

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Публикуется с разрешения правообладателя —
Литературного агентства «Научная книга»

И.С. Козлова

Данное учебное пособие содержит материал по курсу «Электротехники» и предназначен для учащихся педагогических училищ или студентов ВУЗов. Основные концепции предмета изложены в доступной форме с привлечением примеров.

ЛЕКЦИЯ № 1. Постоянный ток

1. Электрическая цепь

Электротехника — это наука, изучающая электрические явления для нужд промышленного производства.

Важнейшим электрическим явлением, которое рассматривается в электротехнике, является **электрический ток** — упорядоченное движение заряженных частиц. При рассмотрении тока в металлах он представляется в виде упорядоченного движения электронов (валентных электронов). При этом кристаллическая решетка металла является пространственно-периодичной.

Электрический ток в металлах создается дрейфом электронов, накладывающимся на их беспорядочное тепловое движение, имеющее относительно большую скорость.

Для существования электрического тока необходимо наличие электрической цепи.

Электрическая цепь — это замкнутый путь для тока из проводников. Необходимым условием существования тока в электрической цепи является наличие в ней источника электрической энергии. Источник призван преобразовывать в электрическую энергию какую-либо другую форму энергии.

Кроме источника, в состав электрической цепи входят приемник электроэнергии и соединительные провода, для замыкания и размыкания цепи тока необходим выключатель (рубильник).

В электрических цепях электрический ток может оказывать следующие виды действий: тепловое действие при прохождении через металлические проводники; химическое действие, проявляющееся при прохождении через электролиты и выражающееся в явлении электролиза; электродинамическое действие, проявляющееся во взаимодействии проводников с токами; электромагнитное действие, проявляющееся в действии на магнитную стрелку.

На основании наблюдения направления переноса металла током через электролит в электролитических ваннах считается, что в электрической цепи ток проходит в направлении этого переноса, т. е. в направлении от положительного полюса источника к отрицательному. Установив, что ток в металлах является движением электронов,

условно приняли за **направление электрического тока** направление, противоположное направлению дрейфа электронов.

Количественной характеристикой электрического тока является **сила тока** — количество электричества q , которое протекает через поперечное сечение проводника в единицу времени:

$$I = q / t.$$

В случае, если заряды движутся в проводнике неравномерно, изменяющуюся силу тока можно найти по формуле:

$$i = dq / dt.$$

Количество электричества в системе СИ измеряется в кулонах (Кл), а сила тока измеряется в амперах (А).

Ампер является силой неизменяющегося тока, который, проходя по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, вызвал бы между этими проводниками силу, равную 1 Н/м.

Кулон определяется как количество электричества, протекающее через поперечное сечение проводника в 1 с при неизменяющейся силе тока в 1 А.

Для характеристики движения электричества в данной точке поверхности применяется плотность тока δ , которая определяется по формуле:

$$\delta = I / S,$$

где S — площадь поперечного сечения проводника.

2. Законы Кирхгофа

Для расчета неразветвленных электрических цепей применяются

закон Ома для участка цепи $I = \frac{U}{R}$ и закон Ома для полной

цепи $I = \frac{E}{R + r}$. В этих формулах U — напряжение на участке це-

пи; R — сопротивление в цепи; E — электродвижущая сила источника; r — внутреннее сопротивление источника.

Для расчета разветвленных цепей применяют два закона Кирхгофа, называемые также правилами Кирхгофа. Оба эти законы установлены на основании многочисленных опытов и являются следствием закона сохранения энергии.

Первый закон Кирхгофа: алгебраическая сумма токов в любом узле электрической цепи равна нулю:

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

Другими словами, сумма токов, входящих в каждый из узлов, равна сумме токов, выходящих из него (рис. 1).

Данный закон является следствием того, что электрическая цепь замкнута, т. е. в узлах цепи заряды не могут накапливаться в течение длительного времени или возникать в них, так как это могло бы привести к изменению потенциалов узлов и изменению токов в цепи.

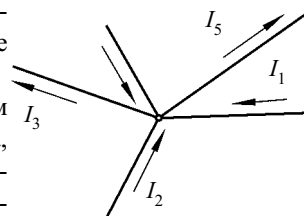


Рис. 1. Токи в узле

По первому закону при последовательном соединении проводников сила тока через различные сечения цепи должна быть одинаковой.

С помощью первого закона Кирхгофа и закона Ома можно рассчитать общую силу тока параллельно соединенных приемников, общую проводимость и общее сопротивление такой разветвленной цепи тока.

Параллельным называется такое соединение двух элементов цепи, при котором они находятся под одним и тем же напряжением. При параллельном соединении проводников их эквивалентное сопротивление находится по формуле:

$$R_y = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Общая сила тока при параллельном соединении находится по формуле:

$$I = \sum_{k=1}^n I_k = U \times \sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k}.$$

По **второму закону Кирхгофа** в любом замкнутом электрическом контуре алгебраическая сумма электродвижущая сила (э. д. с.)

равна алгебраической сумме напряжений на сопротивлениях, входящих в этот контур.

Э. д. с. и токи при этом считаются положительными, если их направления совпадают с произвольно выбранным направлением обхода контура (рис. 2).

По второму закону Кирхгофа составляются уравнения вида:

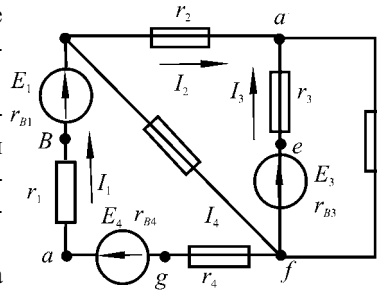


Рис. 2. Разветвленная цепь

$$\sum_{k=1}^n E_k = \sum_{k=1}^n I_k R_k.$$

На основании второго закона Кирхгофа составляется потенциальная диаграмма (рис. 2) с учетом того, что алгебраическая сумма изменений потенциала при обходе замкнутого круга равна нулю. В диаграмме по оси абсцисс откладываются сопротивления между отдельными точками цепи, а по оси ординат — потенциалы этих точек.

3. Работа и мощность электрического тока

Работу источника электроэнергии для перемещения заряда q вдоль какого-то участка можно найти как произведение этого заряда на напряжение U между концами участка, т. е. $A = Uq$. Если заряды переносятся равномерно со временем, количество электричества, перенесенное зарядом, определится соотношением $q = It$, следовательно, работа определяется выражением: $A = UIt$.

Таким образом, если напряжение не изменяется, работа равна произведению напряжения на силу тока и на время. В качестве единицы работы применяют джоуль (Дж) = (В × А × с).

Если напряжение с течением времени изменяется, то работу можно вычислить по формуле:

$$A = \int_{t_1}^{t_2} ui \, dt.$$

где u — мгновенное значение напряжения;

i — мгновенное значение силы тока;

t_1 — начальное время;

t_2 — конечное время.

Мощность P определяет быстроту выполнения работы электрическим током:

$$P = A / t.$$

Следовательно, $P = UI$ при условии, что сила тока и напряжение не изменяются со временем. Если данные параметры изменяются, мгновенная мощность электрического тока будет определяться соотношением:

$$p = \frac{dA}{dt} = ui.$$

Единицей мощности в СИ является ватт (Вт); $1 \text{ Вт} = \text{Дж/с} = \text{В}\cdot\text{А}$.

Для измерения мощности на практике применяется прибор прямого отсчета — ваттметр. Он имеет две измерительные цепи (и две обмотки) — цепь тока, включаемую последовательно с объектом измерения (как амперметр), и цепь напряжения, включаемую параллельно этому объекту (как вольтметр). При постоянном токе мощность часто определяется на основании показаний амперметра и вольтметра, но при переменном токе ваттметр необходим.

Мощность в электрических цепях может быть найдена и при помощи других формул:

$$P = UI = I^2 R = U^2 G.$$

ЛЕКЦИЯ № 2. Расчет электрических цепей постоянного тока

1. Эквивалентные схемы источника электрической энергии

Содержащийся в цепи источник электрической энергии развивает э. д. с. E и характеризуется внутренним сопротивлением r . Эти параметры накладывают некоторые изменения в зависимости от силы тока I , которую отдает источник во внешнюю цепь. Однако часто можно не учитывать данные изменения, и это дает возможность считать E и r постоянными, не зависящими от силы тока. Таким образом, предоставляется возможность при расчете схем цепей изображать реальный источник электроэнергии эквивалентной схемой (рис. 3а). На данной схеме E — источник с постоянной э. д. с., r — неизменяющееся внутреннее сопротивление источника.

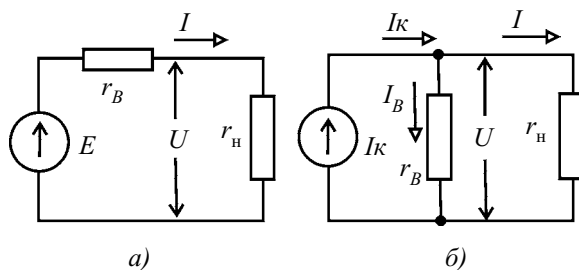


Рис. 3. Эквивалентные схемы источника: E — источник с постоянной э. д. с.; r — неизменяющееся внутреннее сопротивление источника

Напряжение, которое выдает источник, определяется соотношением:

$$U = E - Ar.$$

Подобные источники принято называть источником э. д. с. При коротком замыкании сила тока источника э. д. с. определяется соотношением: $I_{\kappa} = E / r$.

В случае, когда внутреннее сопротивление мало, $U = E = \text{const}$. Подобный источник, в котором напряжение не зависит от значения силы тока, называется источником напряжения. Для идеального источника напряжения $I_{\kappa} = \infty$.

В некоторых электрических цепях (в цепях с электронными лампами или полупроводниковыми приборами) значение внутреннего сопротивления r источника энергии значительно превышает сопротивление внешней цепи $r \gg R$. Такие цепи характеризуются тем, что сила тока, отдаваемая источником, равна силе тока короткого замыкания источника. Такой источник принято называть источником тока, т. е. считать, что сила тока, которую отдает такой источник, не зависит от сопротивления цепи, на которую он замкнут, а равна силе тока короткого замыкания. В таких цепях изменение внешнего сопротивления вызывает только изменение напряжения U . При расчете эквивалентную схему источника э. д. с. можно заменить эквивалентной схемой источника тока, перейдя от уравнения напряжений к уравнению токов.

Разделим уравнение для э. д. с. $E = I_{\kappa} + U$ на внутреннее сопротивление:

$$\frac{E}{r} = I_{\kappa} = \frac{U}{r} + I = I_B + I$$

Итак, сила тока источника складывается из суммы силы тока внутри источника и во внешней цепи. Эквивалентная схема источника тока показана на рисунке 3б.

Уравнение для токов можно изменить, заменив сопротивление проводимостью: $g_B = 1 / r$, $I = U / R = Ug$.

$$I_{\kappa} = U (g_B + g).$$

Таким образом, чем больше проводимость внешней цепи, тем меньше сила тока I_B , и если $g > g_B$, то

$$I_{\kappa} \approx Ug = I.$$

Такой источник является идеальным источником тока (источником с заданным током). При подключении такого источника напряжение прямо пропорционально сопротивлению:

$$U = \frac{I_k}{g} = I_k R.$$

Для внешней цепи источник э. д. с. можно заменить эквивалентным источником тока. Так как напряжение на обоих источниках одинаково, можно получить условие эквивалентности.

Напряжение на источнике э. д. с. определяется соотношением:

$$U = E - I r_1 = E - E \frac{r_1}{r_1 + R} = E \frac{R}{r_1 + R};$$

для источника тока —
$$U = \frac{I_k}{g_B + g} = I_k \frac{r_2 R}{r_2 + R},$$

где r_1 — внутреннее сопротивление источника э. д. с.;

g_B — его внутренняя проводимость.

Эквивалентность соблюдается при условии, что выполняются соотношения: $I_k = E / r_1$ и $r_1 = r_2$.

Но тогда не выполняются внутренние энергетические условия данных источников. Это связано с тем, что потери мощности внутри

источника э. д. с. определяются формулой: $I^2 r = \left(\frac{E}{r + R} \right)^2 r,$

а для источника тока — $I_k^2 = \frac{U^2}{r}.$

2. Применение законов Кирхгофа для расчета электрических цепей

Любой из методов расчета электрических цепей основывается на **законах Кирхгофа**. Это связано с тем, что любую цепь можно полностью определить этими законами.

Рассчитать электрическую цепь — значит, найти значения токов, напряжений и мощностей всех или некоторых определенных

участков цепи. При этом задается схема цепи, по которой определяется число ветвей и узлов.

Для составления уравнений по двум законам Кирхгофа необходимо предположить направления токов во всех ее ветвях.

Для составления уравнений по первому закону Кирхгофа нужно определить количество узлов в цепи n , при этом уравнения по первому закону должны быть составлены для $(n - 1)$ узла.

Для составления уравнений по второму закону Кирхгофа нужно выбрать контуры обхода, чтобы в каждый контур содержал хотя бы одну из ветвей, не вошедших в другие контуры. В этом случае составленные уравнения будут являться независимыми.

Уравнения, составленные по первому и по второму законам Кирхгофа, объединяются в одну систему и решаются относительно неизвестных токов.

Для схемы, изображенной на рисунке 6, по первому закону составляются уравнения:

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

$$I_3 - I_1 - I_2 = 0.$$

По второму закону Кирхгофа составляются следующие уравнения для трех контуров схемы:

$$E_1 = I_1 R_1 + I_3 R_3;$$

$$E_2 = I_2 R_2 + I_3 R_3;$$

$$E_1 - E_2 = I_1 R_1 + I_2 R_2.$$

После составления системы уравнений и нахождения значения токов в каждой из ветвей в качестве проверки применяется баланс мощностей: алгебраическая сумма мощностей, отдаваемых источниками, должна быть равна сумме мощностей, поглощаемых всеми приемниками:

$$\sum_{k=1}^n E_k I_k = \sum_{k=1}^n I_k^2 R_k.$$

Если в результате расчетов некоторые из токов имеют отрицательное значение, это означает, что выбранное изначально направление неверно.

Расчет электрических цепей по законам Кирхгофа математически сложен, поэтому по возможности нужно применять более простые способы решения.

3. Метод преобразования схемы

Часто при решении сложных схем, состоящих из линейных сопротивлений, можно упростить данную схему, заменив часть сопротивлений эквивалентным сопротивлением, в котором сопротивления соединены иначе, чем в исходной схеме.

Примерами таких преобразований может служить замена нескольких параллельно или последовательно соединенных сопротивлений одним. В этом случае общее сопротивление определится по известным формулам. Так, любую n -лучевую звезду сопротивлений можно заменить n -сторонним многоугольником (в обратном направлении преобразование возможно в некоторых случаях).

Рассмотрим преобразование соединений сопротивлений из схемы трехлучевой звезды в треугольник, и наоборот (рис. 4).

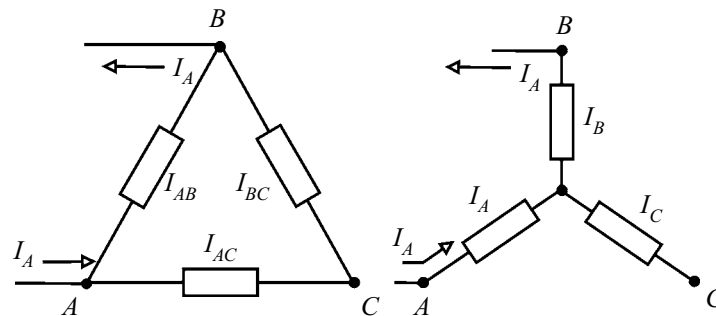


Рис. 4. Эквивалентные схемы

Условия эквивалентности данных видов соединений применим в виде сопоставления межузловых сопротивлений, а также проводимостей этих схем.

Рассмотрим какой-нибудь источник напряжения и присоединенные к нему узлы A и B треугольника. Затем в эту схему подключим одноименные узлы звезды. Когда соединения сопротивлений эквивалентны, то при подключении их к одному источнику сила тока, которой нагружается источник, должна быть одинако-

вой, а это, в свою очередь, возможно при равных проводимостях между узлами схем.

Это равенство сопротивлений должно иметь место также при включении к источнику энергии узлов B и C , а затем и узлов C и A .

Для нахождения проводимости между узлами A и B треугольника необходимо сложить проводимость стороны AB , равную

$\frac{1}{R_{AB}}$, с проводимостью, которая образуется сторонами BC и CA ,

равной $\frac{1}{R_{BC} + R_{CA}}$:

$$\frac{1}{R_{AB}} + \frac{1}{R_{BC} + R_{CA}} = \frac{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}}{R_{AB}R_{BC} + R_{CA}R_{AB}}.$$

В случае соединения звездой сопротивление между узлами A и B находится как сумма сопротивлений двух соответствующих лучей звезды $RA + RB$.

По условию эквивалентности двух видов соединения получим:

$$R_B + R_B = \frac{R_{AB}R_{BC} + R_{CA}R_{AB}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}} = \frac{R_{AB}R_{BC} + R_{CA}R_{AB}}{\sum R_{\Delta}},$$

где $\sum R_{\Delta}$ — сумма сопротивлений всех трех сторон треугольника.

Построение схем треугольника и звезды относительно узлов симметрична, поэтому составим уравнения равенства сопротивлений для узлов путем циклической перестановки индексов:

$$R_B + R_C = \frac{R_{BC}R_{CA} + R_{AB}R_{BC}}{\sum R_{\Delta}};$$

$$R_C + R_A = \frac{R_{AC}R_{AB} + R_{BC}R_{CA}}{\sum R_{\Delta}}.$$

Из трех предыдущих уравнений получаем:

$$R_A = \frac{R_{AB}R_{CA}}{\sum R_{\Delta}};$$
$$R_B = \frac{R_{BC}R_{AB}}{\sum R_{\Delta}};$$
$$R_C = \frac{R_{CA}R_{BC}}{\sum R_{\Delta}}.$$

В случае, если сопротивления сторон треугольников одинаковы, для звезды получаем соотношение:

$$R = \frac{R_{\Delta}}{3}.$$

Возможно и обратное преобразование. С помощью такого способа возможно преобразование мостиковых схем.

4. Метод узлового напряжения

В случае, когда в схеме присутствуют два узла или исходную схему можно преобразовать в схему с двумя узлами, наименее сложным является расчет с применением метода узлового напряжения.

На рисунке 5 приведена схема, состоящая из n ветвей, сходящихся в двух узлах.

Для любой из ветвей разность потенциалов между узлами a и b может быть представлена соотношением:

$$\varphi_b = \varphi_a + I_k R_k - E_k.$$

Преобразуем ее:

$$\varphi_b - \varphi_a = U_{ab} = E_k - I_k R_k,$$

где U_{ab} — узловое напряжение для данной схемы.

В этом случае ток в каждой из ветвей будет находиться по формуле:

$$I_k = (E_k - U_{ab})g_k,$$

где $g_k = \frac{1}{R_k}$ — проводимость данной ветви.

Направление токов в общем случае может быть произвольным (как и направление э. д. с.). Это нужно учитывать при записи ответа.

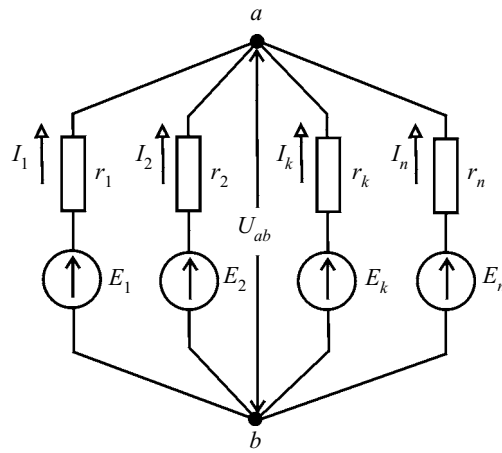


Рис. 5. Схема цепи с двумя узлами

Применив **первый закон Кирхгофа**, для данной схемы получаем:

$$I_1 + I_2 + \dots + I_k + \dots + I_n = \sum_{k=1}^n I_k = 0 = \sum_{k=1}^n (E_k - U_{ab})g_k.$$

Следовательно, узловое напряжение можно выразить формулой:

$$U_{ab} = \frac{\sum_{k=1}^n E_k g_k}{\sum_{k=1}^n g_k}.$$

5. Метод контурных токов

Данный метод расчета электрических цепей является относительно сложным и может применяться при расчетах линейных цепей постоянного или переменного токов.

При расчете схем по методу контурных токов нужно разделить общую схему на отдельные контуры — ячейки. После этого для каждого из контуров выбирается направление контурного тока, т. е. тока, который замыкается только в данном контуре. Токи в ветвях, являющихся общими для двух или более контуров, определяются на основании **первого закона Кирхгофа** как алгебраическая сумма соответствующих контурных токов.

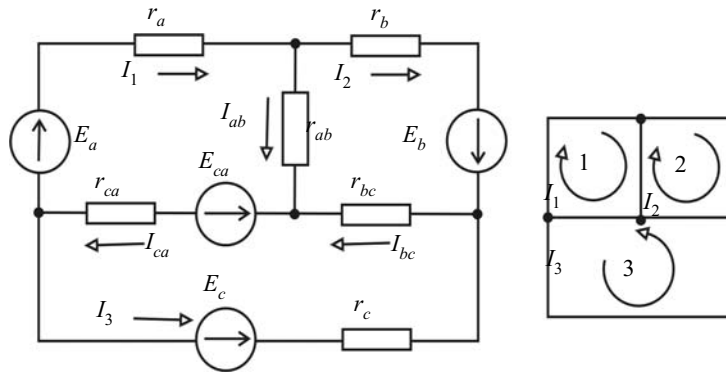


Рис. 6. Сложная схема и ее разделение

На данной схеме (рис. 6) $I_{ab} = I_1 - I_2$, $I_{bc} = I_2 + I_3$, $I_{ca} = I_3 + I_1$. При применении данных уравнений система уравнений по законам Кирхгофа существенно упрощается. При этом направление обхода контуров берется совпадающим с направлением контурных токов.

Для контуров схемы на рисунке составляются следующие уравнения:

$$E_a - E_{ca} = I_1 R_a + (I_1 - I_2) R_{ab} + (I_1 + I_3) R_{ca};$$

$$E_b = I_2 R_b + (I_2 - I_1) R_{ab} + (I_2 + I_3) R_{bc};$$

$$E_c - E_{ca} = I_3 R_c + (I_3 + I_1) R_{ca} + (I_3 + I_2) R_{bc}.$$

Если ввести понятие контурной э. д. с. $E_1 = E_a - E_{ca}$, $E_2 = E_b$, $E_3 = E_c + E_{ca}$ и контурного сопротивления $R_{11} = R_a + R_{ab} + R_{ca}$, $R_{22} = R_b + R_{ab} + R_{dc}$, $R_{33} = R_c + R_{cb} + R_{ca}$, то уравнения для данного контура примут вид:

$$E_1 = I_1 R_{11} + (-I_2) R_{ab} + I_3 R_{ca};$$

$$E_2 = -I_1 R_{ab} + I_2 R_{22} + I_3 R_{bc};$$

$$E_3 = I_1 R_{ca} + I_2 R_{bc} + I_3 R_{33}.$$

Для единообразия вычисления будем считать отрицательными сопротивления тех смежных ветвей двух контуров, ток в которых противоположен по направлению данному контуру. Для данной схемы $R_{12} = R_{21} = -R_{ab}$, $R_{23} = R_{32} = R_{bc}$, $R_{13} = R_{31} = R_{ca}$. После учета этих условий получаем систему:

$$E_1 = I_1 R_{11} + I_2 R_{12} + I_3 R_{13};$$

$$E_2 = I_1 R_{21} + I_2 R_{22} + I_3 R_{23};$$

$$E_3 = I_1 R_{31} + I_2 R_{32} + I_3 R_{33}.$$

При решении данной системы получаем значения контурных токов, из которых находятся значения токов в ветвях.

Можно сделать вывод, что при использовании методом контурных токов не нужно составлять уравнения по законам Кирхгофа.

6. Метод эквивалентного генератора

Данный метод применяют в случаях, когда необходимо расчитать ток в одной из ветвей схемы.

Если цепь содержит источники э. д. с. и некоторые сопротивления, она служит источником напряжения для определенной ветви ab . Данная цепь становится по отношению к ветви ab активным линейным двухполюсником, который независимо от строения может быть заменен эквивалентным источником э. д. с., с некоторым внутренним сопротивлением. Таким образом, при расчете схемы необходимо найти эти параметры.

Мысленно введем в ветвь ab источник, который обладает такой э. д. с, чтобы ток в ветви ab был равен нулю. Это означает, что

э. д. с. введенного источника и исходного равны по величине и противоположны по направлению (рис. 7б).

После этого введем в данную ветвь вторую э. д. с. $E_2 = U_{ab_0}$, где U_{ab_0} — максимальное значение напряжения на концах ветви ab . Она полностью компенсирует действие E_1 и восстанавливает ток в данной ветви.

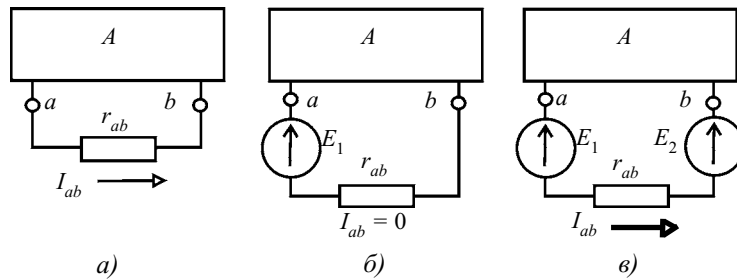


Рис. 7. Двухполюсник

Ток в ветви создан только независимым действием э. д. с. E_2 , при этом ток имеет значение:

$$I_{ab} = \frac{E_2}{R_{ab} + R_k}.$$

В данной формуле R_k — внутреннее сопротивление двухполюсника.

Произведя замену $E_2 = U_{ab_0}$, можно получить формулу, которая определяет ток через напряжение холостого хода и сопротивление двухполюсника:

$$I_{ab} = \frac{U_{ab_0}}{R_{ab} + R_k}.$$

Для того чтобы определить U_{ab_0} , необходимо измерить напряжение между зажимами a, b в случае, когда ветвь ab разомкнута. Для того чтобы определить R_k , нужно замкнуть зажимы a, b коротко (на амперметр с относительно малым собственным сопро-

тивлением) и измерить ток I_{abk} на основании, после чего вычис-

лить по формуле $R_k = \frac{U_{ab0}}{I_{abk}}$.

Расчет часто бывает сложным. Применение этого метода существенно упрощает вычисления, особенно в тех случаях, когда нужно силу тока определить при нескольких значениях сопротивления. Иногда целесообразно при расчетах (в особенности в схемах с электронными и полупроводниковыми элементами) заменить активный двухполюсник не эквивалентным генератором э. д. с., а эквивалентным генератором тока.

ЛЕКЦИЯ № 3. Электрическое поле и емкость электротехнических устройств

1. Электрическое поле. Диэлектрическая проницаемость и электрическая постоянная

Электрическим полем называется особая форма материи, образованная присутствием в пространстве неподвижного электрического заряда.

Силовой характеристикой электрического поля является его напряженность E .

Другой характеристикой является **смещение** D , которое характеризуется как состояние, обусловленное смещением в молекулах диэлектрика и смещением в вакууме.

Потоком смещения называется величина $N_D = \int_S D \, dS$.

Абсолютной диэлектрической проницаемостью среды называется отношение $\epsilon_a = \frac{D}{E}$.

Электрическое поле внутри веществ может изменить свою величину. Отношение абсолютной диэлектрической проницаемости вещества ϵ_a к абсолютной диэлектрической проницаемости вакуума ϵ_0 называется **диэлектрической проницаемостью**:

$$\epsilon = \frac{\epsilon_a}{\epsilon_0},$$

где ϵ — безразмерная величина; ϵ_a и ϵ_0 имеют единицы измерения (Ф/м);

ϵ_0 не изменяется и поэтому считается электрической постоянной;

$$\epsilon_0 = 8,855 \times 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}.$$

Большинство диэлектриков имеет диэлектрическую проницаемость в пределах 1—10 и практически не зависит от электрических условий и температуры.

Среди всех диэлектриков существует особая группа, для которых диэлектрическая проницаемость непостоянна, — сегнетоэлектрики.

2. Емкость и конденсатор

Способность веществ накапливать и сохранять электрический заряд называется электрической емкостью.

На практике для накопления заряда применяется система из двух проводников, которые разделены диэлектриком. Это устройство накапливает электрический заряд под действием напряжения. Так как заряд данного устройства основан на наличии электрического поля в диэлектрике, величина данного заряда зависит от материала диэлектрика, в котором образуется поле. От материала проводников свойства данного устройства не зависят. Чем больше смещение в диэлектрике, тем больше величина удерживаемого заряда.

Электрическая мощность находится по формуле:

$$C = q / U.$$

Единицей измерения электрической емкости в СИ является фарад (Ф).

В технике для накопления электрических зарядов применяется специальный аппарат — конденсатор. Существует множество разновидностей конденсаторов, самым простым из которых является плоский конденсатор. В данном конденсаторе в качестве обкладок применяются две параллельные пластины. Во всех точках этого поля смещение одинаково, а поток смещения можно считать практически сосредоточенным в промежутке между пластинами.

Электрическая емкость плоского конденсатора определяется по формуле:

$$\tilde{N} = \frac{\varepsilon_a S}{d} = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{S}{d}.$$

Для того чтобы увеличить общую емкость, необходимо конденсаторы соединить между собой параллельно. В этом случае все конденсаторы находятся под одним напряжением U , а общий

заряд q находится по формуле: $\sum_{k=1}^n q_k$, т. е. общая емкость

находится по формуле: $C = \sum_{k=1}^n \frac{q_k}{U} = \sum_{k=1}^n C_k$.

Таким образом, при параллельном соединении конденсаторов общая емкость батареи равна сумме емкостей.

При последовательном соединении конденсаторов напряжение установки равно сумме напряжений на каждом из конденсаторов. Этот вид соединения применяется в случае, когда изоляция конденсаторов не выдерживает рабочего напряжения:

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

При последовательном соединении заряды конденсаторов одинаковы, т. е. справедливо соотношение: $q = U_1 C_1 = U_2 C_2 = \dots = U_n C_n$, откуда

$$U_1 = \frac{q}{C_1}, \quad U_2 = \frac{q}{C_2}, \quad \dots, \quad U_n = \frac{q}{C_n}.$$

Отсюда общая электрическая емкость при последовательном соединении определяется по формуле:

$$C = \frac{q}{U} = \frac{q}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}}.$$

Если батарея состоит из последовательного соединения одинаковых конденсаторов, для нее будет справедлива формула:

$$C = \frac{C_n}{n}.$$

В качестве материалов диэлектрика в конденсаторах применяется бумага с пропиткой (в электроэнергетических установках), слюда, керамика и другие материалы.

3. Электрические свойства изоляционных материалов

Изолирующие устройства изготавливаются из диэлектриков, которые обладают достаточным запасом электрической прочности, чтобы выдерживать длительно действие рабочего напряжения установки.

Под электрической прочностью ϵ_n понимается наименьшая напряженность электрического поля, при которой происходит пробой диэлектрика. Электрическая прочность — непостоянная величина, зависящая от многих факторов (например, длительности воздействия электрического поля).

Твердые диэлектрики могут ощущать на себе две основные формы пробоя: тепловую и электрическую.

Тепловой пробой — термическое разрушение изоляции (обугливание, растрескивание), вызванное действием тепла, выделяемого током утечки.

Электрическим пробоем называется разрушение диэлектрика, обусловленное прямым действием сильного электрического поля на ионы, входящие в состав диэлектрика. Ионы приобретают большие скорости, и их удары ионизируют молекулы диэлектрика, превращая их в ионы. В итоге возникает лавинный поток ионов, который разрушает изоляцию. Электрический пробой происходит при более высоких напряжениях, чем тепловой, но воздействие поля на диэлектрик для электрического пробоя может быть кратковременным.

В случае, если поле в изолирующем устройстве неравномерно, то под действием внешнего напряжения в одной части диэлектрика напряженность поля может быть больше, чем прочность диэлектрика, а остальная часть диэлектрика содержит поле меньше пробойного. Тогда возможно только частичное (ограниченное) разрушение диэлектрика, но вероятен менее благоприятный вариант: частичный пробой диэлектрика вызовет повышение напряженности в остальной его части до значения, превышающего электрическую прочность. Это вызовет пробой диэлектрика в целом.

Данная ситуация возможна в конденсаторе со слоистой изоляцией.

Условия слоистой изоляции создаются в электрических машинах и аппаратах, когда вследствие дефектов производства в массе твердого диэлектрика оказываются пузырьки воздуха.

Еще одной важной характеристикой диэлектриков является удельное сопротивление.

Удельное объемное сопротивление ρ_v — величина, количественно определяющая способность материала препятствовать току по всему объему. Единицей измерения удельного объемного

сопротивления является $\frac{\text{Ом} \times \text{мм}^2}{\text{м}}$.

Удельным поверхностным сопротивлением ρ_s определяется способность диэлектрика препятствовать току утечки по всей поверхности. Удельное поверхностное сопротивление измеряется в Ом \times см, так как поверхностное сопротивление считается пропорциональным длине l и обратно пропорциональным ширине слоя.

Вид и характеристики изолирующих материалов зависят от устройства. Фарфор применяется для изоляторов, устанавливаемых на воздушных линиях, обладает большой механической прочностью. К изоляции между пластинами коллектора электрических машин предъявляются требования нагревостойкости, негорючести, упругости и механической прочности. Этим требованиям отвечает слюда.

ЛЕКЦИЯ № 4. Электромагнитные расчеты

1. Основные характеристики магнитного поля тока

Магнитное поле — особая форма материи, образующаяся вокруг проводника, по которому протекает ток. Электрический ток обладает намагничивающей силой, и в магнитном поле существуют магнитные силы.

С помощью намагничивающей силы создается определенная, пропорциональная ей **напряженность** магнитного поля H , которая определяется изменением магнитного состояния среды. Состояние среды в магнитном поле характеризуется вектором магнитной индукции B .

Напряженность и магнитная индукция связаны соотношением: $B = \mu_a H$, где μ_a — абсолютная магнитная проницаемость. Магнитная проницаемость вакуума является постоянной величи-

ной и называется **магнитной постоянной** μ_0 . Отношение $\mu = \frac{\mu_a}{\mu_0}$ называется относительной магнитной проницаемостью.

По величине магнитной проницаемости все вещества разделяются на три группы: парамагнитные (парамагнетики), у которых $\mu > 1$; диамагнитные вещества, у которых $\mu < 1$; ферромагнетики, которые обладают непостоянной магнитной проницаемостью.

Вид магнитного поля определяется по магнитным линиям, направление которых совпадает с направлением магнитных сил. Посредством магнитных линий можно магнитную индукцию выразить числом линий, проходящих через площадку, равную единице поверхности, поставленную перпендикулярно направлению поля.

2. Закон полного тока

С помощью закона полного тока определяется зависимость напряженности магнитного поля от величины силы токов, кото-

рые данное поле возбуждают. Этот закон выводится на основании большого числа опытов. Закон полного тока гласит, что интеграл от напряженности магнитного поля по некоторому замкнутому контуру равен алгебраической сумме токов, входящих

в этот контур: $\oint \vec{I} \, d\vec{l} = \sum I = F$, при этом положительными счита-

ются токи, магнитное поле которых совпадает с направлением обхода контура.

Интеграл в законе полного тока называется циркуляцией вектора напряженности.

F — намагничивающая сила тока.

Для определения направления магнитного поля тока также используют мнемоническое правило буравчика: если направление тока совпадает с поступательным движением буравчика, то его вращательное движение совпадает с направлением магнитного поля данного тока. Магнитное поле нескольких токов, имеющих различное направление, определяется с учетом, что положительными являются токи, магнитные поля которые имеют то же направление, что и выбранное положительное направление.

Сильные магнитные поля возбуждаются при помощи катушки из изолированной проволоки. Учитывая, что намагничивающая сила каждого из витков приравнивается к его силе тока, то для всей катушки намагничивающая сила определится формулой: $F = In$, где n — количество витков в катушке.

По закону полного тока напряженность магнитного поля рассматривается как намагничивающая сила, которая приходится на единицу длины магнитной линии. В случае, если физические условия рядом с рассматриваемой магнитной линией меняются, напряженность магнитного поля будет определяться с помощью деления намагничивающей силы на длину магнитной линии.

Если рассматривается прямой ток, магнитные линии направлены по окружности, которая охватывает провод. В произвольной точке этого магнитного поля, которая находится на некотором расстоянии x от провода, длина окружности магнитной линии определяется формулой $2\pi x$. Так как условия во всех точках окружности одинаковы, напряженность поля определяется соотношением:

$$H = \frac{I}{2\pi x}.$$

По аналогии определяется, что напряженность магнитного поля внутри кольца из любого материала, равномерно и плотно обмотанного проволокой, определяется формулой:

$$H = \frac{In}{2\pi R},$$

где R — радиус кольца.

Во многих электротехнических устройствах напряженность магнитного поля вдоль магнитных линий изменяет значение в зависимости от условий участков, через которые она проходит. При этом путь магнитного потока носит название магнитной цепи. Данную цепь разделяют на определенное число участков, в которых напряженность считается постоянной. В этом случае закон полного тока представляется в виде сумм, а не интегралов:

$$\sum_{k=1}^m H_k l_k = In,$$

где l — длина каждого из участков.

Получаем, что по закону полного тока намагничивающая сила равна сумме произведений напряженности поля на длину соответствующих участков магнитной цепи, которое называется магнитным напряжением:

$$Hl = In.$$

3. Расчет магнитной цепи

Расчет магнитной цепи заключается в основном в определении намагничивающей силы, которая необходима, чтобы возбудить определенный магнитный поток в магнитопроводе.

Для расчета применяется закон полного тока $\sum_{k=1}^m H_k l_k = In$.

Суть расчета заключается в том, что магнитную цепь разделяют на некоторое число участков, в которых напряженность магнитного поля является постоянной. Затем для каждого из участков определяется величина индукции ($B_l = \Phi / S$), и, применяя кривую намагничивания данного материала, определяют напряженность для дан-

ного участка H_1 . Далее по аналогии определяется напряженность всех остальных участков.

В случае, если магнитная цепь содержит небольшой воздушный зазор (рис. 8), сечение пути потока в воздухе можно считать равным сечению ферромагнитного участка.

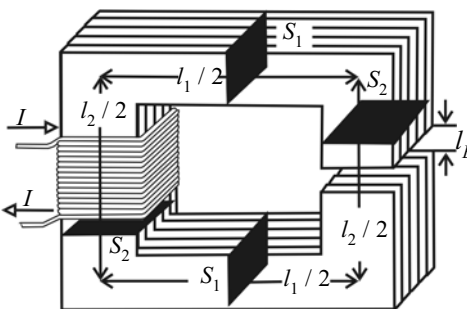


Рис. 8. Магнитопровод с зазором

Отсюда следует, что индукция в воздушном зазоре соответствует значению индукции на соседнем участке. Зная эту индукцию, определяют напряженность поля. В воздухе она имеет большое значение:

$$H_e = \frac{B_e}{\mu_0}.$$

В качестве длины каждого участка цепи принимают длину средней магнитной линии потока.

Затем по закону полного тока подсчитывается необходимая намагничивающая сила: $I_n = H_1 l_1 + H_2 l_2 + \dots + H_e l_e$, откуда

$$I = \frac{H_1 l_1 + H_2 l_2 + \dots + H_e l_e}{n}.$$

При решении обратной задачи — определении магнитного потока или индукции по заданной намагничивающей силе — расчет принимает более сложную форму, что связано с тем, что распределение напряженности H между определенными участками цепи не всегда известно, так как оно зависит от магнитной индукции. Такую задачу решают подбором или построением магнитной характеристики устройства.

4. Электромагнитная индукция

Электромагнитная индукция заключается в том, что при изменении магнитного потока, проходящего через замкнутый кон-

тур, в этом контуре возникает электродвижущая сила индукции. В частности, если проводник движется в магнитном поле, в нем возникает электрическое поле, которое прямо пропорционально индукции данного поля и скорости движения данного проводника.

При этом величина электродвижущей силы, которая является индукционной, определяется по формуле:

$$E = -vBl \sin\alpha,$$

где v — скорость движения проводника;

B — индукция магнитного поля;

l — длина проводника;

α — угол между направлением движения проводника и направлением магнитной индукции поля.

Для определения направления перемещения зарядов в проводнике применяется **правило правой руки** (рис. 9): если линии магнитной индукции входят в правую ладонь, а отставленный большой палец направлен по движению проводника, вытянутые пальцы будут иметь направления индуцированной электродвижущей силы.

Знак минус в формуле закона электромагнитной индукции определяет **правило Ленца**: э. д. с. индукции своим магнитным полем стремится противодействовать причине, ее вызывающей, (например, если замкнуть проводник на некоторое сопротивление).

Закон электромагнитной индукции можно также выразить другим соотношением:

$$E = -Bl \frac{dx}{dt},$$

где $\frac{dx}{dt}$ — скорость движения проводника.

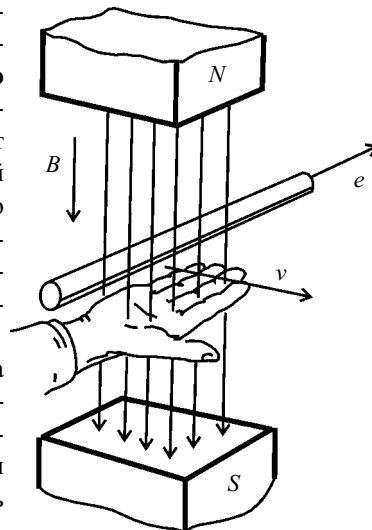


Рис. 9. Правило правой руки

Учитывая, что $B l dx = d\Phi$ — магнитный поток, закон перепишем в виде:

$$E = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Итак, величина э. д. с. определяется как скорость изменения потока, сцепленного с контуром. Единицей измерения магнитного потока в СИ является 1 Вб — вебер.

Индукционные токи образуются не только в обмотках электрических машин и аппаратов, а во всяком проводящем теле, которое находится в переменном магнитном поле. Данные токи являются вихревыми, так как они направлены вдоль проводников и замыкаются сами на себя.

5. Электродвижущая сила, индуцируемая в катушке, и потокосцепление

Большинство электромагнитных устройств (трансформаторы, машины, измерительные приборы) обладает общим свойством: их магнитный поток пронизывает их катушки, сцепляясь при этом с ее отдельными витками (рис. 10). Данный поток, сцепляясь с ветвями катушки, может вести себя по-разному. На представленном рисунке одна часть магнитного потока Φ_1 является сцепленной со всей катушкой, а поток Φ_2 замкнут на последние три витка.

При изменении величины магнитного потока (при перемещении катушки или при перемещении самого потока) в каждом витке образуется э. д. с. индукции, определяемая соотношением:

$$e_0 = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Все витки в катушке соединены между собой последовательно, следовательно, общая э. д. с., образующаяся в катушке в целом, определяется соотношением:

$$E = -\frac{d(\Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_\omega)}{dt}$$

где ω — число витков в катушке.

Выражение $\Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_\omega = \sum_{i=1}^{\omega} \Phi_i = \psi$, характеризующее

магнитный поток, пронизывающий всю катушку, называют потоко-
сцеплением. На основании этого э. д. с., индуцируемая катушкой,
находится по формуле:

$$E = - \frac{d\psi}{dt}.$$

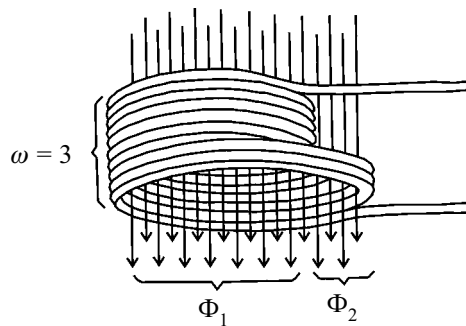


Рис. 10

В случаях, если весь магнитный поток пронизывает все витки катушки, применяют понятие полного потоко-
сцепления, когда

$$\Phi_1 = \Phi_2 = \dots = \Phi_\omega.$$

Тогда форма расчета э. д. с. индукции катушки примет вид:

$$E = - \frac{d\psi}{dt} = - \omega \frac{d\Phi}{dt}.$$

Данную формулу применяют при расчете э. д. с. индукции в катушках машин и аппаратов, потому что в этом случае потоко-
сцепление соответствует полному.

6. Индуктивность

Между магнитным потоком Φ , потоко-
сцеплением ψ электрической цепи и величиной силы тока существует пропорциональ-
ная зависимость. При этом коэффициентом пропорциональности

является индуктивность данной электрической цепи, которая определяется соотношением:

$$L = I / \psi.$$

Индуктивность является свойством электрической цепи, которая характеризует ее способность образовывать потокосцепление. Данная характеристика является одной из основных характеристик электрических цепей.

В СИ в качестве единицы индуктивности принят Генри. $1 \text{ Гн} = 1 \text{ Ом} \times 1 \text{ с}$.

При изменении силы тока в цепи происходят изменения порожденного этим током магнитного потока (потокосцепления), что приводит к индукции э. д. с.:

$$E = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(LI)}{dt}.$$

В большинстве случаев индуктивность цепей принимается за постоянную величину, поэтому формула примет вид:

$$E = -L \frac{dI}{dt}.$$

Такую э. д. с. индукции называют э. д. с. самоиндукции, так как индукционный ток возникает в той же цепи, в которой изменяется величина силы тока. При этом по **правилу Ленца** индукционный ток направлен так, что противодействует вызвавшей его причине, т. е. препятствует изменению силы тока.

Индуктивность в некоторых простых случаях можно определить, не используя общей формулы. Например, для катушки потокосцепление определяется формулой:

$$\psi = \omega\Phi = \frac{\omega^2 I}{\sum_{k=1}^n R_{Mk}},$$

где $\sum_{k=1}^n R_{Mk} = \sum_{k=1}^n \frac{l_k}{\mu_{ak} S_k}$ — сумма магнитных сопротивлений цепи потока Φ .

Отсюда имеем:

$$L = \frac{\Psi}{I} = \frac{\omega^2}{\sum_{k=1}^n R_{Mk}} = \frac{\omega^2}{\sum_{k=1}^n \frac{l_k}{\mu_{ak} S_k}}.$$

В простейшем случае, когда магнитная цепь однородна, индуктивность катушки определяется соотношением:

$$L = \frac{\omega^2}{R_M} = \frac{\mu_a \omega^2 S}{l},$$

где μ_a — магнитная проницаемость материала сердечника;
 S — площадь катушки;
 l — длина катушки.

Когда в магнитном поле катушки присутствует ферромагнетик, индуктивность может изменять свою величину, что связано с тем, что магнитная проницаемость ферромагнетика зависит от напряженности магнитного поля.

Если электрическая цепь содержит индуктивность L и сопротивление R , соединенные последовательно, ток в цепи образуется при сложении разности потенциалов и э. д. с. самоиндукции:

$$i = \frac{U + e_L}{R},$$

откуда

$$U = iR + L \frac{di}{dt}.$$

Полученное уравнение цепи является дифференциальным относительно мгновенного значения силы тока.

Если такую цепь подключить к постоянному напряжению, э. д. с. самоиндукции препятствует нарастанию силы тока. По этой причине после включения цепи сила тока не сразу достигает установленного значения $I = U / R$, которое определяется по **закону Ома** постоянного тока.

На протяжении некоторого времени с момента включения в цепи протекают переходные процессы. Но в данном случае переходные процессы протекают в течение очень короткого промежутка времени.

Важно учитывать явление самоиндукции при рассмотрении процессов выключения электрических цепей. Если цепь содержит индуктивность, ток в ней не может мгновенно достичь нулевого значения, так как возникающая при выключении э. д. с. самоиндукции будет препятствовать уменьшению величины тока. При выключении подобных цепей э. д. с. самоиндукции пробивает воздушный промежуток между расходящимися контактами, создавая при этом электрическую дугу, посредством которой некоторое время цепь остается замкнутой. Через определенный промежуток времени дуга исчезает, и ток прекращается.

Результатом появления электрической дуги является нагревание контактов, вызывающее их обгорание и разрушение. Для увеличения сроков службы выключателей применяются специальные дугогасящие устройства: пружины, которые ускоряют расхождение контактов, и устройства, которые растягивают дугу.

ЛЕКЦИЯ № 5. Синусоидальный переменный ток

1. Синусоидальный ток

Переменным называется такой электрический ток, который изменяет со временем свою величину и направление. При этом изменения во времени повторяются, и время, через которое изменения начинают повторяться, называется **периодом переменного тока T** , а величина, обратная периоду, называется **частотой f** .

Одной из простейших форм для расчета переменного тока является синусоидальный ток. **Синусоидальным** называется такой ток, для которого мгновенные значения силы тока образуют синусоиду. Расчеты такого тока просты, так как производная по току является косинусоидой, которая не отличается от синусоиды по форме.

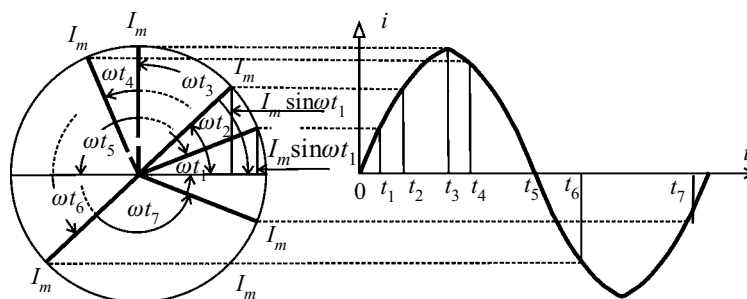


Рис. 11. Получение синусоидальной кривой

На рисунке 11 показано построение синусоидального тока. При этом необходимо взять определенный отрезок I_m , для которого длина равна максимальному значению синусоидальной величины. Данный вектор является вектором синусоидальной величины. Исходное положение соответствует направлению вектора по горизонтальной оси ($t = 0$). Далее рассматривается равномерное вращение данного вектора в положительном направлении

с периодом $T = 2\pi$. Угловая скорость вращения определяется формулой:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f.$$

При этом мгновенное значение силы тока будет определяться как проекция вектора тока на горизонтальную ось.

При повороте на угол $\phi = \omega t$ проекция будет определяться формулой: $I_m \sin \omega t$. Таким образом, в каждый момент времени значение силы тока будет определяться уравнением:

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

где i — мгновенное значение силы тока, т. е. значение силы тока в каждый момент времени;

I_m — максимальное значение силы тока.

В данном уравнении выражение, находящееся под знаком тригонометрической функции, называется фазой тока. Если вращение рассматриваемого вектора в момент времени равно нулю, вектор начинается не с горизонтального направления, а находится под некоторым углом α к горизонтальной оси, данный угол называется начальной фазой.

Таким образом, уравнение переменного синусоидального тока примет общий вид:

$$i = I_m \sin(\omega t + \alpha).$$

Генераторы, вырабатывающие переменный синусоидальный ток, должны иметь э. д. с., определяемые соотношением:

$$e = E_m \sin(\omega t + \beta),$$

где β — начальная фаза э. д. с.

В случае, когда э. д. с. и ток в одной цепи проходят через нулевое или максимальное значения в различные моменты времени, говорят, что они сдвинуты по фазе друг относительно друга (рис. 12). Сдвиги фаз ϕ определяются как разность начальных фаз синусоидальных величин. Для данного случая $\phi = \alpha - \beta$, и векторы силы тока и напряжения расположены под углом ϕ друг относительно друга.

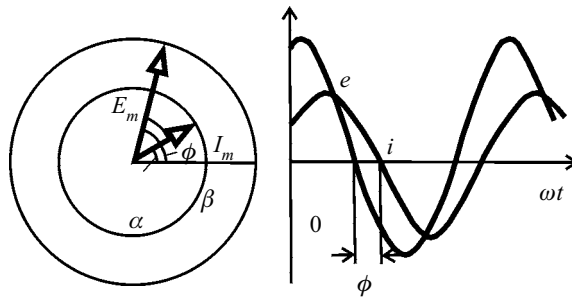


Рис. 12. Две величины не совпадающие по фазе

При вращении векторов угол между ними сохраняется.

2. Действующие значения переменных токов и напряжений

Для того чтобы оценить действие переменного тока, его среднее тепловое действие сравнивается с подобным действием постоянного тока. Значение силы переменного тока, определенное таким образом, называется действующим (эффективным) значением.

Для постоянного тока I в течение времени T через сопротивление R на нем выделяется определенное количество теплоты Q :

$$Q = I^2 RT.$$

За этот же период времени переменный ток на том же сопротивлении выделяет количество теплоты, определяемое формулой:

$$Q = \int_{t=0}^T i^2 R dt,$$

где i — мгновенное значение силы тока.

Учитывая определение действующего значения, приравняем количество теплоты для постоянного и переменного тока.

$$I^2 RT = \int_{t=0}^T i^2 R dt,$$

откуда получаем: $I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t=0}^T i^2 dt}$.

Если переменный ток является синусоидальным, его действующее значение можно рассчитать так:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t=0}^T I_m^2 \sin^2 \omega t \, dt} = I_m \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t=0}^T \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \, dt}.$$

Так как $\int_{t=0}^T dt = T$ и $\int_{t=0}^T \cos 2\omega t \, dt = 0$, формула преобразуется:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}.$$

Путем похожих рассуждений получается формула для действующего значения напряжения:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$$

Действующее значение силы тока является основной характеристикой переменного тока, так как часто действие тока пропорционально квадрату силы тока. Поэтому при измерениях электрических величин можно применять одни и те же приборы как для постоянного, так и для переменного тока. Необходимо только учитывать, что если прибор показывает 200 А, то максимальная сила тока в цепи будет равна $200\sqrt{2} = 283$ А.

3. Закон Ома для простейших цепей переменного тока

Характеристики переменного тока (значение тока, фаза тока) зависят не только от величины сопротивления, входящего в данную цепь, но и от величины индуктивности и емкости этой цепи. Это связано с тем, что в таких цепях образуются магнитное поле и потоки смещения в конденсаторах.

Часто относительная роль параметров (R , L , C) в цепи незначительна. Поэтому подобные цепи рассматриваются как цепи, которые обладают только сопротивлением, или только индуктивностью, или только емкостью, т. е. рассматривается каждое из условий по очереди для трех простейших цепей переменного тока.

Если цепь содержит только сопротивление R , входное напряжение $u = U_m \sin \omega t$ будет создавать ток:

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \sin \omega t.$$

R считается постоянной величиной, поэтому сила тока и напряжение совпадают по фазе, а амплитуда силы тока определяется по формуле: $I_m = \frac{U_m}{R}$.

Если разделить это выражение на $\sqrt{2}$, получим выражение для действующих значений: $I = \frac{U}{R}$.

Данное выражение повторяет формулу закона Ома для участка цепи постоянного тока.

Для цепей переменного тока R называют активным сопротивлением. Такие сопротивления преобразуют электроэнергию в теплоту или другой вид. Оно может отличаться от сопротивления при постоянном токе.

Если в цепь переменного тока включена индуктивность L , ток обуславливается совместным действием напряжения и источника энергии, и э. д. с. самоиндукции, возникающей в цепи в результате изменений тока:

$$i = \frac{u + e_L}{R},$$

откуда

$$u = (-e_L) + iR.$$

В случае, когда $R = 0$, формула преобразуется:

$$u = -e_L = L \frac{di}{dt}.$$

Так как ток, проходящий в цепи, определяется выражением $i = I_m \sin \omega t$, напряжение будет изменяться по закону:

$$u = L \frac{di}{dt} = I_m \omega L \cos \omega t.$$

Итак, в данном случае синусоидальный ток отстает от синусоидального напряжения по фазе на четверть периода.

Исходя из свойства косинуса получаем, что

$$U_m = I_m \omega L.$$

Разделив уравнение на $\sqrt{2}$, получаем выражение:

$$U = I \omega L,$$

которое называется законом Ома для цепи переменного тока, содержащей индуктивность.

Если электрическая цепь содержит емкость, то в ней проходит заряд и разряд конденсатора. Это вызывает поступательное и возвратное движения зарядов в проводниках, соединяющих емкость с источником переменного напряжения.

Ток в такой цепи запишется уравнением:

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt}.$$

Напряжение для синусоидального тока записывается уравнением $u = U_m \sin \omega t$, поэтому, подставляя это выражение, получаем закон изменения тока в такой цепи:

$$i = C \frac{d(U_m \sin \omega t)}{dt} = U_m \omega C \cos \omega t.$$

Таким образом, в цепи с емкостью ток опережает по фазе напряжение на четверть периода.

Для максимальных значений справедлива формула:

$$I_m = U_m \omega C.$$

А для действующих значений справедливо соотношение:

$$I = U \omega C,$$

которое называется законом Ома для цепей переменного тока, содержащих емкостное сопротивление.

В отличие от индуктивного сопротивления емкостное уменьшается с увеличением частоты переменного тока, а для постоянного напряжения сопротивление емкости равно бесконечности.

4. Последовательное соединение индуктивности и активного сопротивления

Рассмотрим цепи переменного синусоидального тока, которые состоят из последовательно соединенных индуктивности L и активного сопротивления R .

Из-за присутствия в цепи индуктивности в ней действуют напряжение источника и э. д. с. самоиндукции, поэтому ток в цепи запишется уравнением:

$$i = \frac{u + e_L}{R}.$$

Учитывая, что $e_L = -L \frac{di}{dt}$, получаем выражение:

$$u = iR + L \frac{di}{dt}.$$

Так как ток в цепи должен удовлетворять условию

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

напряжение запишется уравнением:

$$u = I_m R \sin \omega t + I_m \omega L \cos \omega t.$$

Получаем, что напряжение складывается алгебраически из двух частей: активной составляющей $u_A = I_m R \sin \omega t$, которая совпадает по фазе с током, и индуктивной реактивной составляющей $u_p = I_m \omega L \cos \omega t$, которая опережает по фазе ток в цепи на $\pi / 2$.

Если рассмотреть отношение коэффициентов при косинусе и синусе $\frac{\omega L}{R}$ как тангенс какого-то угла ϕ , получаем:

$$\phi = \arctg \frac{\omega L}{R} = \arctg \frac{x}{R}.$$

Данное выражение можно изобразить прямоугольным треугольником сопротивлений (рис. 13), для которого гипотенуза будет находиться из выражения:

$$z = \sqrt{R^2 + x^2}.$$

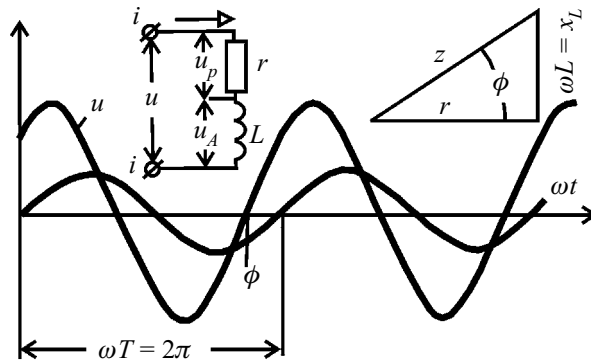


Рис. 13. Характеристики цепи с R и L

Данный треугольник называется **треугольником сопротивлений**.

Умножив и разделив выражение для напряжения на выражение для z , получаем:

$$u = I_m z \left(\frac{R}{z} \sin \omega t + \frac{x}{R} \cos \omega t \right)$$

Если применить к этому выражению соотношения из треугольника сопротивлений $\cos \phi = \frac{R}{z}$ и $\sin \phi = \frac{x}{z}$, получаем выражение:

$$u = I_m z \sin(\omega t + \phi).$$

Отсюда следует, что между напряжением и силой тока существует сдвиг фаз:

$$\phi = \operatorname{arctg} \frac{\omega L}{R}.$$

Максимальное значение напряжения будет определяться формулой:

$$\sin(\omega t + f) = 1,$$

откуда

$$U_m = I_m z.$$

Разделив это выражение на $\sqrt{2}$, получаем выражение для действующих значений:

$$I = \frac{U}{z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + x^2}},$$

z из этого выражения имеет смысл сопротивления и называется полным сопротивлением цепи переменного тока.

x — индуктивное сопротивление цепи.

5. Построение векторных диаграмм

Для выполнения арифметических действий со значениями синусоидального переменного тока применяется геометрическое сложение и вычитание векторов используемых величин. Применение такого способа значительно упрощает расчет цепей синусоидального тока через построение их векторных диаграмм.

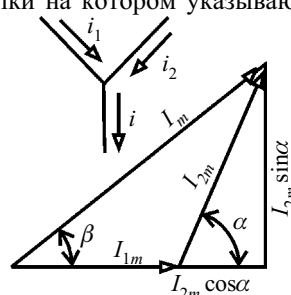
Так, для сложения суммы двух синусоидальных токов $i = i_1 + i_2$, которые не совпадают по фазе, $i_1 = \sin \omega t$ и $i_2 = I_{2m} \sin(\omega t + \alpha)$.

Для геометрического сложения векторов каждому из значений силы тока сопоставляют вектор, стрелки на котором указывают положительное направление.

Переменный ток изменяется со временем по направлению, но для удобства выбирается направление, которое мы считаем положительным.

На данной схеме (рис. 14) направление подобных стрелок указывает, что рассматриваемые токи в узле схемы складываются, а не вычитаются.

Мгновенное значение общего тока *Рис. 14. Схема и диаграмма узла*



$$= I_{1m} \sin \omega t + I_{2m} \sin(\omega t + \alpha) = (I_{1m} + I_{2m} \cos \alpha) \sin \omega t + I_{2m} \sin \alpha \cos \omega t.$$

Для нахождения конечного результата применим отношение коэффициентов при $\cos \omega t$ и при $\sin \omega t$, равным значению тангенса угла β , т. е.

$$\beta = \operatorname{arctg} \frac{I_{2m} \sin \alpha}{I_{1m} + I_{2m} \cos \alpha}.$$

Иначе говоря, существует прямоугольный треугольник, в котором отношение сторон удовлетворяет приведенному условию.

Если разделить и умножить уравнение для i на гипотенузу данного треугольника

$$I_m = \sqrt{(I_{1m} + I_{2m} \cos \alpha)^2 + (I_{2m} \sin \alpha)^2},$$

получим выражение:

$$i = I_m (\cos \beta \sin \omega t + \sin \beta \cos \omega t) = I_m \sin (\omega t + \beta).$$

Треугольник токов на данной диаграмме можно представить как треугольник, построенный на основании геометрического сложения векторов I_{1m} и I_{2m} .

Задача сложения двух токов при таких представлениях переходит к геометрическому сложению векторов токов, длины которых соответствуют максимальному значению токов, а направление определяется по величине начальной фазы колебания тока.

Диаграммы строятся в масштабе, что позволяет точно определить амплитуду результирующего тока.

Часто диаграммы строятся не для максимальных, а для действующих значений параметров, что позволяет уменьшить длины соответствующих векторов.

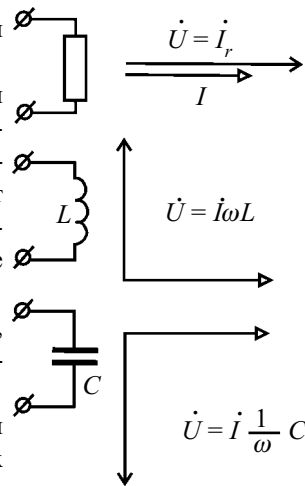


Рис. 15. Векторные диаграммы цепей

Сложные цепи переменного тока часто рассматриваются как цепи, которые состоят из отдельных активных, индуктивных и емкостных сопротивлений (цепи с сосредоточенными постоянными). Соответственно при построении векторных диаграмм используются векторные соотношения этих трех видов сопротивлений. На рисунке 15 рассмотрены векторы напряжений и токов для активного, индуктивного и емкостного сопротивлений. Эти простейшие векторные соотношения помогают при построении векторных диаграмм сложных цепей синусоидальных токов.

6. Последовательное соединение активных сопротивлений, индуктивностей и емкостей

Для того чтобы рассчитать цепи переменного тока, которые состоят из активных (R) и реактивных (L и C) элементов, соединенных последовательно, проще всего свести решение к тригонометрической задаче с применением построения векторных диаграмм для данных цепей.

Рассмотрим цепь, которая состоит из двух последовательно соединенных катушек z_1 и z_2 , которые обладают активным сопротивлением R и индуктивностью L и связаны между собой. Поэтому данную цепь представим как цепь, состоящую из последовательно соединенных двух активных сопротивлений катушек, которые рассматриваются отдельно от их индуктивности (рис. 16).

Для того чтобы построить векторные диаграммы при последовательном соединении, следует начинать с вектора тока \dot{I} , так как в этом случае ток на всех участках цепи одинаков. Общее напряжение \dot{U} находится как векторная сумма частных напряжений $\dot{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2$. Любое из частных напряжений при этом

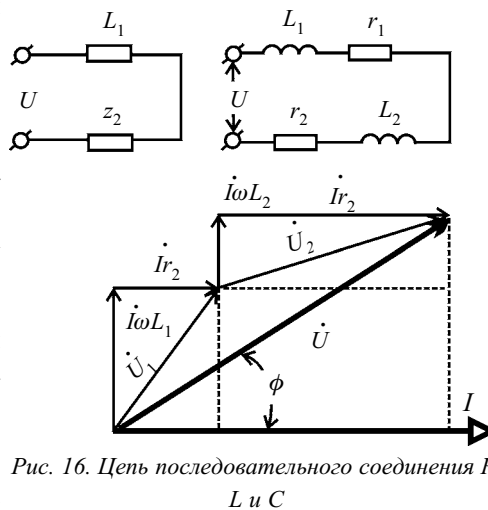


Рис. 16. Цепь последовательного соединения R , L и C

определяется как сумма индуктивного реактивного напряжения $\dot{I}\omega L = \dot{I}x_L$, для которого вектор опережает вектор тока I на 90°, и активной составляющей напряжения $\dot{I}R$, для которого вектор сонаправлен вектору тока.

На диаграмме получаем вектор \dot{I} , который направлен по горизонтальной оси, перпендикулярный ему в направлении против часовой стрелки вектор индуктивного напряжения $\dot{I}\omega L_1$ и вектор активного напряжения, который откладывается из конца вектора индуктивного напряжения, — параллельно вектору \dot{I} . Затем соединяем конец данного вектора с началом координат и получаем вектор \dot{U}_1 , характеризующий напряжение на первой катушке.

После этого по данному методу находим вектор напряжения \dot{U}_2 , начиная построение от конца вектора \dot{U}_1 .

Вектор \dot{U} , определяющий общее напряжение, находим, соединив с началом координат конец вектора \dot{U}_2 . По векторной диаграмме видно, что общее напряжение определяется как гипотенуза прямоугольного треугольника, катетами которого являются векторы $\dot{I}R_1 + \dot{I}R_2$ и $\dot{I}x_1 + \dot{I}x_2$, т. е. можно записать соотношение:

$$U = \sqrt{(\dot{I}R_1 + \dot{I}R_2)^2 + (\dot{I}x_1 + \dot{I}x_2)^2} = I\sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (x_1 + x_2)^2},$$

приводящее к выражению для силы тока:

$$I = \frac{U}{\sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (\omega L_1 + \omega L_2)^2}},$$

которое можно записать в общем виде:

$$I = \frac{U}{\sqrt{(\sum R)^2 + (\sum \omega L)^2}}.$$

Если в неразветвленной цепи тока содержатся все три вида приемников (индуктивность L , активное сопротивление R и емкость C), закон Ома для нее можно вывести аналогично, используя построение векторных диаграмм, которые изображают вектор общего напряжения цепи через сумму векторов частичных напряжений.

Начинаем построение диаграммы с построения вектора тока I . Сила тока на индуктивности отстает по фазе от напряжения на чет-

верть периода, значит, вектор $\dot{i}\omega L_1$ опережает \dot{I} на $\pi / 2$. Затем к этому вектору прибавляется вектор активного напряжения $\dot{I}R$, параллельный вектору \dot{I} . Для конденсатора сила тока опережает напряжение на четверть периода. Отсюда получаем, что вектор напряжения на емкости строится под углом 90° к вектору $\dot{U}_C = \dot{i} \frac{1}{\omega C}$, но в от-

рицательную сторону, т. е. на диаграмме — вниз (рис. 17).

Вектор общего напряжения получаем, соединив начальную и конечную точки. Оно получается как гипотенуза прямоугольного треугольника. При этом один катет этого треугольника равен активному напряжению IR , а второй определяется как разность индуктивного и емкостного напряжений:

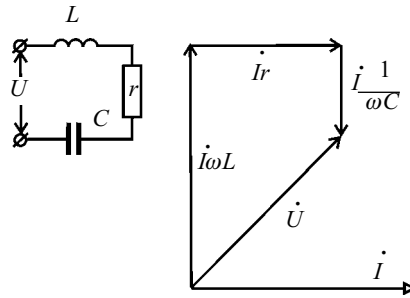


Рис. 17. Цепь и ее диаграмма

как разность индуктивного и емкостного напряжений:

$$I\omega L - I \frac{1}{\omega C}.$$

Из соотношений в треугольнике получаем:

$$U = \sqrt{(IR)^2 + \left(I\omega L - I \frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

Отсюда сила тока найдется из соотношения:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (x_L - x_C)^2}}.$$

Сдвиг фаз ϕ между током и напряжением из треугольника будет равен:

$$\phi = \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}.$$

Когда $\omega L > \frac{1}{\omega C}$, сдвиг фаз является положительным, поэтому

перед емкостным сопротивлением в выражении **закона Ома** ставится минус с учетом, что данное сопротивление приводит к отрицательному сдвигу фаз.

7. Параллельное соединение приемников переменного тока

Рассчитаем цепь, которая состоит из двух параллельно соединенных приемников, каждый из которых обладает различным индуктивным сдвигом фаз ϕ_1 и ϕ_2 .

Найдем общий ток I , который потребляется схемой. Данный ток определится соотношением:

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2,$$

так как приемники энергии соединены параллельно.

Исходя из свойств параллельного соединения построение векторных диаграмм в данном случае начинают с вектора напряжения.

Векторы \dot{I}_1 и \dot{I}_2 направлены по отношению к этому вектору под углами ϕ_1 и ϕ_2 . Общий ток определяется как геометрическая сумма этих векторов.

После проектирования этих векторов на две координатные оси, находим соотношение для величины активной составляющей тока:

$$I \cos \phi = I_a = I_1 \cos \phi_1 + I_2 \cos \phi_2 = I_{1a} + I_{2a}$$

и для его реактивной составляющей:

$$I \sin \phi = I_p = I_1 \sin \phi_1 + I_2 \sin \phi_2 = I_{1p} + I_{2p}.$$

Общий ток определится по формуле:

$$I = \sqrt{(I \cos \phi)^2 + (I \sin \phi)^2} = \sqrt{(I_{1a} + I_{2a})^2 + (I_{1p} + I_{2p})^2}.$$

8. Смешанное соединение приемников переменного тока

Для того чтобы рассчитать смешанное соединение потребителей в цепи переменного тока, придерживаются последовательности действий, которые применялись при расчете подобных цепей постоянного тока.

Начать расчеты следует с определения эквивалентного сопротивления разветвления, после чего заменить разветвления эквивалентным сопротивлением и рассчитать цепь в целом, считая ее последовательной.

При расчете цепей переменного тока сложность заключается в том, что необходимо учитывать векторные соотношения величин переменного тока.

Рассмотрим пример расчета одной из таких цепей (рис. 18).

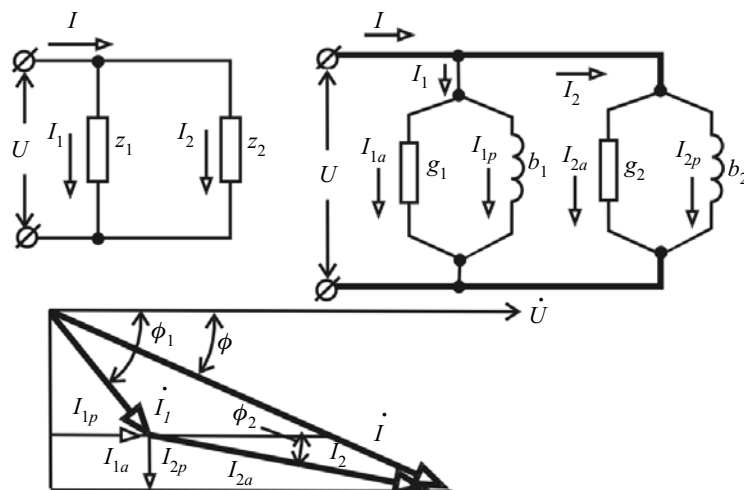


Рис. 18. Смешанное соединение и векторная диаграмма

Начнем с определения проводимостей разветвлений, для чего нужно определить активные проводимости обеих ветвей:

$$g_1 = \frac{R_1}{R_1^2 + (\omega L_1)^2} \quad \text{и} \quad g_2 = \frac{R_2}{R_2^2 + \frac{1}{(\omega C)^2}}$$

После этого найдем реактивные проводимости этих ветвей:

$$b_1 = \frac{\omega L_1}{R_1^2 + (\omega L_2)^2} \text{ и } b_2 = \frac{1}{R_2^2 + \frac{1}{(\omega C)^2}}.$$

Для разветвления активная проводимость равна: $g = g_1 + g_2$, а реактивная проводимость находится как $b = b_1 + b_2$. После этого определим эквивалентные активное и реактивное сопротивления:

$$R_p = \frac{g_p}{y_p^2} \quad \text{è} \quad x_p = \frac{b_p}{y_p^2}.$$

После преобразований рассчитываем схему как последовательное соединение, т. е. справедлива формула:

$$I_3 = \frac{U}{\sqrt{(R_p + R_3)^2 + (x_p \pm x_3)^2}}.$$

Во второй скобке знаменателя знак будет зависеть от характера реактивного сопротивления разветвления.

Если оно того же характера, что и реактивное сопротивление последовательного участка z_3 , то равно сумме этих сопротивлений; если сопротивление имеет другой характер, x_p вычитается из x_3 . Для нахождения токов в ветвях разветвлений найдем напряжение в разветвлениях:

$$U_p = I_3 z_p,$$

откуда рассчитываем значения токов:

$$I_1 = \frac{U_p}{z_1} \text{ и } I_2 = \frac{U_p}{z_2}.$$

Напряжение \dot{U}_3 определяется соотношением:

$$U_3 = I_3 z_3.$$

Активная мощность, т. е. мощность, определяющая энергетическое состояние цепи, определяется по общему току и суммарному активному сопротивлению цепи:

$$P = I_3^2 (R_p + R_3).$$

Для построения векторной диаграммы такой цепи следует начинать с вектора напряжения на разветвлении \dot{U}_p (рис. 19). Под углом ϕ_1 к нему строится вектор тока \dot{I}_1 (здесь и далее точка над буквой показывает, что данная величина является вектором). Этот угол можно построить, если отложить в некотором масштабе по направлению \dot{U}_p величину активного сопротивления и под углом $\pi/2$ к нему — величину индуктивного сопротивления. Затем суммируем I_1 и I_2 , сумма которых строится относительно силы тока I_1 под углом $\phi_2 = \arctg \frac{x_2}{R_2}$. Далее строится $I_3 = I_1 + I_2$, которая отстает по фазе от \dot{U}_3 на определенный угол.

Общее напряжение цепи:

$$\dot{U} = \dot{U}_p + \dot{U}_3.$$

Легче всего строить \dot{U}_3 по частям: прибавить к \dot{U}_p активное напряжение $I_3 R_3$, которое параллельно вектору тока \dot{I}_3 , после чего прибавить реактивное напряжение $I_3 x_3$, которое имеет направление, образующее угол 90° к \dot{U}_p .

\dot{U}_3 при этом получается как гипотенуза прямоугольного треугольника, катетами которого являются $\dot{I}_3 R_3$ и $\dot{I}_3 x_3$.

Если соединить конец вектора \dot{U}_3 и начало координат, можно определить вектор общего напряжения \dot{U} . Этот вектор опережает вектор общего тока на угол ϕ :

$$\phi = \arctg \frac{x_p + x_3}{R_p + R_3}.$$

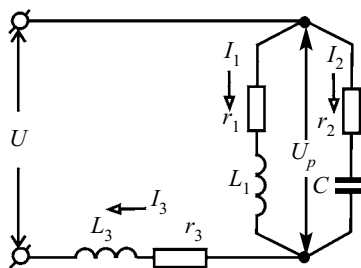


Рис. 19. Смешанное соединение

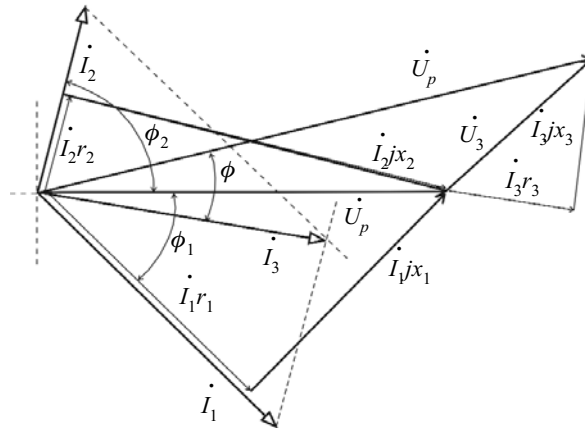


Рис. 20. Диаграмма смешанного соединения

9. Полная и реактивная мощности

Энергетические условия в цепях переменного тока характеризует активная мощность $P = UI \cos\phi$. Однако существует также полная мощность $S = UI$ и реактивная мощность $Q = UI \sin\phi$, которые применяются для более точного расчета цепей.

Площадь сечения проводов обмоток генераторов и других электротехнических устройств рассчитана на некоторое действительное значение силы тока.

Коэффициент мощности, при котором работают данные машины, зависит от рода приемников энергии, которые включены в их цепь. Активная мощность, отдаваемая этими машинами без перегрузки, тем меньше, чем ниже $\cos\phi$ потребителей.

Поэтому на генераторах и трансформаторах в качестве их номинальной мощности указывают полную мощность. Она равна той наибольшей активной мощности, которую генератор может отдать, а трансформатор передать, когда у нагрузки $\cos\phi = 1$.

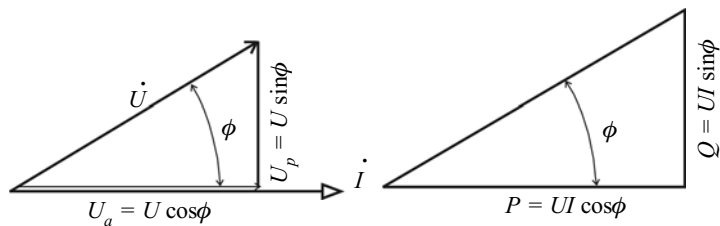


Рис. 21. Треугольники напряжений и мощностей

Единицей полной мощности является вольт-ампер (В – А), единицей измерения реактивной мощности является вар (Var). Соотношение между всеми видами мощности цепей переменного тока представляются с помощью треугольника мощностей (рис. 21).

Его можно построить путем умножения треугольника напряжений цепи на силу тока I . Из данного треугольника получаем следующие соотношения:

$$\begin{aligned} S &= \sqrt{P^2 + Q^2}; \\ P &= S \cos\phi; \\ Q &= S \sin\phi; \\ Q &= P \operatorname{tg}\phi. \end{aligned}$$

Для того чтобы рассчитать полную мощность сложной установки, применяется формула:

$$S = \sqrt{(\sum P)^2 + (\sum Q)^2},$$

а если учесть, что реактивная мощность определяется соотношением

$$Q = Q_L - Q_C,$$

получаем следующую формулу:

$$S = \sqrt{(\sum P)^2 + (\sum Q_L - \sum Q_C)^2}.$$

10. Явления резонанса в цепях переменного тока

Электрическим резонансом называется явление совпадения частоты источника переменного тока с частотой собственных свободных колебаний электрической цепи. Электрические колебания возникают в цепи, которая включает в себя индуктивность и емкость. Изначально емкость заряжается до начального напряжения U_n , после чего ее замыкают на индуктивность, в результате чего в цепи возникает постепенно увеличивающийся ток i . Сила тока возрастает постепенно, так как ее увеличению препятствует э. д. с. самоиндукции. При увеличении силы тока в магнитном поле ин-

дуктивности L накапливается энергия $\frac{Li^2}{2}$. Ток достигает макси-

мального значения, после чего уменьшается постепенно, так как его уменьшению препятствует э. д. с. самоиндукции. Она поддерживает ток, благодаря чему конденсатор перезаряжается в обратном направлении.

В случае, когда в колебательном контуре нет потерь, перезарядка емкости продолжается до тех пор, пока емкость не зарядится до первоначального напряжения U_n . Частота электрических колебаний определяется по формуле:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Резонанс возникает в цепи, когда цепь подключена к внешнему источнику, а частота этого источника ω равна частоте ω_0 .

Существуют два основных вида резонанса: **резонанс напряжений**, который возникает при последовательном соединении реактивных элементов, и **резонанс токов** — при параллельном соединении.

Резонанс напряжений происходит в неразветвленной цепи переменного тока, которая содержит источник энергии, индуктивность L , емкость C и активное сопротивление R (рис. 22). По **законам Ома**

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}.$$

Если учесть, что при резонансе $\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, справедливо равенство:

$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}},$$

что преобразует выражение для тока:

$$I = U / R.$$

Отсюда получаем, что $z = R$ и $\cos \varphi = \frac{R}{z} = 1$.

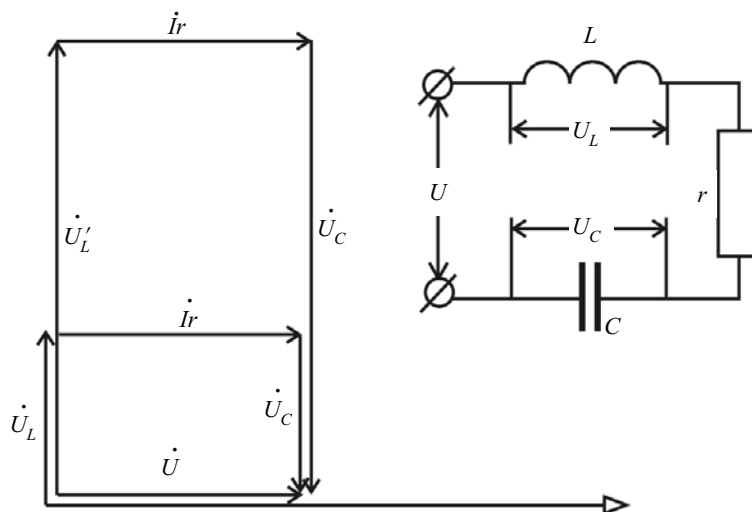


Рис. 22. Цепь резонанса напряжения

Когда активное сопротивление цепи R мало, при резонансе сила тока быстро увеличивается, и при этом возрастают напряжения на емкости и индуктивности. Таким образом, условие резкого увеличения электрических величин определяется соотношением:

$$R > \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Выражение $\sqrt{\frac{L}{C}}$ называется характеристическим или волновым сопротивлением колебательного контура ρ .

Добротностью электрического контура называется величина $Q = \rho / R$.

На практике в устройствах резонанс напряжений является нежелательным явлением, которое связано с возникновением перенапряжений.

Положительное действие резонанса проявляется в радиотехнике, проволочной телефонии, в автоматике и т. п.

Резонанс токов возникает при параллельном соединении источника и колебательного контура. Для параллельного соединения, используя закон Ома, можно получить выражение:

$$I = U \sqrt{g^2 + (b_C - b_L)^2}.$$

Данное явление происходит при условии, что $b_C = b_L$, когда $I = Ug$ и $\cos\phi = 1$. Токи в каждой из реактивных ветвей пропорциональны одному и тому же напряжению и поэтому при резонансе равны:

$$I_C = Ub_C = I_L = Ub_L.$$

В реальных цепях не существует катушек, которые обладают индуктивностью и не обладают активным сопротивлением, что относится и к емкости.

Поэтому для случая параллельного соединения невозможно применять условие идеального случая:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}},$$

потому что значение этих сопротивлений влияет на эквивалентные значения индуктивности и емкости. В этом случае справедливым является условие: $b_L = b_C$.

А если учесть, что $b_L = \frac{\omega L}{R_L^2 + (\omega L)^2}$ и $b_C = \frac{1}{R_C^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}$, полу-

чаем выражение, которое может служить условием резонанса тока:

$$\frac{\omega C}{(\omega C R_C)^2 + 1} = \frac{\omega L}{R_L^2 + (\omega L)^2}.$$

ЛЕКЦИЯ № 6. Трехфазная система

1. Соединение по схеме «звезда»

Трехфазной системой называется объединение трех цепей переменного тока в одну цепь. При этом каждая из цепей называется **фазой**.

В трехфазной системе мгновенные значения э. д. с. могут быть записаны в виде системы:

$$\begin{cases} e_A = E_m \sin \omega t; \\ e_B = E_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right); \\ e_C = E_m \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right). \end{cases}$$

В этих формулах буквы *A*, *B* и *C* означают принадлежность к соответствующим фазам.

Фазные обмотки трехфазных устройств могут соединяться с приемниками электроэнергии с помощью шести проводов, образуя три независимые фазные цепи. Подобные схемы почти не применяются. На рисунке 23 стрелками показаны положительные направления, которые определяют начала (*A*, *B*, *C*) и концы (*X*, *Y*, *Z*) обмоток генератора.

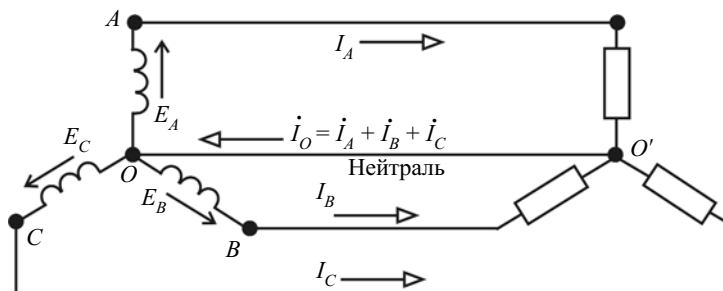


Рис. 23. Соединение звездой

Если концы трехфазных обмоток генератора соединить в общую точку O , данное соединение будет называться соединением по схеме «звезда» (рис. 23). В такой схеме три обратных провода фаз системы объединяются в один общий провод. Когда все фазы системы имеют одинаковую нагрузку, можно записать уравнения:

$$i_A = I_m \sin \omega t; \quad i_B = I_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right);$$

$$i_C = I_m \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right).$$

А так как в общем проводе ток будет находиться как сумма токов в нем $i_0 = i_A + i_B + i_C$, выражение для общего тока примет вид:

$$i_0 = I_m \left[\sin \omega t + \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) + \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \right] =$$

$$= I_m \left(\sin \omega t - \frac{1}{2} \sin \omega t - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \omega t - \frac{1}{2} \sin \omega t + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \omega t \right) = 0$$

Отсюда получаем, что ток в общем проводе равен нулю, т. е. общий провод можно назвать нулевым, или нейтральным, проводом. При этом все другие провода, которые соединяют обмотки генератора с приемником, носят название **линейных проводов**. Узел, образующийся обмотками фаз генератора или фазы нагрузки, называется **нулевой точкой**, или **нейтралью**.

Если нагрузка во всех трех фазах имеет одинаковые значения, то она называется **симметричной**, или **равномерной**. При такой нагрузке сила тока в каждой из фаз одинакова, а сдвиги фаз между э. д. с. и токами имеют одинаковые значения.

Когда трехфазная цепь симметрична, нулевой провод может быть убран за ненадобностью.

Для трехфазных систем напряжение на зажимах обмоток каждой из фаз генератора или нагрузки называется **фазным напряжением**.

Фазные токи — токи, проходящие в обмотках генератора или в фазах нагрузки.

Напряжения между отдельными линейными проводниками носят название **линейных токов**.

Если фазы соединены звездой, линейные токи равны фазным:

$$I_A = I_\Phi,$$

а линейные напряжения определяются как векторная разность фазных напряжений:

$$\begin{cases} \dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B; \\ \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C; \\ \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A. \end{cases}$$

Векторная диаграмма для этого представлена на рисунке 24.

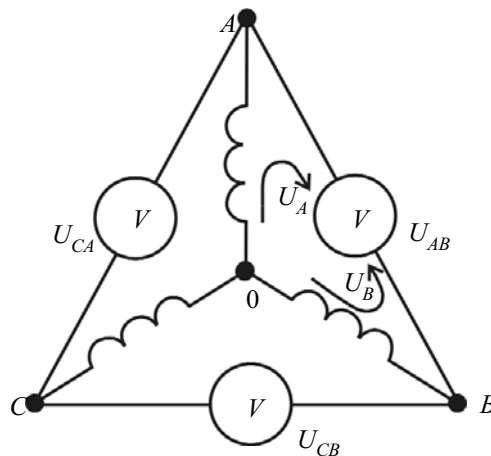


Рис. 24. Линейное напряжение

Так как часто трехфазная система является симметричной, векторы фазных и линейного напряжений образуют три равнобедренных треугольника, в котором острые углы по 30° (рис. 25).

Из треугольника получаем $\frac{U_\lambda}{2} = U_\Phi \cos 30^\circ$, откуда $U_\lambda = \sqrt{3}U_\Phi$.

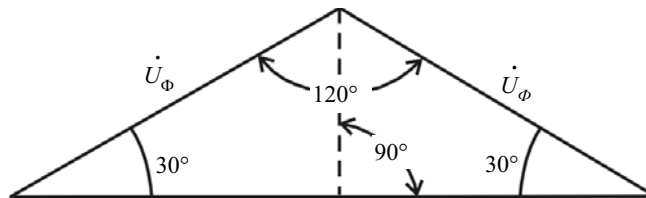


Рис. 25. Векторная диаграмма

2. Соединение по схеме «треугольник»

Трёхфазную систему можно соединить по схеме «треугольник», при котором нулевой провод отсутствует.

Фазные обмотки генератора при соединении в треугольник подключаются так: конец каждой из обмоток соединяется с началом другой фазы (рис. 26).

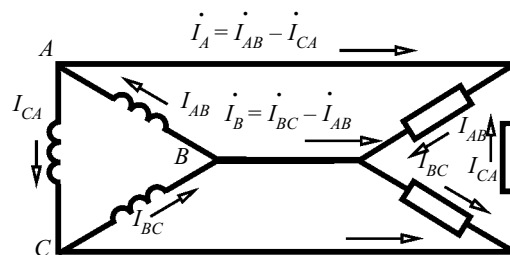


Рис. 26. Подключение треугольником

В этом случае фазные э. д. с. имеют одинаковые направления, а внутри треугольника генератора действует их алгебраическая сумма. При соединении треугольником линейные напряжения равны фазным напряжениям:

$$U_{\text{л}} = U_{\Phi}.$$

Линейные токи находятся как разность фазных токов:

$$\begin{cases} \dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}; \\ \dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}; \\ \dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}. \end{cases}$$

При построении векторной диаграммы начинают с построения трех векторов линейных напряжений, углы между которыми равны 120° . Затем строятся векторы токов, которые образуют углы ϕ с ними.

Если нагрузка симметрична, то

$$I_{AB} = I_{BC} = I_{CA} = I_\phi.$$

Векторы фазного и линейного токов образуют равнобедренный треугольник, в котором острые углы равны 30° .

Отсюда получаем, что

$$I_L = \sqrt{3}I_\phi$$

3. Активная, реактивная и полная мощности трехфазной симметричной системы

В качестве активной мощности трехфазной системы принимается выражение:

$$P = P_A + P_B + P_C.$$

Для симметричной системы мощности в каждой из фаз равны между собой, поэтому $P = 3P_\phi$, т. е. справедливо выражение:

$$P_\phi = U_\phi I_\phi \cos \phi.$$

Когда цепь соединена звездой, $U_\phi = \frac{U_n}{\sqrt{3}}$ и $I_\phi = I_L$, когда цепь

соединена треугольником, $U_L = U_\phi$ и $I_\phi = \frac{I_n}{\sqrt{3}}$.

Если в формулах заменить фазные величины линейными, получим выражения для мощности:

$$H = 3U_\phi I_\phi \cos \phi = \sqrt{3}U_n I_n \cos \phi.$$

Данная формула применима для трехфазных симметричных цепей или для почти симметричных.

Реактивную мощность создают колебания энергии электромагнитных полей цепи.

Если протекающие колебания происходят одинаково во всех фазах трехфазной системы, реактивная мощность этой системы определяется соотношением фазных величин:

$$Q = 3Q_{\Phi} = 3U_{\Phi}I_{\Phi} \sin\varphi$$

или соотношением линейных величин:

$$Q = \sqrt{3}U_{л}I_{л} \sin\varphi.$$

Полной мощностью трехфазной системы будет являться величина

$$S = \sqrt{3}U_{л}I_{л}.$$

4. Расчет трехфазной цепи при симметричной нагрузке

При расчете цепей, в которых трехфазная нагрузка симметрична или близка к симметричной, расчет токов и частичных напряжений выполняют для одной фазы.

Если симметричная нагрузка соединена звездой (рис. 27а), фазное сопротивление которой z_{Φ} , линейное напряжение на нем равно $U_{л}$, фазный ток I_{Φ} при этом равен линейному $I_{л}$, по закону Ома получим выражение:

$$I_{л} = I_{\Phi} = \frac{U_{\Phi}}{z_{\Phi}} = \frac{U_{л}}{\sqrt{3}z_{\Phi}}.$$

Когда ту же самую нагрузку соединяют треугольником (рис. 27б), фазное напряжение равно линейному, поэтому фазный ток $I_{\Phi} = U_{\Phi} / z_{\Phi}$, при этом линейный ток:

$$I_{л} = \sqrt{3}I_{\Phi} = \frac{\sqrt{3}U_{л}}{z_{\Phi}}.$$

Когда рассматривается более сложная цепь, которая имеет симметричный характер, применяют эквивалентные замены на одну звезду, после чего рассчитываются общие линейные токи и фазные напряжения нагрузки и определяются фазные токи нагрузок.

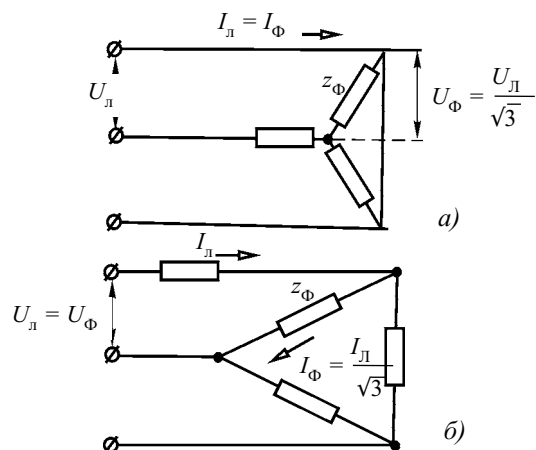


Рис. 27. Симметричная схема

5. Расчет трехфазной несимметричной цепи

Наиболее часто несимметричная нагрузка рассматривается как соединение потребителей звездой без нулевого провода или с нулевым проводом (рис. 28), который обладает некоторым сопротивлением z_0 . При задании линейного напряжения нагрузки $U_{\text{л}}$ можно к данной схеме добавить воображаемый трехфазный источник, который соединен по схеме «звезда». В итоге исходная схема имеет две нулевые точки: генератора O и нагрузки O' , которые представляют собой два узла схемы.

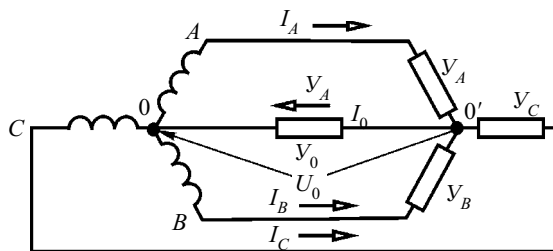


Рис. 28. Несимметричная нагрузка

Исходя из этого при расчетах следует использовать метод узлового напряжения. В этом случае проводимости постоянного тока заменяются комплексными величинами, соответствующими полным проводимостям переменного тока $Y = 1 / Z$. При этом постоянные э. д. с. и токи заменяются на комплексные выражения соответствующих переменных напряжений и токов.

При этом в качестве узлового напряжения принимается напряжение U_0 между нулевыми точками генератора (O) и нагрузкой (O').

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{U}_A Y_A + \dot{U}_B Y_B + \dot{U}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C}.$$

Если учесть соотношение между линейными и фазными напряжениями и сдвиги фаз между линейными напряжениями трехфазной цепи, получаем:

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= U_\phi; \\ \dot{U}_B &= U_\phi a^2 = U_\phi e^{-j\frac{2\pi}{3}} = U_\phi \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right); \\ \dot{U}_C &= U_\phi a = U_\phi e^{j\frac{2\pi}{3}} = U_\phi \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right). \end{aligned}$$

Таким образом, формула примет вид:

$$\dot{U}_0 = U_\phi \frac{Y_A + a^2 Y_B + a Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_0}.$$

Применяя метод узловых потенциалов, получаем выражение для фазных напряжений и токов нагрузки:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{An} &= \dot{U}_A - \dot{U}_0; & \dot{U}_{Bn} &= \dot{U}_B - \dot{U}_0; & \dot{U}_{Cn} &= \dot{U}_C - \dot{U}_0; \\ \dot{I}_A &= (\dot{U}_A - \dot{U}_0) Y_A; & \dot{I}_B &= (\dot{U}_B - \dot{U}_0) Y_B; & \dot{I}_C &= (\dot{U}_C - \dot{U}_0) Y_C; \end{aligned}$$

Нулевой ток определится выражением:

$$\dot{I}_0 = -\dot{U}_0 Y_0.$$

На рисунке 29 показана векторная диаграмма данной ситуации. Из нулевой точки строят три вектора фазных напряжений, по ним строятся линейные напряжения.

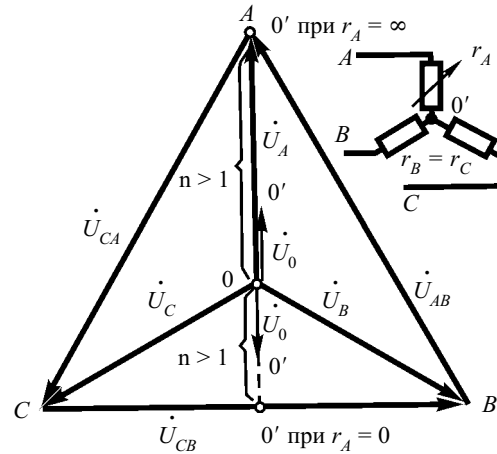


Рис. 29. Смещение нейтрали

Если нулевой провод отсутствует, фазные напряжения нагрузок не будут связанными с фазными напряжениями генератора, потому что на нагрузку действуют только линейные напряжения генератора. В этом случае за счет несимметричности нагрузки возникают несимметричность ее фазных напряжений и смещение нулевой точки от центра треугольника линейных напряжений.

В простейшем случае, когда вся нагрузка, причем две из трех фаз имеют равные проводимости $g_B = g_C = g$ и g_A , равна от нуля до бесконечности режимы фазы переходят из режима холостого хода к режиму короткого замыкания.

Введем обозначение:

$$n = g_A / g,$$

при этом выражение примет вид:

$$\dot{U}_0 = \dot{U}_A \frac{(n + a^2 + a)g}{(n - 2)g} = \dot{U}_A \frac{n - 1}{n + 2},$$

откуда получаем:

$$\dot{U}_0 = \dot{U}_A \frac{1 - \frac{1}{n}}{1 + \frac{2}{n}}$$

Если g_A изменяется от нуля до бесконечности, U_A принимает действительные значения, поэтому напряжение смещения нейтрали совпадает по фазе с \dot{U}_A . Геометрическое место точки O' на диаграмме является перпендикуляром, опущенным из вершины A треугольника на противоположную сторону. Например, при хо-

лостом ходе фазы A $\dot{U}_0 = \dot{U}_A \left(-\frac{1}{2} \right)$.

При этом напряжения нагрузки будут определяться выражениями:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{A1} &= \dot{U}_A - \dot{U}_0 = U_\delta \left(1 + \frac{1}{2} \right) = 1,5U_\delta; \\ \dot{U}_{B1} &= \dot{U}_B - \dot{U}_0 = U_\delta \left(a^2 + \frac{1}{2} \right) = -j \frac{U_\delta}{2}; \\ \dot{U}_{C1} &= \dot{U}_C - \dot{U}_0 = U_\delta \left(a + \frac{1}{2} \right) = j\sqrt{3} \frac{U_\delta}{2} = j \frac{U_\delta}{2}.\end{aligned}$$

Когда сопротивления фаз различаются по характеру, направление смещения нейтрали определяется последовательностью фаз системы.

ЛЕКЦИЯ № 7. Несинусоидальные периодические токи

1. Общие сведения

Часто в цепях электронных, полупроводниковых устройств и иных ток не имеет синусоидального характера, что является для них нормой.

Несинусоидальные функции являются периодическими, если выполняется условие:

$$i = F(t) = F(t + kT),$$

где T — период функции;

k — целое число.

Так как функция периодична, ее можно представить как сумму:

$$i = I_0 + \sum_{k=1}^n I_{km} \sin(k\omega + \alpha_k).$$

где I_0 — постоянная составляющая;

$I_{0m} \sin(\omega t + \alpha_1)$ — колебания, для которых частота равна частоте несинусоидальной периодической функции.

Удобнее записывать колебания, используя замену:

$$i = I_0 + A_1 \sin \omega t + B_1 \cos \omega t + A_2 \sin 2\omega t + B_2 \sin 2\omega t + \dots \\ + A_n \sin n\omega t + B_n \sin n\omega t = I_0 + \sum_{k=1}^n A_k \sin k\omega t + \sum_{k=1}^n B_n \sin k\omega t.$$

Постоянные составляющие появляются в кривой тока тогда, когда присутствуют источник постоянного тока или элементы, выпрямляющие ток. При этом в несинусоидальных кривых переменного тока четные гармонические часто отсутствуют, потому что при наличии четной гармонической составляющей кривая переменного тока становится несимметричной по отношению к оси времени.

Учитывая свойства периодического тока в гармониках, в которых возможна асимметрия, получим:

$$\begin{aligned} A_k \sin k\omega t + B_k \cos k\omega t &= -A_k \sin k\omega \left(t + \frac{T}{2} \right) - B_k \cos k\omega \left(t + \frac{T}{2} \right) = \\ &= -A_k (\sin k\omega t \cos k\pi + \cos k\omega t \sin k\pi) - \\ &\quad - B_k (\cos k\omega t \cos k\pi - \sin k\omega t \sin k\pi) \end{aligned}$$

где k — целое число.

Если k четное, то $\cos k\pi = 1$ и $\sin k\pi = 0$, тогда:

$$A_k \sin k\omega t + B_k \cos k\omega t = -A_k \sin k\omega t - B_k \cos k\omega t.$$

Есть единственное решение $A_k = 0$ и $B_k = 0$, значит, в кривой отсутствуют четкие гармонические составляющие.

Для расчета линейных цепей (рис. 30) переменного тока применяют принцип наложения: ток и напряжение рассчитывают отдельно для каждой гармонической составляющей и постоянной. Для каждой из гармоник линейных цепей применяется **закон Ома**:

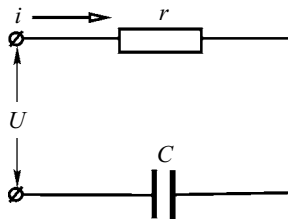


Рис. 30. Последовательное соединение R и C

$$I_k = U_k / z_k,$$

где z_k — гармоническая функция порядка.

Если на вход такой цепи подается переменное напряжение

$$u = U_{1m} \sin \omega t + U_{5m} \sin(5\omega t + \alpha_5),$$

$$\text{то } i = \frac{U_{1m}}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}} \sin(\omega t + \varphi_1) + \frac{U_{5m}}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{5\omega C}\right)^2}} \sin(5\omega t + \varphi_5),$$

$$\text{при этом } \varphi_1 = \arctg\left(\frac{1}{\omega CR}\right) \text{ и } \varphi_5 = \arctg\left(\frac{1}{5\omega CR}\right).$$

При таком расчете гармонических функций используются все основные способы расчета цепей.

ЛЕКЦИЯ № 8. Трансформаторы

1. Общие сведения

Трансформатор — это электромагнитный аппарат, который способен изменять напряжение переменного тока. Трансформатор состоит из двух или более обмоток, которые связаны между собой через общий магнитный поток. Обмотки изолированы друг от друга (за исключением автотрансформаторов).

Магнитная связь усиливается за счет сердечника, который состоит из листов электротехнической стали (рис. 31).

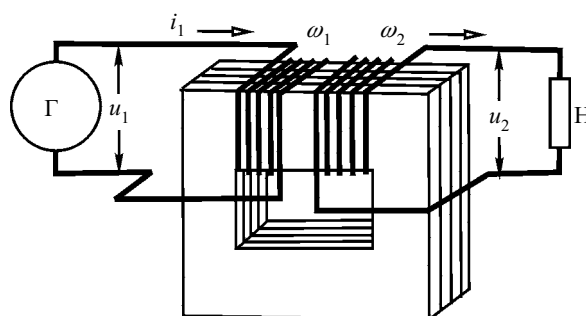


Рис. 31. Трансформатор

Обмотку трансформатора, которая соединяется с источником энергии, называют **первичной**. Обмотку, отдающую электроэнергию, а также величины, которые относятся к ней, называют **вторичными**. Соответственно все величины, характеризующие первичную обмотку, обозначают индексами 1, а вторичную — индексом 2.

Трансформаторы могут быть однофазным или трехфазным. Для трехфазного трансформатора первичной или вторичной обмоткой называют три фазные обмотки одного напряжения. По способу охлаждения трансформаторы могут быть сухими или масляными.

Щиток трансформатора содержит информацию о его номинальных напряжениях — высших и низших, номинальной и полной мощности, линейных токах, частоте, числе фаз, схеме и группе соединений и др.

В случае, когда первичное напряжение U_1 меньше вторичного U_2 , трансформатор называют повышающим, если $U_1 > U_2$, его называют понижающим.

Для трансформатора отношение амплитудных, мгновенных и действующих значений э. д. с. соответствует отношению количеств витков обмоток трансформатора:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2},$$

$$\frac{E_{1m}}{E_{2m}} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = k_{12},$$

k_{12} называют коэффициентом трансформации.

Коэффициент полезного действия трансформатора очень высок, примерно 99%.

На рисунке 32 представлена энергетическая диаграмма трансформатора, по которой можно проследить распределение мощности при работе.

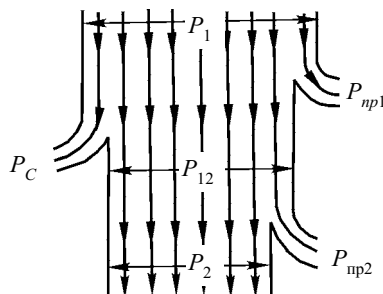


Рис. 32. Энергетическая диаграмма

Мощность P_1 подводится к первичной обмотке, в процессе работы происходят потери мощности на нагревание проводников в первичной обмотке $P_{пр1}$, на гистерезис и вихревые токи P_c , оставшаяся мощность попадает на вторичную обмотку: $P_1 = P_1 - P_{пр1} - P_c$.

Потери во вторичной обмотке приходятся на нагрев проводников $P_{\text{пр2}}$, и оставшаяся мощность P_2 передается во внешнюю цепь. Таким образом, можно записать уравнение:

$$P_2 = P_{12} - P_{\text{пр2}} = P_1 - P_{\text{пр1}} - P_c - P_{\text{пр2}}.$$

2. Холостой ход трансформатора

Холостым ходом называется такой режим трансформатора, при котором к зажимам его первичной обмотки подключено переменное напряжение, а вторичная обмотка разомкнута. Схема холостого хода показана на рисунке 33.

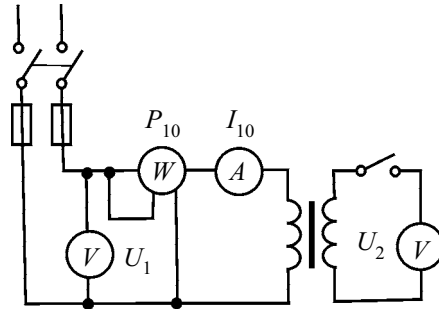


Рис. 33. Схема холостого хода

Этот режим применяется при испытании готового трансформатора.

При холостом ходе первичное напряжение U_1 создается током холостого хода I_{10} , который создает магнитный поток $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$. Вместе с тем происходит частичное рассеяние магнитного потока Φp_1 .

На векторной диаграмме трансформатора при холостом ходе (рис. 34) изображаются соотношения, подобные соотношениям в катушке со стальным сердечником, т. е. она повторяет векторную диаграмму катушки.

Построение ее начинают с вектора Φ_m магнитного потока сердечника. Ток холостого хода I_{10} опережает вектор потока на угол магнитного запаздывания. Под прямым углом к вектору Φ_m в сторону отставания откладываем два вектора E_1 и E_2 . К вектору \vec{E} прибавляем вектор $\vec{I}_{10} R_1$, который направлен параллельно \vec{I}_{10} ,

а также $\dot{I}_{10}jx_1$, который опережает \dot{I}_{10} на $\pi/2$. Замыкается прямоугольный треугольник внутреннего падения напряжения, катетами которого являются векторы активного и реактивного падения напряжения на первичной обмотке, вектором полного внутреннего падения напряжения в обмотке — $\dot{I}_1 Z_1$.

По опыту холостого хода можно вычислить коэффициент трансформации:

$$k_{12} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_{20}}$$

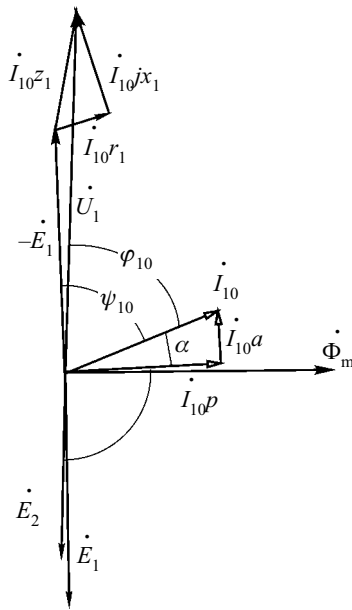


Рис. 34. Векторная диаграмма

Мощность, которая потребляется трансформатором при холостом ходе, тратится на потери в сердечнике и потери в проводах только первичной обмотки $i_{10}^2 R_1$. При этом почти все потери сводятся к потерям в стали, поэтому опыт холостого хода применяется для расчета потерь стали трансформатора. Одной из характеристик трансформатора является характер изменения режима трансформатора при изменении значения

первичного напряжения. Эти зависимости $I_{10} = F(U_1)$ и $P_{10} = f(U_1)$ носят название характеристик холостого хода трансформатора (рис. 35).

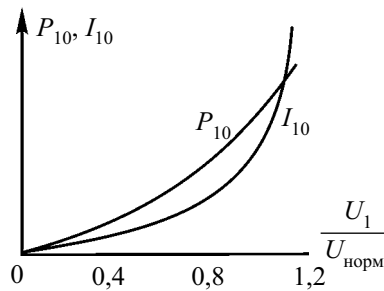


Рис. 35. Характеристики холостого хода

3. Построение векторных диаграмм нагруженного трансформатора

С помощью векторных диаграмм нагруженного трансформатора (рис. 36) наглядно показывается соотношение первичных и вторичных напряжений, а также токов. Диаграмму начинают строить с вектора главного магнитного потока $\dot{\Phi}_m$, после чего строится вектор тока холостого хода I_{10} , который опережает вектор $\dot{\Phi}_m$ на угол магнитного запаздывания α . Вектор \dot{U}_1 отстает от вектора $\dot{\Phi}_m$ на угол 90° .

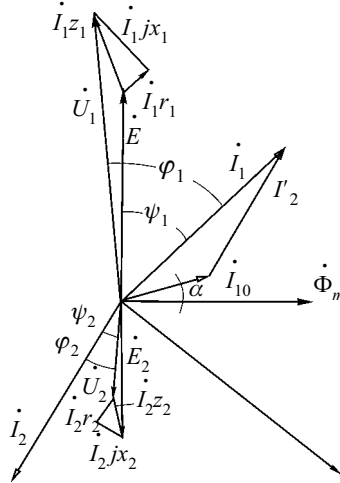


Рис. 36. Диаграмма нагруженного трансформатора

Угол между э. д. с. \dot{E}_2 и током во вторичной обмотке \dot{I}_2 определяется условиями нагрузки, которая включена во вторичную цепь. Если нагрузка носит активно-емкостный характер, этот угол определяется соотношением:

$$\psi_2 = \arctg \frac{x_2 + x_n}{R_2 + R_n}.$$

Для построения вектора вторичного напряжения \dot{U}_2 из \dot{E}_2 вычитают оба падения напряжения на каждом из сопротивлений $\dot{I}_2 jx_2$ и $\dot{I}_2 R_2$. Образуется прямоугольный треугольник, катетами которого являются $\dot{I}_2 jx_2$ и $\dot{I}_2 R_2$, а гипотенузой — вектор $\dot{I}_2 z_2$. Для по-

строения вектора вторичного напряжения \dot{U}_2 соединяют начало координат с началом вектора $\dot{I}_2 z_2$, учитывая, что $\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 z_2$.

Для построения вектора первичного тока \dot{I}_1 находят векторную сумму тока холостого хода и приведен-

ного вторичного тока $\dot{I}' = -\dot{I}_2 \frac{\omega_2}{\omega_1}$.

Вектор первичного напряжения строится исходя из соотношения $\dot{U}_1 = (-\dot{E}_1) + \dot{I}_1 R_1 + \dot{I}_1 jx_1$. В итоге полученный вектор первичного опережает вектор \dot{I}_1 на угол φ_1 ; при этом $\varphi_1 > \varphi_2$, так как проявляется влияние намагничивающего тока и внутреннего индуктивного сопротивления трансформатора.

Диаграмма для трансформатора при емкостной нагрузке приведена на рисунке 37.

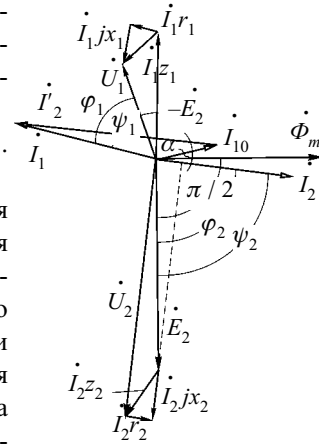


Рис. 37. Диаграмма для емкостной нагрузки

4. Параметры и векторная диаграмма приведенного трансформатора

Для трансформаторов коэффициент трансформации бывает настолько большим, что на векторных диаграммах его тяжело изобразить в том же масштабе, что и напряжения. Этим целям можно достигнуть путем приведения вторичной обмотки к числу витков первичной, построения диаграммы и расчетов замены фактического трансформатора с отношением числа витков обмоток ω_1 / ω_2 на приведенный трансформатор, для которого коэффициент трансформации равен единице.

Такая замена не изменяет режим первичной цепи, а в цепи самой вторичной обмотки при этом сохраняются энергетические условия (активная и реактивная мощность) и их распределение между различными элементами вторичной цепи.

В результате приведения не изменяются сдвиги фаз между напряжениями и токами во вторичной цепи. Приведенные величины обозначаются штрихами.

Для расчета коэффициента приведения э. д. с. и напряжений применяется соотношение $E_1 = E_2 \frac{\omega_1}{\omega_2} = k_{12} E_2$, таким образом:

$$E_2' = k_{12} E_2 = E_2 \frac{\omega_1}{\omega_2}.$$

Подобным образом приводим все другие величины:

$$U_2' = k_{12} U_2,$$

$$I_2' r_2' = k_{12} I_2 R_2,$$

$$I_2' j x_2' = k_{12} I_2 x_2,$$

$$I_2' = \frac{1}{k_{12}} I_2 = I_2 \frac{\omega_2}{\omega_1}.$$

Так как активная мощность неизменна, получаем выражение:

$$I_2^2 R_2 = I_2'^2 R_2' = \frac{1}{k_{12}^2} I_2^2 R_2',$$

а выражение для приведенного сопротивления имеет вид:

$$R_2' = k_{12}^2 R_2 = \frac{\omega_1}{\omega_2} R_2.$$

Из условия равенства реактивных мощностей

$$I_2^2 x_2 = I_2'^2 x_2' = \frac{1}{k_{12}^2} I_2^2 x_2'$$

получаем выражение для приведенного индуктивного сопротивления:

$$x_2' = k_{12}^2 x_2 = \frac{\omega_1}{\omega_2} x_2.$$

Коэффициент приведения сопротивлений сохраняется и для полного сопротивления цепи.

Векторную диаграмму приведенного трансформатора отличает от диаграммы реального трансформатора равенство приведенных э. д. с.

При этом, когда диаграмма построена в масштабе, потеря напряжения трансформатора определяется как простая разность $U_1 = U'_2$.

5. Эквивалентная схема трансформатора и ее векторная диаграмма

Эквивалентная схема трансформатора — это комбинация сопротивлений, которая потребляет ту же мощность при том же токе и сдвиге фаз при включении ее вместо трансформатора.

Можно преобразовать систему уравнений трансформатора таким образом, что параметры эквивалентной схемы можно будет определить через параметры трансформатора:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = iZ_1 + (-\dot{E}_1) = i_1Z_1 - k_{12}\dot{E}_2; \\ \dot{E}_2 = i_2R_2 + \dot{U}_2 = i_2Z_2 + i_2Z_i. \end{cases}$$

Во втором уравнении, заменяя $\dot{I}_2 = -k_{12}\dot{I}'_2$, получаем:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1Z_1 + \dot{I}_2k_{12}^2Z_2 + \dot{I}'_2k_{12}^2Z_i$$

где $k_{12}^2Z_2 = Z'_2$ является приведенным полным внутренним сопротивлением вторичной обмотки;

$k_{12}^2Z_i = Z'_i$ — приведенным полным сопротивлением нагрузки, включенной во вторичную обмотку трансформатора.

Таким образом, получаем уравнение, которое является первым уравнением напряжения эквивалентной схемы:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1Z_1 + \dot{I}'_2Z'_2 + \dot{I}'_2Z'_i.$$

Если учесть, что для трансформатора $-\dot{E}_1 = \dot{I}_{10}Z_{12}$, при применении этого выражения к первому уравнению системы можно получить второе уравнение напряжений для составления эквивалентной схемы:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1Z_1 + \dot{I}_{10}Z_{12}.$$

Третьим уравнением может служить уравнение первичного тока:

$$\dot{I}'_1 = \dot{I}_{10} + \dot{I}_2.$$

При анализе полученных уравнений получаем эквивалентную схему трансформатора, которая является т-образной. При этом Z_1 заменяет первичную обмотку, Z'_2 — вторичную обмотку и Z_{12} является магнитной цепью. При этом $Z'_н$ заменяет нагрузку, замыкающую вторичную обмотку (рис. 38). Данное сопротивление находится вне эквивалентной схемы трансформатора.

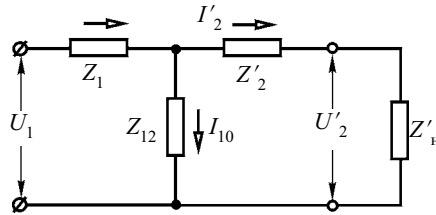


Рис. 38. Эквивалентная схема

Векторная диаграмма эквивалентной схемы (рис. 39) отличается от диаграммы трансформатора тем, что в ней векторы вторичных напряжений и токов приведены к первичной обмотке и смещены на 180° . Строить данную диаграмму начинают с вектора $\dot{E}'_1 = \dot{E}'_2$.

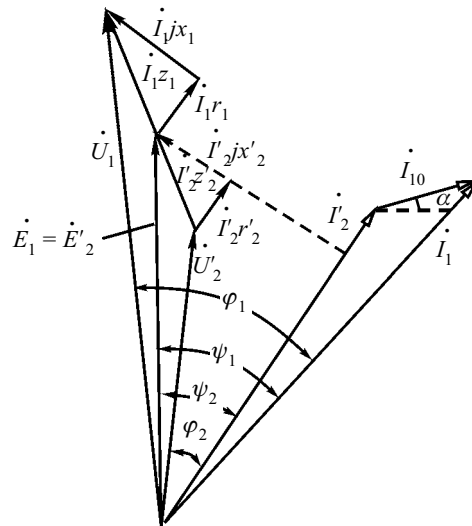


Рис. 39. Векторная диаграмма эквивалентной схемы трансформатора

Приведенный вторичный ток строится под углом ψ_2 к \dot{E}_1 в сторону отставания:

$$\psi_2 = \arctg \frac{x'_2 + x'_i}{R'_2 + R'_i}.$$

6. Короткое замыкание трансформатора

Режим короткого замыкания трансформатора характеризуется тем, что вторичная обмотка замкнута накоротко или на очень малое сопротивление. Опыт короткого замыкания используют для нахождения параметров трансформатора: внутреннего падения напряжения, потерь в проводниках и т. п.

При проведении этого опыта зажимы вторичной обмотки трансформатора накоротко замыкают и напряжение на первичной обмотке значительно понижают, при этом сила тока I_{1k} в первичной обмотке равна номинальной. В цепи (рис. 40) измеряются U_{1k} , I_{1k} и P_{1k} . При этом в опыте должно выполняться:

$$\dot{E}_{2k} = \dot{I}_2 Z_2.$$

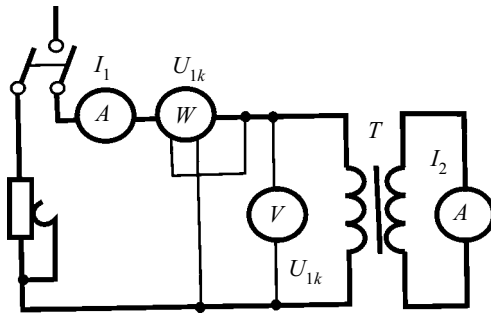


Рис. 40. Схема опыта короткого замыкания

В опыте короткого замыкания потеря в проводниках обмоток не изменяется относительно рабочего режима, и потери сердечника малы, т. е. при опыте короткого замыкания вся мощность P_{1k} тратится на электрические потери в проводниках обмоток трансформатора, т. е.

$$P_{1k} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2.$$

И если учесть, что намагничивающим током можно пренебречь, то получаем

$$I_1 = I'_2,$$

т. е.

$$P_{1k} = I_1^2 R_1 + I'^2_2 = I^2_1 (R_1 + R'_2) = I^2_1 R.$$

Из последнего выражения $R = \frac{P_{1k}}{I^2_1}$ и называется активным со-

противлением короткого замыкания трансформатора. Оно определяется по результатам опыта и ориентировочно определяет сопротивление нагруженного трансформатора.

Для определения минимальных размеров трансформатора выбирается плотность тока в проводниках и индукция в сердечниках величины, соответствующей при работе предельно допустимой температуры нагревания. Подобное нагревание изменяет активное сопротивление проводников обмоток трансформатора и потери в них. Поэтому, определяя потери в обмотках при работе под нагрузкой, необходимо пересчитать значения, найденные из опыта короткого замыкания:

$$R_t = R \frac{234,5 + 75}{234,5 + Q},$$

где Q — приближенное значение температуры обмотки при коротком замыкании.

7. Коэффициент полезного действия трансформатора и его зависимость от нагрузки

Коэффициент полезного действия (КПД) трансформатора определяется как отношение выходной мощности P_2 к входной мощности P_1 :

$$\eta = P_2 / P_1;$$
$$\eta\% = \frac{P_2}{P_1} \times 100\%.$$

КПД обычного трансформатора, работающего при номинальной нагрузке, не превышает 99%, поэтому чаще всего КПД опре-

деляют методом косвенного измерения на основании измерения потерь в трансформаторе $\Delta P = P_1 - P_2$. Выражение для КПД можно переписать:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{P_1}.$$

Потери в трансформаторе разделяются на P_C — потери в стали сердечника и $P_{\text{пр}}$ — потери в проводниках обмоток. При этом $P_C = P_{10}$, где P_{10} — мощность холостого хода, которая почти полностью затрачивается на потери в стали. При этом немного преувеличивается значение потерь в стали, которые называются **постоянными потерями** трансформатора.

Потери в проводниках определяем при проведении опыта короткого замыкания при температуре 75 °С, при котором не учитываются малые потери от нагревания намагничивающим током проводников первичной обмотки, т. е. потери немного уменьшены. Этот вид потерь называется **переменными потерями**.

При определении КПД следует применять коэффициент загрузки, который равен отношению вторичного тока в условиях определяемого КПД к номинальному значению этого тока:

$$k_3 = I_2 / I_{2k}.$$

Таким образом, для потерь в проводниках применяется выражение:

$$I_2^2 R_{75} = k_3^2 I_{2k}^2 R_{75} = k_3^2 P_{\text{эф}}.$$

где $P_{\text{к.н}}$ — мощность потерь в проводниках при номинальной нагрузке.

Если считать $U_2 \approx \text{const} \approx U_{2\text{н}}$, то

$$P_2 = U_2 I_{2\text{н}} k_3 \cos \varphi_2 = S_{2\text{н}} k_3 \cos \varphi_2,$$

отсюда

$$\eta = \left(1 - \frac{\Delta P}{P_2 + \Delta P} \right) \times 100\% = \left(1 - \frac{k_3^2 P_{\text{к.н}} + P_C}{k_3 S_{2\text{н}} \cos \varphi_2 + k_3^2 P_{\text{к.н}} + P_C} \right) \times 100\%$$

К. п. д. трансформатора максимально, когда $k_3 = \sqrt{\frac{P_C}{P_{\text{к.н}}}}$, т. е.

при условии, что постоянные потери равны переменным, потери

в стали равны потерям в проводниках. Для расчета мощности в реальных условиях, когда мощность не принимает номинальных значений и нагрузка изменяется, применяется график зависимости КПД трансформатора от нагрузки (рис. 41).

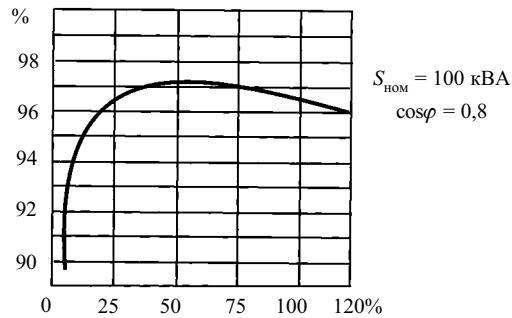


Рис. 41. Зависимость КПД от нагрузки

8. Особенности трехфазных трансформаторов

Для трехфазных трансформаторов можно применять формулы однофазного трансформатора для каждой из фаз. При трансформировании трехфазной системы токов возможно использование трансформаторной группы, т. е. трех однофазных трансформаторов, которые работают как единый агрегат.

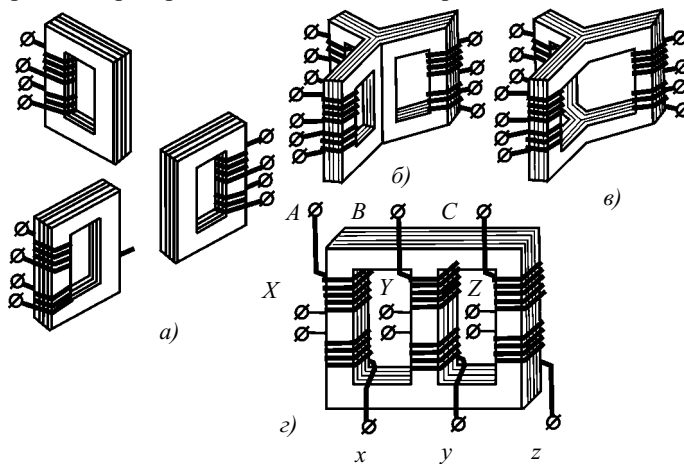


Рис. 42. Преобразование трех однофазных трансформаторов в трехфазный

Можно так соединить три трансформатора, чтобы при этом сэкономить материал (рис. 42). Три однофазных трансформатора (рис. 42а) соединяем в один прибор, при этом в сердечнике остаются без изменения части, в которых намотана катушка, свободные же части сердечников соединяются в общий (рис. 42б). В средней части общее магнитное поле равно нулю, поэтому ее можно убрать (рис. 42в).

Симметричные сердечники (рис. 42б) неудобны в применении и изготовлении, поэтому заменяются другим магнитопроводом (рис. 42г).

Симметричной трехфазной системой первичных напряжений трансформатора возбуждается в магнитопроводе симметричная система магнитных потоков. Однако вследствие неравенства магнитных сопротивлений намагничивающие токи в отдельных фазах не равны. Но данная асимметрия для основных соотношений большого значения не имеет. С физической точки зрения в каждый момент поток одного стержня замыкается через два других стержня магнитопровода (рис. 43).

Для фазных напряжений и токов отношения для однофазных трансформаторов применимы и для трехфазных. Это нарушается только при несимметричной нагрузке трехфазного трансформатора.

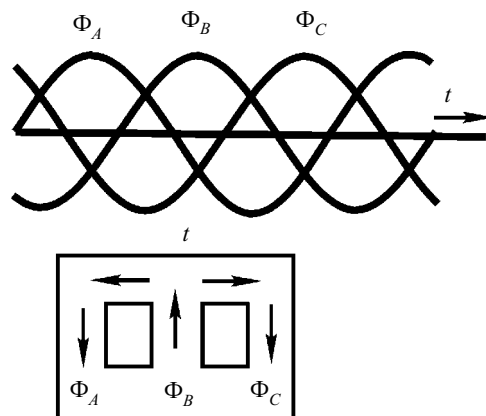


Рис. 43. Магнитные потоки в сердечнике

Трехфазные группы характеризуются большей надежностью при эксплуатации по сравнению с однофазными и при этом обладают меньшими размерами при той же мощности, поэтому более удобны.

Обмотки трехфазного трансформатора могут соединяться по схеме «звезда» Y или схеме «треугольник» Δ . Более просто и дешево соединять обмотки трансформатора звездой. При этом обмотки и их изоляция при глухом заземлении нулевой точки должны быть рассчитаны только на фазное напряжение и линейный ток. Это объясняется тем, что число витков обмотки трансформатора пропорционально напряжению, а при соединении звездой требуется меньшее количество витков, но большее сечение проводников с изоляцией, которые рассчитаны только на фазное напряжение. Такое соединение применяется для трансформаторов малой и средней мощности.

Соединение треугольником более удобно при больших токах.

9. Устройство сердечника (магнитопровода) и обмоток

Основными частями трансформатора являются сердечник и обмотки.

Сердечник применяется для образования магнитной цепи трансформатора. Он состоит из отдельных листов электротехнической стали, что призвано уменьшить потери от вихревых токов до 4—5%. Чтобы изолировать листы между собой, их покрывают изоляционным лаком.

По виду сердечника и его положению различают стержневые трансформаторы (рис. 44), в которых обмотки огибают стержень сердечника, и броневые (рис. 45), сердечники которых только частично охватывают обмотки. На рисунке 44 для стержневого трансформатора а) — однофазный трансформатор, б) — трехфазный.

В стержневом трансформаторе сердечник состоит из стержней, на которых размещаются обмотки, и ярма, которое замыкает магнитную цепь. Данный вид сердечника имеет более простую конструкцию и имеет более благоприятные условия изоляции обмоток. Поэтому он часто используется на практике. Ярмо, которое применяется для стержневого сердечника, обычно бывает ступенчатой или прямоугольной формы.

Броневые сердечники частично защищают обмотки от механических повреждений. Они применяются в малых сухих трансформаторах (рис. 45). Подобные сердечники изготавливаются из холоднокатаной стали, так как в них малые потери и высокая магнитная проницаемость в направлении прокатки.

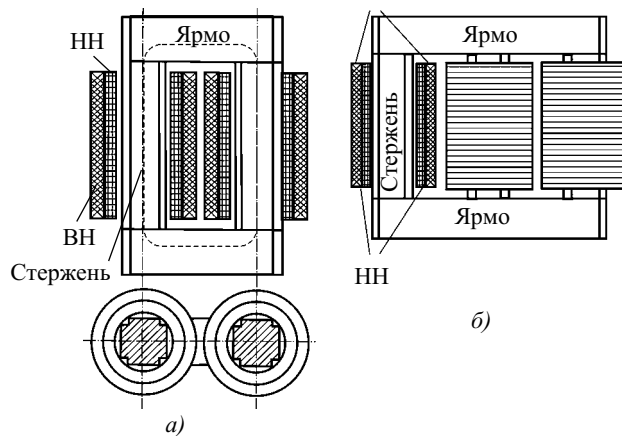


Рис. 44. Стержневые однофазные и трехфазные сердечники

По виду расположения обмоток высшего и низшего напряжения трансформаторы делятся на концентрические и чередующиеся.

В большинстве трансформаторов применяют концентрические обмотки. Одним из простейших видов таких обмоток является цилиндрическая обмотка, которая имеет форму двух коаксиальных цилиндров (рис. 45). Обмотка низшего напряжения находится ближе к стержню потому, что ее проще изолировать от сердечника. Обмотка высшего напряжения накладывается поверх обмотки низшего напряжения. Для изолирования обмоток применяется изолирующий цилиндр из специального картона или бакелизированной бумаги.

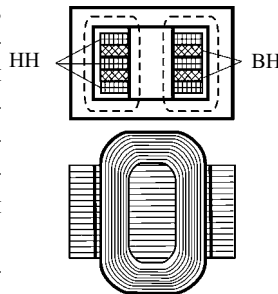


Рис. 45. Броневой сердечник

Чередующиеся обмотки используются редко в броневых трансформаторах. В них чередуются положенные друг на друга дискообразные катушки низкого и высокого напряжения. При этом крайние катушки, которые прилегают к ядру, должны быть низшего напряжения.

10. Измерительные трансформаторы

Измерительные трансформаторы предназначены для изоляции измерительных приборов и аппаратов автоматической защиты от

цепи высокого напряжения, расширения пределов измерения измерительных приборов.

Применение этих приборов, которые обладают различными пределами, дает возможность использовать одни и те же приборы со стандартными пределами измерения (100 В и 5 А) для проведения измерений в различных цепях посредством данных приборов через измерительные трансформаторы с различными коэффициентами трансформации.

Различают измерительные трансформаторы напряжения, применяемые для включения вольтметров, частотомеров, цепей напряжения измерительных приборов (ваттметров, счетчиков, фазометров) и реле, а также трансформаторы тока, предназначенные для включения амперметров, цепей тока измерительных приборов и реле.

Устройство **трансформатора напряжения** и его условное обозначение показаны на рисунках 46 и 47. Первичная обмотка таких трансформаторов, которая является и обмоткой высшего напряжения, имеет большое число витков и включается как вольтметр под измеряемое напряжение U_1 ; вторичная же обмотка является обмоткой низшего напряжения, имеет меньшее количество витков и замыкается на вольтметр и цепи напряжения других приборов.

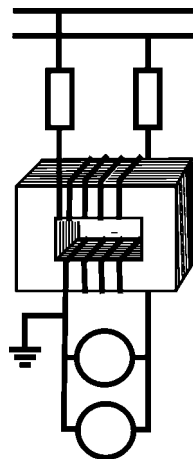


Рис. 46. Трансформатор напряжения

Измерительный прибор относительно вторичной обмотки соединяется параллельно, что обеспечивает действие одного и того же вторичного напряжения. Трансформатор напряжения в условиях работы находится в условиях холостого хода, так как сопротивление вольтметра и цепей напряжения измерительных приборов велико. Поэтому внутренние падения напряжения в обмотках измерительного трансформатора не принимают больших значений, поэтому $U_1 = E_1$ и $U_2 = E_2$,

и если учесть, что $\frac{E_1}{E_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = k_{12}$, получаем

соотношение для напряжений: $U_1 = k_{12} U_2$.

Итак, с помощью измерительного трансформатора во вторичную цепь передается пропорционально измененное значение пер-

вичного высокого напряжения. Определяя низкое напряжение, можно определить первичное высокое напряжение. Фаза вторичного напряжения противоположна фазе первичного.

Первичное и вторичное напряжения строго пропорциональны, если внутренние падения напряжения измерительного трансформатора равны нулю. В реальных ситуациях присутствие падений внутренних напряжений приводит к неточностям при передаче напряжения. Данные неточности приводят к появлению погрешностей напряжения, а неточности в передаче фаз способствует появлению угловой погрешности.

Погрешностью напряжения называется выражаемая в процентах погрешность в измерениях первичного напряжения, которая относится к действительному значению этого напряжения:

$$f_u \% = \frac{k_{12\text{ном}} U_2 - U_1}{U_1} \times 100\% = \frac{k_{12\text{ном}} - k_{12}}{k_{12}}$$

Угловая погрешность — это угол δ_u , который образуется между вектором первичного напряжения и смещенным на 180° вектором вторичного напряжения. Ее измеряют в минутах и считают

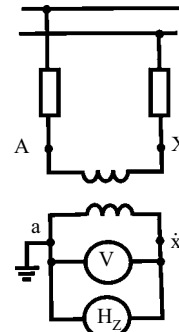


Рис. 47.

Изображение трансформатора

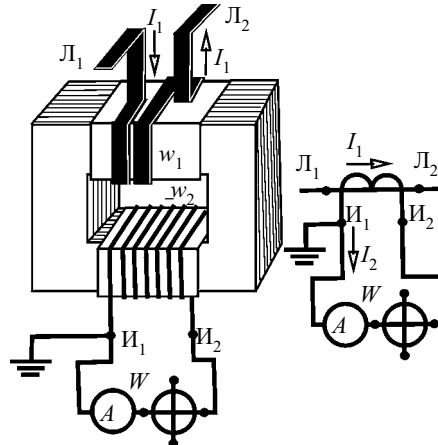


Рис. 48. Устройство и условное обозначение трансформатора тока

положительной, если повернутый на 180° вектор вторичной величины опережает вектор первичной величины.

Трансформатор тока включают в линию так же, как амперметр, последовательно с измеряемым объектом (рис. 48), а вторичную обмотку замыкают на амперметр и цепи тока других измерительных приборов.

Трансформаторы напряжения позволяют определять большую силу тока на основании измерения небольшой силы тока в условиях полной безопасности. Также трансформаторы тока используют для измерения больших токов в установках с напряжением ниже 1000 В.

ЛЕКЦИЯ № 9. Электрические измерения

1. Меры, измерительные приборы и методы измерений

Измерением называется сравнение физической величины с принятым за единицу значением через физический эксперимент. В общих случаях для такого сравнения измеряемой величины с мерой, которая называется вещественным воспроизведением единицы измерения, необходимо применить специальный прибор сравнения.

Для упрощения процесса измерения применяется прибор непосредственного отсчета, который показывает численное значение измеряемой величины на шкале или циферблате. При этом не применяется мера, но она учитывалась при градуировании шкалы данного прибора. Приборы такого рода имеют большую точность и чувствительность, но они сложнее и дороже и требуют больших затрат времени.

По способу получения результата измерения называют прямыми, косвенными и совокупными.

Измерения называются прямыми, если результаты измерений непосредственно определяют определяемое значение величины.

Измерения называются косвенными, если измеряемую величину определяют через прямые измерения других физических величин, связанных с определяемой известной зависимостью. При косвенных измерениях вероятно снижение точности по сравнению с точностью при прямом измерении, так как наблюдается сложение погрешностей прямых измерений величин, которые входят в расчетные уравнения.

Измерения называются совокупными, если конечный результат измерений определяется из результатов нескольких групп прямых или косвенных измерений отдельных величин, от которых исследуемая величина зависит некоторым образом.

По способу применения приборов и мер различают следующие основные методы измерения: метод непосредственного измерения, нулевой и дифференциальный.

Метод непосредственного измерения характеризуется тем, что измеряемая величина определяется путем непосредственного отсчета показания измерительного прибора или сравнения с мерой имеющейся физической величины. При данном методе пределом точности измерения считается точность измерительного прибора непосредственного отсчета.

Нулевой метод заключается в том, что образцовая величина регулируется и доводится до равенства с измеряемой величиной. При этом измерительный прибор, который должен обладать высокой чувствительностью, устанавливает факт осуществления равенства. Из числа подобных методов электрических измерений выделяются мостовые и компенсационные.

Дифференциальные методы измерения обладают еще большей точностью. При этом измеряемую величину уравнивают известной величиной, однако до полного равновесия измерительная цепь не доводится, а путем прямого отсчета измеряется разность измеряемой и известной величин. Примером применения такого метода является измерение э. д. с. через сравнение ее с известной и близкой к ней по значению э. д. с. другого источника.

2. Числовые выражения погрешностей измерения и классы точности

Погрешности характеризуют точность измерений. Для каждого конкретного измерения существует значение погрешности, которую нельзя превышать. Различают абсолютные, относительные и приведенные погрешности. Абсолютной погрешностью ΔA называют разность между измеренными $A_{из}$ и действительными A значениями искомой величины.

$$\Delta A = A_{из} - A.$$

Для определения действительного значения необходимо к измеренной величине прибавить поправку, т. е. абсолютную погрешность, которая берется с обратным знаком.

Относительной погрешностью называется выраженное в процентах отношение абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой величины:

$$\gamma_0 = \frac{\Delta A}{A} \times 100\%.$$

Если учесть, что A и $A_{из}$ приблизительно малы, то можно записать:

$$\gamma_0 \approx \frac{\Delta A}{A_{из}} \times 100\%.$$

Для того чтобы оценить точность стрелочных измерительных приборов применяют приведенную погрешность. Это выраженная в процентах величина, равная отношению абсолютной погрешности к наибольшему показанию прибора A_n :

$$\gamma_{пр} = \frac{\Delta A}{A_n} \times 100\%.$$

Погрешность зависит от качества прибора и внешних условий. Основной называется такая приведенная погрешность, которая определяется в нормальных рабочих условиях, т. е. зависит только от недостатков прибора. К нормальным рабочим условиям относят температуру 20 °С, положение прибора, указанное условным знаком на его шкале, изоляцию от внешних магнитных полей и др.

Допускаемая основная погрешность данных приборов относится их к тому или иному классу точности. Класс точности — допускаемая основная погрешность приборов. По ГОСТу 1845-59 электроизмерительные приборы делятся на восемь классов точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5; 4. Класс точности указывает максимально допустимую основную погрешность прибора на всех делениях рабочей части шкалы.

Отклонения внешних условий от нормальных приводит к дополнительным погрешностям.

3. Системы электроизмерительных приборов

Приборы прямого отсчета включают в себя измерительный механизм и измерительную цепь.

Измерительный механизм предназначен для преобразования подводимой к нему электрической энергии в механическую энергию, которая необходима для перемещения подвижной части и связанного с ней указателя.

Измерительная цепь предназначена для преобразования измеряемой электрической величины в пропорциональную ей величину, которая непосредственно воздействует на измерительный механизм.

По виду физического явления, которое используется для измерения, измерительные приборы разделяют по системам. Среди них самыми распространенными являются магнитоэлектрические, электромагнитные, индукционные, электродинамические и ферродинамические системы.

Магнитоэлектрические измерительные механизмы применяют для измерений постоянного тока. В этих механизмах вращающий момент создается при взаимодействии измеряемого тока, который проходит по катушке механизма, с полем постоянного магнита.

Применяются два основных типа приборов магнитоэлектрической системы: приборы с подвижной катушкой (подвижной рамкой) и приборы с подвижным магнитом. Приборы, содержащие подвижную катушку, применяются чаще, чем приборы, содержащие подвижный магнит.

В приборах с подвижной катушкой ее устанавливают на опорах таким образом, что она была способна поворачиваться в воздушном зазоре магнитной цепи постоянного магнита 1. Ток к катушке подводится посредством пружины или растяжки, с их же помощью получается противодействующий момент.

Существует измерительный механизм с современными магнитами — механизмы с внешним (внерамочным) магнитом.

На рисунке 49 показаны механизмы с внутрирамочным магнитом. В этом случае магнитная цепь образуются магнитопроводом 2, полюсными наконечниками 3 и цилиндрическим сердечником 4. В таких механизмах в качестве сердечника применяется сам магнит 1, а его охватывает цилиндрический магнитопровод 3, изготовленный из магнитно-мягкого материала.

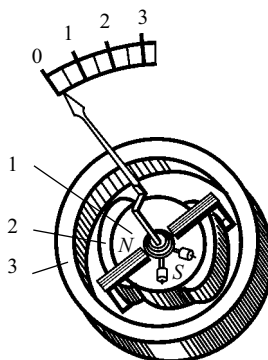


Рис. 49. Магнитоэлектрический механизм с внутрирамочным магнитом

На каждый проводник в таких механизмах действует электромагнитная сила:

$$f = BI,$$

при этом l — активная длина проводника, которая приблизительно равна высоте катушки h . Так как катушка имеет ω витков и диаметр d , то для определения вращающего момента, который действует на подвижную часть механизма,

$$\dot{M}_{\text{вп}} = \frac{f 2\omega d}{2} = \omega h dBI.$$

Если учесть, что $S = h d$, получим:

$$M_{\text{вп}} = \omega SBI.$$

Отсюда видно, что вращающий момент прямо пропорционален току.

Так как противодействующий момент, который создается спиральными пружинами, прямо пропорционален углу закручивания:

$$M_{\text{пр}} = k_{\text{пр}}\alpha,$$

можно сделать вывод, что сила тока пропорциональна углу поворота механизма:

$$I = \frac{k_{\text{пр}}\alpha}{k_{\text{вп}}} = C_{\text{пр}}\alpha,$$

где $C_{\text{пр}}$ — постоянная прибора (цена деления).

Приборы магнитоэлектрической системы с подвижным магнитом (рис. 50) обладают вращающим моментом, который создается действием на подвижный магнит магнитного поля измеряемого тока, проходящего через катушку 1. Пружину заменяют направляющей силой неподвижного постоянного магнита 2. Этот прибор прост по устройству и устойчив к перегрузкам, но обладает низкой точностью из-за влияний гистерезиса.

Термоэлектрическая система характеризуется тем, что включает в себя магнитоэлектрический измерительный механизм и термопреобразователи. Термопреобразователи состоят из тер-

мопар и подогревателей, через которые проходит определяемый переменный ток. Электродвижущая сила пропорциональна разности температур между горячими и холодными концами термопары, которая пропорциональна квадрату действующего значения переменного тока P , т. е. $M_{вр}$ пропорционален I^2 .

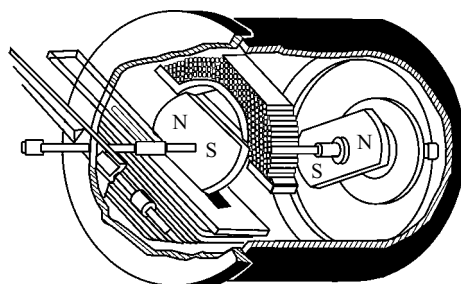


Рис. 50. Прибор с подвижным магнитом

Различают **контактные** и **бесконтактные термопреобразователи**.

Так как КПД термопреобразователей низок, термоэлектрические приборы малочувствительны и работают при высокой температуре нагревателя, а при перегрузке свыше 50% они разрушаются. Подобные приборы применяются при измерении переменных токов высокой частоты.

Электромагнитная система обладает вращающим моментом, который создается воздействием магнитного поля измеряемого тока, проходящего по неподвижной катушке прибора, на ферромагнитный сердечник, который способен вращаться. Сейчас применяются два типа подобных механизмов этой системы: с круглой или плоской катушкой.

Механизм с круглой катушкой (рис. 51) состоит из круглой катушки 4, внутри которой находятся два сердечника: подвижный 1, укрепленный на оси, и неподвижный 2. При прохождении тока по катушке 4 оба сердечника намагничиваются и отталкиваются, в результате чего создается вращающий момент, который поворачивает сердечник 1.

Механизм с плоской катушкой (рис. 52) содержит подвижный сердечник 1, который втягивается в катушку 2, с измеряемым током. Усиление магнитного поля и регулирование вращающего момента осуществляется с помощью второго неподвижного сер-

дечника 3. Для создания противодействующего момента применяется спиральная пружина.

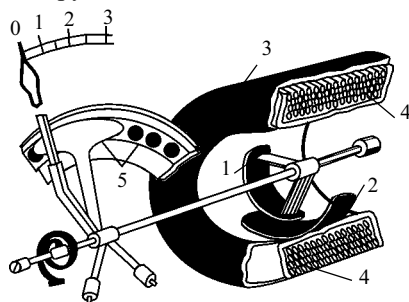


Рис. 51. Электромагнитный механизм с круглой катушкой

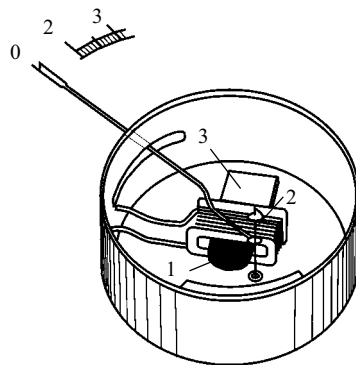


Рис. 52. Электромагнитный механизм с плоской катушкой

С целью защиты от внешних магнитных полей прибор закрывают ферромагнитным экраном. Класс точности подобных приборов не превышает 1,5, что является следствием влияния гистерезиса. К ценным свойствам этих приборов относят защиту от перегрузок, дешевизну и простоту устройства.

Измерительные приборы электродинамической природы обладают вращающим моментом, который образуется при взаимодействии проводников, по которым протекают токи. Подобные измерительные механизмы состоят из неподвижной 1 и подвижной 2 катушек (рис. 53). Противодействующий момент создается спиральными пружинами 3, которые вместе с тем используются для подвода тока в подвижную катушку, занимающую под действием электродинамических сил положение, при котором ее магнитное поле совпадает по направлению с направлением поля неподвижной катушки.

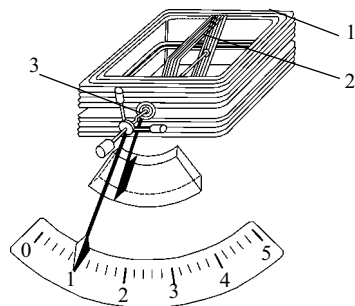


Рис. 53. Электродинамический механизм

Вращающий момент такого механизма определяется формулой:

$$M_{\text{вр}} = I_{\text{под}} I_{\text{неп}} \frac{\partial M}{\partial \alpha}.$$

Электродинамические приборы применяются для измерения как постоянного, так и переменного токов, при этом шкала у приборов для обоих родов тока одна и та же.

Из-за отсутствия подвода тока в подвижную часть и плохого охлаждения электродинамические механизмы не выдерживают значительной перегрузки, к тому же они дороги. При этом класс их точности 0,2 или даже 0,1.

Они применяются при лабораторных и контрольных измерениях переменного тока.

Ферродинамическими называются приборы, в которых применяется ферромагнитный магнитопровод (рис. 54). Но применение стали уменьшает точность прибора за счет влияния гистерезиса и вихревых токов. Поэтому ферродинамические приборы не применяют для точных измерений.

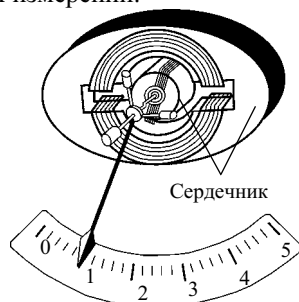


Рис. 54. Ферродинамический механизм

Индукционная измерительная система основывается на использовании явления вращающегося магнитного поля. Такие виды механизмов (рис. 55) обладают вращающим моментом, который создается действием общего магнитного поля электромагнитов (2, 3) на подвижную часть — алюминиевый диск 1, по которому протекают индуцированные вихревые токи. Электромагниты возбуждаются искомыми токами, поэтому вращающий момент создается взаимодействием индуцированных токов с вращающимся магнитным полем. В стрелочных приборах противодействующий момент создает спиральная пружина 4.

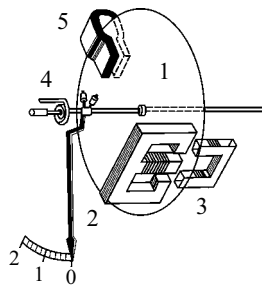


Рис. 55. Индукционный механизм

В приборах электростатической системы вращающий момент создают силы взаимодействия заряженных проводников. Напряжение образует электрическое поле между неподвижной 2 и подвижной 1 пластинами прибора (рис. 56). Для создания противодействующего момента служит пружина.

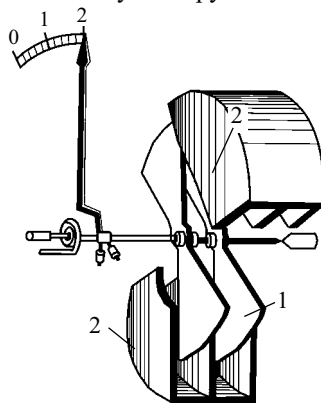


Рис. 56. Электростатический механизм

Преимуществом таких приборов являются малые затраты энергии.

Электростатические вольтметры применяют в основном в лабораториях при измерениях малой мощности и для непосредственного измерения высоких напряжений.

В основу тепловой системы положено использование для отклонения подвижной части удлинения металлической нити, нагреваемой измеряемым током. Достоинство этой системы в том, что показания приборов не зависят от частоты и формы кривой переменного тока. Их применяют при измерении токов высокой частоты.

ЛЕКЦИЯ № 10. Асинхронные бесколлекторные машины

1. Общие сведения

Электрические двигатели — машины, преобразующие электрическую энергию в механическую. **Электрические генераторы** — машины, преобразующие механическую энергию в электрическую.

Среди большого числа электрических машин самой распространенной является асинхронная бесколлекторная машина, которую применяют как двигатель. Асинхронная машина характеризуется тем, что при ее работе возбуждается вращающееся магнитное поле, которое вращается асинхронно относительно скорости вращения ротора.

В состав асинхронной машины входят три неподвижные катушки, которые размещены на общем сердечнике, и помещенная между ними четвертая вращающаяся катушка. В подобных машинах отсутствуют легко повреждающиеся или изнашивающиеся электрические части (коллектор).

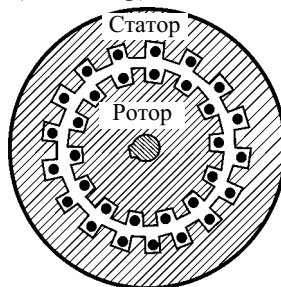


Рис. 57. Магнитная система асинхронной машины

Трехфазные асинхронные машины должны иметь на статоре три фазные обмотки, которые составляют обмотку статора. Токи трехфазной системы проходят по этим обмоткам и возбуждают в машине вращающееся магнитное поле. Усиление этого поля и придание ему нужной конфигурации осуществляется с помощью

магнитной системы машины, в состав которой входят два цилиндра (рис. 57), полый цилиндр и сердечник ротора (рис. 58). Сердечники собраны из пластин электротехнической стали и изолированы друг от друга слоем лака, что обеспечивает уменьшение потерь от вихревых токов. Фазные обмотки, которые возбуждают вращающееся магнитное поле, размещаются в пазах на внутренней стороне сердечника статора. Обмотка ротора располагается в пазах на внешней поверхности цилиндра ротора. Она не соединена с сетью и с обмоткой статора, так как токи в ней индуцируются вращающимся магнитным полем.

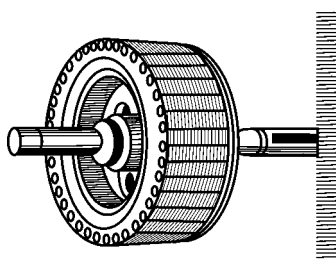


Рис. 58. Сердечник ротора

Машина также состоит из неэлектрических частей: вала, на который насажен сердечник ротора, массивного корпуса, в котором укрепляется сердечник статора, подшипниковых щитов, на подшипники которых опирается вал машины.

Асинхронная машина может работать как двигатель или как генератор, т. е. она обратима, но чаще всего она используется как асинхронный двигатель.

В асинхронных двигателях фазные обмотки статора получают энергию из трехфазной сети, токи которой в обмотках статора возбуждают в машине вращающееся магнитное поле, индуцирующее ток в замкнутой обмотке ротора. Ротор вращается по направлению вращения поля вследствие взаимодействия токов ротора с вращающимся магнитным полем. Вращение ротора должно осуществляться асинхронно и медленнее поля. В этом случае токи, которые индуцируются в роторе, создают вращающий момент, который уравновешивает тормозящий момент от сил трения и нагрузки на валу.

Электродвижущая сила, которая индуцируется в обмотке ротора, пропорциональна частоте вращения поля по отношению к ротору. Такая относительная скорость определяется как раз-

ность частот вращения поля n_1 и ротора n , т. е. равна $n_1 - n$ оборотов в минуту. **Скольжение** является отношением относительной скорости к частоте вращения поля:

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

Э. д. с., которая индуцируется в роторе, пропорциональна скольжению. Если нагрузка возрастает, тормозящий момент на валу двигателя становится больше вращающего, в результате ротор уменьшает скорость. Однако при увеличении скольжения возрастает величина индуцируемых в роторе э. д. с. и токов, поэтому увеличивается вращающий момент. При возрастании скольжения восстанавливается динамическое равновесие вращающих и тормозящих моментов. При этом увеличение токов ротора приводит к увеличению токов статора и возрастанию мощности, которую потребляет двигатель из сети.

2. Устройство ротора

Чаще всего в двигателях применяется короткозамкнутый ротор. Он отличается дешевизной и простотой обслуживания. Обмотку короткозамкнутого ротора изготавливают в виде цилиндрической клетки из медных или алюминиевых стержней, вставляемых без изоляции в пазы сердечника ротора (рис. 59).

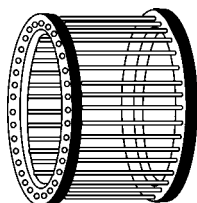


Рис. 59. Обмотка короткозамкнутого ротора

Концы стержней замыкают накоротко кольцами, которые изготавливают из того же материала.

Фазный ротор (рис. 60) изготавливается из изолированного провода. Его обмотка чаще всего трехфазная и состоит из такого же числа катушек, что и обмотка статора двигателя. Три фазные обмотки ротора соединяются на роторе по схеме «звезда», и их

свободные концы соединяются тремя контактными кольцами, которые укреплены на валу машины. При этом их изолируют от вала. На кольца накладывают щетки, которые устанавливаются в неподвижных щеткодержателях. С по-

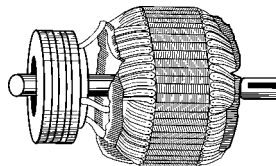


Рис. 60. Фазный ротор

мощью колец и щеток обмотку ротора замыкают на трехфазный реостат. В подобных двигателях обмотку статора включают в трехфазную сеть (рис. 61). Включением реостата в цепь ротора достигается возможность улучшить пусковые условия двигателя, а именно уменьшить пусковой ток и увеличить начальный пусковой момент.

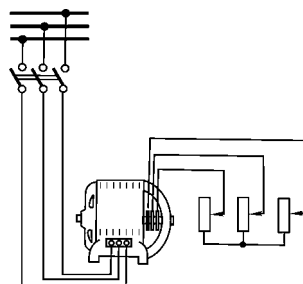


Рис. 61. Схема соединения двигателя с фазным ротором

3. Обмотка статора

Обмотка статора предназначена для возбуждения магнитного потока машины. Потоки фазных обмоток должны быть распределены синусоидально вдоль окружности статора, так как в этом случае вращающееся магнитное поле индуцирует в обмотках синусоидальные э. д. с. Для лучшего использования окружности статора стороны катушек обмотки распределены по нескольким пазам (рис. 62) вдоль внутренней окружности статора.

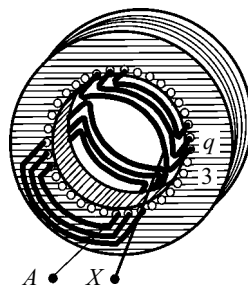


Рис. 62. Катушка распределенной обмотки статора

С помощью распределения обмотки по пазам достигается распределение магнитной индукции по окружности статора. Магнит-

ное сопротивление по окружности статора считается постоянным, так как магнитная система симметрична, и магнитное насыщение сердечника влияет мало, так как большая часть магнитного сопротивления образует магнитное сопротивление воздушного зазора между статором и ротором. Так как магнитное сопротивление по закону Ома для магнитной цепи постоянно, поток и индукцию фаз считают пропорциональными намагничивающим силам. Однако по краям фазных катушек магнитная индукция изменяется пропорционально возбуждающей намагничивающей силе. Кривая распределения магнитной индукции катушки показана на рисунке 63. Зная характер данного распределения обмотки, можно получать практически синусоидальное распределение индукции в воздушных зазорах машины.

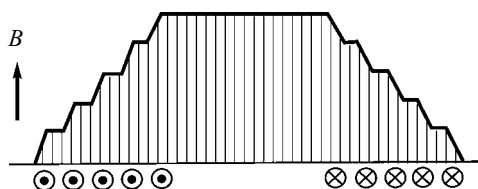


Рис. 63. Кривая магнитной индукции

Для распределения многовитковой катушки по нескольким пазам необходимо ее разделить на некоторое число соединенных последовательно секций. При этом каждая из секций состоит из нескольких витков. Схемы обмоток показывают не отдельные витки, а стороны секций.

При создании асинхронного двигателя необходимо уменьшить скорость вращения поля. Для этого применяется многополюсные обмотки статора. В этом случае каждой паре полюсов вращающегося поля ставятся в соответствие три катушки. При этом в случае, когда поле имеет p пар полюсов, число катушек обмотки статора должно быть $k = 3p$.

На рисунке 64 показана упрощенная схема шестиполюсной ($p = 3$) обмотки статора.

Для двухполюсных обмоток характерно расстояние между сторонами катушки, равное 180° , в многополюсной — $\frac{180^\circ}{p}$, т. е.

в шестиполюсной катушке оно равно 60° . В этой обмотке $3_p = 9$ катушек, т. е. каждая фаза имеет три катушки. Для упрощения

изображения схем каждую катушку изображают в виде одновитковой секции и соединения наносят только для фазы *A*, при этом соединения на тыльной торцевой стороне сердечника показывают пунктиром. На рисунке также показаны кривые для мгновенных значений трехфазной системы токов статора.

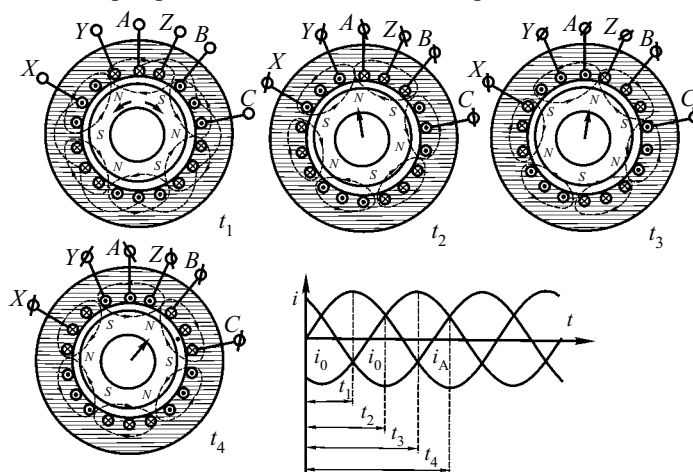


Рис. 64. Схема шестиполюсной обмотки статора

В течение одного периода T переменного тока магнитное поле повернется на двойное полюсное деление (2τ), где $\tau = \frac{\pi D^2}{2p}$. Полный оборот вращающегося поля делает за p периодов. Отсюда за секунду поле совершает n_1 оборотов:

$$n_1 = \frac{f \times 60^\circ}{p}$$

Для того чтобы изменить направление вращения двигателя, т. е. совершить реверсирование, нужно изменить соединения обмотки статора с сетью. Данное изменение соединений осуществляется с помощью трехполюсного переключателя (рис. 65).

Часто обмотку делают двухслойной, т. е. в каждый паз укладывают стороны двух секций, при этом одна сторона секции на-

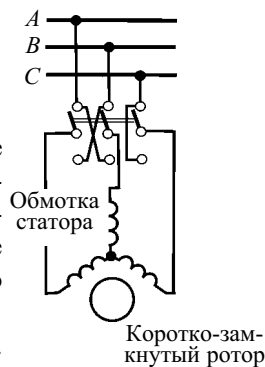


Рис. 65. Реверсионный двигатель

ходится в верхнем слое, а вторая — в нижнем слое. Двухслойную обмотку выполняют из намотанных на станке шаблонных секций.

Для того чтобы вставить ротор, головки катушек отгибают в сторону. Отогнутые стороны катушек, которые лежат на торцевых сторонах, используются в качестве лобовых соединений обмотки. Они предназначены для соединения активных сторон витков обмотки. Магнитные линии, которые замыкаются вокруг них, образуют основную часть потока рассеяния статора. Поэтому лобовые соединения должны быть как можно короче.

Схематичное изображение трех фаз обмотки четырехполюсной машины, которые развернули на плоскость, показана на рисунке 66. Катушечные группы состоят из трех секций. Так как лобовые соединения отдельных фаз обмотки пересекаются между собой, их изготавливают разной длины. Начала фазных обмоток обозначаются буквами *A*, *B* и *C*, а концы — *X*, *Y*, *Z*. Проводники, которые соединяют отдельные секции фазных катушечных групп, на схеме изображены более тонкими линиями.

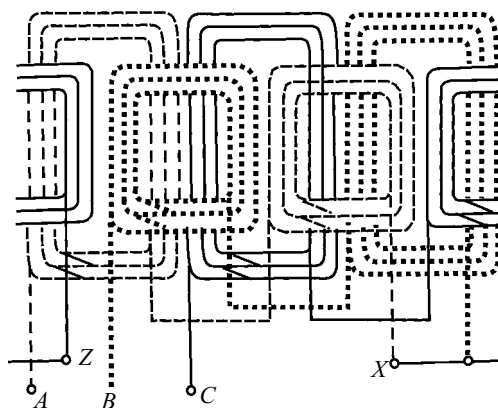


Рис. 66. Развернутая схема обмоток

4. Векторные диаграммы двигателя

Работающий асинхронный двигатель имеет частоту в цепи ротора, которая в несколько раз меньше частоты в цепи статора. Поэтому при построении векторных диаграмм э. д. с и ток ротора невозможно изобразить векторами на одной диаграмме с напряжениями и токами статора.

Иногда в случае, если ротор не вращается, его частота равна частоте сети, которая питает статор. В этом случае можно построить векторную диаграмму (рис. 67), которая напоминает диаграмму нагруженного трансформатора. Ее строят для одной фазы двигателя, и в качестве исходного принимается вектор Φ_6 магнитного потока вращающегося магнитного поля. По отношению к этому вектору векторы э. д. с. статора \dot{E}_1 и ротора \dot{E}_2 отстают на $\pi / 2$. В короткозамкнутом роторе электродвижущая сила создает ток

$$I_2 = \frac{E_{2f}}{\sqrt{R_2^2 + (\omega L_2)^2}}.$$

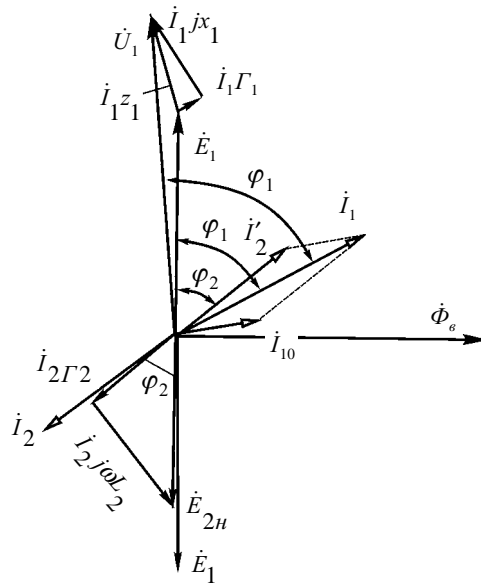


Рис. 67. Диаграмма для неподвижного ротора

Угол между этим током и э. д. с. E_{2H} определяется соотношением:

$$\psi_2 = \arctg \frac{\omega L_2}{R_2}.$$

Ток ротора I_2 соответствует в обмотке статора компенсирующему приведенному току

$$\dot{i}'_2 = \frac{-\dot{I}_2 m_2 \omega_2 k_{i\dot{a}2}}{3\omega_1 k_{i\dot{a}1}},$$

вектор которого противоположен по направлению вектору I_2 . Вектор тока \dot{I}_{10} опережает вектор потока из-за влияния неподвижного ротора гистерезиса и вихревых токов на угол α , который называется **углом магнитного запаздывания**. Ток статора определяется как векторная сумма этих двух токов:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}'_2 + \dot{I}_{10}.$$

Напряжение статора определяется из уравнения:

$$\dot{U}_1 = (-\dot{E}_1) + \dot{I}_1 Z_1 = (-\dot{E}_1) + \dot{I}_1 R_2 + \dot{I}_1 jx_1.$$

При построении вектора напряжения к вектору $(-\dot{E}_1)$ прибавляется вектор $\dot{I}_1 R_1$, который параллелен вектору \dot{I}_1 . Вектор \dot{I}_1 отстает от вектора $\dot{I}_1 jx_1$ на 90° . Вектор \dot{U}_1 замыкает в диаграмме перечисленные векторы.

Для построения векторной диаграммы работающего двигателя необходимо различить частоты цепи статора (f) и цепи ротора ($f_2 = fs$).

Обычно строятся две отдельные диаграммы для цепи ротора и цепи статора. В обоих случаях начинают с вектора магнитного потока вращающегося поля.

В диаграмме ротора (рис. 67) положение вектора E_2 определяется тем, что он отстает от вектора потока Φ_v на $\pi / 2$. Для двигателя скольжение принимает значение $s = 0,2 - 0,4$, поэтому частота в цепи ротора мала, и значит, индуктивное сопротивление $s\omega L_2$ также имеет небольшое значение. Это определяет то, что угол между \dot{I}_2 и \dot{E}_2 также мал:

$$\psi_2 = \arccos \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (s\omega L_2)^2}}.$$

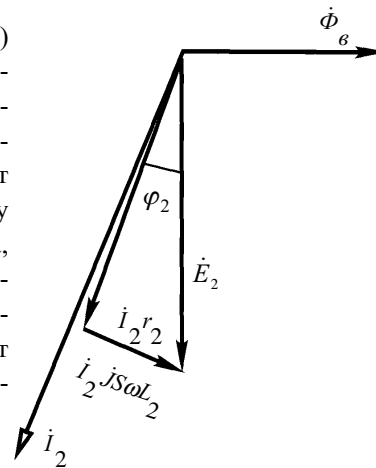


Рис. 68. Векторная диаграмма цепи ротора

На диаграмме статора вектор \dot{E}_1 отстает на 90° от вектора магнитного потока (рис. 69). Вектор намагничивающего тока I_{10} опережает вектор Φ_B на угол α . Направление вектора I'_2 определяем из взаимного положения векторов I_2 и Φ_B . Вектор I_2 отстает от Φ_B на $90^\circ + \psi_2$, т. е. вектор I'_2 опережает вектор магнитного потока на угол $180^\circ - 90^\circ - \psi_2 = 90^\circ - \varphi_2$. Вектор Φ_B отстает от вектора $(-\dot{E}_1)$ на 90° , значит, $(-\dot{E}_1)$ опережает вектор I'_2 на угол ψ_2 . Ток статора определяется соотношением:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}'_2 + \dot{I}_{10}.$$

Напряжение определяется как

$$\dot{U}_1 = (-\dot{E}_1) + \dot{I}_1 R_1 + \dot{I} j x_1.$$

Отдельные диаграммы статора и ротора не позволяют анализировать влияние механической нагрузки двигателя на его электрические характеристики. Это достигается путем рассмотрения трансформатора, энергетические соотношения в котором похожи на соотношения асинхронного двигателя. Для этого необходимо привести цепь ротора к частоте статора. Сила тока в роторе выражается соотношением:

$$I_2 = \frac{E}{\sqrt{R_2^2 + (s\omega L_2)^2}} = \frac{E_{2H}}{\sqrt{\frac{R_2^2}{s^2} + (\omega L_2)^2}}.$$

Разделим числитель и знаменатель выражения на скольжение s и получим в знаменателе в подкорневом выражении сумму индуктивного сопротивления ротора при частоте сети и активного сопротивления

$$\frac{R_2}{s} = R_2 + R.$$

Отношение E_2 / S заменяем на E_{2H} , которая во много раз больше.

В результате вращения ротора, кроме передачи энергии в обмотку ро-

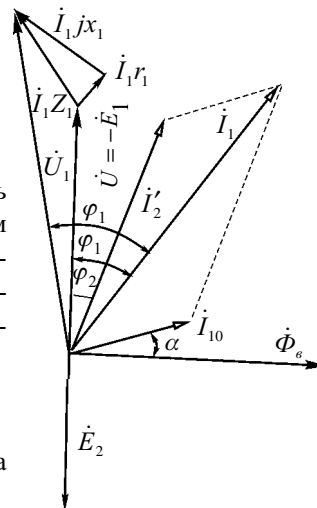


Рис. 69. Диаграмма статора

тора через взаимную индукцию, наблюдается переход электрической энергии в механическую. В результате приведения данные два преобразования были заменены простой трансформацией при неподвижном роторе. Однако обмотка ротора при этом условии эквивалентного трансформатора замкнута не накоротко, а на сопротивление R , которое соответствует механической нагрузке. Мощность, которую поглощает эта нагрузка $I_2^2 R$ соответствует механической мощности, которую развивает ротор в одной фазе, т. е. работающий асинхронный двигатель можно заменить эквивалентным неподвижным, для которого цепь ротора замкнута на активное сопротивление:

$$R = \frac{R_2}{s} - R_2 = \frac{R_2(1-s)}{s}.$$

При этом общую векторную диаграмму двигателя статора и ротора можно построить в том же порядке, что и для трансформатора или двигателя при заторможенном роторе. Начинается построение с вектора $\Phi_{\text{в}}$ (рис. 70), после чего под углом 90° — э. д. с. ротора, приведенного к условиям трансформатора $\dot{E}_{2\text{т}}$, как и э. д. с. статора \dot{E}_1 .

$\dot{E}_{2\text{т}}$ опережает вектор тока \dot{I}_2 на угол ψ_2 :

$$\psi_2 = \arctg \frac{\omega L_2}{R_2 + R} = \arctg \frac{s\omega L_2}{R_2},$$

который совпадает со сдвигом фаз при вращающемся роторе.

Вторичная цепь образуется активными сопротивлениями

$$R_2 + R = \frac{R_2}{s}$$

и индуктивным сопротивлением ωL_2 . То есть $E_{2\text{т}}$ можно разложить

на активную $\frac{I_2 R_2}{s}$ и реактивную

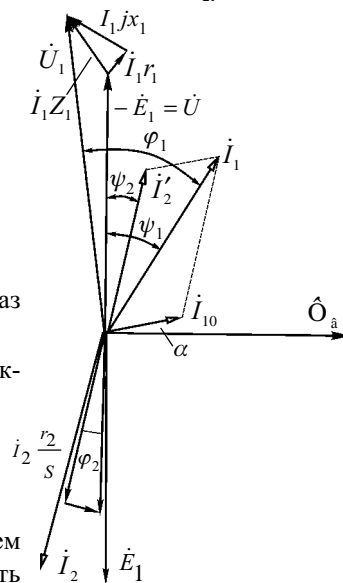


Рис. 70. Векторная диаграмма трансформатора, эквивалентного двигателю

составляющие $I_2\omega L_2$. Приведенный ток ротора определяется как вектор

$$I_2' = -\frac{\dot{I}_2 m_2 \omega_2 k_{ia2}}{3\omega_1 k_{ia1}}.$$

Этот вектор противоположен вектору \dot{I}_2 . Вектор тока статора определяется как $\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_{10}$. При построении вектора напряжения статора применяется уравнения:

$$\dot{U}_1 = (-\dot{E}_1) + \dot{I}_1 R_1 + \dot{I}_1 jx.$$

5. Эквивалентная схема двигателя

При расчетах рабочих процессов асинхронных двигателей удобно использовать эквивалентную схему двигателя (рис. 71). Она представляет собой несколько электрически соединенных активных и индуктивных сопротивлений и изменяющееся активное сопротивление, которое заменяет на эквивалентной схеме нагрузку вала двигателя. Обоснование эквивалентной схемы обеспечивается с помощью преобразования основных уравнений двигателя. Если учесть, что эквивалентную схему включают в сеть вместо статора, все роторные величины нужно привести к числу витков, обмоточному коэффициенту, а также числу фаз статора.

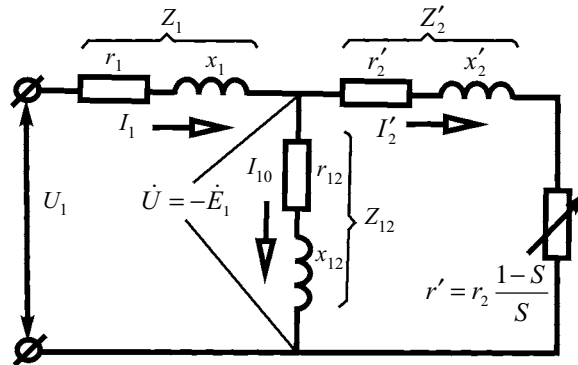


Рис. 71. Эквивалентная схема двигателя

Асинхронный двигатель — трехфазное устройство, в котором фазы являются симметричными. Следовательно, при состав-

влении эквивалентной схемы можно ограничиться одной фазой двигателя.

Электродвижущая сила (э. д. с.) статора E_1 связана с э. д. с. неподвижного ротора $E_{2н}$:

$$E_1 = \frac{E_{2н} \omega_1 k_{об2}}{\omega_2 k_{об2}} = E_{2н} k_{об},$$

где k_e — коэффициент трансформации напряжений асинхронной машины.

С учетом векторной диаграммы двигателя:

$$\dot{E}_{2н} = \dot{I}_2 \left(\frac{R_2}{s} + j\omega L_2 \right) = \dot{I}_2 (R_2 + R + j\omega L_2) = \dot{I}_2 Z_2 + \dot{I}_2 R,$$

отсюда

$$\dot{E}_1 = \dot{I}_2 (Z_2 + R) k_e.$$

Для тока ротора можно записать выражение через приведенный ток:

$$\dot{I}_2 = -\frac{\dot{I}'_2 3\omega_1 k_{об1}}{m_2 \omega_2 k_{об2}} = -\dot{I}'_2 k_i,$$

где k_i — коэффициент трансформации токов асинхронной машины.

В результате подстановки получаем:

$$\dot{E}_1 = -\dot{I}'_2 (Z_2 + R) k_e k_i.$$

Выражение $k_e k_i = k$ называется коэффициентом трансформации асинхронной машины.

Применим выражение для приведенных сопротивлений:

$$Z_2 k_e k_i = Z'_2 \text{ и } R k_e k_i = R'.$$

Данные сопротивления при включении в цепь статора потребляют такую же мощность, как и при соответствующих сопротивлениях, которые находятся в цепи ротора.

Подставляя в выражение для э. д. с. статора, получаем:

$$\dot{E}_1 = -i'(Z'_2 + R').$$

При этом напряжение статора находится соотношением:

$$\dot{U}_1 = (-\dot{E}_1) + i_1 Z_1 = I_1 Z_1 + i'(Z'_2 + R').$$

Если учесть, что э. д. с. \dot{E}_1 пропорциональна току намагничивания \dot{I}_{10} , можно записать соотношение:

$$(-\dot{E}_1) = \dot{I}_{10} Z_{12},$$

где Z_{12} имеет размерность сопротивления и изображает в эквивалентной схеме магнитную цепь двигателя.

Отсюда получаем выражение для напряжения статора:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 Z_1 + \dot{I}_{10} Z_{12}.$$

Учтем также уравнение тока статора:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{10} + \dot{I}_2.$$

Если рассмотреть два уравнения напряжения статора на основании законов Кирхгофа для схемы на рисунке, то в ней Z'_1 — обмотка статора, Z'_2 — обмотка ротора, Z_{12} — магнитная цепь машины, R' — механическая нагрузка.

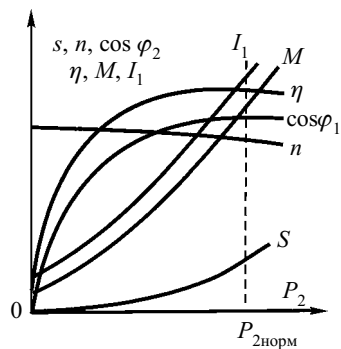
В случае синхронного вращения двигателя, т. е. когда $s = 0$, по нему проходит ток холостого хода I'_{10} и определяется из опыта холостого хода.

В этих условиях сопротивление, которое изображает механическую нагрузку, можно выразить соотношением:

$$R' = \frac{R_2}{s} - R_2 = R_2 \frac{1-s}{s} = \infty.$$

Когда происходит торможение двигателя, $s = 1$, поэтому $R' = 0$.

Поэтому опыт торможения двигателя называют опытом короткого замыкания, который осуществляется при понижении напряжения на статоре асинхронного двигателя.



6. Рабочие характеристики двигателя

С помощью механических характеристик можно показать свойства двигателя как части электропривода. Рабочие характеристики двигателя более полно выявляют свойства самого двигателя. К ним относят зависимость частоты вращения n , мощности

Рис. 72. Рабочие характеристики P_2 , которую отдает двигатель на вал, вращающих моментов M и т. д.

Для снятия рабочих характеристик применяются цепи с номинальными частотами сети f и напряжениями на статоре U .

Вращающий момент M , который развивает двигатель, получается при сложении полезного момента M_2 , который отдается валу двигателя, и момента холостого хода M_0 , который затрачивается на механические потери двигателя. M_0 приближенно считают не зависящим от нагрузки двигателя. Для полезного момента $M_2 = F(P_2)$, т. е. при постоянной скорости вращения двигателя зависимость является линейной. Но в реальных условиях M_2 отклоняется вверх. Для построения кривой $M = F(P_2)$ необходимо сложить момент холостого хода и полезный момент. Она пересечет ось ординат в точке M_0 , после чего почти прямолинейно направляется вверх (рис. 72).

Для выяснения зависимости $\cos \varphi_1$ двигателя от нагрузки необходимо учесть некоторые соотношения. Ток намагничивания двигателя почти не зависит от нагрузки, поскольку ее увеличение приводит к возрастанию только потоков рассеяния, которые пропорциональны токам статора и ротора. При этом главный магнитный поток двигателя при увеличении нагрузки слабо уменьшается, а активный ток двигателя зависит от его механической нагрузки. Следовательно, увеличение нагрузки двигателя приводит к убыванию относительного значения реактивного тока. При этом $\cos \varphi_1$ увеличивается. В режиме холостого хода двигателя его коэффициент мощности низок. Увеличение нагрузки приводит к его увеличению до максимальных значений (0,7—0,9), когда нагрузка близка к номинальной, т. е. даже полностью загруженный двигатель обладает реактивным током, который составляет 70—40% тока статора.

Магнитный поток двигателя прямо пропорционален напряжению на статоре. Намагничивающий ток, который возбуждает этот поток, при известном значении потока обратно пропорционален магнитному сопротивлению на пути потока. В данном магнитном сопротивлении основную часть составляет сопротивление воздушных зазоров между статором и ротором. Поэтому величину воздушных зазоров стремятся уменьшить, что положительно влияет на величину коэффициента мощности.

Для нахождения коэффициента полезного действия применяется формула:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

При этом подводимую мощность находят как сумму полезной мощности и мощностей всех потерь двигателя:

$$P_1 = P_2 + P_{\text{пот}}.$$

Потери принято разделять на постоянные, которые почти не зависят от нагрузки, и переменные, которые от нее зависят.

Постоянные потери — потери в стали сердечника статора на гистерезис и вихревые токи, а также на механические потери. Для их определения применяют опыт холостого хода двигателя.

Переменные потери — потери на нагревание проводников в статоре и роторе:

$$P_{\text{пр1}} = 3I_1^2 R_1; \quad P_{\text{пр2}} = m_2 I_2^2 R_2.$$

Переменными потерями считают и добавочные потери, возникающие при изменении вращения ротора относительно положения зубцов статора и ротора. Для данных потерь применяют скос пазов ротора относительно пазов статора.

КПД является максимальным при условии, что переменные потери равны постоянным. Максимальный КПД асинхронной машины составляет примерно 75%.

7. Пуск в ход двигателей

Пусковые свойства являются важной характеристикой электродвигателей. Они определяются пусковыми токами $I_{\text{п}}$ и начальными

ми пусковыми моментами $M_{п.нач}$, плавностью и экономичностью пуска и продолжительностью.

Кратность пусковых величин ($\frac{I_{п}}{I_{ном}}$ и $\frac{M_{п.нач}}{M_{ном}}$) приводится

в каталогах.

Пусковые свойства асинхронных двигателей зависят от его конструкции и устройства ротора.

Чаще всего применяют прямой пуск двигателей с короткозамкнутым ротором, который является простым и быстрым. В этом случае применяется простой коммутирующий аппарат, который представляет собой рубильник (для двигателя высокого напряжения — масляный выключатель). При прямом пуске пусковой ток превышает номинальный в 5,5—7 раз. Подобная перегрузка тока относительно безопасна для двигателя, но приводит к увеличению потери напряжения в сети и может отрицательно повлиять на других потребителей энергии.

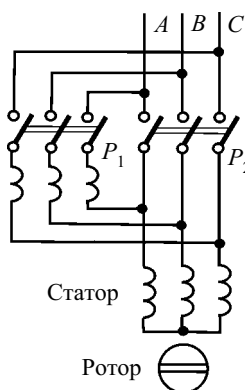


Рис. 73. Схема пуска

Также важно, что у двигателей с короткозамкнутым ротором кратность пускового момента находится в пределах 1,0—2,0. Следовательно, такие двигатели в момент пуска потребляют большую силу тока, развивая при этом малый вращающий момент.

Для улучшения пуска асинхронного двигателя необходимо уменьшить пусковой толчок тока и при этом увеличить пусковой момент.

Уменьшение пускового тока достигается понижением напряжения на зажимах статора, для чего включаем последовательно к обмотке статора трехфазное индуктивное сопротивление (рис. 73).

Для запуска нужно замкнуть рубильник P_1 , что обеспечивает последовательное соединение реактивной катушки и двигателя. Если скорость двигателя ста-

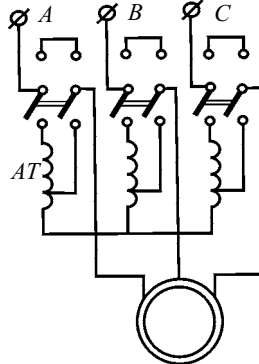


Рис. 74. Схема пуска автотрансформатором

новится равной номинальной, происходит замыкание рубильника P_2 , в результате чего катушка закорочивается и статор включается на полное напряжение сети. В результате уменьшения пускового тока создается пониженное напряжение на статоре, которое вызывает уменьшение пускового момента, что порой бывает недопустимым.

В пусковой схеме вместо индуктивного иногда применяется активное сопротивление реостата. Однако это несет за собой большие потери.

Пуск мощных двигателей часто осуществляется с помощью автотрансформатора (рис. 74). Автотрансформатор при пуске предназначен для снижения фазного напряжения $\dot{U}_{\text{ф}}'$ двигателя и пускового тока:

$$I_{\text{п.дв}} = \frac{U}{kz},$$

при этом ток сети $I_{\text{л}} = \frac{I_{\text{п.дв}}}{k} = \frac{U}{k^2 z},$

где z — сопротивление фазы двигателя;

U — фазное напряжение сети.

В результате получается снижение напряжения автотрансформатором в k раз, уменьшение пускового тока в сети в k^2 раз. Недостатком автотрансформатора является дороговизна производства.

Снизить напряжение на статоре в момент пуска можно, если на время пуска переключить обмотки статора (которая в норме работает при соединении треугольником) на соединение по схеме «звезда». Этот метод применяется при пуске короткозамкнутых двигателей небольшой мощности, которые работают нормально с соединением обмоток по схеме «треугольник». В момент пуска обмотка статора соединяется звездой, в результате чего фазное напряжение и пусковой ток уменьшается в $\sqrt{3}$ раз:

$$I_{\text{п.дв}} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}z},$$

где $U_{\text{л}}$ — линейное напряжение.

Линейные токи звезды равны фазным, поэтому $I_{л\lambda} = I_{п.дв} = \frac{U_{\lambda}}{\sqrt{3}z}$.

При соединении обмотки треугольником $I_{л\Delta} = \sqrt{3}I_{п.дв} = \frac{\sqrt{3}U_{\lambda}}{z}$

Можно видеть, что от применения данного способа пусковой ток уменьшается в 3 раза.

Переключение с треугольника на звезду производится с применением трехполюсного переключателя (рис. 75) или барабанного переключателя.

Пусковые условия двигателя можно улучшить, усложняя конструкцию и обслуживание двигателя. Таким способом осуществляется пуск асинхронного двигателя с фазной обмоткой ротора. Это осуществляется, например, применением пусковых реостатов.

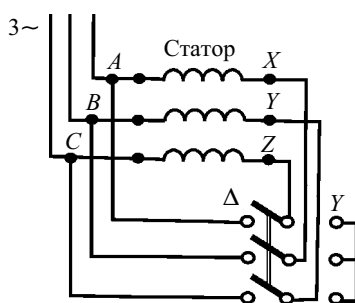


Рис. 75. Пуск переключением

Еще одним способом улучшения пусковых свойств является использование асинхронных двигателей с двойной беличьей клеткой. В этих двигателях короткозамкнутая обмотка ротора изготовлена в форме двойной беличьей клетки. Стержни нижних клеток имеют большее сечение, благодаря чему активное сопротивление верхней клетки намного больше активного сопротивления нижней клетки (в 4—5 раз).

Стержни клеток размещают в верхней и нижней частях паза, при этом между стержнями наружной и внутренней клеток оставляют узкую щель, высоту и ширину которой определяют поток рассеяния нижней клетки и ее индуктивность. Индуктивность

нижней клетки велика за счет того, что стержни клетки окружаются сталью, которая прорезана только сверху. Индуктивность верхней клетки меньше, потому что поток рассеяния возле нее испытывает на себе большое магнитное сопротивление воздушного пространства между ротором и статором и щели паза под стержнями.

Во время пуска двигателя ($s = 1$) частота тока ротора равна частоте сети, при этом полное сопротивление внутренней клетки образуется ее индуктивным сопротивлением, т. е. в момент пуска двигателя в роторе происходит вытеснение тока из внутренней беличьей клетки. При этом полное сопротивление внешней клетки в основном является активным, и поэтому ток внутренней клетки является преимущественно реактивным. Он отстает по фазе от э. д. с. и практически не участвует в образовании вращающего момента. Ток наружной клетки в момент пуска мало сдвинут по фазе к э. д. с. и создает значительный пусковой момент.

Двигатели с двойной беличьей клеткой имеют активное сопротивление обмотки ротора, изменяющееся в зависимости от скольжения, которое велико при пуске и мало при рабочем режиме. Благодаря такой конструкции ротор с двойной беличьей клеткой имеет повышенный пусковой вращающий момент при понижении пускового тока.

8. Методы регулирования частоты вращения двигателей

Частота вращения асинхронного двигателя определяется скоростью вращения магнитного поля и числом полюсов.

Существуют два основных способа регулировать частоту вращения асинхронного двигателя: включение резисторов в цепь фазного ротора, изменение количества полюсов, образующих вращающееся магнитное поле.

Для осуществления первого способа применяются двигатели с фазными роторами. При этом в цепь двигателя вводят трехфазный реостат, который должен быть рассчитанным на длительную нагрузку током ротора. При увеличении активного сопротивления цепи изменяется характеристика $M = F(s)$ — она становится более пологой. Если, не изменяя момента на валу двигателя, уве-

личить сопротивление цепи ротора постепенным увеличением сопротивления реостата, рабочая точка сместится с одной кривой $M = F(s)$ на другую, которая соответствует увеличенному сопротивлению цепи ротора, т. е. будет расти скольжение, и поэтому снизится частота вращения двигателя. Таким способом изменится частота вращения ротора от номинального скольжения до абсолютной остановки. Недостатком способа являются слишком большие потери энергии. Для мощности вращающегося поля справедлива формула:

$$P_{\text{вр}} = \frac{\omega M}{p},$$

которая не зависит от скольжения при неизменном моменте. Эта мощность тратится на потери в проводах ротора:

$$P_{\text{пр2}} = P_{\text{вр}} s$$

и механическую мощность:

$$P_{\text{мех}} = \frac{P_{\text{вр}}}{1-s}.$$

Зная отношение этих величин:

$$\frac{P_{\text{пр2}}}{P_{\text{мех}}} = \frac{s}{1-s} = \frac{n_1 - n}{n},$$

можно сделать вывод, что доля механической мощности уменьшается с уменьшением частоты ротора, при этом возрастает величина потерь в сопротивлениях цепи ротора. Мощность, которую забирает двигатель из сети, не изменяется, т. е. для уменьшения скорости вращения двигателя необходимо включить в цепь ротора сопротивление, которое вынуждает превращаться в тепло большую часть энергии.

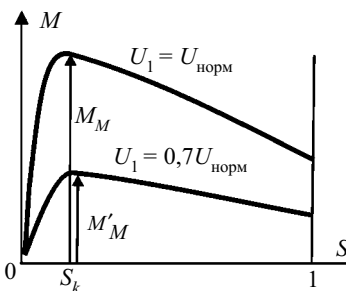


Рис. 76. Зависимость скорости от напряжения

Среди недостатков данного способа является то, что включение сопротивления уменьшает устойчивость работы двигателя, поскольку небольшое изменение нагрузки приводит к значительным изменениям частоты вращения двигателя.

Для плавного регулирования частоты вращения двигателя в цепи изменяют напряжение на зажимах статора. Такой вид регулирования применим к двигателям с короткозамкнутым ротором. Если учесть, что вращающий момент двигателей прямо пропорционален квадрату напряжения, координата механической

характеристики уменьшается в отношении $\left(\frac{U_1}{U_n}\right)$, как изобра-

жено на рисунке 76. Скачкообразное изменение скоростей вращения двигателя возможно осуществлением усложнением конструкций асинхронных двигателей. Оно связано с переключением числа полюсов двигателей.

Скорость вращения поля определяется количеством полюсов этого поля. При размещении на статоре двух отдельных обмоток с p и p' парами полюсов, включая в сеть первую или вторую обмотку, скорость поля будет составлять:

$$n_1 = \frac{60f}{p} \text{ или } n'_1 = \frac{60f}{p'}$$

откуда получаем:

$$\frac{n_1}{n'_1} = \frac{p'}{p}$$

Подобным образом будут отличаться и частоты вращения ротора двигателя. Обмотку ротора двигателя в этом случае нужно выполнить в форме беличьего колеса, для которого количество фаз изменяется с изменением числа полюсов поля:

$$m_2 = \frac{N}{p} \text{ и } m'_2 = \frac{N}{p'}$$

где N — число стержней беличьего колеса.

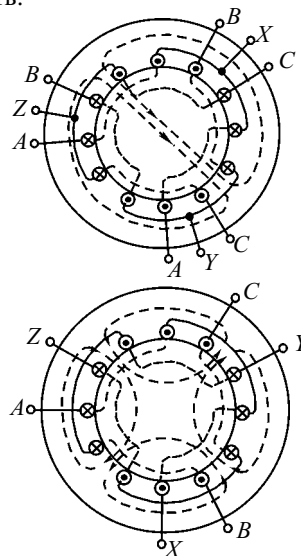


Рис. 77. Изменение числа полюсов переключением обмоток

При этих условиях количество полюсов обмоток статора ничем не связано и выбирается любым в зависимости от условий работы двигателя. Регулирование при этом осуществляется скачкообразным изменением частоты вращения поля двигателя. Однако частоту вращения ротора нельзя изменить скачкообразно вследствие наличия инерции всей системы электропривода. Только после переключения наступает изменение частоты вращения ротора. На рисунке 77 показано изменение числа полюсов с двух на четыре.

Еще одним методом управления частотой вращения асинхронного двигателя является изменение частоты переменного тока, который питает двигатель. Скорость вращения поля находится по формуле:

$$\omega_i = \frac{2\pi f}{p}$$

поэтому изменение частоты приводит к изменению угловой скорости поля. При таком способе важно учитывать, что необходимо одновременно регулировать и напряжение. Часто необходимо чтобы изменение частоты вращения двигателя не сопровождалось изменением его вращающего момента. Для номинальных значений тока и магнитного потока справедливо выражение:

$$U_1 \approx 4,44f\omega_1 k_{об1} \Phi_e.$$

При этом условии активные материалы двигателя полностью используются. Значит, изменение частоты должно сопровождаться поддержанием вращающего момента постоянным, что осуществляется изменением напряжения на зажимах статора.

9. Двухфазные и однофазные двигатели

Для некоторых механизмов нужны двигатели переменного тока, которые питаются от одной фазы трехфазной системы, т. е. посредством только двух проводов. Для этих целей используют асинхронные бесколлекторные двигатели и коллекторные двигатели переменного тока.

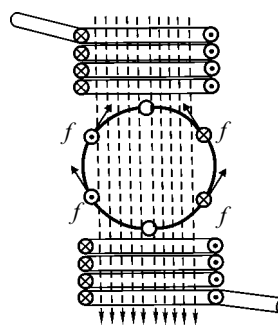


Рис. 78. Силы, действующие на проводник

В случае, если статор двигателя имеет только одну однофазную обмотку, протекающий по ней переменный ток возбуждает в машине переменное магнитное поле. Данное поле способно индуцировать в обмотке ротора токи, и взаимодействие индуцированных токов с магнитным полем будет создавать электромагнитные силы, которые имеют противоположные направления. Результирующий момент, который действует на ротор, будет равен нулю, т. е. при наличии одной обмотки двигатель не будет вращаться (рис. 78).

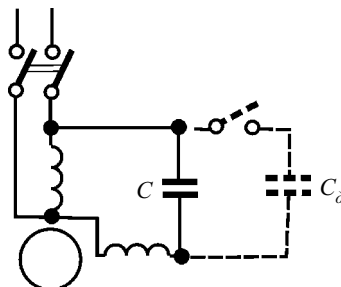


Рис. 79. Схема соединения конденсаторного двигателя

Для создания начального пускового момента используются два способа, в соответствии с чем двигатели разделяют на двухфазные и однофазные.

Двухфазные двигатели, кроме обмотки, которая включена непосредственно в сеть, снабжаются второй обмоткой, которая соединена последовательно с одним из фазосдвигающих устройств (конденсатором, реактивной катушкой).

Наиболее удобно для этой цели использовать конденсатор (рис. 79). Такие двигатели называются конденсаторными. В пазы статора таких двигателей укладываются две фазные обмотки, каждая из которых занимает половину всех пазов. Таким способом достигается условие получения вращающего момента через индукционный механизм — присутствие двух изменяющихся магнитных потоков, которые не совмещены в пространстве, сдвинуты по фазе относительно друг к другу.

Недостатком такого двигателя являются пульсации тока, что приводит к уменьшению вращающего момента. Этот недостаток устраняется путем усложнения установки — отключения части емкости при условии перехода от пусковых условий к рабочим.

В качестве двухфазных конденсаторных двигателей можно использовать малый трехфазный асинхронный двигатель.

Для этого две фазные обмотки соединяют последовательно и включают непосредственно под напряжение, а третьи фазные обмотки соединяют последовательно с конденсатором и включают под то же напряжение.

Применение двухфазных двигателей чаще всего связано с автоматическими устройствами. Также их используют как управляемые двигатели: частоту их вращения или вращающий момент можно регулировать, изменяя величины или фазы напряжения одной из обмоток. Подобный двигатель вместо обычных короткозамкнутых роторов снабжается ротором в форме полого тонкостенного алюминиевого цилиндра, который вращается в небольшом воздушном зазоре между статором и неподвижным центральным. Такой двигатель с полым ротором обладает очень маленькой инерцией, что используется при регулировании производственных процессов. На рисунке 80 изображена зависимость частоты вращения подобного двигателя от напряжения на управляющей обмотке.

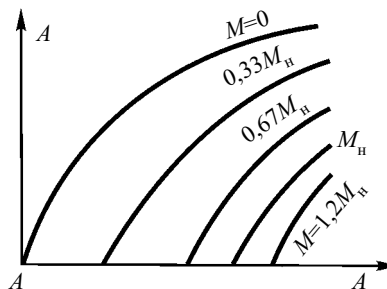


Рис. 80. Кривые частоты вращения

Однофазные двигатели не развивают пускового момента. Однако если раскрутить его ротор в любую сторону, то он сможет вращаться сам и будет способен развивать большой вращающий момент.

Подобные условия наблюдаются у трехфазного двигателя при перегорании предохранителей в одной из фаз. При этом трехфазный двигатель будет продолжать работать. Объяснить работу двигателя при однофазном возбуждении можно, зная, что переменное пульсирующее магнитное поле — это поле, созданное наложением двух магнитных полей, которые вращаются в противополож-

ные стороны с синхронной угловой скоростью $\frac{\omega}{p}$. Амплитудное значение магнитной индукции данных полей одинаковы и равны половине амплитуды индукции переменного поля агрегата:

$$B_{1m} = B_{2m} = \frac{B_m}{2}.$$

С помощью графического построения (рис. 81) можно показать, как в результате сложения двух одинаковых по длине век-

торов, которые вращаются в противоположные стороны, можно получить синусоидально изменяющийся вектор. Индукция распределена синусоидально вдоль полюсного деления машины и при этом является синусоидальной функцией времени:

$$B_x = B_m \sin \omega t \sin \frac{\pi}{\tau} x$$

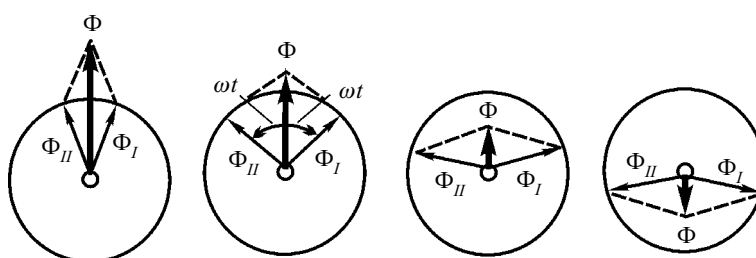


Рис. 81 Разложение переменного поля на два поля, вращающегося в противоположных направлениях

Применим формулу произведения синусов и получим выражение индукции в виде двух одинаковых магнитных волн, которые бегут вдоль окружности машины в противоположные стороны:

$$B_x = \frac{B_m}{2} \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x \right) + \frac{B_m}{2} \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x \right)$$

Для однофазного двигателя это положение справедливо при условии, что ротор неподвижен. Рассматривая при этом переменное поле, которое складывается из двух вращающихся полей, можно сделать вывод, что оба эти поля индуцируют в обмотке ротора равные по силе токи. Данные токи взаимодействуют только с индуцирующими их полями и создают два равных вращающихся момента, которые направлены в противоположные стороны, благодаря чему взаимно уравновешивают друг друга.

Равенство этих двух моментов нарушается в случаях, когда ротор начинает вращаться. При этом вращающийся момент, который создается прямо вращающимся полем, приобретает большую величину, а ротор может не только самостоятельно вращаться, но и вращать некоторый механизм.

ЛЕКЦИЯ № 11. Машины постоянного тока

1. Общие сведения

В состав некоторых электрических машин входит коллектор, который представляет собой полый цилиндр, набранный из изолированных клинообразных медных пластин. Пластины коллектора изолируют от вала машины. Для соединения с витками обмотки, которые размещены в пазах ротора, применяются проводники. В коллекторных щеткодержателях помещаются неподвижные щетки, служащие для соединения с внешней цепью вращающейся обмотки.

Коллекторы применяются в генераторах постоянного тока. Они предназначены для выпрямления переменной э. д. с., которая индуктируется по вращающейся обмотке. В двигателях постоянного тока коллектор применяется для образования постоянного тока по направлению вращающего момента.

При применении коллектора в двигателях переменного тока проявляются ценные свойства двигателей постоянного тока: возможность плавно и в широких пределах регулировать скорость вращения; коллекторные генераторы переменного тока позволяют получать переменный ток постоянной частоты при переменной частоте вращения первичного двигателя.

Коллекторный однокорный преобразователь применяется в качестве преобразователя переменного тока в постоянный, или постоянного тока — в переменный, или для изменения частоты переменного тока.

В некоторых специальных установках используют каскадное соединение коллекторных машин с бесколлекторными крупными асинхронными двигателями, что позволяет плавно и экономично регулировать частоту вращения и коэффициент мощности данных двигателей.

Но присутствие коллектора удорожает машину, усложняет ее эксплуатацию и уменьшают надежность.

2. Устройство машины постоянного тока

В состав машины постоянного тока входят неподвижная часть, которая служит для возбуждения главного магнитного поля, и вращающаяся часть, которая индуцирует э. д. с. и токи, создает тормозящий момент в генераторе и вращающий момент в двигателе.

Неподвижную часть иногда называют **статором**, и она состоит из станины (рис. 82) с укрепленными в ней основными полюсами возбуждения главного магнитного потока и дополнительными полюсами для лучшей коммутации машины.

Главный полюс содержит сердечник, набранный из листов электротехнической стали и укрепленный болтами на станине, а также катушку обмотки возбуждения. На свободном конце сердечника укрепляются полюсные наконечники для равномерного распределения магнитной индукции по окружности якоря.

Станина играет роль ярма машины, т. е. она замыкает магнитную цепь главного потока (рис. 83). Ее изготавливают из литой стали, так как магнитный поток в ней относительно постоянен.

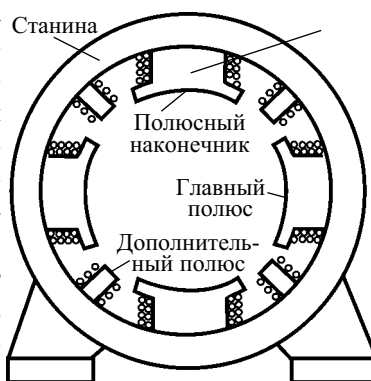


Рис. 82. Станина

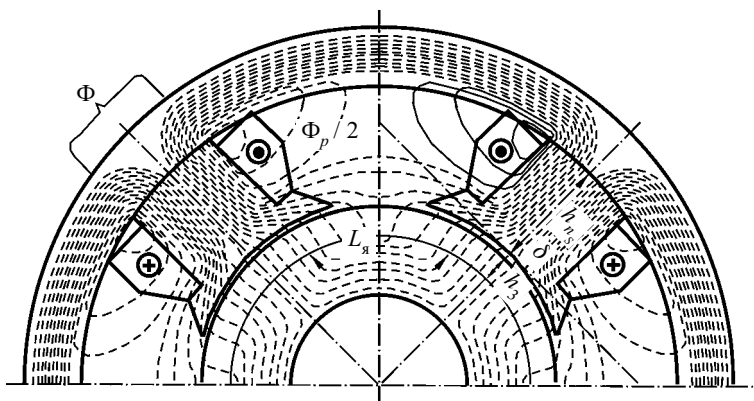


Рис. 83. Магнитная цепь машины переменного тока

На станине между основными полюсами помещаются дополнительные, сердечники которых крепятся болтами к станине, а катушки их обмоток соединяются последовательно с якорем.

Якорь — часть машины, в обмотке которой при вращении ее относительно главного магнитного поля индуцируется э. д. с. Якорь в машинах постоянного тока имеет в составе зубчатый сердечник, обмотку, которая уложена в пазах сердечника, и коллектор, который насажен на вал якоря. Сердечник состоит из листов электротехнической стали, изолированных друг от друга. В пазах сердечника якоря располагается обмотка якоря, которая обычно состоит из отдельных секций. Для отведения тока от коллектора применяют угольные или медные щетки, которые устанавливают в щеткодержателях. Щетка прижимается к коллектору пружиной. Ток от щетки отводят через специальный гибкий кабель. Щеткодержатели надевают на щеточную траверсу, от которой они изолируются. Траверсу устанавливают на подшипниках машины, и она способна поворачиваться и при этом изменять положение щеток по отношению к полюсам машины.

Машина постоянного тока является обратимой, т. е. она работает в режиме генератора, когда ее вращает двигатель. При этом главное магнитное поле возбуждается, а цепь якоря замкнута через щетки на нагрузку. В таких условиях обмотка якоря индуцирует э. д. с., посылающую ток через коллектор и щетки во внешнюю цепь. Внутри машины взаимодействует ток якоря с главным магнитным полем, в результате чего создается тормозящий момент, который должен преодолевать первичный двигатель. Таким образом, машина из механической энергии получает электрическую.

Если цепь якоря и цепь возбуждения машины присоединить к источнику, то напряжение создает ток в обмотках машины и ток якоря, которые при взаимодействии с главным магнитным полем формируют вращающий момент. Под его действием якорь приходит во вращение, т. е. машина работает в режиме двигателя.

По способу возбуждения главного магнитного поля машины постоянного тока разделяют на группы.

Машины независимого возбуждения имеют обмотку возбуждения, которая получает ток от независимого источника (рис. 84). При этом сила тока возбуждения не зависит от напряжения на зажимах якоря машины. При выборе сечений проводов обмотки возбуждения необходимо учитывать напряжение источника тока

возбуждения. Для таких машин характерна независимость главного магнитного потока от нагрузки машины.

Машины параллельного возбуждения обладают цепью обмотки возбуждения, которая соединяется параллельно с цепью якоря (рис. 85). При такой схеме возбуждения ток $I_{\text{в}}$ в несколько раз меньше силы тока якоря, и напряжение U на зажимах цепей якоря и возбуждения сохраняется, т. е. сопротивление обмотки возбуждения

$$\left(R_{\text{в}} = \frac{U}{I_{\text{в}}} \right) \text{ должно принимать большое значение.}$$

В обмотке возбуждения такой машины содержится большое число витков тонкого провода, и поэтому его сопротивление значительно. В машинах параллельного возбуждения главный магнитный поток является независимым.

Машины последовательного возбуждения обладают полным током якоря, который проходит через обмотку возбуждения (рис. 86). По этой причине для обмотки используется провод большого сечения. Обмотка последовательного возбуждения имеет большую силу тока $I_{\text{я}}$, поэтому для получения намагничивающей силы ($I\omega$) достаточно небольшого числа витков, которые обладают небольшим сопротивлением. В таких машинах изменения главного магнитного потока возможны в широких пределах при изменениях нагрузки машины. Это является следствием изменений силы тока якоря, являющегося одновременно и током возбуждения.

Машины смешанного возбуждения имеют по две катушки на каждом полюсном сердечнике. При этом одна из них входит в обмотку возбуждения, которая включена параллельно якорю, а вторая — в обмотку, которая включена последовательно с якорем (рис. 87).

При этом одна обмотка является основной, намагничивающая сила возбуждает главное

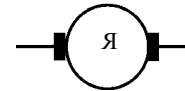


Рис. 84. Схема независимого возбуждения

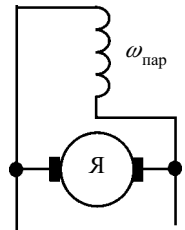


Рис. 85. Схема параллельного возбуждения

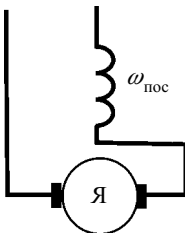


Рис. 86. Схема последовательного возбуждения

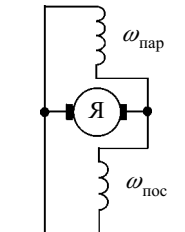


Рис. 87. Схема смешанного возбуждения

магнитное поле, а вторая воздействует на образовавшееся поле. По виду преобладания намагничивающей силы последовательной или параллельной обмотки можно выделить машины последовательного возбуждения с небольшой параллельно обмоткой возбуждения и машины параллельного возбуждения с небольшой последовательной обмоткой возбуждения. Во многих машинах смешанного возбуждения применяют согласное соединение, при котором намагничивающая сила обмоток складывается.

3. Выпрямление переменной э. д. с. посредством коллектора и щеток

Э. д. с., которая индуцируется в обмотках, имеет вид:

$$e = -\frac{d\psi}{dt}.$$

Таким образом при продолжительном процессе э. д. с. должна быть переменной, так как потокосцепление не может возрасти неограниченно, а при убывании э. д. с. меняется знак производной. Поэтому во вращающейся обмотке машины индуцируется переменная э. д. с., для выпрямления которой необходим коллектор. Выпрямление этой э. д. с. можно проследить на примере устройства кольцевого якоря.

Сердечник кольцевого якоря выполнен в виде полого цилиндра (рис. 88), который собран из пластин электротехнической стали. Обмотка кольцевого якоря обвивает цилиндр и образует замкнутый контур из большого числа витков. Главные полюсы образуют магнитный поток, который проходит по сердечнику якоря, не проходя во внутреннюю полость цилиндра якоря. Поэтому при вращении якоря магнитное поле воздействует только на проводники обмотки, которые лежат на внешней поверхности якоря, и э. д. с. индуцируется только в них. По правилу правой руки

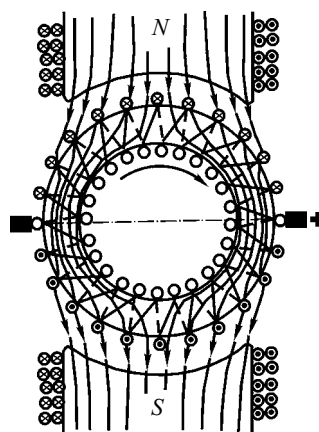


Рис. 88. Схема кольцевого якоря с обмоткой

определяем, что э. д. с., которые индуцируются в проводниках, лежат под разноименными полюсами, поэтому имеют противоположное направление. Вследствие симметричного построения машины э. д. с. не создают внутреннего уравнительного тока.

Для использования э. д. с. двух половин обмотки при рассмотрении двухполюсной машины можно наложить на якорь две неподвижные щетки, при этом освободив от изоляции ту часть поверхности проводников якоря, которая касается щеток при вращении якоря. Ставить щетки необходимо посередине между главными полюсами. Таким образом, обмотка разделяется на две параллельные ветви, которые являются двумя источниками э. д. с. Эти э. д. с. способны совместно посылать токи во внешнюю цепь. Э. д. с., образующиеся в витках параллельных ветвей обмотки, должны иметь одинаковые направления, которые зависят от направлений магнитного поля и вращения якоря. Щетки стоят между главными полюсами машины в области, где магнитная индукция является практически равной нулю (рис. 89). Данное пространство называется нейтральной зоной машины. По окружности якоря магнитная индукция будет распределяться в зависимости от магнитного сопротивления. Для равномерности распределения применяются полюсные наконечники. Когда щетки сдвинуты из нейтральной зоны, в одной и той же параллельной ветви помещаются секции с противоположным направлением э. д. с., поэтому напряжение между щетками уменьшается. Оно станет равным нулю при помещении щеток под срединами полюсов.

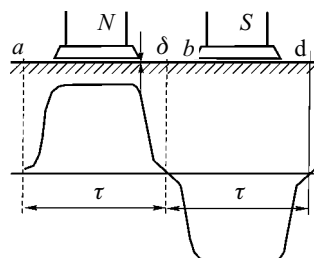


Рис. 89. Магнитная индукция

За счет щеток напряжение на зажимах машины является постоянным, несмотря на то что в каждом из проводников обмотки ее якоря индуцируется переменная э. д. с. Проводники, которые движутся непрерывно, переходят от северного к южному полюсу, поэтому направление индуцируемой в них э. д. с. изменяется. При этом по отношению к полюсам машины положение группы проводников остается постоянным. Одни проводники из этой группы уходят, но то же количество проводников в нее поступает.

Когда число пар полюсов машины больше 1, спиральная обмотка кольцевого якоря должна иметь увеличенное число щеток,

чтобы соединять параллельно все ветви обмотки. На рисунке 90 изображено такое соединение в случае четырехполюсной ($p = 2$) машины. Щетки с одинаковой полярностью соединены между собой так, чтобы образовались положительный и отрицательный полюсы обмотки якоря. В случае более сложных обмоток число параллельных ветвей $2a$ не обязательно должно соответствовать числу полюсов $2p$.

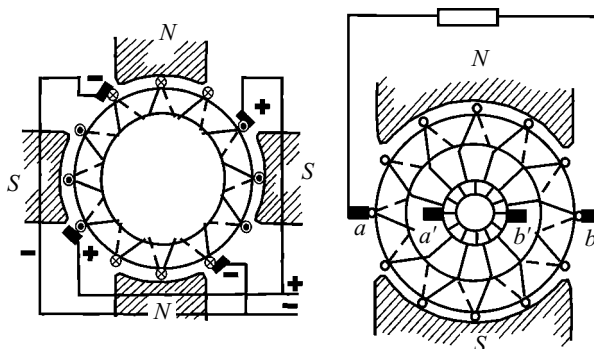


Рис. 90. Соединение якоря с коллектором

Рассмотренная схема машины не имела коллектора, так как его роль выполняла сама обмотка якоря. Однако при контакте щеток с обмоткой якоря условия работы контактов неблагоприятны вследствие высокой скорости на поверхности якоря. Такие контакты можно сделать надежнее, если перенести щетки на пластины коллектора. Пластины необходимо соединить проводниками (петушками) с соответствующими секциями якоря. Щетки соединяют параллельно ветви обмотки так же, как при прямом контакте с якорем. Так как диаметр коллектора намного меньше диаметра якоря, его окружная скорость значительно уменьшается. При этом пластины коллектора механически значительно прочнее проводников обмотки якоря.

В генераторах щетки и коллектор применяют для выпрямления переменной э. д. с. витков обмотки. В двигателях коллектор и щетки призваны обеспечивать непрерывность вращения. Через все проводники параллельной ветви обмотки якоря протекают

одинаковые токи $I = \frac{I_{\text{я}}}{2a}$. Когда на все эти проводники действует

электромагнитная сила одинакового направления, двигатель раз-

вивает максимальный вращающий момент. Если проводник переходит от одного полюса к другому полюсу, то и щетки, и коллектор производят переключение направления тока, проходящего по проводнику. За счет этих переключений направление вращающего момента сохраняется постоянным.

4. Реакция якоря

Реакция якоря — воздействие намагничивающей силы якоря на магнитное поле машины. Реакция якоря чаще всего признается нежелательным явлением, которое искажает основное магнитное поле и ухудшает условия работы машины. Поэтому при конструировании машины стремятся уменьшить влияние реакции якоря.

При прохождении тока по обмотке возбуждения ($I_{\text{я}} = 0$) магнитное поле машины является симметричным относительно оси сердечников полюсов и под полюсами почти равномерно. На рисунке 91а схематически показано поле двухполюсной ($p = 1$) машины.

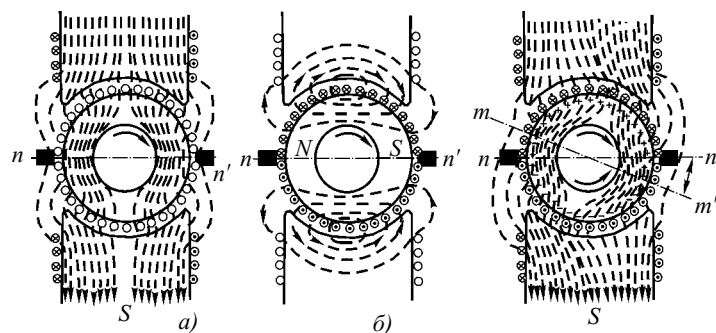


Рис. 91. Магнитное поле машины

Геометрической нейтралью $n - n'$ называется линия, которая перпендикулярна оси полюсов и разделяет на дуге якоря северный и южный полюсы. Геометрическая нейтраль является физической нейтралью, т. е. линией, которая проходит через такие точки окружности якоря, где магнитная индукция равна нулю.

В момент прохождения тока по обмотке якоря он становится электромагнитом (рис. 91б) с направлением оси по оси щеток. Ось поля якоря направлена перпендикулярно относительно оси

поля главных полюсов. При таких условиях поле якоря является поперечным.

Если нагрузить машину, реакция якоря воздействует на основное поле и создает результирующее поле. Характер этого поля изображен на рисунке 91в. В машине поток смещается в направлении ее вращения в генераторном режиме или против — в двигательном режиме. В этом случае поток распределен несимметрично относительно оси полюсов. Он ослабляется у одного края и усиливается у другого. При этом под влиянием реакции якоря физическая нейтраль $m - m'$ сместится относительно геометрической нейтрали и щетки.

Для того чтобы ослабить реакцию якоря в машинах, увеличивают магнитное сопротивление на пути потока якоря. Это обеспечивается созданием относительно большого воздушного зазора между якорем и полюсными наконечниками, а также выбором сечения зубцов якоря таким образом, чтобы увеличить их индукцию. При дальнейшем увеличении индукции происходит возрастание магнитного сопротивления зубцов, что соответствует увеличению воздушного зазора на пути потока якоря. Но для поддержания необходимого полезного потока в машине нужно соответственно увеличить намагничивающие силы главных полюсов, т. е. увеличить габариты и массу машины.

Еще одним способом уменьшения смещения физической нейтрали из-за реакции якоря является снабжение машины дополнительными полюсами, которые необходимы и для улучшения коммутации. Их устанавливают на станине машины по линии геометрической нейтрали (рис. 92). Обмотки этих полюсов соединяют через щетки последовательно с обмоткой якоря. При этом направление намагничивающей силы дополнительных полюсов должно быть противоположно направлению намагничивающих сил реакции якоря, т. е. дополнительные полюсы экранируют поле реакции якоря в небольшой зоне коммутируемых секций. Благодаря этому предупреждается смещение физической нейтрали относительно геометрической.

Так как намагничивающую силу дополнительных полюсов создает ток якоря, компенсация реакции якоря проис-

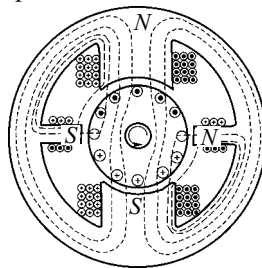


Рис. 92. Устройство дополнительных полюсов

ходит при любых нагрузках машины, при этом важно, чтобы магнитная цепь дополнительных полюсов не была насыщена.

Когда машина работает в режиме генератора, дополнительные полюсы должны иметь полярность тех главных полюсов, на которые набегает якорь, а при работе в режиме двигателя — полярность тех полюсов, из-под которых якорь выбегает.

С помощью дополнительных полюсов не устраняются создаваемые реакцией якоря неравномерное распределение индукции под полюсами и уменьшение полезного потока. В крупных машинах значительное повышение индукции под полюсами приводит к перекрытию изоляционного промежутка между пластинами коллектора и вызывает круговой огонь. Для предупреждения такой аварии нужно полностью компенсировать реакцию якоря. Для этого применяют компенсационные обмотки К (рис. 93).

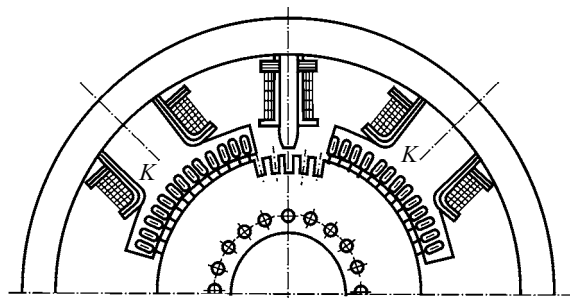


Рис. 93. Размещение компенсационной обмотки в пазах полюсных наконечников

При вращении якоря его магнитный поток остается неподвижным относительно станины машины. Поэтому можно компенсировать действие намагничивающей силы якоря действием неподвижной обмотки, которую размещают в пазах, выполненных в расширенных полюсных наконечниках главных полюсов. Компенсационную обмотку соединяют последовательно с якорем, и каждый ее стержень образует со стержнем обмотки якоря, который находится под стержнем, бифилярную систему, магнитное поле у которой почти отсутствует.

Компенсационную обмотку дополняют действием дополнительных полюсов, так как вместе они практически полностью компенсируют реакцию якоря. Но наличие компенсационной обмотки удорожает машину и увеличивает потери в ней.

5. Коммутация в машинах постоянного тока

Под щетками на коллекторе происходит искрообразование, способное вызвать быстрое разрушение коллектора из-за высокой температуры искры, которая способна разрушить металлы и сплавы. Поэтому для увеличения срока службы машины постоянного тока необходимо устранить искрение под щетками, так как искры быстро разрушают пластины коллектора и щетки.

Среди причин искрообразования можно выделить механические и электрические. Среди механических причин основной является ухудшение контакта коллектора со щетками, что возникает вследствие неровности коллектора, дрожания щеток и т. п.

Электрической причиной является неудовлетворительная коммутация. Коммутация — это совокупность явлений при изменении направления тока в секциях обмотки якоря в течение замыкания щетками этих секций на коротко.

Когда пластины коллектора с присоединенными к ним концами секции замкнуты щеткой на коротко, секция переходит из одной параллельной ветви обмотки в другую. Процесс коммутации можно рассмотреть на примере обмотки кольцевого якоря (рис. 94). Отрезок времени, когда секция обмотки вращающегося якоря замыкается щеткой, называется периодом коммутации T . В течение этого времени сила в секции изменяет направление на противоположное ($c + I$ до $-I$). С увеличением скорости вращения якоря и с уменьшением ширины щетки $b_{щ}$ период коммутации уменьшается:

$$T = \frac{b_{щ}}{v_k},$$

где v_k — круговая скорость коллектора.

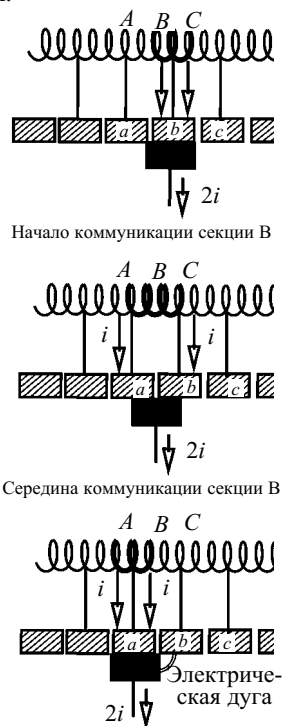


Рис. 94. Начало, середина и конец коммутирования секции обмотки

Если бы в секции коммутирования не происходило индукции, то процесс коммутации тока в секции был бы определен только соотношениями переходных сопротивлений контактов щетки с двумя пластинами коллектора. Одна пластина постепенно уходит из-под щетки, а вторая заходит под нее. Будем считать, что ширина щетки не превышает ширины одной коллекторной пластины, и не будем учитывать малые сопротивления проводников, которые соединяют обмотку якоря с коллектором.

В процессе коммутации щетка прикасается к двум пластинам коллектора, образуя два переходных сопротивления. Каждое из этих сопротивлений больше сопротивления контакта щетки $R_{щ}$, так как площадь соприкосновения щетки с пластиной не больше, чем в случае, когда щетка стоит на одной пластине, а переходное сопротивление обратно пропорционально площади контакта. Получаем, что переходное сопротивление R_1 в контакте с пластиной, которая уходит из-под щетки, возрастает в процессе коммутации и достигает бесконечности в конце периода коммутации. Если обозначить время, которое протекает с момента начала коммутации t , получим:

$$R_1 = \frac{R_{щ} T}{T - t}.$$

При этом переходное сопротивление в контакте второй пластины будет уменьшаться:

$$R_2 = \frac{R_{щ} T}{t}.$$

Ток I , который поступает в щетку из обмотки якоря, должен распределяться между двумя коллекторными пластинами, учитывая величины их переходных сопротивлений:

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{R_2}{R_1} = (T - t)t.$$

По **первому закону Кирхгофа** ток секции, в которой происходит процесс коммутации,

$$i = i_1 - I.$$

При этом ток, который уходит через щетку в процессе коммутации, определяется как сумма токов, которые проходят через два переходных контакта щетки:

$$2I = i_1 + i_2.$$

Получаем выражение:

$$2I = \frac{i_1 T}{T-t}; \quad i_1 = \frac{2I(T-t)}{T}.$$

Ток в коммутируемой секции будет определяться выражением:

$$i = \frac{2I(T-t)}{T} - I = \frac{I(T-2t)}{T}.$$

В момент времени $t = 0$ получаем $i = I$, в момент времени $t = T$ (конец коммутации) получим $i = -I$.

Если в обмотке якоря $2a$ параллельных ветвей, по каждой из которых протекает ток I , сила тока коммутируемой секции будет определяться выражением:

$$i = \frac{I_{\text{я}}}{2a} \times \frac{T-2t}{T}.$$

Отсюда ясно, что в рассматриваемых условиях сила тока в коммутируемой секции прямо пропорциональна времени (рис. 94а).

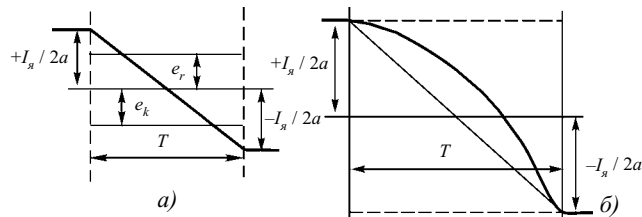


Рис. 94. Линейная и замедляющая коммутации

Такой вид коммутации называется прямолинейной, или равномерной, коммутацией. При таких условиях плотность тока под всей щеткой одинакова и не изменяется во время коммутации, вследствие чего отсутствуют коммутационные причины искрения.

При реальных условиях щетка перекрывает более двух коллекторных пластин, однако это фактически не меняет линейного характера процесса коммутации, если в коммутируемой секции нет индуктированных э. д. с.

Но возникновения э. д. с. самоиндукции в коммутируемых секциях избежать невозможно. Витки секций находятся в пазах сердечника якоря, поэтому секция обладает значительной индуктивностью L , следовательно, при изменении силы тока в процессе коммутации в секции индуцируется некоторая э. д. с. самоиндукции e_L . К данной э. д. с. прибавляется э. д. с. взаимной индукции e_M , образующаяся при изменении силы тока в соседних секциях, которые коммутируются одновременно. По правилу Ленца эти э. д. с. противодействуют изменению силы тока, т. е. задерживают это изменение. Результирующую э. д. с., которая индуцируется при изменении силы тока, называют реактивной э. д. с.:

$$e_p = e_L + e_M.$$

Если выразить ее как э. д. с. самоиндукции, используя некоторую индуктивность секции L_0 , получим выражение:

$$e_p = -L \frac{di}{dt}.$$

Данная э. д. с. задерживает изменение тока (рис. 94б) и замедляет коммутацию в течение большей части периода. Однако в конце периода при уходе пластины из-под щетки сила тока секции

будет равна $-\frac{I_a}{2a}$, т. е. в конце периода ускоренное изменение

силы тока в секции вызывает увеличение реактивной э. д. с. При этом плотность тока под щеткой будет сильно возрастать у края пластины, выходящей из-под щетки, что может привести к сильному нагреванию краев щетки и пластины коллектора. По этим причинам могут возникнуть миниатюрные электрические дуги под щеткой со стороны уходящей пластины коллектора.

Для ослабления вредного действия реактивной э. д. с. нужно противопоставить ей другую индуктируемую э. д. с., которую на-

зывают коммутирующей э. д. с. e_k , т. е. условие идеальной коммутации выглядит так:

$$e_p + e_k = 0.$$

Коммутирующую э. д. с. создают посредством движения витков коммутируемой секции во внешнем магнитном поле. Чаще всего e_k образуется магнитными полями дополнительных полюсов машины $\Phi_{д.п.}$, следовательно,

$$e_k = -\frac{\omega_c d\Phi_{д.п.}}{dt}.$$

Изменение нагрузки машины приводит к изменению реактивной э. д. с., которая пропорциональна току якоря. Однако изменяется и коммутирующая э. д. с., так как обмотка дополнительных полюсов также соединяется с якорем, т. е. изменение нагрузки не нарушает компенсации e_p и e_k .

При условии $e_k > e_p$ наблюдается ускоренная коммутация, которая возникает при усилении поля дополнительных полюсов, при увеличении числа витков их обмоток. Такую коммутацию применяют в машинах, которые работают в особо тяжелых условиях.

6. Генератор независимого возбуждения

В случае независимого возбуждения цепь возбуждения и цепь якоря генератора являются электрически разделенными (рис. 95), поэтому ток возбуждения и напряжение генератора (а следовательно, и нагрузка) независимы. Это позволяет регулировать магнитный поток вместе с напряжением генератора в достаточно широких пределах. Регулировку осуществляют введением в цепь возбуждения регулировочного реостата $R_{ш.}$. Схему включения и конструкцию реостата выбирают исходя из того, чтобы ток возбуждения не прерывался, так как обмотка возбуждения, обладающая большой индуктивностью, при размыкании ее цепи тока может индуцировать

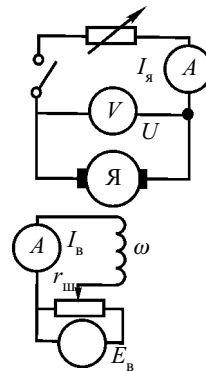


Рис. 95. Соединение генератора независимого возбуждения

большую э. д. с. самоиндукции, которая опасна для целости изоляции обмотки возбуждения и может вызвать значительное искрообразование между размыкаемыми контактами.

Мощность, которая необходима для цепи возбуждения, составляет 1—3% от номинальной мощности генератора. Это позволяет экономично осуществлять регулирование работы генератора.

В результате изменения силы тока возбуждения изменяется главный магнитный поток и пропорциональная ему э. д. с.:

$$E_{\text{я}} = C_{\text{Е}} \Phi_n.$$

Зависимость э. д. с. от силы тока возбуждения при условии разомкнутой цепи якоря ($I_{\text{я}} = 0$) и постоянства частоты вращения $n = \text{const}$ является характеристикой холостого хода ($E_{\text{я}} = F_{\text{я}}(I_{\text{я}})$). При переводе ее в другой масштаб может получить магнитную характеристику.

Если цепь возбуждения разомкнута ($I_{\text{в}} = 0$) и якорь продолжает вращение, то $E_{\text{я}} \neq 0$ вследствие того, что в массивной станине генератора от имеющейся ранее работы сохранилась определенная остаточная индукция. Когда якорь вращается в поле остаточной индукции, его обмотка индуцирует небольшую э. д. с. $E_{\text{я}0\text{а}}$.

Для снятия характеристики холостого хода необходимо подать напряжение на обмотку возбуждения, после чего постепенно увеличивать силу тока возбуждения до максимально допустимых значений, измеряя получившиеся значения э. д. с. Таким образом, получим восходящую ветвь характеристики (рис. 96).

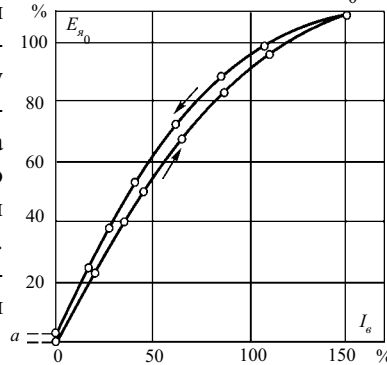


Рис. 96. Характеристика холостого хода

После этого постепенным понижением силы тока возбуждения получаем нисходящую ветвь характеристики. Ее расположение немного выше расположения восходящей ветви, так как проявляется возросшее влияние гистерезиса.

При выключении возбуждения остаточный магнетизм и э. д. с., соответствующая ей ($E_{\text{я}0\text{а}}$), будут намного больше, чем в предыдущих условиях. Однако данный остаточный магнетизм являет-

ся неустойчивым, и спустя определенное время после отключения возбуждения индуктируемые им поток и э. д. с. уменьшаются до величин, которые имели место при начальных условиях ($E_{я0a}$).

Таким образом, характеристика холостого хода имеет форму петли, что вызвано наличием стали в магнитной цепи машины.

В верхней части характеристика холостого хода значительно загибается в сторону оси абсцисс. Данный участок характеризует насыщение стали машины. Чаще всего генераторы постоянного тока работают в условиях, которые соответствуют насыщенной части данной характеристики. Из-за возникающего насыщения напряжение генератора меньше реагирует на изменения нагрузки вследствие ослабления влияния реакции якоря на основной поток и э. д. с. машины.

Еще одной важной характеристикой генератора служит зависимость напряжения U от силы тока якоря $I_я$ при условии, что сопротивление цепи возбуждения $R_в$ и частота вращения n не изменяются. Данная зависимость имеет название внешней характеристики. Для получения данной характеристики необходимо нагрузить генератор до номинального тока $I_{ном}$ в условии номинального напряжения на зажимах генератора. Для установления напряжения применяют регулирование силы тока возбуждения $I_в$. После этого постепенно уменьшают ток якоря до нуля без изменения сопротивления цепи возбуждения. У генератора независимого возбуждения при этом ток возбуждения изменяться не будет.

Напряжение на зажимах цепи якоря генератора не превышает его э. д. с., так как присутствуют потери напряжения в сопротивлении обмотки якоря $R_я$ и переходном контакте щеток и коллектора:

$$U = E_я - I_я R_я.$$

Зависимость $U = F(I_я)$ была бы прямой при постоянстве э. д. с. $E_я$. Однако полезный поток машины при увеличении нагрузки уменьшается под действием реакции якоря, при этом пропорционально уменьшается и э. д. с. $E_я$. Результатом является то, что внешняя характеристика изгибается в сторону оси абсцисс. По внешней характеристике можно определить номинальное изменение напряжения в генераторе, которое характеризует изменение напряжения на его зажимах, вызываемое изменением нагрузки от номи-

нальной до нуля при неизменном токе возбуждения и неизменной скорости:

$$\Delta U_n = \frac{U_0 - U_n}{U_n} \times 100\%.$$

Если генератор не обладает компенсационной обмоткой, эта величина составляет примерно 5—15%.

Если сила тока якоря больше, чем номинальное значение, и при этом уменьшается сопротивление нагрузки, то напряжение генератора будет дальше понижаться, но машина будет работать в условиях перегрузки, которая будет выражаться в нагревании обмоток якоря, щеток и коллектора, в результате под щетками может возникнуть искрение.

Для того чтобы приемники электроэнергии работали нормально, нужно поддерживать постоянным напряжение на их зажимах при изменении общей нагрузки генератора. Для этой цели применяется регулирование тока возбуждения. Регулировочная характеристика генератора — это зависимость силы тока возбуждения I_v от силы тока якоря I_a при условии, что напряжение U и частота вращения n остаются постоянными. По такой характеристике можно определить, как надо изменять силу тока возбуждения для обеспечения постоянства напряжения при изменении нагрузки. Данная кривая сначала почти прямолинейна, но затем загибается вверх от оси абсцисс в результате того, что на нее влияет насыщение магнитопровода машины.

7. Самовозбуждение генераторов

У большинства генераторов ток возбуждения является частью тока якоря, т. е. генератору необходимо питать свою обмотку возбуждения током генератора (рис. 97). Для пуска генератора сначала в якоре и обмотке возбуждения тока нет, но массивная станина всегда обладает небольшим потоком $\Phi_{ост}$ остаточного намагничивания, который равен 1—3% нормального рабочего потока машины. Данный остаточный момент является следствием намагничивания машины при ее предыдущей работе. При вращении якоря генератора первичным двигателем остаточный поток индуцирует в обмотке якоря малую э. д. с., если генератор является генератором параллельного возбуждения, данная э. д. с. E_{x_0} бу-

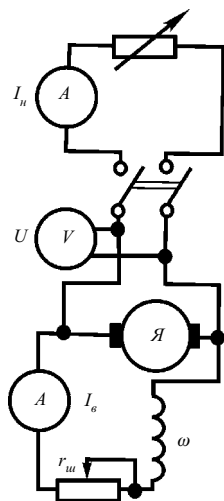


Рис. 97. Схема соединения генератора параллельного возбуждения

дет создавать ток i_b в обмотке возбуждения, поэтому обмотка возбуждения становится источником некоторой намагничивающей силы. Она может иметь направление, сонаправленное или противоположное $\Phi_{ост}$, т. е. будет подмагничивать или размагничивать. Для того чтобы происходило самовозбуждение, нужно, чтобы направления были согласными, что осуществляется правильным соединением обмотки возбуждения с якорем, заключающимся в том, что намагничивающая сила тока возбуждения должна усиливать магнитное поле машины. Магнитное поле машины индуцирует большую э. д. с. в обмотке якоря. При таком увеличении э. д. с. происходит дальнейшее увеличение силы тока возбуждения, которое прекратится только при насыщении магнитной цепи машины.

У обмотки возбуждения имеется определенная индуктивность, так как в цепи возбуждения имеет выражение:

$$i_b = (E_y + e_L)R_b, \text{ или } E_y = i_b R_b + L \frac{di_b}{dt},$$

где э. д. с. E_y является нелинейной функцией i_b , которая представлена на характеристике холостого хода машины.

Электродвижущая сила самоиндукции исчезает, если увеличение силы тока возбуждения прекратится. Поэтому установившийся ток возбуждения I_b можно определить из условия:

$$E_y = F(I_b).$$

Данное условие на графике (рис. 98) соответствует точке пересечения характеристики холостого хода и прямой (точка A). Угол, под которым наклонена прямая $I_b R_b$, зависит от сопротивления в результате того, что $\operatorname{tg} \alpha = R_b$. При уменьшении тока, которое может быть вызвано введением в цепь возбуждения реостата, точка пересечения сместится влево (A'). Если сопротивление будет большим (критическим), машина не будет возбуждаться.

В случае потери машиной остаточного магнетизма для ее восстановления используют посторонний источник постоянного тока, подключаемый на короткое время к обмотке возбуждения машины, которая размагнитилась, после чего остаточное намагничивание восстановлено и может происходить нормальное возбуждение.

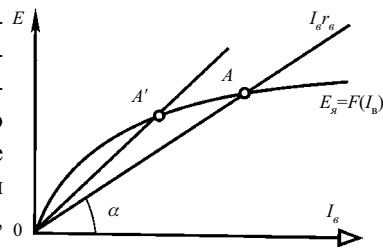


Рис. 98. Графическое определение режима генератора

Самовозбуждение используется при работе генераторов параллельного, смешанного и последовательного возбуждения.

8. Режим двигателя

Так как электрические машины обратимы, генераторный режим машины можно изменить на двигательный. Подобное изменение режима чаще всего осуществляется для генератора параллельного возбуждения, который работает от сети постоянного тока. Для этого нужно уменьшить силу тока возбуждения так, чтобы э. д. с. якоря стала меньше напряжения сети. Преобладание напряжения сети приведет к изменению направления тока обмотки якоря, создаваемого разностью напряжения сети и э. д. с. якоря, т. е.

$$E_{\text{я}} = i_{\text{в}} R_{\text{в}} + L \frac{di_{\text{в}}}{dt}.$$

При взаимодействии этого тока с магнитным полем машины создается вращающий электромагнитный момент. Под его действием якорь придет во вращение без помощи первичного двигателя, и двигатель можно расцепить с машиной. Этим способом машина из режима генератора переводится в режим двигателя и при работе потребляет из сети мощность $P = U(I_{\text{я}} + I_{\text{в}})$.

Энергетическую диаграмму можно представить в виде, показанном на рисунке 99. Мощность, которая подводится из сети, разделяется между цепью якоря и цепью возбуждения. Небольшой процент мощности, которая потребляется цепью якоря, тратится на нагревание обмотки; оставшаяся мощность преобразуется в механическую $P_{\text{мех}}$. Но для определения полезной мощности,

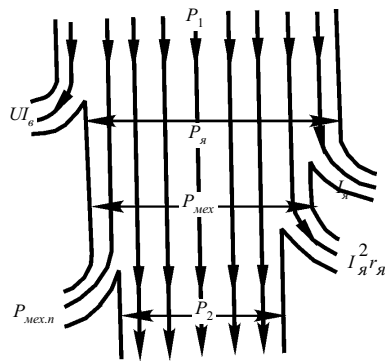


Рис. 99. Энергетическая диаграмма двигателя

которая отдается валу машины, необходимо отнять от механической мощности потери в стали P_c и механические потери.

Э. д. с. якоря при таком режиме работы направлена против тока, поэтому ее называют противоэлектродвижущей силой. Напряжение на якоре определяется выражением:

$$U = I_{я}R_{я} + E_{я}.$$

Умножим это уравнение на ток якоря и, если учесть, что $UI_{я} - I_{я}^2R_{я} = P_{мех} = E_{я}I_{я}$, получим:

$$UI_{я} = I_{я}^2R_{я} = I_{я}^2R_{я} + P_{мех}.$$

Данное уравнение показывает, что мощность, которую потребляет цепь якоря, складывается из мощности тепловых потерь $I_{я}R_{я}$ и механической мощности.

Присутствие противо-э. д. с, характеризует преобразование электрической энергии в механическую электромагнитным устройством. Отсюда ясно, что при увеличении $E_{я}$ увеличивается КПД двигателя.

Чаще всего режим двигателя осуществляется пуском машины в ход, для чего ее включают под напряжение питающей сети постоянного тока. При этих условиях, пока якорь покоится ($n = 0$), э. д. с. в нем не появляется, поэтому напряжение $U_{я} = I_{я}R_{я}$.

Так как сопротивление не изменяется, сила тока $I_{я}$ в момент пуска двигателя должна превышать рабочее значение в 25—40 раз, что недопустимо ни для коллектора и обмотки якоря, ни для сети, которая питает двигатель.

Для устранения пускового тока последовательно к якору всех двигателей постоянного тока включают пусковой реостат $R_{п}$. (рис. 100). Пусковой ток двигателей параллельного возбуждения

$$I_{я} = \frac{U}{R_{я} + R_{п}},$$

для двигателей последовательного возбуждения справедливо выражение:

$$I_{\text{я}} = \frac{U}{R_{\text{я}} + R_{\text{в}} + R_{\text{п}}},$$

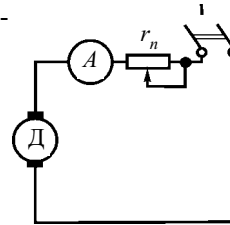


Рис. 100. Включение пускового реостата

где $R_{\text{в}}$ — сопротивление обмотки возбуждения.

Вращающий момент, который создает пусковой ток, приводит в движение якорь, и в его обмотках индуцируется противо-э. д. с. $E_{\text{я}}$, которая ограничивает силу тока якоря, т. е. для двигателя параллельного возбуждения:

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E_{\text{я}}}{R_{\text{я}} + R_{\text{п}}},$$

для машины последовательного возбуждения:

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E_{\text{я}}}{R_{\text{я}} + R_{\text{в}} + R_{\text{п}}}.$$

При этом появляется возможность постепенно вывести пусковой реостат, т. е. чтобы сила тока во время пуска была не более 1,5 номинальной силы тока двигателя.

При окончании пуска $E_{\text{я}}$ не должна быть больше напряжения, так как ток якоря создавал вращающий момент, который должен быть равен тормозящему моменту на валу двигателя. С помощью равенства моментов определяется n — частота вращения якоря, пропорциональная противо-э. д. с. $E_{\text{я}}$:

$$n = \frac{U - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{C_E \Phi},$$

когда двигатель является двигателем параллельного возбуждения;

$$n = \frac{U - I_{\text{я}} (R_{\text{я}} + R_{\text{в}})}{C_E \Phi}$$

для двигателей последовательного возбуждения.

Если учесть, что частота вращения двигателя обратно пропорциональна главному магнитному потоку Φ и прямо пропорциональна напряжению U якоря, то регулировать ее можно изменением магнитного потока или изменением напряжения якоря.

Для того чтобы реверсировать двигатель постоянного тока, нужно изменить направление тока в одной цепи двигателя, либо в цепи возбуждения, либо в цепи якоря. Если изменить направление тока в обеих цепях двигателя, изменения направления вращающего момента не произойдет.

Вид рабочих характеристик двигателей зависит от способа возбуждения их главного магнитного поля.

ЛЕКЦИЯ № 12. Синхронные машины

1. Общие сведения

Машина называется синхронной, если частота вращения связана постоянным отношением с частотой f сети переменного тока, в которую эта машина включается. Такие машины применяют в качестве генераторов переменного тока промышленной частоты, синхронных двигателей, когда нужен двигатель, который работает при постоянной частоте вращения.

Синхронная машина состоит из статора и ротора, при этом статор похож на статор асинхронной машины. Сердечник статора собирается из листов электротехнической стали, которые изолированы друг от друга, и укрепляется внутри массивного корпуса. В пазах внутри статора размещается обмотка переменного тока, которая чаще всего является трехфазной.

Ротор синхронной машины является электромагнитом с неявно выраженными полюсами или с явно выраженными полюсами.

На обмотку возбуждения ток поступает через контактные кольца и щетки от внешнего источника постоянного тока, который называют возбудителем.

Многополюсная синхронная машина содержит ротор с p парами полюсов. Токи в обмотке статора формируют p пар полюсов магнитного поля, совершающего вращения. Ротор вращается с частотой вращения магнитного поля, т. е. его скорость

$$n = \frac{f \times 60}{p}.$$

Синхронные двигатели широко применяют для разных видов привода, которые работают с постоянной частотой вращения. Чаще всего данные двигатели являются явно полюсными мощностью от 40 до 7500 кВт, с частотами вращения от 125 до 1000 об/мин. Двигатели и генераторы отличаются наличием на роторе дополнительной короткозамкнутой обмотки или подобного приспособления. Также различие выражается в меньшем воздушном зазоре

между статором и ротором. Синхронные двигатели имеют КПД выше, чем асинхронный двигатель той же массы.

Для синхронных машин иногда используются те же названия, как и в машинах постоянного тока: якорем называют часть, в обмотке которой индуцируется э. д. с., т. е. в синхронных машинах статор является якорем. Индуктором, который возбуждает главный магнитный поток, в синхронной машине является ротор.

Важное отличие синхронной и асинхронной машин заключается в том, что главный магнитный поток в ней создает намагничивающая сила постоянного тока возбуждения, получаемого машиной от возбудителя. Поэтому синхронная машина при работе в режиме двигателя может не загружать сеть намагничивающим током. Чаще всего в качестве возбудителей применяются небольшие генераторы постоянного тока с самовозбуждением или генераторы с независимым возбуждением от подвозбудителя.

Синхронная машина является обратимой, т. е. может работать как двигатель и как генератор. Машина переходит из режима генератора к режиму двигателя в зависимости от действия на ее вал вращающей или тормозящей механической силы. Если действует вращающая сила, машина получает на валу механическую энергию, которую он перерабатывает в электрическую. Если действует тормозящая сила, машина потребляет из сети электрическую энергию перерабатывает ее в механическую.

Для синхронного генератора рабочий процесс определяется тем, связана ли его частота и э. д. с. с частотой тока в сети, которая питается другими синхронными генераторами, или он работает независимо и сам задает частоту тока в сети.

При независимой работе частота сети изменяет значение вместе с частотой вращения первичного двигателя, который вращает синхронный генератор. При этом э. д. с, которые индуцируются в обмотках статора, при подключении нагрузки создают токи в обмотках статора. Эти токи взаимодействуют с магнитным полем машины и создают тормозящую силу, преодолевающую первичный двигатель. При увеличении нагрузки генератора увеличивается и тормозящая сила, приводящая к преобразованию механической мощности первичного двигателя в электрическую мощность, которая отдается в сеть.

Когда синхронный генератор работает параллельно с сетью, которая питается другими генераторами, частота машины соответствует частоте сети. Однако для того чтобы частота машины

была постоянной, необходимо постоянно синхронизировать частоту вращения ротора, чтобы индуцируемая им э. д. с. совпадала с изменениями напряжения внешней сети.

Поле ротора, которое является главным магнитным полем, возбуждается постоянным током, но, кроме него, трехфазная система переменных токов статора образует свое магнитное поле. Угловую скорость данного поля определяет частота переменного тока:

$$\omega_n = \frac{\omega}{p} = \frac{2\pi f}{p},$$

где ω — частота переменного тока;

p — количество пар полюсов вращающегося поля.

Если учесть, что число пар полюсов ротора соответствует числу пар полюсов вращающегося поля, можно записать:

$$\omega_n = \frac{2\pi n}{60},$$

т. е. угловую скорость вращающегося поля статора определяет скорость ротора. Следовательно, в синхронной машине существует две намагничивающие силы: ротора и якоря.

Генераторный режим машины характеризуется опережением ротором поля статора, при котором взаимодействие токов статора и поля машины создает механическую силу, которая тормозит вращение ротора; эту силу необходимо преодолевать первичному двигателю машины.

В случае параллельной работы синхронной машины с другими синхронными машинами, для того чтобы включить машины в общую сеть, нужна предварительная синхронизация. Она заключается в том, чтобы приравнять частоту вращения машины с частотой сети. При этом э. д. с. машины должна быть равна по величине и противоположна по фазе напряжению сети. В случае идеальной синхронизации машины и сети токи в обмотках статора после включения машины на параллельную работу станут равными в результате того, что поле ротора индуцирует в обмотках статора э. д. с., которые уравновешивают полностью напряжение сети. При этом синхронная машина не будет отдавать энергию в сеть и не будет потреблять ее. Таким образом, машина не является ни генератором, ни двигателем. Потери такой машины, механические и магнитные, при этих условиях покрывает первич-

ный двигатель, т. е. чтобы синхронная машина, которая включена в сеть, работала как генератор, отдавая в эту сеть энергию, нужно увеличить механический момент, приложенный первичным двигателем к валу машины.

2. Получение синусоидальной э. д. с. в синхронном генераторе

Устройство обмотки статора синхронной машины такое же, как и у обмотки асинхронной машины, но в ней магнитный поток возбуждает постоянный ток. При холостом ходе синхронного генератора поток, который сцепляется с одним витком обмотки якоря, изменяет свое значение в пределах от $+\Phi$ до $-\Phi$; значит, среднее значение э. д. с., которая индуктируется в витке за полупериод переменного тока, определяется формулой:

$$E_{\text{в.ср}} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} e \, dt,$$

где $e = -\frac{d\Phi}{dt}$ — мгновенное значение э. д. с. одного витка,

т. е. имеем:

$$E_{\text{в.ср}} = -\frac{2}{T} \int_{+\Phi}^{-\Phi} d\Phi = \frac{4}{T} \Phi = 4f\Phi.$$

Если учесть, что действующее значение э. д. с. равно среднему значению, которое умножено на коэффициент формы кривой поля k_{Φ} , действующее значение э. д. с., образующейся в одном витке, определяется соотношением:

$$E_{\text{в}} = E_{\text{в.ср}} k_{\Phi} = 4k_{\Phi} f\Phi.$$

Так как секции, которые образуют фазы обмотки, являются распределенными по нескольким пазам, их э. д. с. складываются геометрически. Это учитывают в расчетах э. д. с. обмотки, применяя обмоточный коэффициент $k_{\text{об}} < 1$. Подобное геометрическое сложение э. д. с. каждого из витков представляет собой определенную потерю в величине э. д. с. Однако оно оправдывается тем, что лучше используется окружность якоря.

Таким образом, э. д. с. обмотки статора в синхронной машине, в каждой фазе которого ω витков, имеет вид:

$$E = 4k_{\Phi} f \omega k_{\omega} \Phi .$$

Одной из основных характеристик синхронного генератора является зависимость потока и э. д. с. машины от намагничивающего тока.

В случае холостого хода синхронного генератора его э. д. с. создает только главный магнитный поток, следовательно, при имеющихся условиях с постоянной частотой вращения кривая $E = F(I_B)$ похожа на кривую $\Phi = F_1(I_B)$, отличаясь от нее только по масштабам. Эту зависимость называют характеристикой холостого хода, а также магнитной характеристикой. Магнитную характеристику можно построить на основании расчета магнитных цепей машины. В эту цепь входят пять основных участков: воздушный зазор, зубцы статора, спинки статора, полюсной сердечника с башмаками и ярмо ротора (рис. 101). Сумму магнитных напряжений $H_k l_k$ данных пяти участков дает полный ток $(I_B \omega_B)$ обмотки возбуждения ротора, который необходим для создания определенного заданного значения потока в воздушных зазорах машины. Построение характеристик должно основываться на расчетах не менее пяти значений потока.

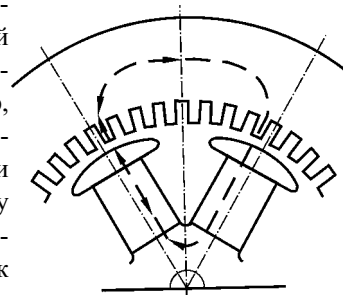


Рис. 101. Схема синхронной машины с неподвижными электромагнитами

Магнитные поля нагруженной синхронной машины возбуждают не только намагничивающие силы ротора, но и намагничивающие силы обмотки якоря, который обтекается нагрузочным током. Иначе говоря, синхронные машины, как и машины постоянного тока, испытывают на себе реакцию якоря, т. е. действие намагничивающей силы якоря на основное магнитное поле машины. Форму кривой э. д. с. нагруженного генератора определяет не только поле ротора, но и распределение поля статора. Поле статора тоже должно быть синусоидальным, чтобы суммарное поле и кривая э. д. с. нагруженной машины оставались синусоидальными.

При сопоставлении синхронной машины с асинхронной в последней ток статора автоматически изменяется вместе с изменением тока ротора, т. е. почти постоянным поток в воздушном зазоре сохраняется. Однако изменения тока статора синхронной машины не приводит к изменению постоянного тока возбуждения. Поэтому суммарное магнитное поле синхронной машины изменяется с изменением нагрузки, при этом изменяется и вид реакции якоря.

В синхронных генераторах такие влияния силы тока и сдвига фаз нагрузки на напряжение машины являются отрицательными. Для сведения влияния реакции якоря к минимуму нужно, чтобы намагничивающей силой якоря можно было пренебречь по сравнению с намагничивающей силой ротора. Для этого увеличивают магнитное сопротивление машины.

Проще всего осуществить данное повышение увеличением воздушного зазора машины. Но при этом необходимо соответственно увеличить намагничивающую силу ротора; для синхронной машины данное увеличение возможно, так как энергия магнитного поля ротора не изменяется, а возбудитель синхронной машины должен давать энергию только для компенсации тепловой потери цепи ротора.

Реакция якоря присутствует и в синхронных двигателях, но поскольку эти двигатели обладают формой кривой э. д. с., которая практически малосущественна, реакция якоря в них не учитывается.

3. Упрощенная векторная диаграмма синхронного генератора

Часто синхронные генераторы являются машинами большой мощности, проектирование которых требует учета всех подробностей и возможностей рабочих процессов, которые происходят в них.

Построить векторную диаграмму, которая отображала бы все соотношения синхронного генератора, очень сложно. Поэтому применяются диаграммы в упрощенном виде, на основании которых можно строить подробные диаграммы.

Построение диаграммы начинают с построения вектора постоянного потока ротора $\dot{\Phi}$, который направляют по оси абсцисс влево (рис. 102).

Вектор э. д. с. \dot{E} , который индуцируется потоком ротора Φ , будет отставать от вектора Φ на $\pi / 2$. Ток якоря \dot{I} должен отставать от E на угол ψ , который определяется из значений сопротивлений соотношением:

$$\psi = \arctg \frac{x + x_i}{R + R_i}.$$

Активное падение напряжения $\dot{I}R$ имеет вектор, сонаправленный с вектором силы тока. Вектор реактивного напряжения $\dot{I}x$ должен опережать вектор силы тока на 90° . Для определения вектора напряжения \dot{U} необходимо опустить из конца вектора \dot{E} перпендикуляр на вектор \dot{I} . На получившемся перпендикуляре, откладываяем вниз вектор $\dot{I}x$ для того, чтобы вычесть его из E . После этого влево из полученной точки откладывают вектор активного напряжения параллельно вектору \dot{I} . При соединении полученной точки с началом координат находят вектор напряжения:

$$\dot{U} = \dot{E} - \dot{I}x - \dot{I}R.$$

Соединяя ту же точку с концом вектора \dot{E} , получаем треугольник внутренних падений напряжения генератора с гипотенузой $\dot{I}Z$.

4. Асинхронный пуск синхронного двигателя

При пуске синхронного двигателя его вращающий момент равен нулю, т. е. двигатель нужно раскрутить до частоты вращения, которая близка к синхронной. Иногда для этого применяется специальный разгонный асинхронный двигатель малой мощности, а двигатель синхронизируется с сетью по примеру генератора при включении на параллельную работу.

Чаще всего применяется другой вид пуска. Для приспособления двигателя к такому пуску при явно полюсном роторе в полюсные наконечники закладывают пусковую короткозамкнутую обмотку, которая состоит из медных или латунных стержней. Она похожа на беличье колесо асинхронной машины и занимает большую часть окружности ротора.

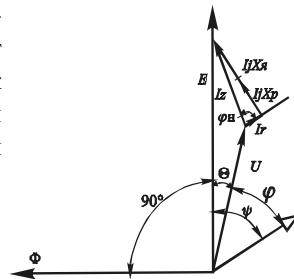


Рис. 102. Упрощенная векторная диаграмма синхронного генератора

Пуск двигателя можно разделить на два этапа: I — асинхронный набор частоты вращения без возбуждения постоянным током; II — втягивание в синхронизм после включения постоянного тока возбуждения. Первый этап такого пуска характеризуется тем, что обмотку возбуждения отключают от источника постоянного тока и замыкают активное сопротивление $R_{\text{пуск}}$ (рис. 104), которое во много раз превышает активное сопротивление обмотки возбуждения. Нельзя оставлять обмотку возбуждения разомкнутой, потому что вращающееся поле способно индуцировать в ней большую э. д. с., которая опасна для целостности изоляции. Однако следовало бы замыкать эту обмотку накоротко, из-за того что в ней возникает большой однофазный ток, способный тормозить ротор при достижении им половины синхронной частоты вращения. Чаще всего для уменьшения пусковых токов применяют включение двигателя через пусковой автотрансформатор либо через реактивную катушку. При пуске замыкают выключатель 2, через который соединяются по схеме «звезда» три фазные обмотки автотрансформатора АТ. Для того чтобы подать на вход автотрансформатора напряжение сети, следует замкнуть рубильник 1, т. е. на клеммы статора синхронного двигателя СД подается пониженное с помощью автотрансформатора линейное напряжение трехфазной системы, под действием которого ротор двигателя начинает вращение как короткозамкнутый ротор асинхронного двигателя. Если скольжение ротора мало, нужно разомкнуть рубильник 2, в результате чего напряжение на клеммах двигателя немного повысится, так как только часть каждой из фазных обмоток автотрансформатора является реактивной катушкой, которая включена последовательно с фазной обмоткой двигателя и при этом ограничивает своим сопротивлением величину пускового тока.

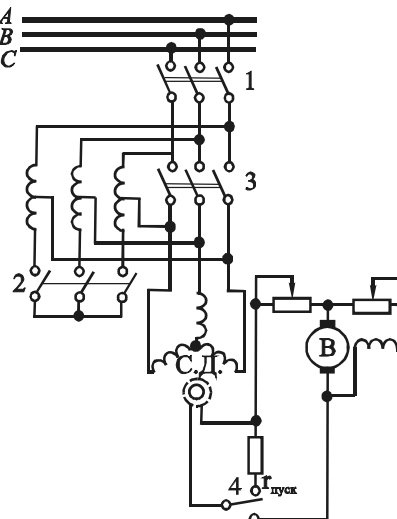


Рис. 103. Схема асинхронного пуска синхронного двигателя

Затем двигатель включается на полное напряжение сети через замыкание рубильника 3. Однако, пока не включили постоянный ток, ротор вращается асинхронно. Пуск заканчивают включением постоянного тока возбуждения переключателем 4. Двигатель приобретает синхронную частоту вращения под действием электромагнитных сил и развивает необходимый вращающий момент.

Такой пуск не требует операций по синхронизации двигателя с сетью и может быть автоматизирован.

Для пуска мощных синхронных двигателей можно улучшить условия пуска и работы через применение для питания цепи возбуждения управляемых кремниевых вентилей — тиристоров.

СОДЕРЖАНИЕ

ЛЕКЦИЯ № 1. Постоянный ток	3
1. Электрическая цепь	3
2. Законы Кирхгофа	4
3. Работа и мощность электрического тока	6
ЛЕКЦИЯ № 2. Расчет электрических цепей постоянного тока	8
1. Эквивалентные схемы источника электрической энергии	8
2. Применение законов Кирхгофа для расчета электрических цепей	10
3. Метод преобразования схемы	12
4. Метод узлового напряжения	14
5. Метод контурных токов	16
6. Метод эквивалентного генератора	17
ЛЕКЦИЯ № 3. Электрическое поле и емкость электротехнических устройств	20
1. Электрическое поле. Диэлектрическая проницаемость и электрическая постоянная	20
2. Емкость и конденсатор	21
3. Электрические свойства изоляционных материалов	23
ЛЕКЦИЯ № 4. Электромагнитные расчеты	25
1. Основные характеристики магнитного поля тока	25
2. Закон полного тока	25
3. Расчет магнитной цепи	27
4. Электромагнитная индукция	28
5. Электродвижущая сила, индуцируемая в катушке, и потокосцепление	30
6. Индуктивность	31

ЛЕКЦИЯ № 5. Синусоидальный переменный ток	35
1. Синусоидальный ток	35
2. Действующие значения переменных токов и напряжений	37
3. Закон Ома для простейших цепей переменного тока	38
4. Последовательное соединение индуктивности и активного сопротивления	41
5. Построение векторных диаграмм	43
6. Последовательное соединение активных сопротивлений, индуктивностей и емкостей	45
7. Параллельное соединение приемников переменного тока	48
8. Смешанное соединение приемников переменного тока	49
9. Полная и реактивная мощности	52
10. Явления резонанса в цепях переменного тока	53
 ЛЕКЦИЯ № 6. Трехфазная система	 57
1. Соединение по схеме «звезда»	57
2. Соединение по схеме «треугольник»	60
3. Активная, реактивная и полная мощности трехфазной симметричной системы	61
4. Расчет трехфазной цепи при симметричной нагрузке	62
5. Расчет трехфазной несимметричной цепи	63
 ЛЕКЦИЯ № 7. Несинусоидальные периодические токи	 67
1. Общие сведения	67
 ЛЕКЦИЯ № 8. Трансформаторы	 69
1. Общие сведения	69
2. Холостой ход трансформатора	71
3. Построение векторных диаграмм нагруженного трансформатора	73
4. Параметры и векторная диаграмма приведенного трансформатора	74

5. Эквивалентная схема трансформатора и ее векторная диаграмма	76
6. Короткое замыкание трансформатора	78
7. Коэффициент полезного действия трансформатора и его зависимость от нагрузки	79
8. Особенности трехфазных трансформаторов	81
9. Устройство сердечника (магнитопровода) и обмоток	83
10. Измерительные трансформаторы	84
ЛЕКЦИЯ № 9. Электрические измерения.	88
1. Меры, измерительные приборы и методы измерений	88
2. Числовые выражения погрешностей измерения и классы точности	89
3. Системы электроизмерительных приборов	90
ЛЕКЦИЯ № 10. Асинхронные бесколлекторные машины	98
1. Общие сведения	98
2. Устройство ротора	100
3. Обмотка статора	101
4. Векторные диаграммы двигателя	104
5. Эквивалентная схема двигателя	109
6. Рабочие характеристики двигателя	112
7. Пуск в ход двигателей	113
8. Методы регулирования частоты вращения двигателей	117
9. Двухфазные и однофазные двигатели	120
ЛЕКЦИЯ № 11. Машины постоянного тока.	124
1. Общие сведения	124
2. Устройство машины постоянного тока	125
3. Выпрямление переменной э. д. с. посредством коллектора и щеток	128
4. Реакция якоря	131
5. Коммутация в машинах постоянного тока	134
6. Генератор независимого возбуждения	138
7. Самовозбуждение генераторов	141
8. Режим двигателя	143

ЛЕКЦИЯ № 12. Синхронные машины	147
1. Общие сведения	147
2. Получение синусоидальной э. д. с. в синхронном генераторе	150
3. Упрощенная векторная диаграмма синхронного генератора	152
4. Асинхронный пуск синхронного двигателя	153

Козлова И.С.

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ
ПО ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ

Завредакцией: *Седова М. В.*

Выпускающий редактор: *Рагулина А. Ю.*

Корректор: *Серикова Г. А.*

Технический редактор: *Семенова И. С., Тринеева В. С.*

Компьютерная верстка: *Гребенникова В. А.*

Формат: 84 × 108/32

Гарнитура: «Таймс»