называется активной проводимостью и обозначается буквой g .

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

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 ($\psi_i = \psi_u$, $\phi = \psi_u - \psi_i = 0$), или совпадают по фазе. Они одновременно достигают своего максимального значения и соответственно одновременно проходят через ноль. Как показано на временной диаграмме. На векторной диаграмме векторы тока и напряжения на резисторе сонаправлены.

Индуктивный элемент

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

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

Тогда величина ЭДС самоиндукции:

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

ЭДС самоиндукции всегда направлено навстречу напряжению, а значит:

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

Начальная фаза напряжения отличается от начальной фазы тока на угол 90° , т.е. $\psi_u = \psi_i + 90^\circ$, откуда следует, что $\phi = \psi_u - \psi_i = 90^\circ$. 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:

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

Начальная фаза тока отличается от начальной фазы напряжения на угол 90° , т.е. $\psi_i = \psi_u + 90^\circ$, откуда следует, что $\phi = \psi_u - \psi_i = -90^\circ$. Говорят, что напряжение на емкости отстает или ток опережает напряжение на угол 90° . При тех значениях, 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.

3.5 Активная, реактивная и полная мощности. Коэффициент мощности

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

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

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

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

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:

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

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 ни 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.

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

Тема: «Трехфазный переменный электрический ток»

1.3.1 Вопросы:

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

1.3.2 Краткое содержание вопросов

1. Получение трехфазной ЭДС

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° 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° . 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° 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:

$$\begin{aligned} e_A &= E_m \sin \omega t ; \\ e_B &= E_m \sin (\omega t - 120^\circ) ; \\ e_C &= E_m \sin (\omega t - 240^\circ) = E_m \sin (\omega t + 120^\circ) , \end{aligned}$$

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

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:

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

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° , тогда угол между вектором фазного напряжения и отрезком NM будет равен 60° . Определим длину отрезка MB:

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

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

Запишем комплексы действующих значений линейных напряжений генератора:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{AB} &= U_\lambda \cdot e^{j30^\circ} ; \\ \dot{U}_{BC} &= U_\lambda \cdot e^{-j90^\circ} ;\end{aligned}$$

$$\dot{U}_{CA} = U_a \cdot e^{j150^\circ}$$

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 цеп, при соединении фаз генератора и нагрузки звездой, фазные токи равны линейным. Линейные токи определяются по закону Ома:

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

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°), 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:

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

Из уравнений следует, что:

- каждый линейный ток равен геометрической разности фазных токов;
- уменьшаемым 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:

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

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:

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

1.5 Лекция № 3 (2 часа)

Тема: «Асинхронные машины переменного тока»

1.5.1 Вопросы лекции:

1. Конструкция, принцип работы в режиме двигателя.
2. Основные характеристики асинхронного двигателя
3. Особенности пуска и способы регулирования частоты вращения ротора
4. Однофазный асинхронный двигатель
5. Паспортные характеристики

1.5.2 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 $I_n = (5\dots7)I_n$;
- пусковой вращающий момент относительно момента в номинальном режиме мал $M_n = (1,2\dots1,6)M_n$;
- затруднено регулирование скорости вращения ротора.

1. 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 индуцируются 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 $t = 0$.

$$\begin{aligned} i_A &= 0 ; & F_A &= 0 \\ i_B &= I_m \cdot \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \right) ; & F_B &= -\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_m \cdot w \\ i_C &= I_m \cdot \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \right) ; & F_C &= \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_m \cdot w \end{aligned}$$

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.

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

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

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

Определим геометрическую сумму МДС F_A и F_B :

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

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

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

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, индуцированные ЭДС и токи в роторной обмотке изменят свое направление. И момент, создаваемый на валу, становится 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:

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

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 к уменьшению пускового момента.

3. Особенности пуска и способы регулирования частоты вращения ротора

При пуске АД в ход возникает врачающийся 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, изменяя:

- 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 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.

4. 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.

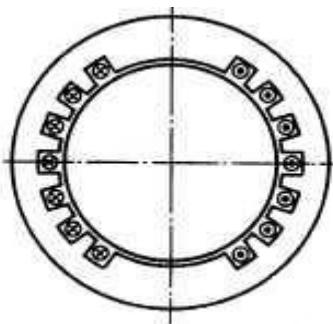


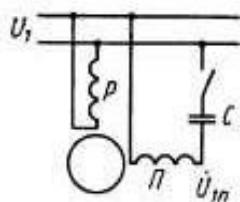
Рисунок 1 . Статор однофазного асинхронного двигателя

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 подбрав 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.

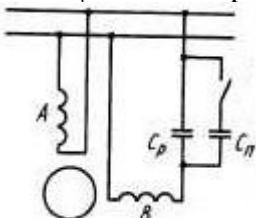


Рисунок 3 . Использование второй обмотки в качестве рабочей

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.

5. Паспортные характеристики

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 З.

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.

1.4 Лекция №4

Тема: «Трансформаторы»

1.4.1 Вопросы:

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

1.4.2 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.

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

3. Особенности трехфазных трансформаторов. Специальные трансформаторы

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

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

маркируются прописными буквами, на стороне низшего напряжения – строчными буквами.

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

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

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

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

Трансформаторы напряжения применяются для включения вольтметров, частотометров, и цепей напряжения измерительных приборов (ваттметров, счетчиков и фазометров). Схема включения показана на рисунке. Такой трансформатор конструктивно похож на силовой трансформатор. Его первичная обмотка, с большим числом витков, является обмоткой высшего напряжения, и включается параллельно как вольтметр в цепь. Вторичная обмотка, с меньшим числом витков, является обмоткой низшего напряжения, и замыкается на вольтметр или на обмотку напряжения ваттметра.

Сопротивления измерительных приборов относительно велики (порядка тысяч Ом) $Z_V \rightarrow \infty$, вследствие чего трансформатор работает в режиме, близком к режиму ХХ ($I_1 \cdot Z_1 = I_2 \cdot Z_2$), что позволяет считать напряжения равными индуцированным ЭДС ($U_1 = E_1$, $U_{20} = E_2$). Тогда вторичное напряжение, измеряемое вольтметром, связано с первичным постоянным соотношением, равным коэффициенту трансформации:

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

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

$$I_1 = k \cdot I_2$$

Автотрансформаторы

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

Мощность автотрансформатора

$$S = S_{\vartheta} + S_T$$

складывается из мощности, передаваемой электрическим путем

$$S_{\vartheta} = U_2 \cdot I_1 ,$$

и трансформируемой мощности

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

Размеры и вес автотрансформатора определяются трансформируемой мощностью.

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

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

Сварочный трансформатор

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

1.7 Лекция № 4 (2 часа)

Тема: «Основы электроники. Элементная база современных электронных устройств»

1.7.1 Вопросы лекции:

1. Полупроводниковые приборы, принцип действия и конструкция
2. Источники вторичного электропитания: выпрямители, фильтры, стабилизаторы напряжения

1.7.2 Краткое содержание вопросов

1. Полупроводниковые приборы, принцип действия и конструкция

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

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

Огромный скачок в развитии электроники произошел после открытия в 1922 г. русским ученым Лосевым явления проводимости в полупроводниках, а также разработки группой российских физиков теории полупроводников и их технического применения.

Современный этап развития электроники и электронной техники характеризуется использованием новых материалов и технологий, что привело к созданию интегральной микросхемы. Микросхема – миниатюрный функциональный узел электронной аппаратуры, в котором элементы и

соединительные провода изготавливаются в едином объеме или на поверхности полупроводника и имеет общую герметичную оболочку. Появление микросхем позволило существенно снизить размеры и энергопотребление устройств, повысить их надежность и быстродействие.

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

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

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

Элементы физики полупроводников

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

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

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

При отсутствии внешнего электрического поля перемещение электронов и дырок хаотичное. При наличии внешнего электрического поля в

полупроводнике дырки дрейфуют по направлению поля, а электроны – в противоположном направлении. Следовательно, в полупроводнике имеются два типа носителей тока: дырки проводимости и электроны проводимости.

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

Принцип действия многих полупроводниковых приборов основан на получении в полупроводнике электропроводности, связанной с присутствием свободных носителей электрического заряда какого-либо одного типа: только электронная (n -типа) или только дырочная (p -типа). Такая электропроводность может быть получена добавлением в кристалл полупроводника примесей других элементов (индий, фосфор, сурьма, бора, алюминия). Получаемая при этом электропроводность называется примесной, может быть значительно больше, чем электропроводность чистого полупроводника.

Электронная примесная проводимость возникает, когда у атома примеси одним валентным электроном больше (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,

учитываемых при выборе стабилитрона, является напряжение стабилизации (пробоя). В справочных данных указывается номинальное напряжение стабилизации для определенного тока, максимальный и минимальный токи стабилизации. Параметры схем со стабилитронами выбираются так, чтобы длительный средний ток через них был меньше максимально допустимого. Кратковременно же стабилитрон способен выдержать токи, большие максимального значения.

Транзисторы

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

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

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

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

Биполярный транзистор

Один из крайних слоев транзистора соединяется через свой электрод с источником постоянного напряжения. Если это $p-n-p$ -переход, то эмиттер соединяется с положительным выводом источника напряжения а база с отрицательным выводом этого же источника. Т.е. к зажимам «база-эмиттер» приложено прямое напряжение, дырки $p-n$ -перехода притягиваются. Небольшая часть дырок рекомбинирует в базе с ее электронами.

К зажимам «база-коллектор» приложено обратное напряжение другого источника большей величины. Дырки из правого крайнего слоя

перемещаются по направлению коллекторного выхода. Причем это направленное движение основных носителей заряда данного слоя (дырок), а также носителей заряда эмиттера, прошедших через базу. Чтобы большая часть дырок достигла коллектора, слой базы должен иметь малую толщину.

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

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

Коэффициент передачи тока

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

при постоянном напряжении является одним из основных параметров транзистора.

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)

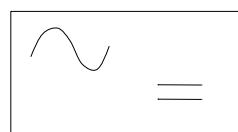
Простейшим усилителем является усилительный каскад, содержащий нелинейный управляемый элемент, как правило, биполярный транзистор, резистор и источник электрической энергии.

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

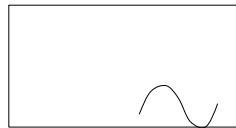
В качестве первичных источников электропитания для ЭУ и систем обычно используют либо промышленную сеть переменного тока, либо автономные источники переменного (генераторы) или постоянного (аккумуляторы, химические батареи и т.д.) тока.

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](#).

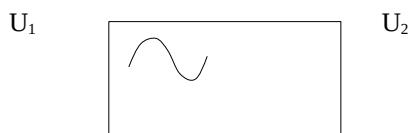


3. Преобразователь частоты – преобразователь переменного напряжения одной частоты в переменное напряжение другой частоты.

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

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:

$$U_{cp} = \frac{2 \cdot U_m}{\pi}$$

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.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

2.1 Лабораторная работа № 1 (2 часа).

Тема: «Расчет цепей постоянного тока методом контурных токов и методом наложения»

2.1.1 Цель работы: Рассмотреть расчет цепи постоянного тока методом контурных токов и методом наложения

2.1.2 Задачи работы:

1. Методом контурных токов определить токи в ветвях схемы

2.1.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Выполняется на компьютерах с использованием программ MULTISIM и Mathcad

2.1.4 Описание (ход) работы:

Определяем количество уравнений системы:

$$K=B-(Y-1)=8-(5-1)=4$$

Выбираем контуры и записываем для каждого уравнения по второму закону Кирхгофа:

$$1-4 -3-2 \quad I_{11} \cdot (R_3 + R_4 + R_5 + R_6) - I_{22} \cdot R_4 - I_{33} \cdot R_5 - I_{44} \cdot R_6 = 0$$

$$1-2-5-2 \quad -I_{11} \cdot R_4 + I_{22} \cdot (R_1 + R_4 + R_7) - I_{33} \cdot R_7 - I_{44} \cdot 0 = E_1$$

$$2-3-5-2 \quad -I_{11} \cdot R_5 - I_{22} \cdot R_7 + I_{33} \cdot (R_5 + R_7 + R_8) - I_{44} \cdot R_8 = 0$$

$$3-4-5-3 \quad -I_{11} \cdot R_6 - I_{22} \cdot 0 - I_{33} \cdot R_8 + I_{44} \cdot (R_2 + R_6 + R_8) = -E_2$$

Решив систему одним из численных методов, получим значения контурных токов:

$$I_{11} = 10 \text{ A}; \quad I_{22} = 15 \text{ A}; \quad I_{33} = 5 \text{ A}; \quad I_{44} = -15 \text{ A}.$$

Затем выражаем токи ветвей из контурных токов.

$$I_1 = I_{22} = 15 \text{ A}; \quad I_3 = I_{11} = 10 \text{ A}; \quad I_5 = I_{11} - I_{33} = 5 \text{ A};$$

$$I_7 = I_{22} - I_{33} = 10 \text{ A}; \quad I_2 = -I_{44} = 15 \text{ A}; \quad I_4 = I_{22} - I_{11} = 5 \text{ A};$$

$$I_6 = I_{11} - I_{44} = 25 \text{ A}; \quad I_8 = I_{33} - I_{44} = 20 \text{ A};$$

Составляем баланс мощностей:

$$P_{ист} = E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2 = 145 \cdot 15 + 140 \cdot 15 = 4275 \text{ Вт}$$

$$P_{потр} = I_{12} R_1 + I_{22} R_2 + I_{32} R_3 + I_{42} R_4 + I_{52} R_5 + I_{62} R_6 + I_{72} R_7 +$$

$$I_{82} R_8 = 4275 \text{ Вт}$$

2.2 Лабораторная работа № 2 (2 часа).

Тема: «Исследование законов Кирхгофа и метода контурных токов»
 (указывается тема лабораторной работы в соответствии с рабочей программой дисциплины)

1.2.1 Цель работы:

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

2.2.2 Задачи работы:

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

2.2.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

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

2.2.4 Описание (ход) работы:

(По данной форме необходимо представить все лабораторные 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 Е2 и Е3, удалив их из цепи.
 5. Провести измерение токов ветвей в режиме, когда действует источник Е1. Результаты измерений занести в таблицу 2.
 6. Отключить действие источников эдс Е1 и Е3, удалив их из цепи.
 7. Провести измерение токов ветвей в режиме, когда действует источник Е2. Результаты измерений занести в таблицу 2.
 8. Отключить действие источников эдс Е1 и Е2, удалив их из цепи..
 9. Провести измерение токов ветвей в режиме, когда действует источник Е3. Результаты измерений занести в таблицу 2.
 10. На основании полученных результатов выполнить проверку справедливости законов Кирхгофа. Составить уравнения для каждого узла цепи по первому закону Кирхгофа, подставить в них полученные в первом эксперименте токи и убедиться в справедливости уравнений. Составить уравнения для трех независимых контуров цепи по второму закону Кирхгофа, подставить в них полученные в первом эксперименте токи и убедиться в справедливости уравнений.
 11. Выполнить проверку справедливости принципа наложения. Для этого рассчитать ток каждой ветви как сумму составляющих его токов от действия отдельных источников ЭДС. Составляющие токи – результаты экспериментов 2, 3, 4. Полученные токи занести в таблицу 3 и сравнить с результатами эксперимента 1 по таблице 2.
 12. Используя метод контурных токов, теоретически рассчитать токи всех ветвей цепи. Результаты расчетов занести в таблицу 3 и сравнить с результатами эксперимента 1 по таблице 2.
 13. Составить уравнение баланса мощности цепи, подставить в него результаты опыта 1 и убедиться в справедливости уравнения.
- Контрольные вопросы**
1. Сформулируйте законы Кирхгофа.
 2. Опишите последовательность расчета цепи методом контурных токов.
 3. В чем заключается принцип наложения применительно к электрической цепи?

2.3 Лабораторная работа № 3 (2 часа).

Тема: «Исследование простых цепей синусоидального переменного тока»

2.3.1 Цель работы:

1. Ознакомиться со свойствами элементов электрической цепи синусоидального переменного тока.

2.3.2 Задачи работы:

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

2.3.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

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

2.3.4 Описание (ход) работы:

14. 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.
15. Провести измерение тока и напряжений в цепи. Результаты измерений занести в таблицу 2.
16. Подключить к цепи осциллограф. При этом канал А подключить параллельно всей цепи (к точке 1), а канал В – параллельно активному сопротивлению (к точке 2). Установить чувствительность канала А – Y_A , чувствительность канала В – Y_B и частоту развертки X_T в соответствии с таблицей 1. Включить режим ZOOM на осциллографе.
17. 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).
18. 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.
19. Собрать электрическую цепь, используя рис. 2. Установить параметры элементов цепи в соответствии с техническими характеристиками. Амперметр и вольтметры перевести в режим АС.
20. Провести измерение тока и напряжений в цепи. Результаты измерений занести в таблицу 2.

21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. Сравнить результаты расчетов с результатами измерений.
Используя результаты расчетов построить в масштабе векторные диаграммы цепей.

2.4 Лабораторная работа № 4 (2 часа).

Тема: «Усилитель постоянного тока»

2.4.1 Цель работы:

1. Изучить схемы и характеристики усилителей постоянного тока.

2.4.2 Задачи работы:

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

2. Записать выводы по результатам.

2.4.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1.

2.4.4 Описание (ход) работы:

2.1 Подготовка к работе на компьютере

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

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

Результаты записать в таблицы 1 и 2

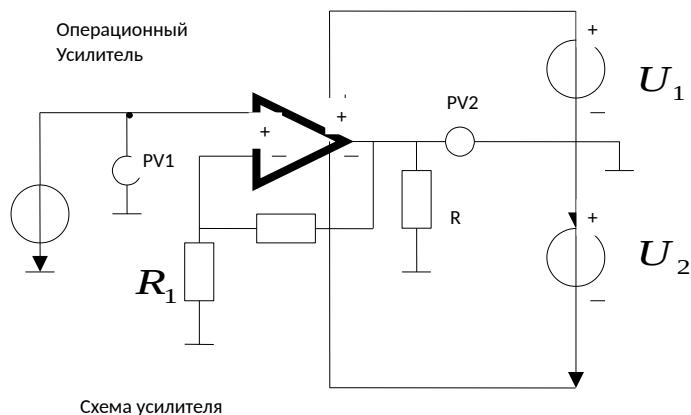
2.2 Работа на компьютере

2.2.1 Показать преподавателю подготовленный отчет.

2.2.2 «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 «АС») 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.

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

3 По результатам занятий

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

$f, \text{ кГц} (\text{при } U_{\text{вх.}}=1\text{мВ})$	0,01	5	12	15	20	25	30
--	------	---	----	----	----	----	----

$U_{\text{вых.}}, \text{В}$ при глубине обратной связи	$\beta = R_1 / (R_1 + R_2)$	$R_1 = 10 \cdot N, \text{kОм}$							
		$R_1 + 30 \cdot N, \text{kОм}$							
		$R_1 + 50 \cdot N, \text{kОм}$							
рассчитать	$K_u = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх.}}$ (при $R_1 = 30 \cdot N, \text{kОм}$)								
		$K_{o.c.} = K_u / (1 + \beta \cdot K_u)$							

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

3.3 Записать выводы о характере полученных зависимостей.

4 Содержание отчета

- 4.1 Заполнение таблицы результатов измерений и расчетов.
- 4.2 Графики зависимостей $K_u(f)$ и $K_{o.c.}(f)$.
- 4.3 Выводы.

5 Контрольные вопросы

- 5.1 По каким признакам классифицируют усилители?
- 5.2 Какая связь между цепями усилителя называется обратной?
- 5.3 Как изменяется входное сопротивление усилителя при уменьшении глубины обратной связи?

2.16 Лабораторная работа № 5 (2 часа).

Тема: «Неуправляемые двухполупериодные выпрямители»

2.5.1 Цель работы:

1. Изучить принцип действия диода.
2. Изучить схемы двухполупериодных выпрямителей и принцип действия сглаживающих фильтров.

2.5.2 Задачи работы:

1. Исследовать работу сглаживающего фильтра при двухполупериодном выпрямлении.
2. Записать выводы по результатам.

2.5.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. 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.

2.1.2 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 С – простейший гладящий фильтр. Вольтметр PV показывает среднее значение выпрямленного напряжения $U_{ср.}$ на нагрузке. Для измерения максимальных значений выпрямленного напряжений в работе используется осциллограф.

2.5.4 Описание (ход) работы:

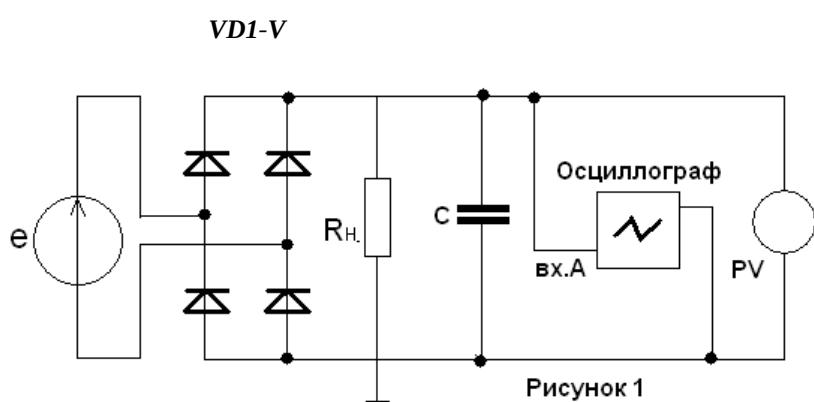
Поочередно «собрать» схемы выпрямителей (рисунки 1,2 и 3).

Для выбора диода двойным нажатием клавиши «мыши» на его изображении открыть окно параметров (см. рисунок 1 «Инструкции пользователю программой ...»). В окне Diode Properties 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 ϕ_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).



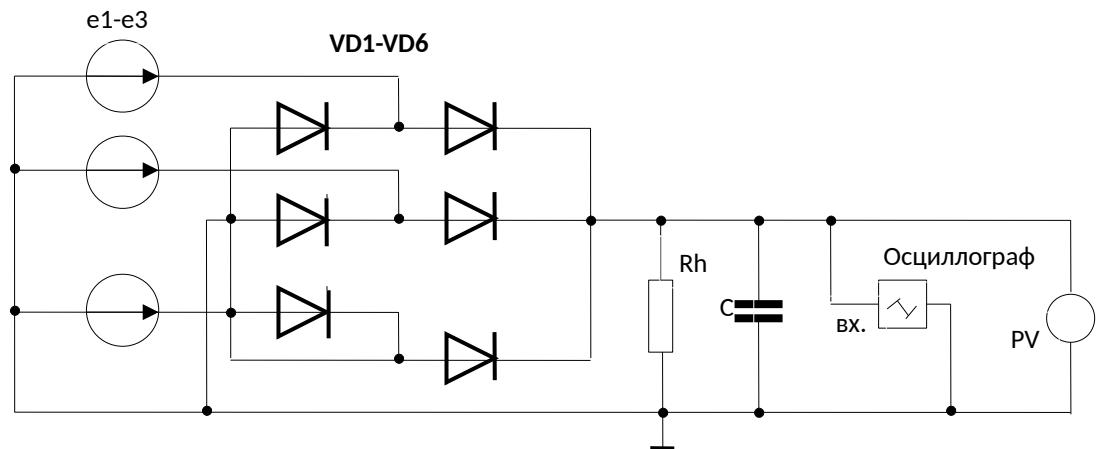


Рисунок 2

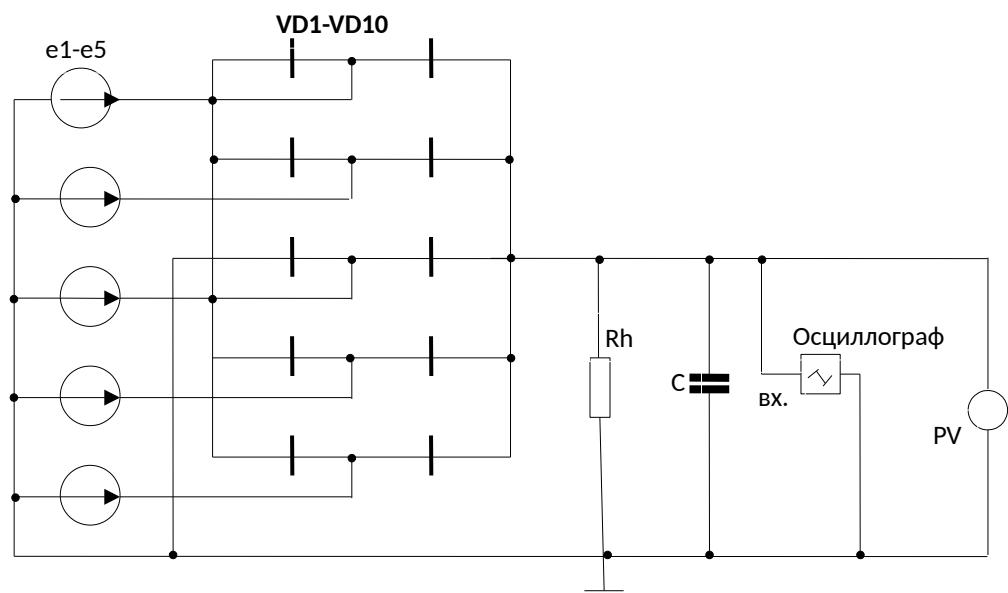
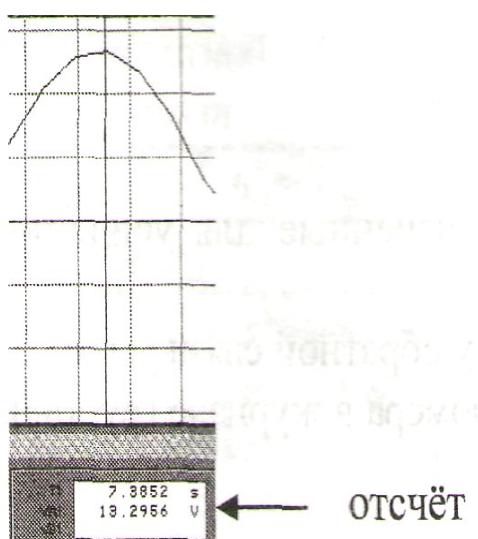


Рисунок 3



2.2.2 Поочередно собирать схемы (рисунки 1...3).

2.2.3 «Включить схему и, изменения 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 Cannel «A»-10V/Div, а

развертку Time base-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	$U_{cp} B$					
		$U_m B$					
	расc	q					
Трехфазный	изм	$U_{cp} B$					
		$U_m B$					
	расc	q					
Пятифазный	изм	$U_{cp} B$					
		$U_m B$					
	расc	q					

4 Содержание отчета

4.1 Заполненная таблица и осцилограммы напряжений.

4.2 Графики зависимости $q(C)$.

4.3 Выводы.

5 Контрольные вопросы

5.1 Какое свойство диода используют для преобразования переменного тока в постоянный?

5.2 Для каких целей применяют выпрямителей?

5.3 Каковы отличительные особенности двухполупериодной схемы выпрямления (по сравнению с однополупериодной)?

5.4 Как влияет конденсатор на пульсацию выпрямленного напряжения?

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

3.1 Практическое занятие № 1 (2 часа).

Тема: «Расчет цепей постоянного тока методом контурных токов и методом наложения»

3.1.1 Задание для работы:

1. Методом контурных токов определить токи в ветвях схемы

3.1.2 Краткое описание проводимого занятия:

Определяем количество уравнений системы:

$$K=B-(Y-1)=8-(5-1)=4$$

Выбираем контуры и записываем для каждого уравнения по второму закону Кирхгофа:

$$1-4 \quad -3-2 \quad I_{11} \cdot (R_3 + R_4 + R_5 + R_6) - I_{22} \cdot R_4 - I_{33} \cdot R_5 - I_{44} \cdot R_6 = 0$$

$$1-2-5-2 \quad - I_{11} \cdot R_4 + I_{22} \cdot (R_1 + R_4 + R_7) - I_{33} \cdot R_7 - I_{44} \cdot 0 = E_1$$

$$2-3-5-2 \quad - I_{11} \cdot R_5 - I_{22} \cdot R_7 + I_{33} \cdot (R_5 + R_7 + R_8) - I_{44} \cdot R_8 = 0$$

$$3-4-5-3 \quad -I_{11} \cdot R_6 - I_{22} \cdot 0 - I_{33} \cdot R_8 + I_{44} \cdot (R_2 + R_6 + R_8) = -E_2$$

Решив систему одним из численных методов, получим значения контурных токов:

$$I_{11}=10 \text{ A}; \quad I_{22}=15 \text{ A}; \quad I_{33}=5 \text{ A}; \quad I_{44}=-15 \text{ A}.$$

Затем выражаем токи ветвей из контурных токов.

$$I_1 = I_{22} = 15 \text{ A}; \quad I_3 = I_{11} = 10 \text{ A}; \quad I_5 = I_{11} - I_{33} = 5 \text{ A};$$

$$I_7 = I_{22} - I_{33} = 10 \text{ A}; \quad I_2 = -I_{44} = 15 \text{ A}; \quad I_4 = I_{22} - I_{11} = 5 \text{ A};$$

$$I_6 = I_{11} - I_{44} = 25 \text{ A}; \quad I_8 = I_{33} - I_{44} = 20 \text{ A};$$

Составляем баланс мощностей:

$$P_{\text{ист}} = E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2 = 145 \cdot 15 + 140 \cdot 15 = 4275 \text{ Вт}$$

$$P_{\text{потр}} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 + I_4^2 R_4 + I_5^2 R_5 + I_6^2 R_6 + I_7^2 R_7 +$$

$$I_8^2 R_8 = 4275 \text{ Вт}$$

3.1.3 Результаты и выводы:

