

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

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ
ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ**

Электротехника и электроника

Направление подготовки (специальность) 35.03.06 «Агроинженерия»

Профиль образовательной программы Технический сервис в АПК

Форма обучения заочная

СОДЕРЖАНИЕ

1. Конспект лекций.....	3
1.1 Лекция №1 Электрические цепи постоянного тока.....	3
1.2 Лекция № 2 Синусоидальный переменный электрический ток.....	24
1.3 Лекция № 3 Трансформаторы Асинхронные двигатели.....	47
2. Методические указания по выполнению лабораторных работ.....	48
2.1 Лабораторная работа № ЛР-1 Исследование законов Кирхгофа и принципа наложения в сложной электрической цепи постоянного тока.....	70
2.2 Лабораторная работа № ЛР-2 Исследование цепи переменного тока с последовательным включением элементов	73
2.3 Лабораторная работа № ЛР-3 Исследование трехфазной цепи синусоидального переменного тока при соединении потребителей звездой.....	76
2.4 Лабораторная работа № ЛР-4 Включение трехфазного асинхронного электродвигателя в трехфазную систему.....	78

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. Закон Ома. Законы Кирхгофа.
3. Расчет простых цепей при последовательном, параллельном и смешанном включении элементов. Анализ линейных электрических цепей постоянного тока. Электромагнетизм.

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 называли 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, электродвижущей силе и электрическом напряжении.

Электрический ток

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

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

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

Электрический ток неизменный по направлению и величине называется постоянным.

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

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

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

Электродвижущая сила

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

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

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

$$E = \frac{A}{q}, \quad \text{Вб/Кл}$$

Электрическое напряжение и электрический потенциал

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

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

$$U_{ab} = \frac{A}{q_0} = \int_a^b E_n dl, \quad \text{Вб/Кл}$$

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

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

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

$$\varphi_b = \int_0^b E dl, \quad \text{Вб/Кл}$$

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

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

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

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

Измерение ЭДС и напряжения

Единицей измерения ЭДС и электрического напряжения является вольт, а прибор, измеряющий эти величины – вольтметр. Вольтметр включается параллельно в электрическую цепь, и должен обладать очень большим сопротивлением, чтобы он не влиял на режим работы цепи. Величина ЭДС измеряется в режиме холостого хода, при разомкнутой электрической цепи, напряжение на любом участке в рабочем режиме.

Элементы схемы замещения

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

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

Источник ЭДС

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

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

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

Выразим напряжение

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

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

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

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

Элементы схемы замещения

На рисунке представлено условное графическое изображение источника ЭДС. Основными параметрами источника ЭДС являются: величина ЭДС E ; внутреннее

сопротивление r_0 и вольтамперная характеристика $U = f(I)$.

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

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

Выразим напряжение

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

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

внутреннего сопротивления источника, то им можно пренебречь, тогда напряжение не зависит от величины тока. Такой источник называется идеализированным.

Резистивный элемент

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Индуктивность, параметр, характеризующий способность катушки индуцировать ЭДС.

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

Основные параметры: электрическая емкость, кулон-вольтная характеристика.

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

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

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

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

2. Закон Ома. Законы Кирхгофа.

Закон Ома для пассивной ветви

Ветвью называется участок ЭЦ вдоль которого течет ток одного значения.

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

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

$$U = R \cdot I$$

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

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

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

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

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

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

$$R_{\text{экв}} = \sum_{k=1}^n R_k$$

Закон Ома для активной ветви

Рассмотрим пример активной ветви, содержащей несколько источников ЭДС.

Обобщенный закон Ома для данного участка цепи запишется следующим образом:

$$I = \frac{\mathcal{E}_1 + E_2 - E_3}{R}$$

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

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

Законы Кирхгофа

Первый закон Кирхгофа

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

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

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

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

Представим токи ветвей как отношение напряжения к сопротивлению соответствующего участка:

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

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:

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

Эквивалентные преобразования (звезда-треугольник)

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

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

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

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

Второй закон Кирхгофа

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

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

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

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

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

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

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

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

3. Расчет простых цепей при последовательном, параллельном и смешанном включении элементов. Анализ линейных электрических цепей постоянного тока. Электромагнетизм.

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 напряжения, показываемое вольтметром. Затем записываем уравнение по второму закону Кирхгофа, откуда выражаем напряжение.

Потенциальная диаграмма

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

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

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

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

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

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

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

Метод контурных токов. Метод узловых потенциалов.

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

В основе метода - первый закон Кирхгофа.

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

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

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

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

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

Подставим полученные выражения токов в первое уравнение:

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

Сгруппируем уравнение:

$$\varphi_c \cdot \mathbf{G}_1 + G_2 + G_3 \rightrightarrows \varphi_b \cdot G_1 - \varphi_d \cdot G_2 - \varphi_a \cdot G_3 = E_1 \cdot G_1 - E_3 \cdot G_2$$

Применяется при расчете цепи, которая содержит параллельно соединенные ветви
Порядок расчета.

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

$$\begin{aligned} \varphi_a \cdot \mathbf{G}_6 + G_3 + G_5 &\rightrightarrows \varphi_b \cdot G_6 - \varphi_c \cdot G_3 = E_3 \cdot G_3, \\ -\varphi_a \cdot G_6 + \varphi_b \cdot \mathbf{G}_6 + G_1 + G_4 &\rightrightarrows \varphi_c \cdot G_1 = -E_1 \cdot G_1, \\ -\varphi_a \cdot G_3 - \varphi_b \cdot G_1 + \varphi_c \cdot \mathbf{G}_1 + G_2 + G_3 &\rightrightarrows E_1 \cdot G_1 - E_3 \cdot G_3 \end{aligned}$$

Выразим токи в ветвях по закону Ома:

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

Метод двух узлов

Рассмотрим частный случай метода узловых потенциалов – метод двух узлов.

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

Метод контурных токов

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

$$\begin{aligned} I_{k1} \cdot \mathbf{R}_3 + R_1 + r_{01} + R_6 &\rightrightarrows I_{k2} \cdot R_3 - I_{k3} \cdot R_6 = E_1 + E_3 \\ -I_{k1} \cdot R_3 + I_{k2} \cdot \mathbf{R}_5 + R_3 + R_2 &\rightrightarrows I_{k3} \cdot R_5 = -E_3 \\ -I_{k1} \cdot R_6 - I_{k2} \cdot R_5 + I_{k3} \cdot \mathbf{R}_6 + R_4 + R_5 &\rightrightarrows 0 \end{aligned}$$

Метод эквивалентных преобразований

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

$$I_1 \cdot \mathbf{R}_1 + R_{\text{экв}} \rightrightarrows E_1 \pm E_{\text{экв}}$$

$$I_1 = \frac{E_1 \pm E_{\text{экв}}}{\mathbf{R}_1 + R_{\text{экв}}}$$

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 определяется:

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

2. Мощность в цепи постоянного тока Баланс мощностей.

Поступательное движение свободных электронов в проводнике, создающее электрический ток, вызывает дополнительные столкновения электронов с атомами внутри проводника. При таких столкновениях электроны сообщают атомам дополнительную энергию и усиливают их беспорядочные колебания, что проявляется в виде выделения тепла проводником.

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

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

где 0,24 – тепловой коэффициент.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$P_{\text{потр}} = P_{\text{ист}}.$$

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

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

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

Расчет нелинейных цепей постоянного тока

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

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

Характеристики НЭ

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

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

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

Свойства НЭ кроме ВАХ характеризуются также статическим и дифференциальным сопротивлениями.

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

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

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

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

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.

Электромагнетизм

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 правого винта (правило буравчика).

Магнитодвижущая сила (МДС) создает в каждой точке поля определенную

напряженность \vec{H} , измеряемую в А/м . Напряженность характеризует интенсивность МП, но не учитывает влияния среды, в котором оно находится.

В вакууме и неферромагнитной среде величина напряженности определяется выражением:

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

где B - магнитная индукция, Тл ;

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

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

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

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

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

Проявления магнитного поля: механическое

Рассмотрим магнитное поле, образованное постоянным магнитом. Направление силовых линий магнитного поля всегда от северного полюса к южному. Вектор магнитной индукции, в каждой точке поля, всегда направлен от северного полюса 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.

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

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

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

следовательно, магнитная индукция поля

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

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

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

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

Механическое проявление магнитного поля используют во всех электродвигателях для получения вращающих 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 индуктированной. 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 индуктированной 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 индуктированной ЭДС.

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

Если замкнуть проводник на сопротивление и перемещать его со скоростью v , то индуктированная 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 dx , проходимый им за время dt , т.е.

$$v = \frac{dx}{dt}$$

Произведение магнитной индукции на площадь есть магнитный поток, пересеченный проводником за время dt , следовательно:

$$E = -\frac{B \cdot l \cdot dx}{dt} = -\frac{B \cdot dS}{dt} = -\frac{d\Phi}{dt}$$

Индуктированная ЭДС равна скорости изменения магнитного потока.

В различных электромагнитных устройствах – трансформаторах, машинах измерительных приборах – магнитный 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 индуктироваться 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 индуктированных 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 потокоцеплением Ψ , измеряется как и магнитный поток в Вб.

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

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

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

$$e_k = -w \frac{d\Psi}{dt}$$

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 изменялись 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 намагничивающего тока, магнитная индукция уменьшается, но не по кривой первоначального намагничивания, а по кривой, лежащей несколько выше. При напряженности магнитного поля, равной нулю, в сердечнике сохраняется некоторая

остаточная индукция B_0 . Чтобы полностью размагнитить сердечник, необходима напряженность поля обратного направления H_c , называемая коэрцитивной силой, для возбуждения которой, по катушке нужно пропустить ток обратного направления. Дальнейшее увеличение напряженности приводит к возникновению магнитной индукции обратного направления. Если уменьшать намагничивающий ток, то магнитная индукция будет уменьшаться по кривой расположенной ниже оси абсцисс, но такой же по форме, что и кривая убывания индукции при положительном 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 размагничивающим 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.

Расчет магнитных цепей. Закон полного тока

Расчет магнитных цепей. Закон полного тока.

Магнитные цепи

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

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

Закон полного тока

В основе расчета магнитных цепей лежит закон полного тока

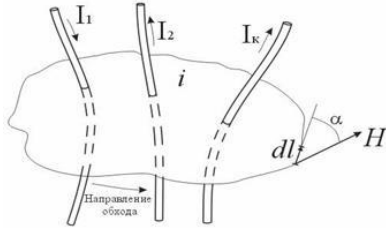
$$\oint H d\vec{L} = \oint H \cos \alpha dL = \sum I,$$

где: H – напряженность магнитного поля в данной точке пространства;

dL – элемент длины замкнутого контура L ;

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

□ I – алгебраическая сумма токов, пронизывающих контур L .

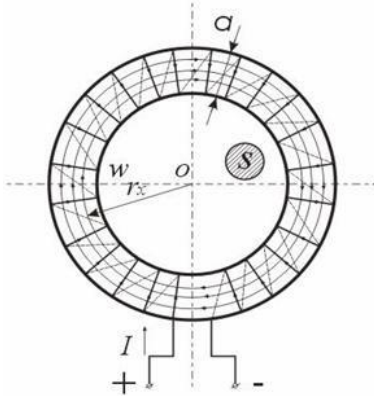


Закон полного тока

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

Применение закона полного тока для расчета магнитных цепей

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



Кольцевая магнитная цепь

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

1. \vec{H} и $d\vec{L}$ совпадают, следовательно $\alpha = 0$;
2. величина H_x во всех точках контура одинакова;
3. сумма токов, пронизывающих контур, равна IW .

Тогда

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

Отсюда

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

где L_x – длина контура, вдоль которого велось интегрирование;

r_x – радиус окружности.

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

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

где L – длина средней магнитной линии.

Запишем интеграл $\oint \mathbf{H} d\mathbf{L}$ в виде суммы интегралов с границами интегрирования, совпадающими с началом и концом каждого участка цепи. Тогда

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{L} = \int_a^b \mathbf{H}_1 d\mathbf{L} + \int_b^c \mathbf{H}_2 d\mathbf{L} + \int_c^a \mathbf{H}_3 d\mathbf{L} = H_1 L_1 + H_2 L_2 + H_{\text{воз}} \delta = I W$$

где: L_1 и L_2 – длины ферромагнитных участков цепи [м].

δ – ширина воздушного зазора, [м].

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

A для воздушного зазора

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

Обратная задача

Задано:

1. Геометрические размеры магнитной цепи;
2. Характеристики ферромагнитных материалов;
3. Намагничивающая сила обмотки F .

Требуется определить магнитный поток Φ .

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

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

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

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

Остальные значения можно давать меньше.

$$\Phi = \frac{F}{R_{m\text{воз}}} = \frac{F}{\frac{b}{S \times 4\pi \times 10^{-7}}}$$

Особенности расчета магнитных цепей с переменной магнитодвижущей силой

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

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

Потери в сердечнике

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

$$P_v = k_v f^2 B_m^2 d^2 / \rho,$$

где k_v – коэффициент, определяемый экспериментально;

f – частота перемагничивания стали;

B_m – максимальная магнитная индукция;

d – толщина листа электротехнической стали сердечника;

ρ – удельное сопротивление материала сердечника.

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

$$P_g = k_g f B_m^2 G,$$

где k_g – постоянный коэффициент;

G – вес сердечника в килограммах.

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

Векторная диаграмма и схема замещения катушки с сердечником

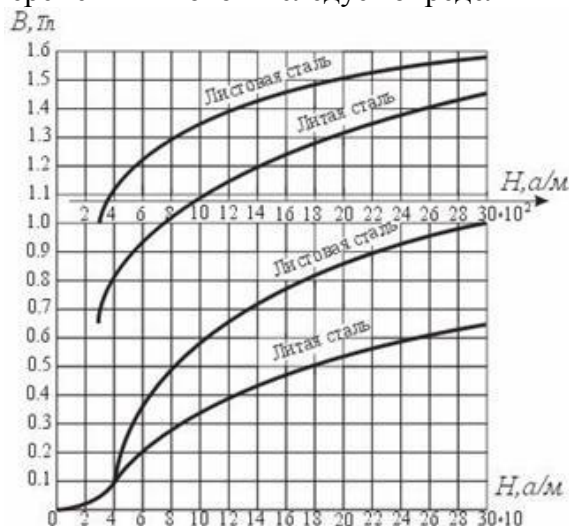
При расчете цепей с ферромагнитными элементами с синусоидальными источниками питания индуктивность L нельзя считать постоянной, и поэтому необходимо использовать зависимость между ЭДС и потокоцеплением или потоком. Форма кривой зависимости между потоком Φ и намагничивающим током i (рис. 4.8) подобна форме основной кривой намагничивания $B(H)$, т.к. $\Phi = B S$, а $H = IW / L$.

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

При непостоянстве индуктивности L ЭДС самоиндукции e , наводимую в катушке

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

переменным током i следует определять по формуле



Зависимость $B(H)$

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

$$u = -e,$$

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

Интегрируя это выражение, получим

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

Из полученного соотношения следует:

1. При синусоидальном напряжении на зажимах катушки магнитный поток Φ , вызванный протекающим по цепи током I , тоже синусоидальный.

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

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

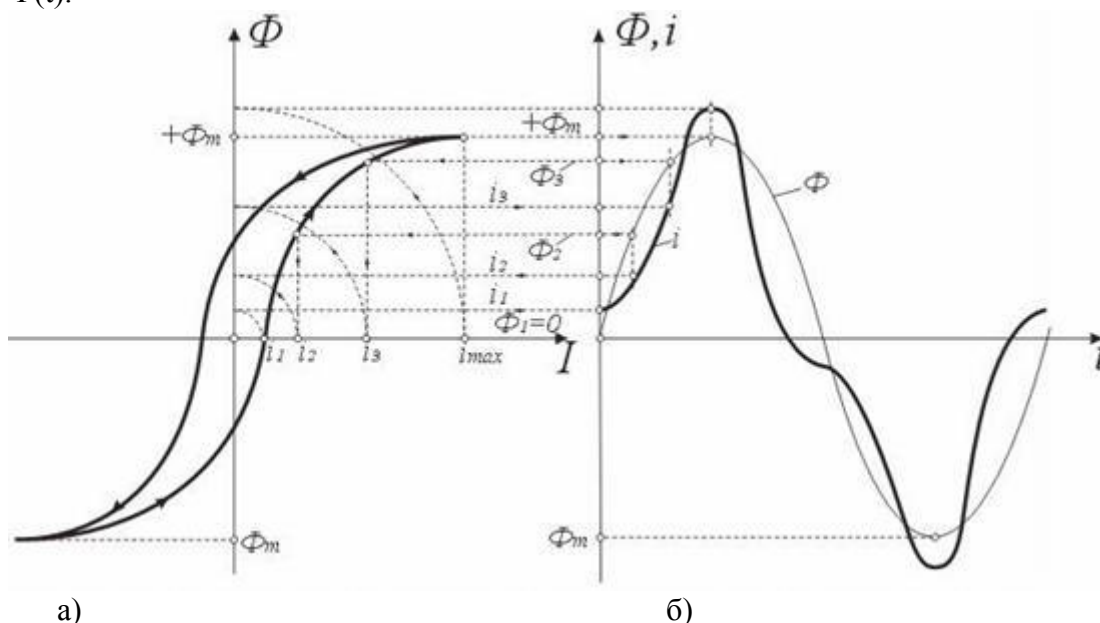
$$E_m = 2 \pi f W \Phi_m,$$

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

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

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

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



Кривая перемагничивания (а) и кривые $\Phi(t)$ и $\Phi(i)$ для катушки со стальным сердечником

1.2 Лекция № 2 (2 часа).

Тема: «Синусоидальный переменный электрический ток»

1.3.1 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. Активная, реактивная и полная мощности. Коэффициент мощности. Треугольник напряжений, сопротивлений и мощностей. Резонанс напряжений. Резонанс токов. Частотные характеристики.
- Получение трехфазного тока. 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.
- Методика расчета цепи трехфазного переменного тока при соединении нагрузки треугольником.
- Мощность в трехфазных цепях. Измерение мощности в трехфазных цепях.

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, изменяющийся 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.

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:

$$f = \frac{n}{60}, \quad [\text{Гц}]$$

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

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

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

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

Синусоидальному току соответствует непрерывное вращение вектора длиной I_m .

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

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

аналогичным образом можно записать выражения для синусоидальных напряжений и ЭДС:

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

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

где i, u, e - мгновенное значение;

I_m, U_m, E_m - амплитудное значение;

ψ_i, ψ_u, ψ_e - начальная фаза.

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

Среднее и действующее значения синусоидальной величины

Пусть закон изменения тока имеет вид:

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

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

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

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

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

$$Q_I = 0,24 R I^2 T$$

Приравняв 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:

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

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;

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

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

$$a = \operatorname{Re} \overbrace{I_m}^{\psi_i} = I_m \cdot \cos \psi_i.$$

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

$$b = \operatorname{Im} \overbrace{I_m}^{\psi_i} = I_m \cdot \sin \psi_i.$$

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:

$$i_1 = 10 \cdot \sin \overbrace{(\omega t + 45^\circ)}^{\psi_1}, \text{ A};$$

$$i_2 = 5 \cdot \sin \overbrace{(\omega t - 135^\circ)}^{\psi_2}, \text{ A}.$$

Перейдем от выражения для мгновенных значений к комплексным амплитудам токов:

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

$$\begin{aligned} \dot{I}_{2m} &= 5 \cdot e^{-j135^\circ} = 5 \cdot \cos \overbrace{135^\circ}^{\psi_2} + j \cdot 5 \cdot \sin \overbrace{135^\circ}^{\psi_2} \\ &= -5 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - j \cdot 5 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} = -2,5\sqrt{2} - j2,5\sqrt{2} \end{aligned}$$

Сложение двух комплексных чисел удобнее производить в алгебраической форме записи:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{1m} + \dot{I}_{2m} &= \overbrace{5\sqrt{2} + j5\sqrt{2}}^{\psi_1} + \overbrace{-2,5\sqrt{2} - j2,5\sqrt{2}}^{\psi_2} = \\ &= \overbrace{5\sqrt{2} - 2,5\sqrt{2}}^{\psi_1} + j \overbrace{5\sqrt{2} - 2,5\sqrt{2}}^{\psi_2} = \\ &= 2,5\sqrt{2} \overbrace{(-1)}^{\psi_1} + j2,5\sqrt{2} \overbrace{(-1)}^{\psi_2} = \\ &= 2,5\sqrt{2} + j2,5\sqrt{2} = \sqrt{\overbrace{5\sqrt{2}}^{\psi_1} + \overbrace{5\sqrt{2}}^{\psi_2}} \cdot e^{j \arctg \left(\frac{2,5\sqrt{2}}{2,5\sqrt{2}} \right)} = \\ &= \sqrt{\overbrace{5\sqrt{2}}^{\psi_1} + \overbrace{5\sqrt{2}}^{\psi_2}} \cdot \overbrace{(-1)}^{\psi_1} \cdot e^{j \arctg \overbrace{(-1)}^{\psi_2}} = \end{aligned}$$

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

Обратный переход к мгновенным значениям:

$$i_{12} = 5 \cdot \sin(\omega t + 45^0)$$

Операции с комплексными числами. Вычитание.

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

Обратный переход к мгновенным значениям:

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

Операции с комплексными числами. Деление.

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

Делить комплексные числа удобнее в показательной форме записи

Комплексные амплитуды напряжения и тока имеют следующий вид:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Величина, обратная полному комплексному сопротивлению называется полной комплексной проводимостью:

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

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

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

4. Простейшие цепи переменного тока с идеальным активным, индуктивным и емкостным элементом. Активная, реактивная и полная мощности. Коэффициент мощности

Резистор

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

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

Определим закон изменения напряжения на его зажимах:

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

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

Индуктивный элемент

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

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

Тогда величина ЭДС самоиндукции:

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

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

ЭДС самоиндукции всегда направлено навстречу напряжению, а значит:

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

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

Емкостный элемент

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

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

Ток и напряжение связаны законом Ома в дифференциальной форме записи:

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

$$= I_m \sin \left(\omega t + 90^\circ \right) \quad X_C = \frac{1}{\omega C}$$

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

Активная, реактивная и полная мощности. Коэффициент мощности

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

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

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

$$p = u \cdot i = U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin (\omega t + \varphi) = U_m I_m \sin \omega t \sin (\omega t + \varphi)$$

$$= \frac{U_m I_m}{2} [\cos \varphi - \cos (\omega t + \varphi)] = \frac{\sqrt{2} U \sqrt{2} I}{2} [\cos \varphi - \cos (\omega t + \varphi)]$$

$$= UI \cos \varphi - UI \cos (\omega t + \varphi)$$

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

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

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

Мощность в цепи с резистивным элементом.

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

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

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

Мощность в цепи с индуктивным элементом.

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

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

Таким образом, ток в цепи с индуктивностью не совершает работу, он обуславливается 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.

$$Q = I^2 \cdot X_L, \text{ в } \text{вар}.$$

Мощность в цепи с емкостным элементом.

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

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

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

Расчёт линейных цепей переменного тока. Резонанс напряжений. Резонанс токов

Линейная цепь переменного тока.

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

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

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

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

или

$\dot{U} = \dot{U}_C + \dot{U}_R + \dot{U}_L$ - для комплексов действующих значений.

Векторная диаграмма

Построим векторную диаграмму напряжений для данной цепи. Построение начинаем с вектора действующего значения тока. Строим векторы напряжений на элементах с учетом из фазовых соотношений. Напряжение на емкости отстает от тока, т.е. вектор повернут на угол 90^0 в направлении по часовой стрелке. Вектор напряжения на резисторе совпадает с вектором тока. Затем строим вектор напряжения на емкости, опережающий вектор тока на угол 90^0 . Складываем векторы по правилу параллелограмма, и получаем вектор напряжения на зажимах цепи.

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

Разность векторов напряжений на емкости и индуктивности представляет собой, в общем случае, реактивное напряжение: $\dot{U}_p = \dot{U}_C - \dot{U}_L$.

Треугольник напряжений, сопротивлений и мощностей. Резонанс напряжений.

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

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

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

Условием резонанса напряжений можно считать равенство реактивных сопротивлений элементов цепи.

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

Векторная диаграмма резонансной цепи выглядит следующим образом: Вектор напряжения на резисторе совпадает с вектором тока, а векторы напряжений на емкости и индуктивности сдвинуты, относительно вектора тока на 90^0 , длины их равны.

Следовательно, их геометрическая сумма равна нулю, а напряжение на входных зажимах цепи равна по величине и совпадает по фазе с напряжением на резисторе $= \dot{U}$.

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

Энергия электрического поля конденсатора при его разряде переходит в энергию магнитного поля катушки и наоборот. Таким образом, происходят колебания энергии между катушкой и емкостным элементом без участия энергии генератора. Генератор же сообщив первоначальный заряд конденсатору, впоследствии компенсирует только потери энергии в активном сопротивлении.

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

Ток в цепи определится выражением:

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

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

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

И в случае, если реактивные сопротивления катушки и емкости много больше, чем

активное сопротивление резистора $X_L = X_C \gg R$; то частичные напряжения на катушке и емкости будут больше, чем напряжение на входе цепи

$\dot{U}_L = \dot{U}_C \gg \dot{U}$. В этом случае, большое частичное напряжение на емкости может привести к пробое слоя диэлектрика, а на катушке – к пробое изоляции. По этой причине к технике сильных токов резонанс напряжений считается нежелательным явлением, а в технике слабых токов нашел широкое применение.

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

$$\frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U} = Q$$

Условия резонанса

Как настроить цепь в режим резонанса.

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

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

2. Для заданного значения частоты изменять значения L и C .

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

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

Частотные характеристики

Зависимость полного сопротивления от частоты

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

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

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

Фазо-частотная характеристика.

Зависимость фазы (угла сдвига фаз) от частоты:

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

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

$$Z = X$$

В интервале частот от нуля до резонансной, характер нагрузки емкостный, угол сдвига фаз между напряжением и током равен -90^0 . После резонансной частоты характер нагрузки индуктивный, а значит, угол сдвига фаз равен 90^0 . Таким образом, в чисто реактивном двухполюснике фазовый сдвиг меняется от -90^0 до $+90^0$. Если в двухполюсник включить активное сопротивление, то график ФЧХ будет не ступенчатым, а плавно возрастающим, причем, чем больше добротность контура, тем ФЧХ ближе к ступенчатой.

Амплитудно-частотная характеристика.

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

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

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

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

. Разветвленные цепи переменного тока Метод проводимостей и эквивалентных преобразований.

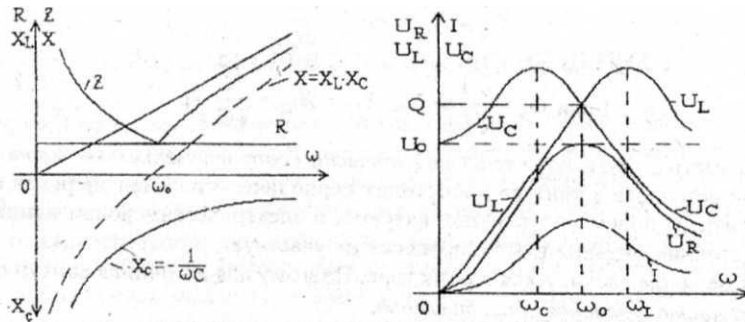
В цепи с параллельным соединением элементов R, L, C (параллельный колебательный контур возникает *резонанс токов*).

Комплексная входная проводимость цепи

$$\underline{Y}_{BX} = \underline{Y}_R + \underline{Y}_L + \underline{Y}_C = G - j(B_L - B_C) = G - jB = ye^{-j\varphi}.$$

Условие резонанса – равенство нулю входной реактивной проводимости цепи:

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



Рис

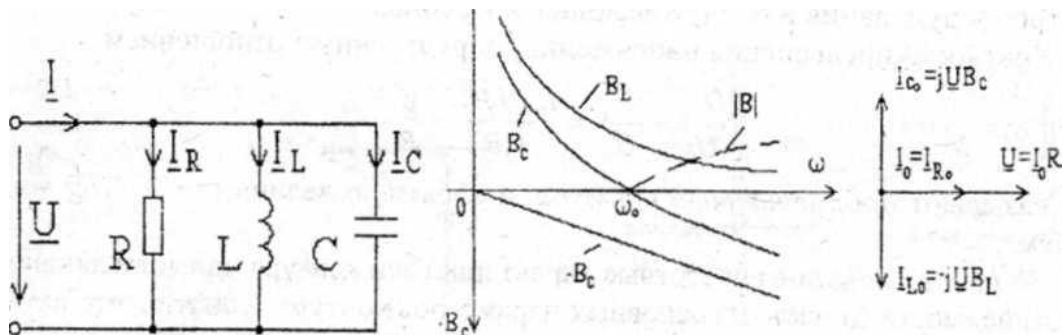
На рис. приведены частотные характеристики идеального контура, для которого $G = 1/R = Q$. При угловых частотах $\omega < \omega_0$ цепь имеет индуктивный характер, а при $\omega > \omega_0$ – емкостный.

Резонанс токов. Частотные характеристики.

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

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_{R0} = \underline{U}G = \underline{U}/R$$

В зависимости от соотношения между G и B ($\underline{B}_L = \underline{B}_C$), равные между собой при резонансе тока $\underline{I}_{L0} = \underline{I}_{C0}$ могут превышать общий ток $\underline{I}_0 = \underline{I}_{R0}$



$$G = 1/R; \quad \rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

4.Трехфазный переменный электрический ток

переменного тока при соединении нагрузки треугольником.

4. Получение трехфазного тока. Основные характеристики трехфазной цепи.

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

Трехфазный ток имеет следующие преимущества:

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

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

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

5.Основные характеристики трехфазной цепи.

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

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

$$e_A = E_m \sin \omega t,$$

$$e_B = E_m \sin(\omega t - 120^\circ);$$

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

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

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

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

Представляет собой совокупность трех одинаковых по амплитуде и частоте источника, ЭДС которых сдвинута друг относительно друга на угол 120 градусов.

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

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 нейтраль 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:

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

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

Запишем комплексы действующих значений линейных напряжений генератора:

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

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

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

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:

$$\dot{I}_{\Phi} = \dot{I}_{Л}; \quad \dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{\underline{Z}_a}; \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{\underline{Z}_b}; \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{\underline{Z}_c}$$

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.

$$\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c$$

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

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

Расчет трехпроводной ТФЦ при соединении звездой

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

фазного напряжения генератора и напряжения смещения нейтрали для каждой фазы соответственно.

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

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

7. Методика расчета цепи трехфазного переменного тока 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 треугольником. 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).

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

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

$$\dot{U}_{AB} = \dot{\varphi}_A - \dot{\varphi}_B = \dot{U}_{ab};$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{\varphi}_B - \dot{\varphi}_C = \dot{U}_{bc};$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{\varphi}_C - \dot{\varphi}_A = \dot{U}_{ca};$$

$$\dot{U}_{ЛГ} = \dot{U}_{ЛН};$$

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

$$U_{\text{ФН}} = U_{\text{ЛН}},$$

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

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

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:

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

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

$$\dot{I}_A + \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{ab} = 0 \quad \dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca};$$

$$\dot{I}_B + \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{bc} = 0 \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab};$$

$$\dot{I}_C + \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ca} = 0 \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}.$$

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

$$\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca}$$

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:

$$\dot{I}_{ab} = I_{\Phi} \cdot e^{j\psi}; \quad \dot{I}_{bc} = I_{\Phi} \cdot e^{j\psi} \cdot e^{-j120^\circ} = \dot{I}_{ab} \cdot e^{-j120^\circ};$$

$$\dot{I}_{ca} = I_{\Phi} \cdot e^{j\psi} \cdot e^{j120^\circ} = \dot{I}_{ab} \cdot e^{j120^\circ}.$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= I_{\text{Л}} \cdot e^{j\psi}; \quad \dot{I}_B = I_{\text{Л}} \cdot e^{j\psi} \cdot e^{-j120^\circ} = \dot{I}_A \cdot e^{-j120^\circ}; \\ \dot{I}_C &= I_{\text{Л}} \cdot e^{j\psi} \cdot e^{j120^\circ} = \dot{I}_A \cdot e^{j120^\circ}. \end{aligned}$$

Векторная диаграмма.

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

$$\frac{I_{\text{Л}}}{2} = I_{\text{Ф}} \cdot \cos 30^\circ = I_{\text{Ф}} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

8. Мощность в трехфазных цепях. Измерение мощности в трехфазных цепях.

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

$$P_{\text{ФГ}} = U_{\text{ФГ}} \cdot I_{\text{Ф}} \cdot \cos \varphi.$$

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

$$P_{\text{ФН}} = U_{\text{ФН}} \cdot I_{\text{Ф}} \cdot \cos \varphi,$$

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

$$P_{\text{ФН}} = I_{\text{Ф}}^2 \cdot R_{\text{Ф}}.$$

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

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

поэтому выполнение баланса мощностей проверяют по сумме мощностей всех фаз:

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

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

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

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

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

При соединении нагрузки звездой фазные и линейные напряжения связаны соотношением:

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

Выражение мощности примет вид:

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

При соединении нагрузки треугольником фазные и линейные токи связаны соотношением:

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

Выражение мощности нагрузки примет вид:

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

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

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

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

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

или, выразив фазные величины через линейные:

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

Тогда полная мощность ТФЦ цепи

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

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

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

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

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

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

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

При соединении треугольником на основании закона Ома:

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

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

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

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

$$\frac{U_{Л\perp}}{\underline{Z}_{\Phi}} = \sqrt{3} \cdot I_{Л\perp}; \quad \frac{U_{Л\Delta}}{\underline{Z}_{\Phi}} = \frac{I_{Л\Delta}}{\sqrt{3}}; \quad \sqrt{3} \cdot I_{Л\perp} = \frac{I_{Л\Delta}}{\sqrt{3}}; \quad I_{Л\Delta} = 3 \cdot I_{Л\perp},$$

а для фазных

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

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

Если мощность цепи

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

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

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

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

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

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

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

Выразим мощность через фазное активное сопротивление:

$$P_{\text{Ф}} = I_{\text{Ф}}^2 \cdot R_{\text{Ф}}$$

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

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

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

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

получаем, что активное сопротивление фазы при соединении звездой должно быть в три раза меньше активного сопротивления, при соединении треугольником. Предположим, что это активное сопротивление провода, из которого намотана катушка приемника

энергии. При соединении звездой сечение провода должно быть в $\sqrt{3}$ раз больше, чтобы пропускать ток, больший в $\sqrt{3}$ раз. А длина его должна быть в $\sqrt{3}$ раз меньше. Таким образом, общая масса катушек при обоих способах соединения будет одинакова, но для звезды понадобится более толстый и короткий провод, что дешевле и механически прочнее. Кроме того, расчет изоляции проводника будет вестись на меньшее, в $\sqrt{3}$ раз, фазное напряжение.

1.3 Лекция № 3 (2 часа).

Тема: «Трансформаторы. Асинхронные двигатели»

1.3.1 Вопросы лекции:

1. Назначение, устройство и принцип действия трансформаторов. Основы теории однофазного трансформатора. Коэффициент трансформации
2. Опыт холостого хода и короткого замыкания. Энергетическая диаграмма потерь. КПД
3. Особенности трехфазных трансформаторов. Специальные трансформаторы
4. Основные характеристики асинхронного двигателя. Паспортные характеристики.
5. Особенности пуска и способы регулирования частоты вращения.
6. Однофазные асинхронные двигатели.
7. Классификация аппаратуры управления и защиты электродвигателей. Магнитные пускатели, автоматические выключатели, тепловые реле.
8. Приводные характеристики рабочих машин.
9. Принципы подбора электродвигателя к рабочей машине.

1.3.2 Краткое содержание вопросов:

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

Трансформатором называется статический (без движущихся частей) электромагнитный аппарат, в котором переменный ток одного напряжения преобразуется в переменный ток другого уровня напряжения, той же частоты. Различают силовые, измерительные, сварочные трансформаторы, а также автотрансформаторы.

Трансформатор простейшего типа состоит из ферромагнитного сердечника 1 и двух обмоток, связанных магнитной связью, исключение составляет автотрансформатор. Обмотка трансформатора, соединенная с источником электроэнергии 2, называется первичной, и, соответственно, первичными именуется 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 взаимной индукции E_2 .

Величину индуктированных 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 взаимной индукции 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 $U_{1\text{К}}$, ток короткого замыкания ПО $I_{1\text{КЗ}}$ и $I_{2\text{КЗ}}$ ВО, а также мощность $P_{\text{КЗ}}$. 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

$$k = \frac{I_{2КЗ}}{I_{1КЗ}}$$

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, частотомеров, и цепей напряжения измерительных приборов (ваттметров, счетчиков и фазометров). Схема включения показана на рисунке. Такой трансформатор конструктивно похож на силовой трансформатор. Его первичная обмотка, с большим числом витков, является обмоткой высшего напряжения, и включается параллельно как вольтметр в цепь. Вторичная обмотка, с меньшим числом витков, является обмоткой низшего напряжения, и замыкается на вольтметр или на обмотку напряжения ваттметра. Сопротивления измерительных приборов относительно велики (порядка тысяч Ом) $Z_V \rightarrow \infty$, вследствие чего трансформатор работает в режиме, близком к режиму ХХ ($I_1 \cdot Z_1 \approx I_2 \cdot Z_2$), что позволяет считать напряжения равными индуктированным ЭДС ($U_1 = E_1, U_2 = E_2$). Тогда вторичное напряжение, измеряемое вольтметром, связано с первичным постоянным соотношением, равным коэффициенту трансформации:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = k \quad U_1 = k \cdot U_2.$$

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

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

складывается из мощности, передаваемой электрическим путем

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

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.

4. Основные характеристики асинхронного двигателя. Паспортные характеристики.

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 $I_n = (5...7)I_n$;
- пусковой вращающий момент относительно момента в номинальном режиме мал $M_n = (1,2...1,6)M_n$;
- затруднено регулирование скорости вращения ротора.

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.

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

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

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

Такой ротор значительно дешевле и обслуживание двигателя проще.

Фазный ротор (с контактными кольцами)

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

Получение вращающегося магнитного поля

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

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

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

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

Эти токи создают магнитодвижущие силы

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

Определим величины и направления магнитодвижущих сил в различные моменты времени.

При $t=0$.

$$i_A = 0;$$

$$F_A = 0$$

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

$$F_B = -\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_m \cdot w$$

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

$$F_C = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_m \cdot w$$

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 $\omega t = 30^\circ$.

$$i_A = I_m \cdot \sin 30^\circ = \frac{1}{2} \cdot I_m; \quad F_A = \frac{1}{2} \cdot I_m \cdot w$$

$$i_B = I_m \cdot \sin (30^\circ - 120^\circ) = -I_m; \quad F_B = -I_m \cdot w$$

$$i_C = I_m \cdot \sin (30^\circ + 120^\circ) = \frac{1}{2} \cdot I_m; \quad F_C = \frac{1}{2} \cdot I_m \cdot w$$

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° , 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 совершит 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° , то в шестиполюсной витки одной фазы расположены под углом 60° относительно друг друга. За время одного периода колебания тока, магнитное поле повернется на одну треть периода или на 120° , 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 асинхронно машины: генераторный ($n > n_1$); двигательный ($n < n_1$); электромагнитного тормоза.

Основные характеристики асинхронного двигателя

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 сопротивления приводит уменьшению пускового момента.

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

работать в двигательном режиме, если скорость вращения ротора лежит в пределах от нуля, до скорости вращения магнитного поля

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

Предположим, что статорная обмотка создает вращающееся магнитное поле, а вал двигателя дополнительно приводится во вращение со скоростью большей, чем скорость поля. Скольжение в этом случае будет отрицательным, 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:

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

Рассмотрим пример, когда вал ротора приводится во вращение против направления магнитного поля статора. В этом случае к асинхронной машине подводится энергия с двух сторон: электрическая от сети, и механическая от первичного двигателя. Такой режим называется режимом электромагнитного тормоза. Он лежит в пределах изменения скольжения: $1 < S < +\infty$.

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

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 3.

Заводской номер дает возможность отличить электрическую машину среди однотипных.

Далее приведены цифры и символы, которые расшифровываются следующим образом:

3 ~ — двигатель трехфазного переменного тока;

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

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

косинус ϕ = 0,89 — коэффициент мощности;

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

S1 — двигатель предназначен для длительного режима работы;

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

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

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

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

F — класс нагревостойкости изоляции по ГОСТ 8865-93. (Системы электрической изоляции. Оценка нагревостойкости и классификация.)

В паспорте (на шильдике) указан также ГОСТ, которому соответствует электродвигатель, масса машины и год выпуска.

4.Особенности пуска и способы регулирования частоты вращения 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.

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

индуктируемые 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 катушек одной фазы обмотки с последовательного на параллельное соединение.

Регулирование скорости вращения переключением числа пар полюсов производится только у двигателей с короткозамкнутым ротором.

Недостатками такого способа регулирования являются ступенчатое изменение скорости вращения, наличие громоздкого многоконтактного переключателя, увеличение габаритных размеров двигателя.

Регулирование скорости вращения изменением частоты можно в случае, когда статорная обмотка питается от отдельного синхронного генератора или от преобразователя частоты. Используется крайне редко, в связи с громоздкостью и высокой стоимостью.

Регулирование скорости вращения путем изменения применяется только для двигателей с фазным ротором, работающих в кратковременном и повторно-кратковременном режиме. Скольжение зависит от активного сопротивления роторной обмотки. Введение в цепь ротора регулировочного реостата позволяет изменять скольжение. Однако этот способ регулирования снижает КПД двигателя.

6. Однофазный асинхронный двигатель

Однофазный асинхронный двигатель как следует из названия, питается от однофазной сети. От трех фазного двигателя он отличается статором. На котором в общем случае находится одна обмотка. На самом деле их как правило две но может быть и три. Ротор же однофазного двигателя ничем не отличается от ротора трех фазного двигателя. Это короткозамкнутая обмотка.

Статорная обмотка однофазного двигателя занимает две трети окружности статора. То есть формируется пара полюсов. При прохождении через нее переменного синусоидального тока образуется неподвижное магнитное поле. Статор не заполняется обмоткой полностью, так как это экономически не выгодно. Мощность при этом увеличится на 12 процентов а затраты и вес значительно.

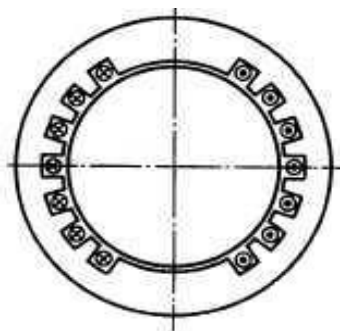


Рисунок 1 . Статор однофазного асинхронного двигателя

Поле статора неподвижно оно как бы пульсирует. При этом формируются два момента вращения направленные в противоположные стороны. Одна часть статорной обмотки тянет ротор в одну сторону другая же в противоположную. Таким образом, при подаче тока на статорную обмотку ротор вращаться не будет. Для этого необходим начальный момент, который повернет ротор в какую-либо сторону.

Пуск такого двигателя можно совершить и вручную крутнув вал. Но чаще для пуска двигателя применяют дополнительную обмотку, которая находится на статоре и называется пусковой. Она подключается к той же фазе что и рабочая, но через фазосдвигающую цепь. В качестве такой цепи может выступать емкость резистор или катушка.

При подключении пусковой обмотки к питающей сети через конденсатор ток в пусковой обмотке сдвигается на 90 градусов. Также на 90 градусов сдвигается и магнитное поле. Вообще говоря угол смещения тока можно регулировать подобрав величину емкости. Таки образом будет регулироваться пусковой момент.

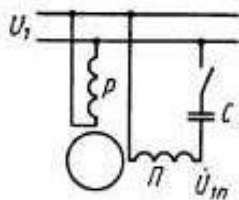


Рисунок 2. Фазосдвигающая цепь в виде пускового конденсатора

В момент пуска фазосдвигающая цепь подключается к пусковой обмотке, тем самым обеспечивая вращающееся магнитное поле. Которое, взаимодействуя с короткозамкнутым ротором, начинает его раскручивать. Время в течении которого пусковая обмотка подключена к питающей сети достаточно мало. Обычно оно составляет около трех секунд. За это время ротор выходит почти на полную скорость вращения и необходимость в пусковой обмотке отпадает. Пусковая емкость отключается от обмотки.

Так как время работы пусковой обмотки невелико ее, как правило, выполняют проводом меньшего сечения и меньшим числом витков. Иногда пусковую обмотку выполняют тем же проводом что и рабочую. Тогда при использовании фазосдвигающей цепи можно улучшить механические характеристики двигателя. В этом случае параллельно пусковой емкости включается рабочая. Эта ёмкость по величине меньше пусковой и, следовательно, обладает большим сопротивлением. Таки образом ток, протекающий во второй обмотке, будет меньше пускового.

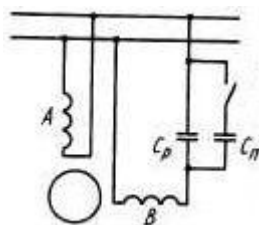


Рисунок 3 . Использование второй обмотки в качестве рабочей

После отключения пусковой емкости дающей пусковой момент вращения она отключается, а вот рабочая емкость остается, обеспечивая вращающееся магнитное поле и во время работы.

Основным недостатком однофазного асинхронного двигателя является то что он не обладает пусковым моментом. И, следовательно, необходимо применять какие либо меры по его пуску. Также в однофазном двигателе частота вращения ниже, чем у трех фазного. так как встречное поле, формируемое второй половиной статорной обмотки, тормозит ротор.

Также из-за тормозящего поля падает и КПД двигателя. У однофазного двигателя такого же габарита, как и трех фазный мощность будет на одну треть меньше.

7. Классификация аппаратуры управления и защиты электродвигателей.

Аппаратура управления и защиты, являющаяся составной частью электропривода, предназначенного для управления электроприводом (пуск, остановка, реверсирование), защиты электродвигателей при аварийных режимах и для обеспечения работы электродвигателя в заданных режимах в соответствии с требованиями технологического процесса.

По способу управления ее можно разделить на аппаратуру неавтоматического (ручного) и автоматического управления.

Магнитные пускатели, автоматические выключатели, тепловые реле.

Аппаратура неавтоматического управления.

Аппаратура неавтоматического управления применяется для осуществления коммутации электрических цепей переменного тока (напряжением до 500В) и приводится в действие вручную. К ней относятся: рубильники, пакетные выключатели, контролеры, кнопочные станции, автоматы и т.д.

Рубильники - простейшие аппараты ручного управления изготавливаются одно- двух- и трехполосными, с центральной или боковой ручкой, с боковым или центральным рычажным приводом.

Рубильники с центральной рукояткой используют для размыкания обесточенных цепей, с боковой ручкой - могут применяться и для управления цепями под нагрузкой.

Промышленность выпускает рубильники типа Р, РП, РПБ, РПЦ (привод центральный), РБ-31 (трехфазный, 100А)

Аппараты автоматического управления

Аппаратура автоматического управления применяется для пуска, остановки, торможения и регулирования частоты вращения электроприводов, их защиты при возникновении аварийных режимов, а также для осуществления дистанционного управления.

Для автоматического управления электроприводами в настоящее время широко используют как контактную аппаратуру (контакторы, магнитные пускатели, промежуточные реле и т.д.), так и бесконтактную. Контакторы герметизированные (герсиконы) силовые КМГ17Д8 до 3 кВт, 380В.

Магнитные пускатели предназначены для дистанционного управления нагрузкой. Они являются наиболее распространенными коммутационными устройствами.

Магнитные пускатели осуществляют автоматическое управление электроустановками, служат для защиты электродвигателей от перегрузок или самопроизвольного включения после снятия напряжения.

Контакты могут выпускаться на напряжение 220В и 380В. применяют габариты контактов (магнитных пускателей) в зависимости от мощности двигателя.

Магнитный пускатель состоит из кнопочной станции и четырёхполюсного контактора, одна пара контактов служит для блокирования кнопки «Пуск». Магнитные пускатели выпускают реверсивными и нереверсивными. Реверсивные служат для изменения направления вращения электропривода (после его остановки), состоят из двух нереверсивных магнитных пускателей, сблокированных между собой.

Кнопочные станции магнитных пускателей можно установить на значительном расстоянии от пускателя.

Магнитные пускатели обеспечивают защиту от исчезновения напряжения в сети или его снижения на 10-50% от Ш. Тепловые реле защищают электродвигатель от продолжительных перегрузок. ($P_{МЕ} < 10 \text{ кВт}$ и $P_{А} > 10 \text{ кВт}$).

Аппаратура защиты электроприводов

Для защиты электродвигателей от токов короткого замыкания -(аварийный режим) служат предохранители и автоматы, от перегрузки (ненормальный режим) - повышение тока в обмотках двигателя - тепловые реле магнитных пускателей.

Тепловые реле встраиваются в магнитный пускатель.

Основной рабочий орган теплового реле - биметаллическая пластинка, состоящая из двух слоев прочно соединенных между собой разнородных металлов, имеющих различные коэффициенты линейного расширения. При нагреве биметаллическая пластинка изгибается и при помощи соответствующих устройств разрывает электрическую цепь. Предохранители - простая и недорогая защита токоприемников от токов короткого замыкания. Наиболее часто применяют пробочные и трубчатые предохранители. Пробочные - ПРС.

Трубчатые предохранители (ТР) состоят из разборного патрона, плавкой вставки и контактных стоек. Для ускорения гашения дуги, возникающей при горении плавкой вставки, внутрь патрона засыпается наполнитель (кварцевый песок, меловая пыль смешанная с асбестом и т.д.). В некоторых предохранителях дугогасительная среда создается газогенерирующим материалом (фиброй), из которой сделан патрон предохранителя. Плавкая вставка, которая размещается внутри патрона, имеет несколько сужений, в которых она расплавляется при токах, превышающих номинальные. Время расплавления плавкой вставки тем меньше, чем больше кратность тока, т.е. отношение

протекающего тока к номинальному. Плавкая вставка не защищает электрооборудование от токовых перегрузок.

Номинальный ток плавкой вставки выбирают на 25% выше максимального длительного тока нагрузки:

$$I_{пв} > 1.25 I_{нагр}$$

Автоматические воздушные выключатели (автоматы).

Служат для ручного включения и отключения электрических цепей и автоматического отключения при коротких замыканиях или значительных перегрузках токоприемников. В настоящее время наиболее распространены автоматы типа А63, АК50, АП50, АЗ 100, АЗ700, АЕ2000 и т.д. Они могут изготавливаться с электромагнитными расцепителями (для отключения токоприемников от токов к.з.), с тепловыми (для защиты от тепловых перегрузок, или с электромагнитными и тепловыми расцепителями. Кроме того, автоматы АП50 могут изготавливаться с расцепителями минимального 15 и максимального тока в нулевом проводе.

Электромагнитные расцепители срабатывают мгновенно при токах, больше тока уставки $I_u = 1.25 I_{пуск}$ и отключают все три фазы одновременно.

Действия реле заключается в следующем: катушка, включенная последовательно в силовую цепь двигателя при токе 200-250% от номинального притягивает якорь реле преодолевая сопротивление пружины. На конце якоря находится штанга, которая упирается в рычаг. Отходя влево под действием штанги, рычаг разрывает контакты цепи управления и контактора.

Поскольку все устройства вышеперечисленные являются устройствами косвенного действия, они не всегда отражают истинный температурный режим обмотки электродвигателя. Поэтому промышленность стала выпускать устройства встроенной температурной защиты типа УЗ-1 А, УВТЗ-1, и др. В качестве датчика температуры служит позистор или термистр, встраиваемый в лобовые части обмотки статора.

Современные электродвигатели различают по принципу действия и конструкции, имеют в качестве выходного элемента вал, который вращается с определенной частотой. Во многих случаях частоту вращения двигателя можно регулировать, но частота вращения рабочих машин изменяется в более широком диапазоне. Поэтому между двигателем и рабочей машиной, как правило, устанавливают передаточный механизм или трансмиссию. В качестве трансмиссии применяют редукторы, муфты, ременные передачи и др.

В современном производстве, работа двигателя не мыслима без применения различных средств управления, обеспечивающих его коммутацию, защиту, изменение частоты вращения и режима работы.

Совокупность двигателя, трансмиссии и управляющего устройства получила название привода. Привод, основным элементом которого является электрический двигатель, называют электроприводом. В общем случае электропривод, кроме указанных элементов может включать и преобразовательное устройство. Электропривод, управляющее устройство которого имеют элементы автоматического управления называют автоматизированным. В животноводстве автоматизированный электропривод применяют в таких процессах, как приготовление и раздача кормов, водоснабжение, уборка навоза, вентиляция и д.р.

8. Приводные характеристики рабочих машин.

Для правильного выбора электропривода к рабочей машине необходимо знать ее принцип действия, конструкцию, происходящий в ней технологический процесс. Важно знать характер изменения нагрузки на валу ротора машины от времени, связь между механическими величинами.

Совокупность сведений о рабочей машине, необходимых для разработки ее привода, принято объединять термин «приводные характеристики рабочей машины». К ним относятся технологические, кинематические, энергетические, механические, нагрузочные и т.д.

Технологические - определяют требования к электроприводу со стороны технологического процесса, т.е. его производительность, качества сырья и готового продукта, условий окружающей среды.

Благодаря знанию кинематических схем можно составить представление о частоте вращения или поступательной скорости любого элемента машины или механизма.

Энергетические характеристики позволяют выявить распределение мощностей между отдельными узлами или рабочими органами машины.

Механические характеристики представляют собой графическое изображение зависимости моментов или сил сопротивления от частоты вращения вала рабочей машины.

Нагрузочные диаграммы характеризуют зависимость момента на валу рабочей машины и подводимой к ней мощности от времени. Они отражают режим работы электродвигателя в динамике. Нагрузка рабочей машины может быть постоянной и переменной. С постоянной нагрузкой работают установки, имеющие постоянную подачу материала, его равномерную загрузку. При неравномерной подаче материала переменной оказывается и нагрузка.

Постоянную нагрузку имеют вентиляторы, насосы при постоянной производительности и напоре, ленточные транспортеры, кормораздатчики.

С переменной нагрузкой работают не только механизмы, которые не удается загрузить равномерно, но и механизмы, имеющие специфическую кинематику. Сюда относятся поршневые насосы, крошипно-шатунные, кулачковые механизмы.

Режимы работы электропривода.

Одной из важнейших приводных характеристик рабочей машины является ее нагрузочная диаграмма. Нагрузочная диаграмма позволяет сделать предварительный выбор электродвигателя и в первую очередь выбрать режим его работы, т.к. каждый двигатель рассчитан на работу в определенном режиме.

Номинальным режимом работы электродвигателя называют режим, на который он рассчитан и для которого предназначен заводом-изготовителем.

Имеют место три номинальных режима электродвигателей: продолжительный, кратковременный и повторно-кратковременный с частыми пусками.

Продолжительными называют режимы работы при постоянной нагрузке, характеризующейся тем, что за время его работы превышения температуры двигателя над температурой окружающей среды практически достигает установившегося значения (А).

В таком режиме работают центробежные насосы, вентиляторы, измельчители корма.

Кратковременным называют режим работы, при котором за период постоянной нагрузки превышение температуры двигателя над температурой окружающей среды не достигает установившегося значения, а за период отключения все части двигателя охлаждаются до исходного состояния. В кратковременном режиме работают двигатели поворота лотков в инкубаторе, транспортеров уборки навоза, раздачи корма, сбора яиц.

При повторно-кратковременном режиме кратковременные нагрузки чередуются с кратковременными перерывами в работе, причем за время работы превышение температуры над температурой окружающей среды не достигает установившегося значения, а во время паузы оно не снижается до нуля. Повторно-кратковременный режим характеризуется длительностью цикла и коэффициентом относительной продолжительности включения. В соответствии с ГОСТом промышленность выпускает двигатели, рассчитанные на ПВ 15, 25, 40, 60%.

В ПК режиме работают двигатели подъемно-транспортных механизмов

9. Принципы подбора электродвигателя к рабочей машине.

Выбор электропривода для рабочей машины включает выбор электродвигателя к рабочей машине, системы управления и при необходимости преобразователя. Выбор

двигателя включает в себя выбор номинальной частоты вращения, номинальной мощности, конструктивного исполнения. Последнее определяется условиями окружающей среды, а также условиями крепления электродвигателя к рабочей машине.

По условиям защиты от воздействия окружающей среды промышленность выпускает электродвигатели защищенные, закрытые обдуваемые, продуваемые, взрывозащищенные. В двигателях защищенного исполнения закрыты все токоведущие и вращающиеся части. Тем самым предотвращается попадание к ним капель и посторонних предметов и случайное прикосновение с ним. Воздух, необходимый для охлаждения, попадает внутрь двигателя через вентиляционные окна. У двигателей закрытого обдуваемого исполнения эти окна отсутствуют, а охлаждение осуществляется вентилятором, установленным снаружи на валу двигателя, и закрытым специальным кожухом. Этот вентилятор засасывает воздух через отверстия в кожухе и направляет его вдоль ребер статора, предназначенных для улучшения охлаждения. Кроме того, предусмотрена вентиляция внутри корпуса электродвигателя. При выборе двигателя необходимо знать характер помещения, в котором он будет установлен. Согласно ПУЭ, помещения подразделяют на ряд классов. В сухих помещениях рекомендуется применять электродвигатели серий А, А2, АЛ, АЛ2. Если влажность не выше 60% - целесообразно применять электродвигатели новой серии 4А, которые по сравнению с серией А2 имеют еще меньшую массу и габариты, меньший уровень шума, большие пусковые моменты, более высокий КПД и надежность. Во влажных помещениях (относительная влажность < 75%) применяют закрытые обдуваемые двигатели АО, А02, АО Л и А0Л2. Высокую надежность во влажных помещениях показали и двигатели серии 4А. В сырых помещениях влажность > 75% применяют двигатели закрытые, обдуваемые, во влагостойком исполнении, например А02-СХ, а также 4АР. Особо сырые - влажность - 100% - А02-СХ и 4АР. Эти же двигатели применяются и для работы на открытом воздухе.

В жарких помещениях (температура больше 30 градусов) используют двигатели защищенного исполнения. В пыльных помещениях - АО, А02, А02-СХ, 4АР и Д специальной модификации.

При выборе двигателя по частоте надо стремиться к тому, чтобы двигатель имел такую же частоту вращения, что и рабочая машина, так как это избавляет от промежуточной передачи. В общем же случае задача выбора двигателя по частоте вращения - это задача экономическая. С увеличением частоты вращения двигателя, его габариты снижаются, а значит падает стоимость и снижается расход материалов. Кроме того высокоскоростные двигатели имеют более высокий КПД и $\cos \phi$ по сравнению с тихоходными. С другой стороны большинство рабочих машин тихоходные, поэтому

между двигателем и рабочей машиной необходима механическая передача. С увеличением передаточного числа стоимость передачи растет. Таким образом для каждой конкретной рабочей машины имеется своя оптимальная частота вращения. Вместе с тем определяющим элементом затрат является все-таки стоимость двигателя. Поэтому основное применение имеют двигатели 1500 об/мин.

Выбор двигателя по мощности.

От правильного выбора мощности двигателя зависит надежность его работы и экономическая эффективность. При продолжительной перегрузке двигателя его изоляция перегревается, что ускоряет ее старение и снижает срок службы двигателя.

Следовательно, применять двигатели заниженной мощности недопустимо. С другой стороны, завышение мощности двигателя увеличивает капитальные затраты, амортизационные отчисления и потери энергии, снижает коэффициент мощности.

Различают работу двигателя при постоянной и переменной нагрузке. При постоянной нагрузке мощность двигателя $P_{дв}$ должна определяться в зависимости от мощности на валу машины $P_{рм}$, по формуле:

$$P_{дв} > P_{рм}$$

Знак $>$ говорит о том, что выбирается двигатель ближайшей большей стандартной мощности.

Если двигатель работает при температуре, отличной от 40 °C, то он допускает степень загрузки, приблизительно равную:

При переменной нагрузке мощность электродвигателя выбирают по нагрузочной диаграмме, которая может представлять собой график изменения вращающегося момента, мощности или тока в зависимости от времени работы.

По нагрузочной диаграмме определяют эквивалентную мощность как среднеквадратичное значение. Эквивалентная мощность - это такая постоянная длительная мощность, которая вызывает такой же нагрев, как и действительная нагрузка.

Схема управления водонасосным агрегатом.

В животноводстве применяют автоматические насосные станции двух типов с воздушным водяным котлом и водонапорной башней. При надежном электроснабжении обычно пользуются безбашенными автоматическими водокачками. Для подъема воды чаще применяют водоструйные насосы, однако в случае использования колодцев их можно заменить вихревыми и лопастными насосами, а при использовании скважин - погружными насосами. При отсутствии воды в воздушно-водяном котле контакты реле давления РД замкнуты. Магнитный пускатель насоса К включает двигатель М, который подает воду потребителю. При уменьшении расхода воды - она поступает в котел, и

давление воздуха в нем повышается. При достижении заданного значения давления контакты реле РД размыкаются и двигатель отключается. Максимальное рабочее давление в системе 150 кПа. Для автоматизации башенных водокачек выпускают комплекты оборудования ПЭТ. При включении автоматического выключателя АВ напряжение подается на контакты МП-«К». О наличии напряжения свидетельствует лампа ЛЗ. Если вода в баке отсутствует, то контакты датчиков нижнего и верхнего уровней ДНУ и ДВУ открыты, реле Р обесточено, его контакты в цепи катушки «К» замкнуты. Магнитный пускатель К включается, а насос подает воду в водонапорную башню или бак. Об этом сигнализирует загорание красной Л К и погасание зеленой ЛЗ сигнальной лампы. По мере заполнения бака сначала запускаются контакты датчика нижнего уровня ДНУ. При дальнейшем заполнении бака замкнутся контакты датчика нижнего уровня ДНУ, что приведет к срабатыванию катушки реле Р, отключению магнитного пускателя К и остановке электродвигателя М насоса.

При заборе воды из бака вначале выходят из воды контакты ДВУ. Дальнейшее снижение уровня воды в баке вызывает разрыв в цепи контактов ДНУ, отключается катушка реле Р и замыкание его контактов в цепи обмотки магнитного пускателя К. электродвигатель М включается вновь.

НЭ - для подогрева электродов датчика уровня.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

2.1 Лабораторная работа № 1 (2 часа).

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

2.1.1 Цель работы:

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

2.1.2 Задачи работы:

1. Освоить методы расчета простых электрических цепей.
2. Научиться включать в цепь электроизмерительные приборы, выбирать и

2.1.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Компьютер «Пентиум-4»

2.1.4 Описание (ход) работы:

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

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

3. Провести измерение токов ветвей в режиме, когда действуют все источники ЭДС. Результаты измерений занести в таблицу 2.

4. Отключить действие источников эдс E_2 и E_3 , удалив их из цепи.

5. Провести измерение токов ветвей в режиме, когда действует источник E_1 . Результаты измерений занести в таблицу 2.

6. Отключить действие источников эдс E_1 и E_3 , удалив их из цепи.

7. Провести измерение токов ветвей в режиме, когда действует источник E_2 . Результаты измерений занести в таблицу 2.

8. Отключить действие источников эдс E_1 и E_2 , удалив их из цепи..

9. Провести измерение токов ветвей в режиме, когда действует источник E_3 . Результаты измерений занести в таблицу 2.

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

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

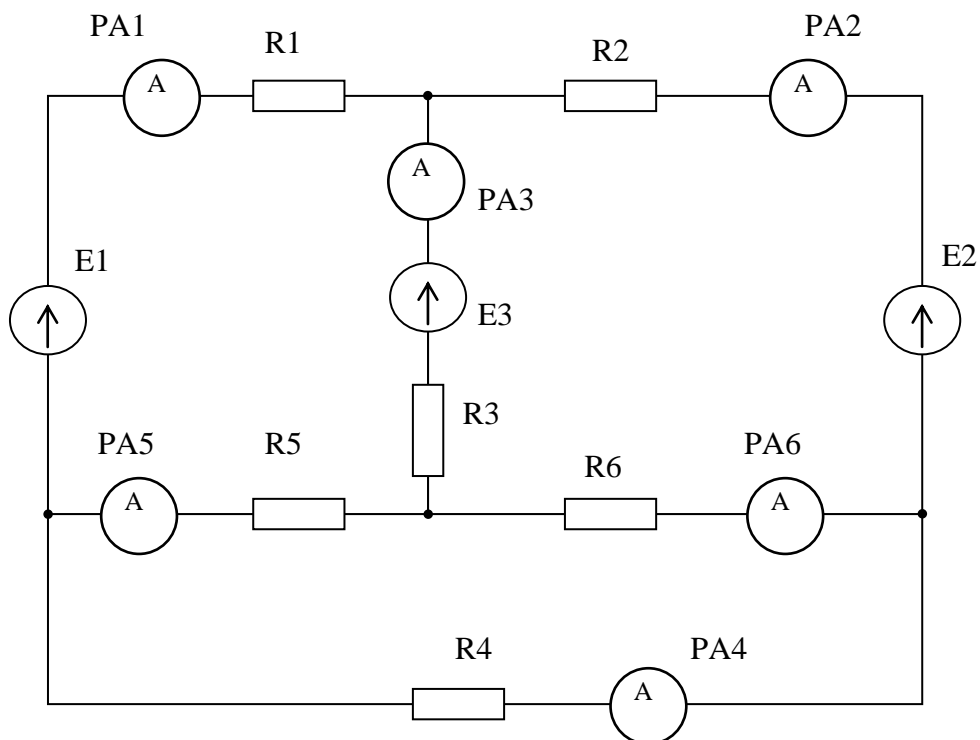
12. Используя метод контурных токов, теоретически рассчитать токи всех ветвей цепи. Результаты расчетов занести в таблицу 3 и сравнить с результатами эксперимента 1 по таблице 2.

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

Объект и средства исследования

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

Электрическая схема



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

2.2 Лабораторная работа № 2(2 часа).

Тема: «Исследование цепи переменного тока с последовательным включением элементов»

Цель работы:

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

2.2.2 Задачи работы:

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

2.2.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Компьютер «Пентиум-4»

2.2.4 Описание (ход) работы:

Собрать электрическую цепь, используя рис. 1. Установить параметры элементов цепи в соответствии с техническими характеристиками выписанными из таблицы 1 по варианту, указанному преподавателем. Амперметр и вольтметры перевести в режим АС.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Сравнить результаты расчетов с результатами измерений.

Используя результаты расчетов построить в масштабе векторные диаграммы цепей.

Объект и средства исследования

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

Электрические схемы

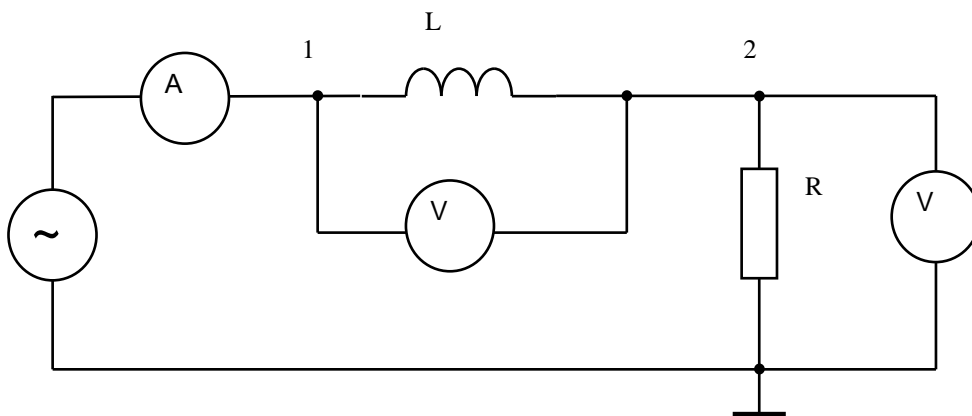


Рис 1

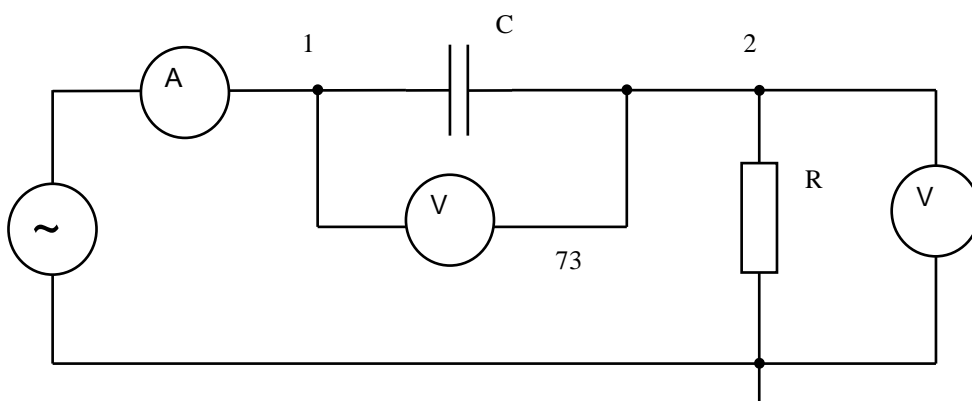


Таблица 2

Результаты экспериментов

с

Режим работы цепи	I, А	U _R , В	U _L , В	U _C , В	ΔT, С	φ, градус
Индуктивная нагрузка				–		
Емкостная нагрузка			–			

Таблица 3

Результаты расчетов

Режим работы цепи	ω, рад/С	X _L , Ом	X _C , Ом	φ, градус	Z, Ом	I, А	U _L , В	U _C , В	U _R , В
Индуктивная нагрузка			–					–	
Емкостная нагрузка		–					–		

№ Вар.	U, Вольт	f, Герц	R, Ом	L, мГн	C, мкФ	Y _A , В/дел	Y _B , В/дел	X _T , мС/дел
1	220	50	100	500	20	100	100	2
2	220	100	100	200	15	100	100	1
3	127	60	80	300	25	100	50	2
4	127	100	70	150	22	100	50	1
5	380	100	150	350	7	200	100	1
6	380	50	160	450	17	200	200	2
7	220	150	120	180	8	100	100	1
8	110	400	60	30	5	50	50	0,2

2.3 Лабораторная работа № 3 (2 часа).

Тема: Исследование трехфазной цепи синусоидального переменного тока при соединении потребителей звездой

2.3.1 Цель работы:

1. Изучение режимов работы трехфазной цепи переменного тока при соединении потребителей звездой.

2.3.2 Задачи работы:

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

2.3.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

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

2.3.4 Описание (ход) работы:

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

Таблица 1

Параметры элементов цепи

№ Вар.	U_{ϕ} , В	f , Гц	L_A , мГн	L_B , мГн	L_C , мГн	R_A , Ом	R_B , Ом	R_C , Ом	Y_A , В/дел	Y_B , В/дел	X_T , мС/дел
1	220	50	100	110	120	20	30	40	200	100	2
2	220	100	100	150	130	100	90	80	200	100	1
3	127	60	80	70	90	30	50	20	100	50	2
4	127	170	40	50	30	10	15	12	100	20	0,5
5	380	200	150	120	170	200	300	250	200	200	0,5
6	380	150	160	150	180	100	130	150	200	200	0,5
7	110	250	20	40	50	40	20	30	50	50	0,5
8	110	300	30	20	40	25	45	35	50	50	0,5

Таблица 2

Результаты экспериментов

Режим работы цепи	I_A , А	I_B , А	I_C , А	I_O , А	ΔT_A , С	ΔT_B , С	ΔT_C , С	P , Вт
Несимметричная нагрузка								
Симметричная нагрузка								

Таблица 3

Результаты расчетов

Режим работы цепи	I_A , А	I_B , А	I_C , А	I_O , А	P_A , Вт	P_B , Вт	P_C , Вт	P , Вт
Несимметричная нагрузка								
Симметричная нагрузка								

Рабочее задание

1. Собрать электрическую цепь, используя рис. 1. Установить параметры элементов цепи в соответствии с техническими характеристиками по варианту, указанному преподавателем. Фазовые углы источников установить равными: $E_A - 0^\circ$, $E_B - 240^\circ$, $E_C - 120^\circ$. Амперметры перевести в режим АС.
2. Провести измерение токов. Результаты измерений занести в таблицу 2.
3. Подключить осциллограф к нагрузке фазы А. При этом канал А подключить параллельно всей нагрузке фазы (к точке 1), а канал В – параллельно активному сопротивлению (к точке 4). Установить чувствительность канала А – Y_A , чувствительность канала В – Y_B и частоту развертки X_T в соответствии с таблицей 1. Включить режим ZOOM на осциллографе.
4. При помощи визирных линий на экране осциллографа определить временной сдвиг по фазе между напряжением на резисторе и напряжением на всей фазе (красную визирную линию совместить с точкой пересечения кривой напряжения на резисторе с осью абсцисс, а синюю линию – с ближайшей точкой пересечения кривой напряжения на всей фазе с осью абсцисс). Результат измерения занести в таблицу 2.
5. Аналогично подключить осциллограф к нагрузке фазы В. Канал А подключить к точке 2, а канал В – к точке 5. При помощи визирных линий на экране осциллографа определить временной сдвиг по фазе между напряжением на резисторе и напряжением на всей фазе. Результат измерения занести в таблицу 2.
6. Выполнить измерение сдвига по фазе между напряжением на всей нагрузке и напряжением на резисторе в фазе С (канал А подключить к точке 3, а канал В – к точке 6). Результат измерения занести в таблицу 2.
7. Установить симметричную нагрузку. Для этого индуктивности во всех фазах установить равными индуктивности в фазе А, а активное сопротивление всех фаз – равным активному сопротивлению в фазе В.
8. Провести измерение токов в цепи и временных сдвигов по фазе между напряжением на резисторе и напряжением на всей фазе. Результаты измерений занести в таблицу 2.
9. Рассчитать углы φ сдвига вектора тока по отношению к вектору напряжения для каждой фазы, используя временной сдвиг по фазе между напряжением на резисторе и напряжением на всей фазе ($\varphi = 360f\Delta T$).
10. Используя результаты измерений, определить активную мощность каждой фазы и всей цепи для несимметричной и симметричной нагрузки. Результат расчета занести в таблицу 2.
11. Используя параметры элементов электрической цепи, рассчитать все токи, а также активную мощность каждой фазы и всей цепи при несимметричной и симметричной нагрузке. Результат занести в таблицу 3.
12. Сравнить результаты расчетов с результатами измерений.
13. Построить в масштабе векторную диаграмму цепи для несимметричной нагрузки.

2.4 Лабораторная работа № 4 (2 часа).

Тема: «Включение трехфазного асинхронного электродвигателя в трехфазную систему»

2.4.1 Цель работы:

1. Изучить конструкцию трехфазного асинхронного электродвигателя с коротко замкнутым ротором.
2. Исследовать работу электродвигателя в нормальном и аварийных режимах.

2.4.2 Задачи работы:

1. Научиться маркировать выводы трехфазного асинхронного электродвигателя

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

номинальное напряжение	220/380 В,
ток холостого хода	6,4/2,2 А,
кратность пускового тока (по отношению к току х.х.)	7,5.

2.4.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

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

2.4.4 Описание (ход) работы:

1. В соответствии с техническими характеристиками электродвигателя и трехфазной сети выбрать схему включения двигателя в сеть.

2. Самостоятельно начертить схему в отчете. В схеме предусмотреть амперметр для измерения линейного тока двигателя. Амперметр включить с измерительным трансформатором тока.

3. Собрать электрическую цепь согласно схеме.

4. В соответствии с техническими характеристиками электродвигателя рассчитать его пусковой ток и установить пределы измерений на приборах.

5. Включить источник тока и измерить пусковой ток электродвигателя (максимальное отклонение стрелки амперметра в момент пуска). После запуска электродвигателя, не выключая источник, установить на трансформаторе тока предел, соответствующий току холостого хода для собранной схемы и записать показания амперметра.

6. Изменить схему включения обмоток электродвигателя, рассчитать пусковой ток для данной схемы, установить пределы измерения приборов и измерить пусковой ток двигателя. После раскрутки электродвигателя установить на трансформаторе тока предел, соответствующий току холостого хода для собранной схемы и записать показания амперметра.

7. Отсоединить один линейный провод от сети и на несколько секунд включить сеть (предел измерения на трансформаторе тока должен соответствовать пусковому току для собранной схемы). Измерить пусковой ток двигателя.

8. Подключить оборванный линейный провод и включить сеть (предел измерения на трансформаторе тока должен соответствовать пусковому току для собранной схемы). После раскрутки электродвигателя установить на трансформаторе тока предел, соответствующий току холостого хода для данной схемы и соблюдая меры

предосторожности, при работающем двигателе отключить линейный провод. Измерить ток холостого хода.

9. Умышленно перепутать начало и конец одной обмотки электродвигателя, включить сеть и произвести измерение пускового тока и тока холостого хода электродвигателя. При этом необходимо учитывать, что работа с таким включением обмоток является аварийным режимом для двигателя, и ток холостого хода будет в несколько раз выше нормы. Поэтому включение сети должно быть кратковременным и при измерении тока холостого хода предел измерения на измерительном трансформаторе тока уменьшать не следует.

10. Разобрать схему, к клеммам выводов обмоток электродвигателя подключить переходную колодку и произвести маркировку выводов на ней по методике, изложенной на лекции.

11. Соединить обмотки электродвигателя на переходной колодке по схеме «звезда», подключить двигатель к сети и произвести его испытание.

12. Оформить отчет об исследованиях. Результаты каждого опыта должны быть сведены в таблицу измеренных величин (для каждого опыта отдельная таблица).