

Министерство образования Украины
Приазовский государственный технический университет
Кафедра АЭС и ЭП

В.Я. Притужалов

Электрические машины

Учебное пособие
для студентов
специальностей
АЭС и ЭПП.

Мариуполь'2000

Предисловие

Настоящая работа является учебным пособием при изучении курса "электрические машины" для специальностей 7.090.607 и 5.09.060.301 "системы управления, производства и распределения электроэнергии", а также "Электроснабжение промышленных предприятий, городов и сел".

Пособие написано на основе конспектов лекций по курсу "Электрические машины", читаемого автором более 30 лет в Приазовском государственном техническом университете.

Работа содержит краткое описание конструкций, принципов действия, основных характеристик и математическое описание всех основных типов электрических машин, необходимых инженеру-электрику, эксплуатирующему энергетические сети и системы; занимающемуся их защитой и автоматизацией.

Она ни в коей мере не заменяет существующие учебники, а только в популярной форме помогает их освоению.

Автор выражает благодарность в подготовке рукописи При-тужаловой Э.С. и Шаповаловой Е.Г.

Особая благодарность за компьютерный набор и графику студентам групп АЭС и ЭПП Смирнову Е., Токаджи Е., Мандрыке А., Сергееву Д., Арцибашеву Г., Небере А., Пенькову М., Белаш Д., Чернову В., Гурину Д., Тиховскому Д.

I. Электрические машины постоянного тока

1. Конструкция машины постоянного тока

Электрическая машина – устройство, преобразующее механическую энергию в электрическую или наоборот. Машина постоянного тока состоит из трех частей:

1. Якорь – основная часть машины, в которой происходит преобразование энергии.
2. Индуктор – часть машины, создающая магнитный поток.
3. Коллектор – устройство, собирающее э.д.с. со всех проводников якоря и выпрямляющее их.

В различных типах электрических машин якорь может быть подвижным – якорь – ротор и неподвижным – якорь – статор. Большинство электрических машин постоянного тока выполняется с подвижным якорем.

Якорь состоит из сердечника и обмотки. Сердечник – цилиндр, набранный из листов тонкой электротехнической стали, толщиной 0.35 – 0.5 мм, имеющий на внешней поверхности пазы, куда укладываются секции обмотки. Стальные листы изолированы друг от друга лаком и плотно пресуются на валу на шпонке или шлицах. Сердечник якоря для охлаждения имеет аксиальные отверстия.

Обмотка якоря распределенная, т.е. каждый виток ее имеет потокосцепление соответствующее его положению в пространстве относительно потока возбуждения. Выполняется, обычно, из медного провода в виде секции, каждая секция состоит из двух активных пазовых сторон, расположенных под разными полюса

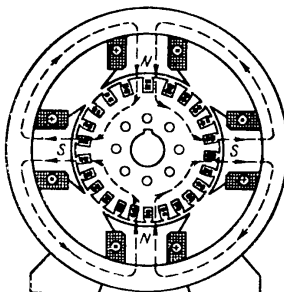


Рисунок I-1.1

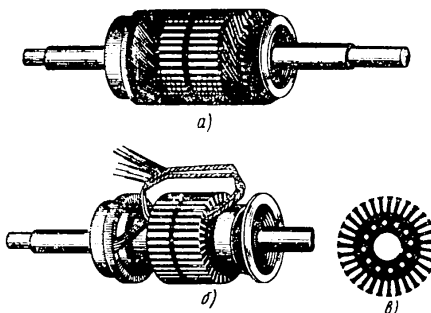


Рисунок I-1.2

ми и лобовых частей, связывающих активные стороны между собой и с коллекторными пластинами.

Все секции связаны между собой последовательно и составляют один бесконечный контур. Секции могут составлять волновую или петлевою обмотку. При петлевой обмотке активные стороны очередных секций ложатся в соседние пазы сердечника. При волновой обмотке одинаковые активные стороны очередных секций ложатся, через определенное число пазов, под соседним одноименным полюсом.

Основная задача обмотки якоря – индуцировать э.д.с. заданной величины.

Индуктор состоит из сердечника и обмотки. Сердечник

состоит из полюсов и ярма, связывающего их. Полюса набираются из тонкой листовой электротехнической стали толщиной 0.5 – 1.0 мм. Они имеют основания для размещения обмотки и полюсовый наконечник, перекрывающий полюсовое деление на 60 – 70%. Полюса болтами притягиваются к ярму, изготовленному из толстой электротехнической стали и имеющей форму цилиндра. Полюса набираются из тонкой листовой стали потому, что при прохождении над ними с большой скоростью якоря с пазами поток в полюсах может пульсировать по величине и нагревать наконечники токами Фуко. Обмотка индуктора катушечная, все витки ее имеют одинаковое потокоцеп-

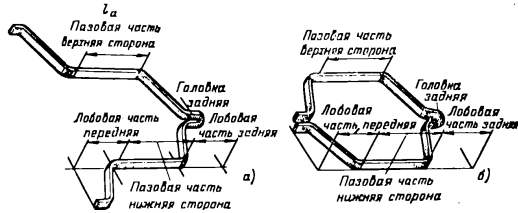


Рисунок I-1.3

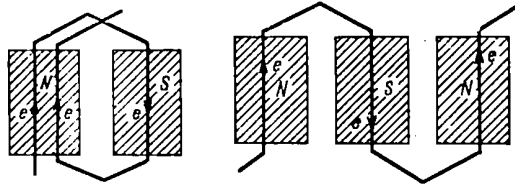


Рисунок I-1.4

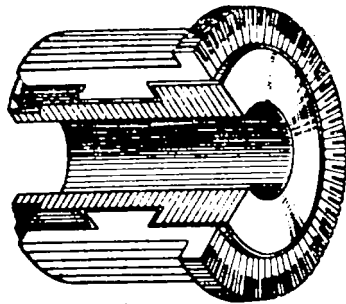


Рисунок I-1.5

ление. Изготавливаются из медного или алюминиевого провода. Насаживаются на основание полюса.

Основная задача индуктора создать магнитный поток возбуждения заданной величины и конфигурации.

Коллектор (“собиратель”) состоит из коллекторных пластин и щеток.

Коллекторные пластины изготавливаются из специальной коллекторной меди, чтобы поверхность под щеткой имела малое трение и необходимое сопротивление. Каждая пластина имеет клинообразную форму, чтобы образовать на валу правильный круг. Нижняя часть для крепления на валу имеет вырез и виде “ласточкиного хвоста”, верхняя торцевая часть для припайки секций имеет “петушок”. Между пластинами прокладывается “коллекторный миканит”, он же изолирует пластины от вала. В собранном виде коллектор протачивается на станке, шлифуется, затем очищаются все “ламели” между ними.

Щетки, в зависимости от назначения машины, могут иметь различные составы от угольно-графитных до медно-графитных. Угольно-графитные имеют значительное сопротивление и очень низкий коэффициент трения. Используются в машинах длительного использования с малой плотностью тока (автомобильные генераторы). Медно-графитные используются в машинах кратковременно работающих с высокой плотностью тока (автостартеры).

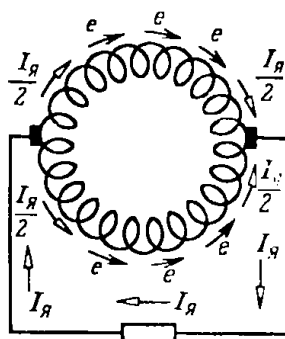


Рисунок I-1.6

Основная задача коллектора:

- в генераторах – собрать э.д.с. и выпрямить;
- в двигателях инвертировать ток и раздать его по секциям.

Щетки к коллектору прижимаются пружинами в щеткодержателях, которые крепятся на траверсе, расположенной соосно валу и позволяющей поворачивать все щетки одновременно относительно полюсов. Каждая пара щеток делит обмотку якоря на параллельные ветви, лежащие под разными полюсами, с разным направлением э.д.с.

2. Принцип действия машины постоянного тока

Машины постоянного тока имеют различные схемы включения обмоток возбуждения:

а) независимое возбуждение, когда обмотка возбуждения получает питание от независимого источника электрической энергии;

б) параллельного возбуждения, когда обмотка возбуждения включена параллельно цепи якоря, шунтирует ее;

в) последовательного возбуждения, когда обмотка возбуждения включена последовательно в цепь якоря;

г) смешанного возбуждения, когда имеются две обмотки – параллельного и последовательного возбуждения.

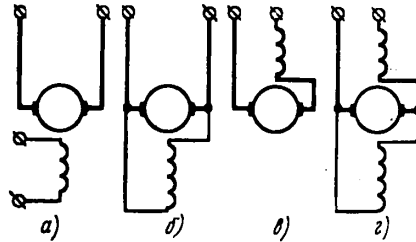


Рисунок I-2.1

Обмотка параллельного возбуждения выполняется из тонкого медного провода, имеет большое количество витков, значительное сопротивление. Рассчитана на номинальное напряжение машины и пропускает незначительный ток – 1 – 3 % от номинального тока якоря. За счет большого количества витков обеспечивает стабильный постоянный магнитный поток возбуждения.

Последовательная обмотка выполняется из провода равного сечению секции якоря, рассчитана на допустимый ток машины. Величина магнитного потока зависит от нагрузки машины.

Генератор преобразует механическую энергию в электрическую, т.е. энергия движителя (турбины или двигателя внутреннего сгорания) превращается в разность потенциалов или напряжение на выходных клеммах генератора. Обмотка возбуждения создает магнитный поток Φ , магнитные силовые линии которого выходят из северного полюса N, пересекают проводники вращающегося

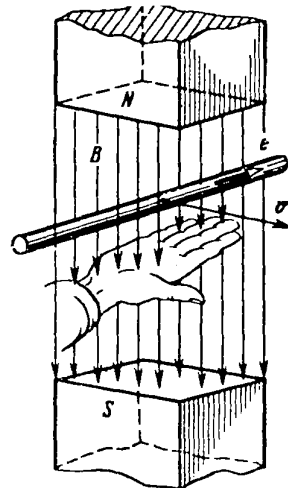


Рисунок I-2.2

из северного полюса N, пересекают проводники вращающегося

якоря и входят в южный полюс S , замыкаясь в ярме. При этом в проводниках якоря наводятся электродвижущие силы, направление которых под каждым полюсом определяется по “правилу правой руки”.

Поскольку все секции соединены последовательно (рис. I-2.2) суммарная электродвижущая сила параллельных ветвей снимается щётками с коллектора, к которому подключена каждая секция.

Двигатель преобразует электрическую энергию, получаемую из сети в механическую, т.е. во вращение вала машины.

При подключении двигателя к сети появляются токи в якорной и индукторной цепях. Обмотка возбуждения создает магнитный поток, а в каждой секции якорной цепи возникает ток.

На проводник с током, помещенный в магнитное поле действует сила, направление которой определяется по “правилу левой руки.” Силы всех секций суммируются, появляется вращающий момент и якорь начинает вращаться.

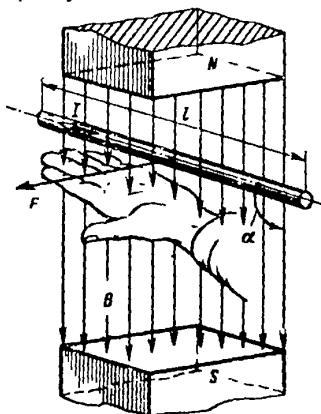


Рисунок I-2.3

3. Основные уравнения машины постоянного тока

При движении проводника в магнитном поле возникает ЭДС.

$$e = \ell v B$$

ℓ - длина проводника,
 v -линейная скорость движения,
 B -индукция.

Если учесть, что магнитный поток $\Phi = BS$ (S - площадь сечения полюса) и перевести линейную скорость в обороты в минуту, учтя количество всех проводников и разбивку их на параллельные ветви получим:

$$E = C_e n \Phi \quad (3.1)$$

$C_e = \frac{pN}{60a}$ - конструктивная постоянная, где

P – число пар полюсов,
 N – число проводников якоря,
 a – число пар параллельных ветвей.

При появлении тока в якоре, вращающемся в магнитном поле, возникает сила, создающая момент вращения

$$M = C_M I_{\text{я}} \Phi \quad (3.2)$$

$C_M = \frac{pN}{2\pi a}$ - конструктивная постоянная.

В генераторах при появлении тока в якоре возникает на валу тормозной момент. Чем больше расход электроэнергии, тем больше нужно расходовать воды, пара или топлива (закон сохранения энергии).

В двигателях при вращении якоря и пересечении проводниками магнитного потока наводится противо'э.д.с. – ЭДС, направленная встречно току.

Так как проводники якоря имеют сопротивление $r_{\text{я}}$, при появлении тока имеет место падение напряжения $r_{\text{я}} I_{\text{я}}$. Таким образом, уравнение якорной цепи генератора – напряжение на клеммах генератора равно ЭДС минус падение напряжения в цепи якоря

$$U = E - r_{\text{я}} I_{\text{я}} \quad (3.3)$$

Для двигателя - напряжение, приложенное к клеммам двигателя уравновешивается противо'э.д.с. плюс падение напряжения в цепи якоря

$$U = E + r_{\text{я}} I_{\text{я}} \quad (3.4)$$

Следует отметить, что E , индуцируемая в генераторе, составляет (1.01 ÷ 1.15U) напряжения на клеммах при номинальной нагрузке; а противо'э.д.с., появляющаяся в якоре двигателя при нагрузке составляет 0.9 ÷ 0.95U напряжения сети.

4. Реакция якоря машины постоянного тока

Реакция якоря - воздействие магнитного поля якоря на поле возбуждения машины. На рисунке I-4.1 показаны:

а) магнитное поле возбуждения машины без нагрузки, когда $I_{\text{я}} = 0$. Магнитные силовые линии направлены вдоль оси симметрии полюсов и равномерно по всей поверхности пронизывают якорь;

б) магнитное поле возбуждения отсутствует, имеется только поле якоря, вызванное током проводников якорной обмотки, магнитные силовые линии направлены вдоль поперечной оси машины и замыкаются через полюса;

в) изображено суммарное магнитное поле машины; на участках, где совпадали направления магнитных силовых линий, произошло насыщение сердечников якоря и полюсов; там, где линии поля якоря и возбуждения направлены встречно, произошло ослабление, в результате чего суммарное поле искривилось, нейтральная ось сдвинулась на угол, в проводниках, лежащих на нейтральной оси и разделяющих обмотку на параллельные ветви появилось ЭДС противоположных знаков, что в свою очередь уменьшает суммарную ЭДС параллельной ветви.

Для компенсации вредного влияния реакции якоря необходимо или сместить щетки коллектора с геометрической нейтрали на физическую (рис. I-4.1), или уложить в

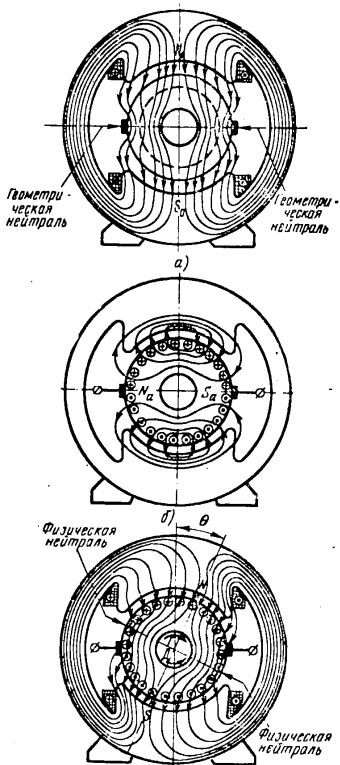


Рисунок I-4.1

наконечники полюсов компенсационную обмотку (рис. I-4.2), включенную в цепь якоря последовательно и создающую

поле, направленное встречно полю реакции.

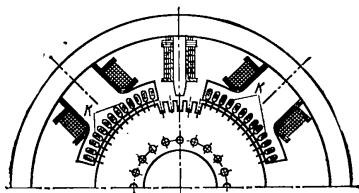


Рисунок I-4.2

5. Коммутация машин постоянного тока

При вращении якоря и коллектора происходит постоянное переключение секций обмотки из одной параллельной ветви в

другую с изменением направления тока. Секция в момент переключения оказывается замкнутой щеткой накоротко. Процесс этот происходит очень быстро, что приводит к появлению ЭДС самоиндукции.

Переходный процесс изменения тока в секциях при переключении их из одной параллельной ветви в другую называется коммутацией тока якоря.

Период коммутации T зависит от ширины щетки и скорости вращения якоря и составляет тысячные доли секунды. Частота коммутации $f_k = \frac{1}{T}$ составляет килogerцы.

Коммутация вызывает значительное искрение на щетках, что может привести к подгоранию коллекторных пластин. В идеале коммутация должна быть линейной (рис. I-5.1а), но из-за большого искажения магнитного поля реакцией якоря и значительной величины ЭДС самоиндукции, она становится замедленной (рис. I-5.1б), что приводит к ещё большему искрению. Для улучшения коммутации применяются дополнительные

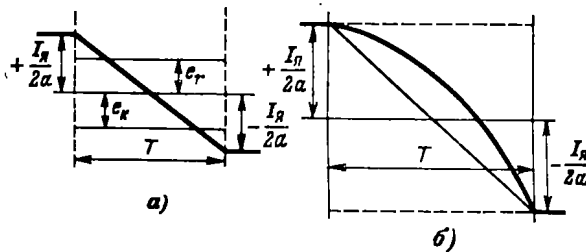
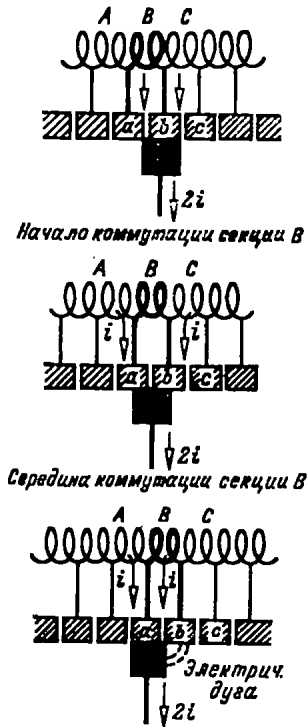


Рисунок I-5.1

полюсы, компенсирующие искажение поля реакцией якоря.

Обмотка дополнительных полюсов включается последовательно в цепь якоря (рис. I-5.2).

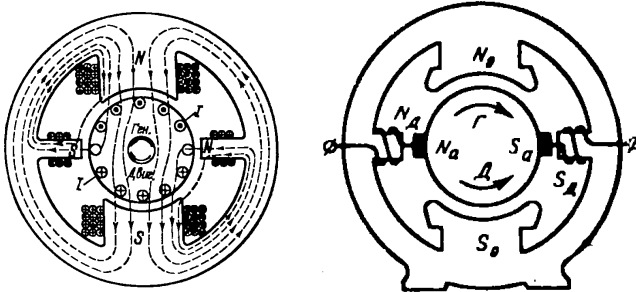


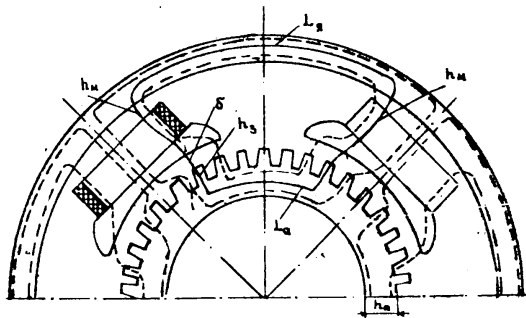
Рисунок I-5.2

6. Расчет магнитной цепи машины

6.1 Магнитные потоки

Для расчета вычерчивается в масштабе эскиз магнитной цепи, на котором изображена картина магнитного потока, создаваемого основными полюсами. Ввиду полной симметрии машины поток, создаваемый каждым полюсом, делится относительно осевой линии на две части - два контура.

Имеет место основной поток Φ_0 , замыкающийся в сердечнике и поток рассеяния Φ_δ замыкающийся в воздухе. Весь поток, создаваемый полюсом



Φ_m .

Магнитная цепь основных полюсов машины постоянного тока.

Рисунок I-6.1 Магнитная цепь основных полюсов машины постоянного тока

$$\Phi_m = \Phi_0 + \Phi_\delta = \Phi_0 K_\delta \quad (6.1)$$

где $K_\delta = 1 + \frac{\Phi_\delta}{\Phi_0}$ - коэффициент рассеяния

$$K_\delta = 1.12 \div 1.25$$

Намагничивающая сила н.с. необходимая для создания Φ_0 называется основной н.с.

6.2 Определение основной н.с

Магнитная цепь машины состоит из различных участков (6.1). Из закона магнитной цепи имеем :

$$F = d\Phi \cdot \int \frac{dl}{\mu ds},$$

где $F = wI$ -н.с.;

$d\Phi$ -поток элементарного участка ;

dl - элемент длины магнитной силовой линии ;

ds - сечение элементарного участка.

При расчете F_0 магнитная цепь делится на ряд участков, на каждом из которых поток Φ , проницаемость μ и сечение s остаются постоянными. Имеется пять основных участков:

- 1) зазор;
- 2) зубцовая зона;
- 3) спинка якоря;
- 4) сердечник полюса;
- 5) ярмо.

Расчет ведется по средней длине магнитной линии участка.

$$F_0 = \Phi_0 \frac{2\delta}{\mu_0 s_\delta} + \Phi_0 \frac{2h_3}{\mu_3 s_3} + \Phi_0 \frac{l_a}{2\mu_a s_a} + \\ + k_\delta \Phi_0 \frac{2h_m}{\mu_m s_m} + k_\delta \Phi_0 \frac{l_j}{2\mu_j s_j}$$

при $\frac{\Phi_{yc}}{S_{yc}} = B_{yc} = \mu_{yc} H_{yc}$

формула имеет вид :

$$F_0 = \frac{2B_\delta \delta}{\mu_0} + \frac{2B_3 h_3}{\mu_3} + \frac{B_a l_a}{\mu_a} + \frac{B_m h_m}{\mu_m} + \frac{B_j l_j}{\mu_j}$$

при $\frac{B}{\mu} = H,$

$$F_0 = F_\delta + F_3 + F + F_M + F_\alpha$$

Таким образом, окончательно имеем:

$$F_0 = 2H_\delta\delta + 2H_3l_3 + H_a l_a + 2H_M l_M + H_\alpha l_\alpha \quad (6.2)$$

Магнитная проницаемость воздушного зазора $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$

Гн/м.

Проницаемость магнитных материалов зависит от индукции

$\mu = f(B)$.

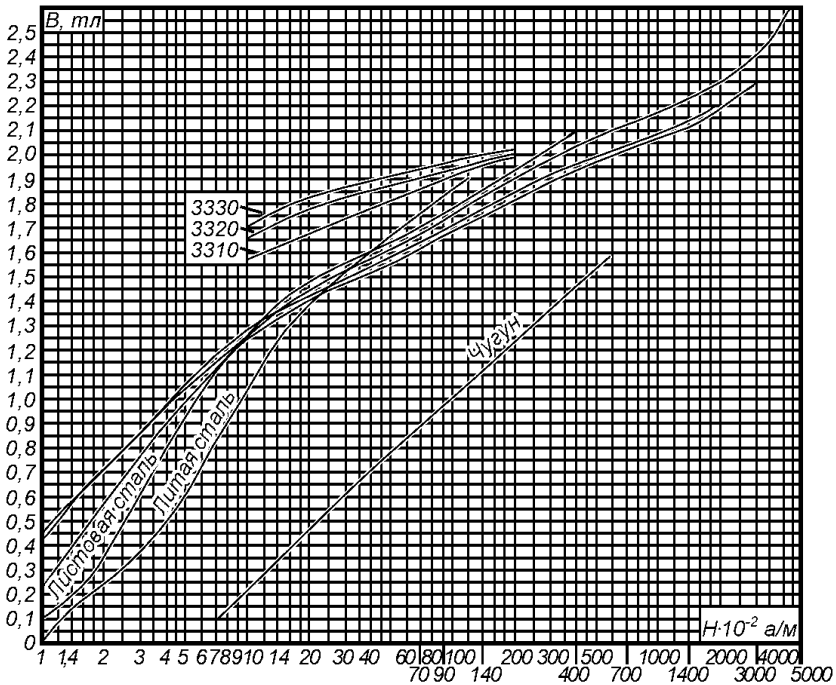


Рисунок I-6.2 Кривые намагничивания электротехнической стали, литой стали и чугуна

На рис. I-6.2. изображены кривые зависимости $B = f(H)$ для различных материалов.

Кривые намагничивания листовой электротехнической стали, литой стали и чугуна.

6.3 Индукция в зазоре

Зазор представляет собой основное сопротивление магнитному потоку.

Н.с. зазора F_{δ} составляет не менее 60% от основной н.с. Формы кривой индукции в зазоре весьма сложна, поэтому производится операция приведения, когда действительную форму заменяют более простой, которая дает при расчете практически те же результаты. Обычно трапециевидальную кривую (рис. 1-6.3.) распределение индукции в зазоре на полюсном делении заменяют прямоугольником с высотой $B_{\delta} = B_{\delta m}$ и основанием b' ;

b' - расчетная полюсная дуга

;

$\alpha' = b'/\tau$ - расчетный коэффициент полюсной дуги.

В машинах с добавочными полюсами $\alpha' = 0.62 \div 0.72$.

Картина распределения индукции по длине машины показаны на рис. 1-6.4., где показан якорь радиальными вентиляционными каналами. С достаточной точностью можно принять расчетную длину якоря:

$$l' = 0.5(l_m + 1) \quad (6.3)$$

Зная величины B_{δ} , b' , l' определяется н.с. на пару полюсов для гладкого якоря

$$F_{\delta 0} = \frac{2}{\mu_0 B_{\delta} \delta} \quad (6.4)$$

Для зубчатого якоря (реального) картина распределения индукции значительно искажается рис. 1-6.5.

В данном случае производится приведение зубчатого якоря к гладкому путем увеличения зазора

$$\delta' = \delta K_{\delta} ,$$

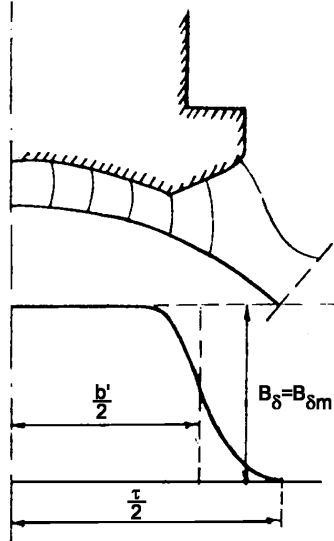


Рисунок 1-6.3 Действительная и приведенная картины поля в зазоре в поперечном сечении гладкого якоря

при этом K_δ - коэффициент зазора определяется по приближенной формуле:

$$K_\delta = \frac{t' + 10\delta}{b_{31} + 10\delta} \quad (6.5)$$

Таким образом, н.с. зазора выражается :

$$F_\delta = F_{\delta 0} K_\delta = \frac{2}{\mu_0} B_\delta K_\delta \delta = \frac{2}{\mu_0} B_\delta \delta' \quad (6.6)$$

6.4 Н.с. зубцовой зоны

В зубцовой зоне поток замыкается по зубцам и пазам якоря. Расчет н.с. ведется в соответствии с рис. I-6.4.

Распределение индукции по высоте зуба имеет параболический характер. Расчетное значение напряженности поля зуба H_3 находится по формуле Симпсона как среднее для параболической кривой

$$H_3 = \frac{H_{31} + 4H_{3cp} + H_{32}}{6} \quad (6.7)$$

Для практических расчетов достаточно трех точек - в верхнем, нижнем и среднем сечении.

По кривым рис. I-6.6. получим $H_{3x} = f(x)$, предварительно определив индукцию для заданных точек.

$$B'_{3x} = \frac{B_\delta t_1'}{b_{3x} K_c} \quad (6.8)$$

$K_c = 0.88 \div 0.9$ - коэффициент заполнения стали с бумагой,

$K_c = 0.91 \div 0.93$ - коэффициент заполнения стали с бумагой лакированной.

Н.с. на пару полюсов выражается :

$$F_3 = 2H_3 h_3 \quad (6.9)$$

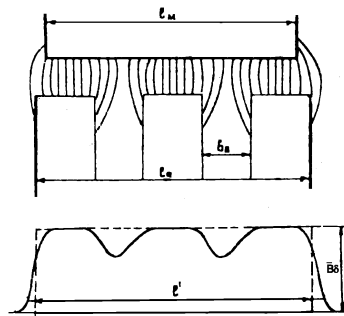


Рисунок I-6.4 Действительная и мнимая картины поля в зазоре в продольном сечении якоря

В упрощенных расчетах индукцию и соответственно напряженность поля определяется только в одном сечении на расстоянии $\frac{h_3}{3}$ от основания зуба.

$$F_3 = 2H_{\frac{2}{3}}h_3 \tag{6.10}$$

В машинах постоянного тока индукция $B_{32} = 1.8 \div 2.3$ (1800÷2300)

$B_{\delta} = 0.4 \div 0.65$ - для машин до 10 кВт

$B_{\delta} = 1.0 \div 1.05$ - для машин большой мощности

$\delta = 0.7 \div 3$ - для машин до 50 кВт

$K_{\delta} = 1.05 \div 1.1$ - для полужакрытых пазов

$K_{\delta} = 1.2 \div 1.3$ - для открытых пазов.

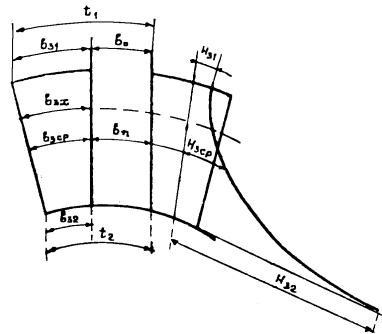


Рисунок I-6.5 М.д.с. зубцов

6.5 Н.с. спинки якоря

Поток по сечению якоря распределяется неравномерно.

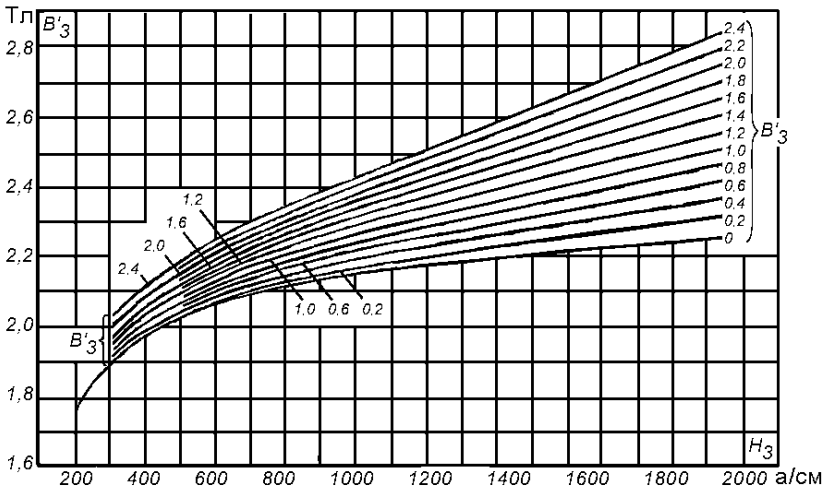


Рисунок I-6.6

Наибольшая индукция в точках ближе к зубцам, наименьшая - внутри. При расчетах необходимо исходить из среднего значения

$$B_a = \frac{\Phi_0}{2S_a} = \frac{\Phi_0}{2h_a K_0} \quad (6.11)$$

По кривым намагничивания для стали данной марки находим напряженность поля H_a , после чего определяется н.с. F_a :

$$F_a = H_a l_a \quad (6.12)$$

Индукция для якоря должна быть

$$B_a = 1.0 \div 1.5 \text{ Тл.}$$

6.6 Н.с. полюсов ярма

Поток полюсов и ярма больше основного на величину потока рассеяния Φ_δ , возникающего между полюсами и в торцевых частях машины.

Потоки полюса и ярма Φ_M и Φ_Y определяются по формуле.

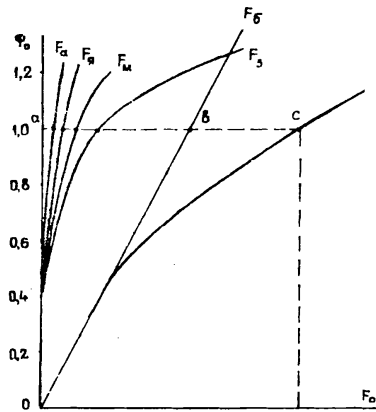
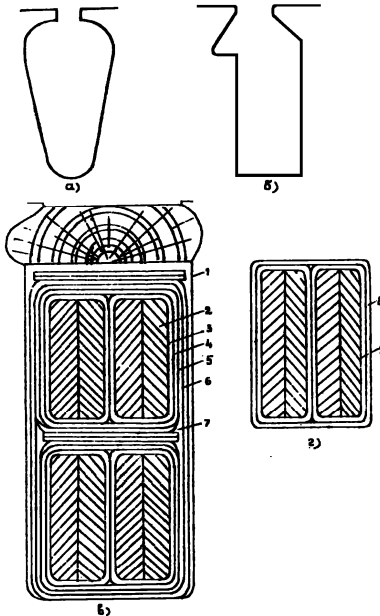


Рисунок 1-6.7 Кривые намагничивания машины

Рисунок 1-6.8 Форма пазов и способ изоляции обмотки якоря:

1. Электрокартон;
2. Медь;
3. Микалента;
4. Микафоллий;
5. Телефонная бумага;
- 6, 7 электрокартон;
- 8, 9 лента тафтян 0.18 мм в пол нахлестки;
- лента миткалевая 0.15 мм в пол нахлестки.

При известных геометрических размерах индукции определяются:

$$B_M = \frac{\Phi_M}{S_M} \quad (6.13)$$

$$B_{\text{я}} = \frac{\Phi_{\text{я}}}{2S_{\text{я}}} \quad (6.14)$$

обычно $B_M = 1.2 \div 1.6$ Тл

$B_{\text{я}} = 0.8 \div 1.4$ Тл - для стали

$B_{\text{я}} = 0.4 \div 0.7$ Тл - для чугуна.

По кривым рис. I-6.2 определяются H_M и $H_{\text{я}}$

$$F_M = 2H_M h_M \quad (6.15)$$

$$F_{\text{я}} = H_{\text{я}} l_{\text{я}} \quad (6.16)$$

размеры h_M и l_M определяются по рис I-5.1.

Примерное значение коэффициентов рассеяния определяются по табл. I-6.1.

Таблица I-6.1

2p	D_q , см	K_{δ}
4	до 25	1.28
> 4	25+75	1.25
> 4	75+150	1.20
> 4	>150	1.15

6.7 Кривая намагничивания машины

Зная н.с. отдельных участков магнитной цепи, можно определить н.с. на пару полюсов по формуле 6.2.

Считая, что номинальному напряжению при номинальной скорости вращения соответствует номинальный поток $\Phi_0 = I$, задавшись различными значениями потока 0.5; 0.8; 1.1; 1.2 и т.д. можно для каждого из них рассчитать F_0 .

По результатам расчета можно построить кривую намагничивания машины (рис. I-6.7.)

$$\Phi_0 = f(F_0).$$

Прямолинейная часть характеристики соответствует не насыщаемому режиму машины. При дальнейшем увеличении н.с. наступает насыщение стали и характеристика загибается. По отношению отрезков

$$\frac{ac}{ab} = \frac{F_0}{F_\delta} = K_\mu$$

определяется коэффициентом насыщения машины.

В серийных машинах нормального исполнения коэффициент насыщения изменяется в следующих пределах: $K_\mu = 1.1 \div 1.35$.

7. Определение мощности машины

По площади сечения паза S_n и коэффициенту заполнения паза K_n определяется общее сечение меди проводников, заполняющих данный паз $\sum_{q.m.p.}$

$$\sum_{q.m.p.} = S_n K_n \quad (7.1)$$

где $K_n = 0.35$

Отсюда определяется расчетное сечение одного проводника q_p

$$q_p = \frac{\sum_{q.m.p.}}{n_n} \quad (7.2)$$

где:

n_n - число проводников в пазу: определяется по общему числу проводников якоря N и числа пазов Z :

$$n_n = \frac{N}{Z} \quad (7.3)$$

Полученное сечение определяется до ближайшего стандартного сечения меди q по таблице I-7.1.

Если расчетное значение сечения q_p больше табличного стандартного, то необходимо принять 2 ÷ 3 проводника в параллель и в дальнейшем вести расчет на суммарное сечение проводников.

Таблица I-7.1. Номинальные диаметры d , сечения q , веса G и сопротивления 1мм меди обмоточной круглой.

Диаметр	Сечение	Вес 1 км	Сопротивление 1км 15 С ⁰
D	Q	G	
Мм	Мм ²	Кг	Ом
(0.77)	0.456	4.14	36.9
0.80	0.503	4.47	34.2

(0.83)	0.541	4.81	31.8
0.86	0.581	51.6	29.6
0.90	0.635	5.66	27.0
0.96	0.724	6.43	23.8
1.00	0.785	6.98	21.9
1.04	0.849	7.55	20.3
1.08	0.916	8.14	18.79
1.12	0.985	8.75	17.47
1.16	1.057	9.40	16.28
(1.20)	1.131	10.05	15.22
1.25	1.227	10.91	14.02
(1.30)	1.327	11.80	12.96
1.35	1.431	12.73	12.01
(1.40)	1.539	13.69	11.18
1.45	1.651	14.68	10.41
(1.50)	1.767	15.71	9.74
1.56	1.911	16.99	9.00
(1.62)	2.06	18.32	8.36
1.68	2.22	19.71	7.75
(1.74)	2.38	21.1	7.23
1.81	2.57	22.9	6.70
(1.88)	2.78	24.7	6.19
1.95	2.99	26.5	5.76
(2.02)	3.20	28.5	5.38
2.26	4.01	35.7	4.29
2.10	3.46	30.8	4.97
2.44	4.68	41.6	3.68
2.63	5.43	48.3	3.17
2.83	6.29	55.9	2.73
3.28	8.45	75.1	2.04
3.53	9.79	87.0	1.758
3.80	11.34	100.8	1.518
4.10	13.20	117.4	1.303
4.50	15.90	141.4	1.082
4.80	18.10	160.9	0.951
5.20	21.2	188.8	0.812

Примечания:

- 1) До диаметра 0.1 мм включительно проводники изготавливаются с повышенным удельным сопротивлением;

2) Диаметры проводников, указанные в скобках, являются малоупотребительными.

Для определения тока якоря при номинальном режиме работы машины необходимо задаться плотностью тока фактической Δ_{ϕ} . Допускаемая плотность тока должна быть в пределах $\Delta = 3 \div 5 \text{ А/мм}^2$.

Определяется ток параллельной ветви

$$I_a = \Delta_{\phi} q \quad (7.5)$$

Затем определяется номинальный ток якоря

$$I_{ан} = 2a I_a \quad (7.6)$$

Электромагнитная мощность определяется приближенно

$$P_{эм} = U_n I_{ан} \quad (7.7)$$

Для машин с параллельным возбуждением по таблице 7.2 выбирается процентное соотношение тока возбуждения $i(\%)$ в зависимости от мощности и определяется ток возбуждения

$$i = \frac{i_{в(\%)} I_{ан}}{100}, \quad i_{в(\%)} = f(P_{эм}) \quad (7.8)$$

Для генератора отдаваемая полезная мощность определяется:

$$P_2 = U(I_{ан} - I_{в}) \quad (7.9)$$

Для двигателя вначале определяется проводимая мощность:

$$P_1 = U(I_{ан} - I_{в}) \quad (7.10)$$

Затем полезная мощность:

$$P_2 = P_1 \eta.$$

Величина коэффициента полезного действия η ориентировочно выбирается по таблице I-7.3.

Проверка мощности по нагреву выполняется по фактической линейной нагрузке

$$A_n = \frac{I_{ан} N}{2a \pi D_d} \quad (7.11)$$

Таблица I-7.2. Выбор тока возбуждения

$P_{эм}$	кВт	0.5..1	5	10	20	40	60	100	300	1000
$I_{в}$	%	10..8	7	5	4	3	2.5	2.0	1.5	1.2

Таблица I-7.3. Выбор к.п.д. машины постоянного тока

$P_{эм}$	кВт	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
η	%	82	87	88	88.5	89	89.5	90	90.5	91	91.5	92

Таблица I-7.4. Допустимая величина нагрева машины

D_a , См	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$A_{\Delta q}$	550	1000	1400	1700	1830	1920	1990	2000	2010	2020
	620	1200	1700	2000	2180	2250	2370	2400	2410	2420

После определения A_H определяется фактор нагрева $A_{H\Delta\phi}$ и сравнивается с рекомендованной величиной по таблице I-7.4, в которой указана зависимость $A_{\Delta q} = D_q$. Если вычисленное значение фактора нагрева меньше или равно рекомендованному таблично, то температура нагрева обмотки не превышает допустимой.

8. Генераторы постоянного тока

Генераторы постоянного тока имеют схемы возбуждения показанные на рисунке I-8.1

Генераторы возбуждения:

- а) независимого;
- б) параллельного;

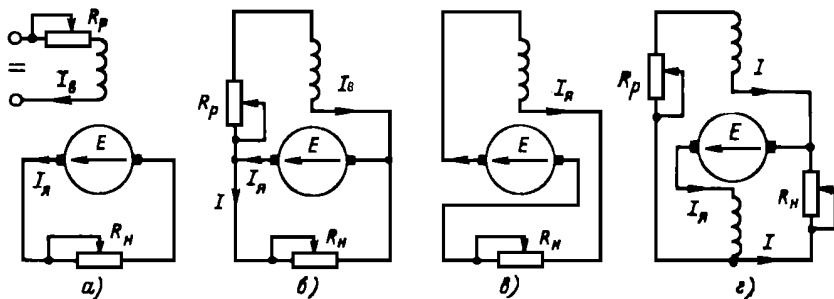


Рисунок I-8.1

- в) последовательного;
- г) смешанного.

8.1 Генераторы независимого возбуждения

При независимом возбуждении цепь возбуждения и цепь якоря генератора электрически разделены благодаря чему ток возбуждения не зависит от напряжения генератора, а следовательно, от условий нагрузки. Это дает возможность регулировать магнитный поток, а вместе с ним и напряжение генератора в

очень широких пределах. Для такой регулировки в цепь возбуждения вводится регулировочный реостат R_p . Схема включения и конструкция реостата должны предупреждать возможность внезапного прерывания тока возбуждения, так как обмотка возбуждения обладает значительной индуктивностью, вследствие чего размыкание ее цепи тока может сопровождаться возникновением большой э.д.с. самоиндукции, опасной для целости изоляции обмотки возбуждения и вызывающей сильное искрообразование между размыкаемыми контактами.

Мощность, необходимая для цепи возбуждения, составляет только 1–3% номинальной мощности генератора. Это дает возможность весьма экономично осуществлять регулирование работы генератора

Изменения силы тока возбуждения изменяют главный магнитный поток и пропорционально ему э.д.с. $E_{\text{я}} = C_e \Phi_n$. Зависимость э.д.с. от тока возбуждения при разомкнутой цепи якоря ($I_{\text{я}}=0$) и постоянной частоте вращения $n=\text{const}$ называется характеристикой холостого хода $E_{\text{я}} = F(I_{\text{в}})$. Она же в другом масштабе может служить магнитной характеристикой.

Если цепь возбуждения разомкнута ($I_{\text{в}} = 0$), а якорь вращается, то $E_{\text{я}} \neq 0$, так как в массивной станине генератора от предыдущей работы сохраняется некоторая остаточная индукция. При вращении якоря в поле остаточной индукции в его обмотке индуцируется малая э.д.с.

Чтобы снять характеристику холостого хода, нужно подать напряжение на обмотку возбуждения и постепенно увеличивать силу тока возбуждения до максимально допустимого значения, отмечая соответствующие значения э.д.с. Таким путем будет получена восходящая ветвь характеристики, затем путем постепенного понижения силы тока возбуждения можно получить нисходящую ветвь характеристики. Она расположится несколько выше восходящей ветви вследствие возросшего влияния гистерезиса. После выключения возбуждения остаточный ме-

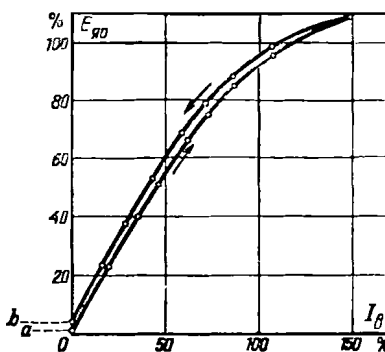


Рисунок 1-8.2

ханизм, а следовательно, и э.д.с., ему соответствующая будет существенно больше, чем в исходных условиях. Но этот остаточный магнетизм неустойчив, и, спустя некоторое время после вращения возбуждения, поток и э.д.с., им индуцируемая при вращении якоря, уменьшаются до значения, соответствующего начальным условиям.

Таким образом, характеристика холостого хода петлевидная, что является естественным следствием наличия стали в магнитной цепи машины, главным образом следствием влияния массивной станины. Характеристика холостого хода в верхней своей части заметно загибается в сторону оси абсцисс. Это - следствие насыщения стали машины. В большинстве случаев генераторы постоянного тока работают в условиях, соответствующих насыщенной части характеристики. Благодаря насыщению напряжение генератора меньше колеблется при изменениях нагрузки, так как ослабляется влияние реакции якоря на основной поток и э.д.с. машины.

Второй важной характеристикой генератора является зависимость его напряжения U от силы тока якоря I_A при неизменных сопротивлениях цепи возбуждения r_B и частоте вращения n . Эта зависимость называется внешней характеристикой (рис 1-8.4).

Чтобы получить ее из опыта, нужно сначала нагрузить генератор

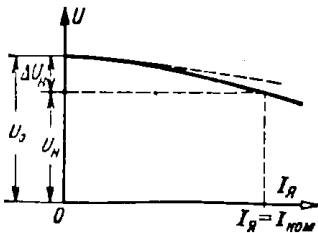


Рисунок 1-8.4

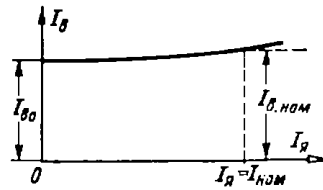


Рисунок 1-8.5

до номинального тока $I_{НОМ}$ при номинальном напряжении на зажимах генератора. Последнее устанавливается посредством регулирования силы тока возбуждения I_B . Затем нужно постепенно уменьшать ток якоря до нуля, не изменяя сопротивление цепи возбуждения. У генератора независимого возбуждения в этих условиях ток возбуждения будет оставаться неизменным.

Напряжение на зажимах цепи якоря генератора меньше его э.д.с. из-за потери напряжения в сопротивлении $r_{\text{я}}$ – обмотки якоря и переходного контакта щеток и коллектора

$$U = E_{\text{я}} - I_{\text{я}} r_{\text{я}}.$$

Зависимость $U = F(I_{\text{я}})$ изображалась бы прямой линией (пунктир на рис), если бы э.д.с. $E_{\text{я}}$ оставалась постоянной. Но полезный поток машины с ростом нагрузки уменьшается под воздействием реакции якоря, а вместе с ним пропорционально уменьшается и э.д.с. $E_{\text{я}}$. В результате внешняя характеристика изгибается в сторону оси абсцисс. На основании внешней характеристики определяется *номинальное изменение напряжения* на генераторе. Это выраженное в процентах относительное изменение напряжения на его зажимах, вызываемое изменением нагрузки от номинальной до нуля при неизменном токе возбуждения и постоянной скорости:

$$\Delta U_{\text{в}} = \left(\frac{U_0 - U_{\text{н}}}{U_{\text{н}}} \right) \times 100\% \quad (8.1)$$

у генераторов без компенсационной обмотки эта величина достигает примерно 5 – 15% .

Если увеличить силу тока якоря сверх номинального значения, уменьшая сопротивление нагрузки, то напряжение генератора станет дальше понижаться, но машина будет уже в условиях перегрузки. Ее обмотка якоря, щетки и коллектор начнут перегреваться, а под щетками начнется сильное искрение.

Для нормальной работы приемников электроэнергии необходимо поддерживать постоянным напряжение на их зажимах, несмотря на изменения общей нагрузки генератора. Это осуществляется посредством регулирования тока возбуждения. *Регулировочной характеристикой генератора* называется зависимость силы тока возбуждения $I_{\text{в}}$ от силы тока якоря $I_{\text{я}}$ при постоянных напряжении U и частоте вращения n . Такая характеристика показывает, как надо изменять силу тока возбуждения, для того, чтобы при изменениях нагрузки поддерживать постоянным напряжение на зажимах генератора. Эта кривая сначала почти прямолинейна (рис I-8.5), но затем загибается вверх от оси абсцисс вследствие влияния насыщения магнитопровода машины.

8.2 Самовозбуждение генераторов

Ток возбуждения у большинства генераторов является частью тока якоря, т. е. генератор должен питать током свою обмотку возбуждения (рис. 1-8.7). При пуске в ход генератора сначала ток в якоре, а следовательно, и в обмотке возбуждения отсутствует, но в массивной станине всегда сохраняется небольшой поток $\Phi_{\text{ост}}$ остаточного намагничивания, равный 1–3% нормального рабочего потока машины. Он остается как следствие намагничивания машины, имевшего место ранее при ее работе. Когда первичный двигатель вращает якорь генератора, тогда остаточный поток индуцирует в обмотке якоря небольшую э.д.с. В случае генератора параллельного возбуждения эта э.д.с. $E_{\text{я0}}$ создает некоторый ток $I_{\text{в}}$ в обмотке возбуждения, а следовательно, в обмотке возбуждения возникает некоторая н.с. По отношению к потоку $\Phi_{\text{ост}}$ она может быть направлена согласно или встречно,

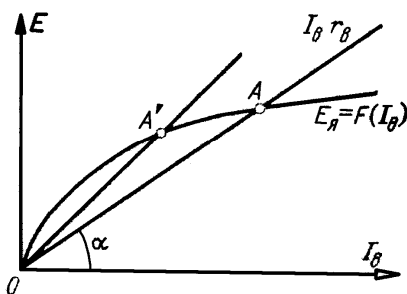


Рисунок 1-8.6

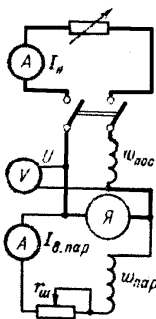


Рисунок 1-8.7

т. е. подмагничивать или размагничивать. Для самовозбуждения необходимо согласное направление, что имеет место при правильном соединении обмотки возбуждения с якорем. При таком соединении н.с. тока возбуждения усиливает магнитное поле машины, а последнее индуцирует большую э.д.с. в обмотке якоря. Возрастание э.д.с. вызывает дальнейшее увеличение силы тока возбуждения. Предел такому самостоятельному увеличению потока и тока возбуждения положен явлениями насыщения магнитной цепи машины.

Обмотка возбуждения обладает значительной индуктивностью, поэтому ток в цепи возбуждения

$$i_B = (E_{\text{я}} + e_{\text{я}}) r_B \quad \text{или} \quad E_{\text{я}} = i_B r_B + L di_B / dt$$

где э.д.с. $E_{\text{я}}$ является нелинейной функцией i_B , изображаемой характеристикой холостого хода машины (рис. I-8.6). Мы пренебрегаем в этом уравнении сопротивлением цепи якоря $r_{\text{я}}$, незначительным по сравнению с r_B . Электродвижущая сила самоиндукции исчезнет, когда прекратится увеличение силы тока возбуждения. Следовательно, установившийся ток возбуждения I_B определяется из условия $E_{\text{я}} = I_B r_B$. Этому условию на графике соответствует точка пересечения характеристики холостого хода $E_{\text{я}} = F(I_B)$ и прямой $I_B r_B$, т. е. точка А. Угол α наклона прямой $I_B r_B$ зависит от $I_B r_B$, $\text{tg} \alpha \sim I_B r_B$. Если уменьшать I_B , например вводя реостат в цепь возбуждения, то точка пересечения смещается влево (А'). При достаточно большом сопротивлении цепи возбуждения, называемом критически~ машина не возбуждается.

Если машина потеряла остаточный магнетизм (из-за короткого замыкания или механических ударов), то для восстановления остаточного магнетизма нужен посторонний источник постоянного тока хотя бы малой мощности. Этот источник нужно на короткий срок замкнуть на обмотку возбуждения размагнитившейся машины, а затем использовать созданное остаточное намагничивание для нормального возбуждения.

Явления самовозбуждения используются в генераторах параллельного, смешанного и последовательного возбуждения.

8.3 Генераторы параллельного, последовательного и смешанного возбуждения

У генератора параллельного возбуждения часть тока якоря служит для возбуждения основного магнитного поля машины (рис. I-8.7). Эти генераторы часто применяются для получения постоянного тока, так как они не требуют дополнительного источника электроэнергии для питания цепи возбуждения, что существенно упрощает обслуживание машины, вместе с тем напряжение таких генераторов мало изменяется из-за колебаний нагрузки.

При пуске в ход генератора параллельного возбуждения для создания магнитного потока в магнитопроводе используется выше описанное явление самовозбуждения, при этом необходимо правильное соединение зажимов обмотки возбуждения с зажимами якоря. Направление э.д.с., индуцируемой остаточным

магнетизмом в обмотке якоря, зависит от направления вращения якоря, следовательно выбор зажимов также зависит от направления вращения. Если соединения выполнены неправильно, то генератор не возбуждается.

Характеристика холостого хода генератора при параллельном возбуждении практически не отличается от характеристике при независимом возбуждении, так как влияние на эту характеристику падения напряжения $I_B r_{\text{я}}$ и реакции якоря от тока возбуждения ничтожно. Это совпадение характеристик имеет место и для регулировочной характеристики.

Но внешняя характеристика при параллельном возбуждении генератора (а) идет значительно ниже, чем при независимом возбуждении (б) (рис. 1-8.8). Причиной этому является уменьшение силы тока возбуждения при понижении напряжения, так как $I_B = U / r_B$. При независимом возбуждении понижение напряже-

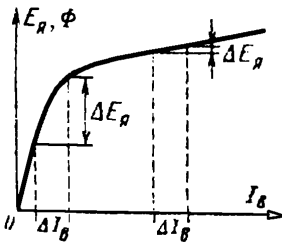


Рисунок 1-8.8

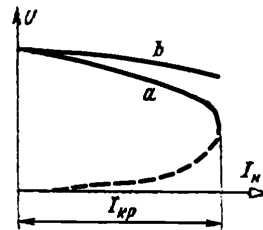


Рисунок 1-8.9

ния вызывается двумя причинами: потерей напряжения в якоре и реакцией якоря. При параллельном возбуждении к этим двум причинам добавляется третья - уменьшение силы тока возбуждения. Пока эта сила тока соответствует условиям насыщения магнитной цепи генератора (пологой части магнитной характеристики), уменьшение силы тока возбуждения. Пока это сила тока соответствует условиям насыщения магнитной цепи генератора (пологой части характеристики), уменьшение э.д.с. якоря меньше уменьшения силы тока возбуждения (рис. 1-8.9). В таких условиях при уменьшении сопротивления цепи нагрузки сила тока якоря возрастает. Но условия резко изменяются, когда в результате увеличения силы тока якоря и вызванного этим понижения напряжения сила тока возбуждения уменьшается настолько, что

магнитная цепь генератора оказывается в ненасыщенном состоянии. В условиях линейной части магнитной характеристики уменьшение силы тока возбуждения вызывает пропорциональное уменьшение потока и э.д.с. якоря, что вызывает дальнейшее уменьшение силы тока возбуждения, а это в свою очередь обуславливает новое понижение э.д.с. и т. д. Имеет место своеобразное саморазмагничивание генератора, заканчивающееся тем, что в машине при коротком замыкании якоря сохраняется только остаточное намагничивание, поддерживающее замыкания $I_{я,к}$.

Сила тока якоря, при которой машина переходит в условия саморазмагничивания, называется критической $I_{кр}$. Она больше номинальной силы тока якоря в 2–2.5 раза. Участок внешней

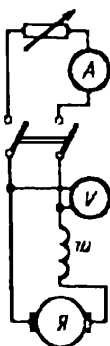


Рисунок I-8.10

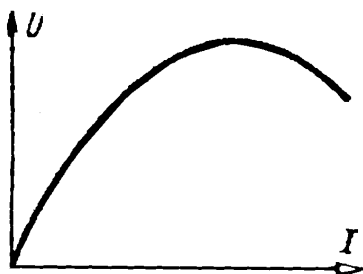


Рисунок I-8.11

характеристики ниже $I_{кр}$ (пунктир) соответствует неустойчивому режиму.

Изменение напряжения у генератора при параллельном возбуждении значительно больше, чем при независимом, и составляет 8–15%. В генераторе последовательного возбуждения якорь Я соединен последовательно с обмоткой возбуждения, благодаря чему ток нагрузки служит вместе с тем током возбуждения (рис. I-8.10). Обмотка возбуждения а такой машины выполняется из провода, рассчитанного на силу тока якоря, число витков такой обмотки мало.

При холостом ходе последовательного возбуждения э.д.с. в обмотке его якоря будет индуцироваться только остаточным магнетизмом, следовательно, у этого генератора нельзя снять характеристику холостого хода. Отсутствует также у него и регулировочная характеристика.

Напряжение этого генератора (рис. I-8.11) сначала возрастает

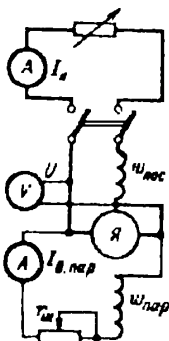


Рисунок I-8.12

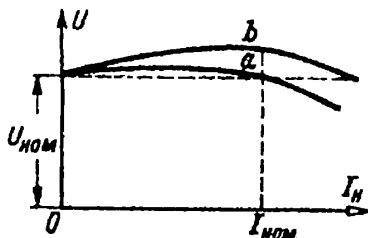


Рисунок I-8.13

тает с увеличением тока якоря. Затем вид характеристики начинает изменяться из-за магнитного насыщения (э.д.с. якоря перестает увеличиваться, в то время как продолжается возрастание потери напряжения в якоре) и размагничивающего действия реакции якоря. В результате напряжение генератора при дальнейшем возрастании нагрузки уменьшается. Из-за непостоянства напряжения генераторы последовательного возбуждения применяются лишь в немногих специальных случаях.

Генератор смешанного возбуждения имеет две обмотки возбуждения: параллельную $\omega_{\text{ПАР}}$ и последовательную $\omega_{\text{ПОС}}$ (рис. I-8.12). У такого генератора напряжение остается практически постоянным при изменениях нагрузки в определенных пределах. Это достигается путем использования последовательного возбуждения для компенсации потери напряжения в якоре и в обмотке возбуждения, а также для компенсации размагничивающего действия якоря. Благодаря наличию обмотки последовательного возбуждения главный магнитный поток генератора и вместе с ним э.д.с. $E_{\text{я}}$ возрастают с увеличением нагрузки. Соответствующим подбором числа витков обмотки последовательного возбуждения можно достичь равенства напряжений генератора при холостом ходе и при номинальной нагрузке (кривая а на рис. I-8.13). Затем вид характеристики начинает изменяться из-за магнитного насыщения (э.д.с. якоря перестает увеличиваться в то время как продолжается возрастание потери напряжения в якоре) и размагничивающего действия реакции якоря. В результате напряжение генератора при дальнейшем возрастании нагрузки

уменьшается. Из-за непостоянства напряжения генераторы последовательного возбуждения применяются лишь в немногих специальных случаях.

Генератор с мешанного возбуждения имеет две обмотки возбуждения: параллельную $\omega_{\text{ПАР}}$ и последовательную $\omega_{\text{ПОС}}$ (рис. I-8.12). У такого генератора напряжение остается практически постоянным при изменениях нагрузки в определенных пределах. Это достигается путем использования последовательного возбуждения для компенсации потери напряжения в якоре и в обмотке возбуждения, а также для компенсации размагничивающего действия якоря. Благодаря наличию обмотки последовательного возбуждения главный магнитный поток генератора и вместе с ним э.д.с. $E_{\text{я}}$ возрастают с увеличением нагрузки. Соответствующим подбором числа витков обмотки последовательного возбуждения можно достичь равенства напряжений генератора при холостом ходе и при номинальной нагрузке (кривая а на рис. I-8.13). В тех специальных случаях, когда повышение напряжения генератора должно компенсировать возрастание потери напряжения в линии, генератор может быть снабжен усиленной последовательной обмоткой возбуждения (кривая б).

Генератор смешанного возбуждения удобен в установках относительно небольшой мощности, чтобы предупредить возникновение значительных изменений напряжений при отключениях отдельных потребителей. Но использование таких генераторов для параллельной работы обычно неудобно: случайное понижение частоты вращения первичного двигателя генератора может сделать э.д.с. генератора меньше напряжения сети, из-за этого ток в якоре генератора и в его последовательной обмотке возбуждения изменит свое направление, что может вызвать перемагничивание генератора и тяжелую аварию установки.

9. Двигатели постоянного тока

Как и генераторы, двигатели постоянного тока имеют независимое, параллельное, последовательное и смешанное возбуждения. Для рассмотрения физических процессов в двигателе примем схему параллельного возбуждения (рис I-9.1)

При подаче напряжения на клеммы машины появляется две цепи с токами - якорная и цепь возбуждения. Ток в цепи возбуждения создает поток Φ который пронизывает якорную обмотку.

Этот ток I_B ограничен большим числом витков и высоким сопротивлением обмотки. Ток якорной цепи определяется по формуле 3.4

$$I_a = \frac{(U - E)}{r_a}$$

Поскольку, во время включения двигателя, якорь не подвижен, согласно (3.1) при $n = 0$, $E = 0$. Сопротивление якорной обмотки r_a мало - для машин средней мощности составляет десятые доли Ома. Таким образом в момент запуска, ток якорной цепи может превышать допустимый в 10-50 раз. При слабом пружинном контакте между щеткой и коллекторными пластинами возникает "дуга", щетка приваривается к пластине и при появлении момента вращения

$$M_{BP} = C_e I_a \Phi_B$$

может произойти разрушение коллектора. Допускается "пусковой ток" не более двух номиналов, что допускается

$$I_n = \frac{U}{(r_a + r_n)} \leq 2I_n \quad (9.1)$$

Введем в якорную цепь пусковой реостат r_n (рис. I-9.1).

Для получения скоростной и механической характеристик следует воспользоваться уравнениями 3.1, 3.2 и 3.4 Подставив значение Э.Д.С. в уравнение напряжения якорной цепи, получим уравнение скоростной характеристики:

$$n = \frac{(U - r_a I_a)}{C_e \Phi_B} \quad (9.2)$$

Если в этом уравнении ток I_a выразить через момент M_{BP} из уравнения 3.2, получим уравнение механической характеристики:

$$n = \frac{U}{C_e \Phi_e} - M_{BP} \frac{r_a}{C_e C_M \Phi_B} \quad (9.3)$$

Поскольку $I_a \sim M_{BP}$, видно из уравнения

$$M_{BP} = C_M I_a \Phi_B$$

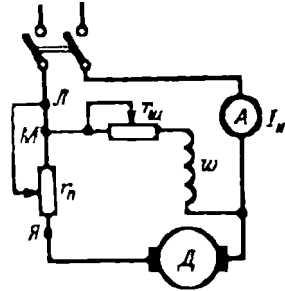


Рисунок I-9.1

где C_M и Φ_B величины постоянные, для анализа работы машины можно пользоваться только скоростной характеристикой. Анализ равнения скоростной характеристики показывает что:

- а) При $\Phi_B \rightarrow 0$, $n \rightarrow \infty$, т. е. при обрыве цепи возбуждения в двигателях параллельного возбуждения при незначительной нагрузке на валу, скорость вращения якоря неограниченно возрастает за счет остаточного магнитного потока $\Phi_{ост}$ и может привести к разрушению машины.
- а) Двигатели последовательного возбуждения по той же причине запрещено соединять с рабочим механизмом при помощи ременных и цепных передач, т.к. при их обрыве наступает явление "разноса" машины.

Механическая характеристика двигателя параллельного возбуждения (рис. 1-9.2) при постоянном напряжении и, следовательно, постоянном потоке возбуждения в рабочей части имеет вид прямой, т.к. в уравнении (9.2) переменной величиной является только ток I_a

или M . При изменении сопротивления якоря (введение пускового реостата) можно получить семейство характеристик с большим наклоном. При увеличении нагрузки на валу, увеличивается ток якоря, уменьшается поток Φ_B и характеристика загибается вниз за счет реакции якоря.

Механическая характеристика двигателя последовательного возбуждения (рис. 1-9.3) пересекает ось ординат при очень высоких значениях скорости вращения n , т.к. поток возбуждения Φ_B зависит от тока якоря I_a , и

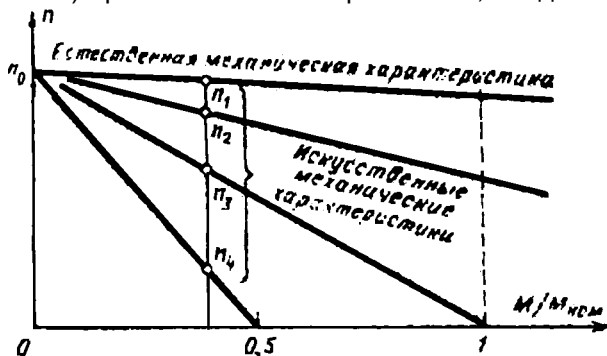


Рисунок 1-9.2

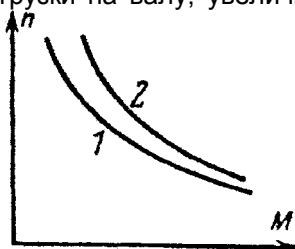


Рисунок 1-9.3

соответственно, от момента на валу. Кривая 2 получается при введении реостата в цепь якоря.

При смешанном возбуждении, когда имеются две обмотки, включенные согласно, уравнение принимает вид:

$$n = \frac{(U - r_a I_a)}{C_e (\Phi_{\text{ПАР}} - \Phi_{\text{ПОСЛ}})}$$

механическая характеристика (рис. 1-9.4) становится более мягкой и имеет верхний предел скорости вращения.

При встречном включении обмоток, характеристика становится идеально жесткой, т.е. параллельна оси абсцисс.

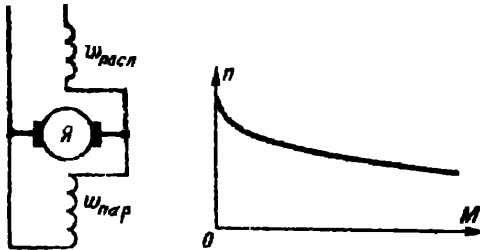


Рисунок 1-9.4

10. Исполнительные двигатели постоянного тока

Двигатели постоянного тока широко используются как исполнительные двигатели в системах автоматического регулирования, в счетно-решающих устройствах, в следящем приводе.

Исполнительные двигатели (ИД) предназначены для точной обработки команд - сигналов, подаваемых в форме напряжения управления различной величины и соответствующей полярности. Мощность ИД обычно не превышает 0,6 кВт. Двигатели постоянного тока наиболее полно отвечают одному из главных требований, предъявляемых к ИД - способности плавно и глубоко регулировать скорость вращения.

Для восприятия сигнала управления цепь якоря и цепь возбуждения у ИД независимы, причем одна из цепей включена постоянно, а на вторую подается напряжение управления.

При обычной схеме управления двигателем сигнал подается на обмотку якоря; обмотка возбуждения включена на постоянное напряжение (иногда поток возбуждения создается постоянными магнитами). Такое управление называется якорным. Механические характеристики двигателя при якорном управлении соответствуют кривым рис. 1-9.2. Потребляемая обмоткой возбуждения мощность очень невелика. Однако мощность сигнала должна быть значительной: практически она равна мощности ИД. Такой сигнал может быть получен только от мощного усилителя.

При небольшой мощности усилителя (например, электронного) применяют полюсное управление: цепь якоря ИД включают (обычно с добавочным сопротивлением) на постоянное напряжение, а цепь возбуждения воспринимает сигнал управления от усилителя. Механические характеристики двигателя при полюсном управлении соответствуют кривым рис. I-9.3. Они более мягкие, чем при якорном управлении ИД. Точность отработки сигнала ИД повышается, если уменьшить момент инерции якоря. Это достигается, в частности, устройством полого якоря (рис. I-10.1), когда вращаются только коллектор и обмотка, запрессованная в пластмассовый "стакан". Но так как при этом увеличивается немагнитный зазор в машине, то увеличивается необходимая мощность возбуждения и габариты ИД.

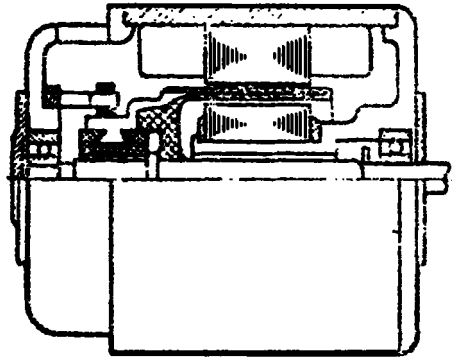


Рисунок I-10.1 Малоинерционный исполнительный двигатель постоянного тока

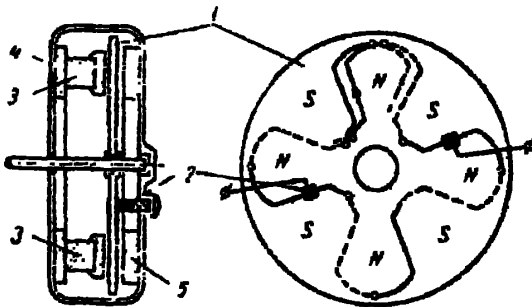


Рисунок I-10.2 Конструкция микродвигателя с дисковым якорем и печатной обмоткой

Другим способом уменьшения инерционности ИД является применение относительно недавно разработанных микродвигателей с печатной обмоткой на дисковом якоря (рис. I-10.2). Якорь представляет собой тонкий немагнитный диск 1 (из текстолита или керамики) с печатной однослойной волновой обмоткой. Плоские (из фольги) проводники обмотки расположены радиально по обеим сторонам диска и соединены между собой через отверстия в нем. Серебряно-

графитовые щетки 2 скользят по поверхности проводников на одной стороне диска, подводя к якорю ток напряжением до 30 В.

Магнитный поток, создаваемый постоянными магнитами 3, пронизывает диск в осевом направлении, замыкаясь по кольцам 4 и 5 из мягкой стали. Корпус микродвигателя (крышки) немагнитный. Электромеханическая постоянная времени дискового якоря весьма мала - около 0,01 сек.

II. Общие вопросы теории машин переменного тока

1. Конструкция обмоток статора

1.1 Назначение и классификация обмоток статора

Обмотка статора машин переменного тока имеет много общего с обмоткой якоря машин постоянного тока. Но между ними есть и существенная разница - обмотки переменного тока не замкнуты.

Элементом обмотки статора является **секция**, которая может быть одно- и многовитковой. Секция состоит из активных сторон и лобовых частей. Расстояние между активными сторонами секций называется **шагом обмотки y** .

Шаг называют **диаметральным** или **полным**, если он равен полюсному делению ($y = \tau = \frac{Z}{2p}$ - целое число), и **укороченным**, если он меньше полюсного деления ($y < \tau$).

Применяемые в настоящее время обмотки статора классифицируют:

1) по числу фаз - однофазные и многофазные (главным образом трехфазные);

2) по способу укладки секций в пазы - однослойные, когда сторона секции занимает весь паз, и двухслойные, когда в одном пазу лежат две стороны различных секций (по аналогии с обмоткой якоря машины постоянного тока);

3) в зависимости от ширины секций - обмотки с полным и обмотки с укороченным шагом;

4) по числу пазов на полюс и фазу q - обмотки с целым q и обмотки с дробным q ;

5) по способу выполнения секций - катушечные и стержневые обмотки.

Двухслойные обмотки статоров разделяют на петлевые и волновые. Преимущественное применение получили петлевые обмотки. Волновые обмотки статоров применяют редко, главным образом в гидрогенераторах большой мощности. Гораздо чаще волновые обмотки переменного тока применяют в роторах асинхронных двигателей с контактными кольцами. Исходя из этого, в настоящей главе рассмотрены лишь петлевые обмотки двухслойного статора.

К обмоткам статора машин переменного тока предъявляют ряд требований. Некоторые из них, общие для всех обмоток электрических машин, - технологичность, минимальный расход проводниковых и изоляционных материалов, эксплуатационная надежность. Наряду с этим имеются специальные требования:

1) фазные напряжения должны быть одинаковыми по величине и сдвинуты по фазе относительно друг друга на требуемый угол (для трехфазных обмоток - 120 эл. град);

2) активные и индуктивные сопротивления всех фазных обмоток должны быть одинаковыми (это требование не распространяется на двухфазные обмотки);

3) форма кривой линейной э.д.с. должна быть практически синусоидальной.

В соответствии с ГОСТ выводы обмоток трехфазных машин переменного тока обозначают следующим образом:

первая фаза начало С1 - конец С4

вторая фаза начало С2 - конец С5

третья фаза начало С3 - конец С6

1.2 Трехфазная двухслойная обмотка статора

Простейшая трехфазная обмотка может быть выполнена тремя секциями, оси которых сдвинуты по окружности статора на $1/3$ двойного полюсного деления (120 эл. град). Каждая секция в этом случае представляет собой фазную обмотку, называемую **сосредоточенной**, так как все витки каждой фазы этой обмотки сосредоточены в двух пазах. Сосредоточенные обмотки не получили практического применения, так как они не удовлетворяют изложенным выше требованиям.

В машинах переменного тока применяют **распределенные** обмотки, в которых каждая фазная обмотка состоит из нескольких секций, занимающих q пазов в пределах каждого полюсного деления. Таким образом, для образования трехфазной обмотки зубцовый слой сердечника статора в пределах каждого полюсного деления необходимо разделить на три зоны по q пазов в каждой. Порядок чередования таких зон под каждым полюсом должен быть одинаковым. Секции, уложенные в пазы одинаковых зон, образуют фазные обмотки.

Число пазов, приходящихся на полюс и фазу,

$$q = \frac{Z}{2p} \quad (1.1)$$

где m - число фаз (для трехфазной обмотки $m = 3$).

Угол сдвига между осями фазных обмоток в трехфазной обмотке составляет 120 эл. град. Однако, для построения схемы обмотки удобнее этот сдвиг выразить в пазах. Вся окружность статора составляет 360 эл. град., поэтому угол между соседними пазами (град.)

$$\alpha = 360 \frac{p}{Z} \quad (1.2)$$

Тогда сдвиг между фазными обмотками, выраженный в пазах

$$\lambda = \frac{120^\circ}{\alpha} \quad (1.3)$$

Рассмотрим на примере порядок построения развернутой схемы трехфазной двухслойной обмотки статора. Двухслойные обмотки преимущественно распространены в машинах переменного тока, это объясняется рядом их достоинств, из которых главным является возможность любого укорочения шага обмотки, что дает в свою очередь возможность максимально приблизить форму кривой э.д.с. к синусоиде. Однако двухслойные обмотки не лишены недостатков, к которым, прежде всего следует отнести некоторые затруднения при укладе секций обмотки, трудность ремонта обмотки при повреждении изоляции нижнего слоя, а также невозможность выполнить разъемным статор без нарушения обмотки в местах разъема.

1.3 Способы соединения секционных групп обмоток статора

Секционной группой называют ряд последовательно соединенных между собой секций, которые лежат в соседних пазах и быть соединены последовательно или параллельно, что влияет на число параллельных ветвей в обмотке.

На рис. II-1.1. показано последовательное соединение двух секционных групп фазной обмотки, для чего необходимо нижний конец первой секционной

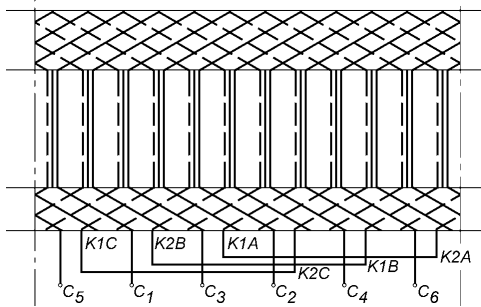


Рисунок II-1.1

группы (K1A) соединить с нижним концом второй секционной группы (K2A), а верхние концы вывести к зажимам фазной обмотки (C1-C4). При таком соединении секционных групп э.д.с. фазной обмотки представляет собой сумму э.д.с. всех секционных групп.

На рис. II-1.2 показано последовательное соединение че-

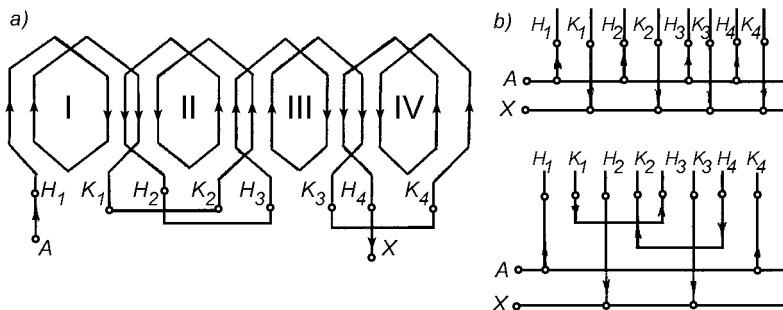


Рисунок II-1.2

тырех секционных групп. Здесь вторая и третья секционные группы соединены верхними концами. Третья и четвертая - нижними концами, а к выводам фазной обмотки присоединены верхние концы первой и четвертой секционных групп. При последовательном соединении секционных групп фазная обмотка независимо от числа полюсов машины содержит одну параллельную ветвь ($2a=2p$).

Двухслойная обмотка в каждой фазе имеет $2p$ секционных групп, поэтому, соединив все секционные группы параллельно, получим обмотку, состоящую из $2p$ параллельных ветвей ($2a=2p$).

Если половину секционных групп каждой фазной обмотки соединить параллельно в одну ветвь, а затем соединить параллельно, то получим последовательно-параллельное (смешанное) соединение секционных групп с двумя параллельными ветвями в фазной обмотке ($2a=2p$). Чтобы э.д.с. параллельных ветвей были одинаковы, в каждую параллельную ветвь через одну включают секционные группы. Таким образом, в одной параллельной ветви оказываются все четные секционные группы, а в другой - все нечетные.

1.4 Однослойные обмотки статора

Трехфазная обмотка. В однослойных обмотках каждая сторона секции полностью заполняет паз сердечника статора.

При этом число циюнных групп в каждой фазе равно числу пар полюсов, так что общее число секционных групп в однослойной обмотке $A = pm$.

Однослойные обмотки статоров разделяют на концентрические и шаблонные. В концентрической обмотке секции каждой секционной группы

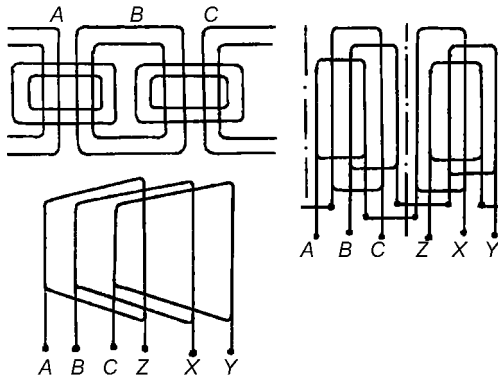


Рисунок II-1.3

имеют разную ширину и располагаются концентрически. Шаги обмотки у секций, входящих в секционную группу, неодинаковы, но их среднее значение $y_{CP} = \frac{Z}{2p}$.

Рассмотренную однослойную обмотку называют **двухплоскостной**, так как лобовые части секций этой обмотки имеют разный вылет и располагаются в двух плоскостях. Такая конструкция обмотки позволяет избежать пересечения лобовых частей секций, принадлежащих разным фазам.

На рис. II-1.4 показана схема однослойной трехфазной обмотки для машины с разъемным статором. Такая конструкция обмотки позволяет разобрать статор на две части (по линии разреза), не повредив ни одну из секций. Лобовые части секций в этой обмотке расположены в трех плоскостях.

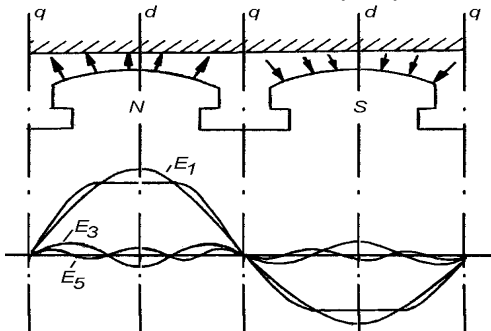


Рисунок II-2.0

Применение

различных по размеру секций, образующих секционные группы, ведет к тому, что секционные группы концентрических обмоток имеют разные сопротивления. Это следует учитывать при опре-

делении размеров секционных групп, образующих фазную обмотку. Необходимо, чтобы все фазные обмотки имели одинаковое сопротивление, для чего они должны содержать одинаковое число различных по размерам секционных групп.

Существенный недостаток концентрических обмоток - наличие секций различных размеров, что усложняет изготовление обмотки. Этот недостаток отсутствует в шаблонных однослойных обмотках, так как их секции имеют одинаковые размеры и могут изготавливаться на общем шаблоне. Кроме того, все секции таких обмоток имеют одинаковые сопротивления, а лобовые части получаются короче, чем в концентрических обмотках, что уменьшает расход меди.

В качестве примера рассмотрим шаблонную обмотку двухполюсной машины с тремя секциями в секционной группе. Трапецидальная форма секций несколько облегчает расположение лобовых частей обмотки. Общий недостаток всех однослойных обмоток (кроме шаблонной) - это затруднение с размещением лобовых частей, которые приходится располагать в двух и более плоскостях. Кроме того, однослойные обмотки не допускают укорочения шага секций, что в ряде случаев необходимо для улучшения рабочих свойств машины переменного тока.

Однофазная обмотка. Ее выполняют аналогично одной фазе трехфазной обмотки с той лишь разницей, что секции этой обмотки занимают $2/3$ сердечника статора. Такая конструкция обмотки делает ее наиболее экономичной, так как заполнение оставшихся $1/3$ пазов статора увеличило бы расход меди на изготовление обмотки в 1,5 раза, а э.д.с. обмотки - лишь в 1,15 раза. Кроме того, такая конструкция однофазной обмотки позволяет избавиться от третьей гармоники э.д.с.

1.5 Трехфазная обмотка с дробным числом пазов на полюс и фазу

В мощных многополюсных синхронных генераторах (гидрогенераторах) практически невозможно выполнить обмотку статора с числом пазов на полюс и фазу $q > 1$, равным целому числу, так как для этого потребовалось бы иметь на статоре слишком большое число пазов. В этом случае обмотку статора выполняют с дробным q . Такие обмотки имеют некоторое преимущество перед обмотками с целым q , так как позволяют при небольших значениях q получить э.д.с. практически синусоидальной формы.

Обмотки статоров с дробным q в двигателях переменного тока применяют главным образом при серийном производстве, когда для изготовления листов статора двигателей с различным числом полюсов используют один штамп. При этом одно из значений $2p$ дает $q \neq$ целое число. Дробное значение q может быть представлено в виде

$$q = a + \frac{b}{c} = \frac{ac + b}{c} \quad (1.5)$$

При этом, очевидно, что числа b , c и $(ac + b)$ не имеют общего делителя. С учетом 1.5 число пазов статора

$$z = 2mpq = 2pm \frac{(ac + b)}{c} \quad (1.6)$$

Если c не кратно m , то обмотка с дробным q эквивалентна обмотке с целым $q=ac+b$. Поскольку q больше действительного (дробного) q в c раз, то и эквивалентное число пазов $Z_{ЭК}$ больше действительного Z в c раз.

2. Электродвижущие силы обмоток переменного тока

2.1 Э.д.с. обмотки от основной гармоники магнитного поля

При конструировании машин переменного тока стремятся к тому, чтобы индуцируемые в обмотках э.д.с. были синусоидальными. Если э.д.с. индуцируются вращающимся магнитным полем, то для этого необходимо, чтобы распределение магнитной индукции вдоль воздушного зазора было также синусоидальным.

Получение вполне синусоидального распределения магнитного поля практически невозможно, однако для приближения к этой цели применяются различные меры конструктивного характера. Например, для улучшения кривой поля возбуждения явнополюсных синхронных генераторов их полюсные наконечники обычно выполняют с радиусом, несколько меньшим, чем радиус воздушного зазора, в результате чего величина воздушного зазора у края наконечника (δ_m) больше, чем по его середине (δ). На

практике $\frac{\delta_m}{\delta} = 1 \div 2$, и коэффициент полюсного перекрытия

$\alpha = \frac{b}{c} = 0.60 \div 0.75$. Тем не менее, и в этом случае кривая поля

наряду с основной гармоникой ($v=1$) содержит другие нечетные

гармоники ($\nu=3,5,7\dots$), амплитуды которых уменьшаются с увеличением их порядка ν (рис II-2.0).

2.2 Коэффициент скоса

В ряде случаев, как в синхронных, так и в асинхронных машинах для улучшения формы кривой э.д.с. обмотки и для других целей осуществляется скос пазов относительно бегущего магнитного поля. Например, в явнополюсных синхронных машинах иногда выполняют скос пазов статора относительно полюсных наконечников ротора или наоборот. При этом фаза э.д.с., индуцируемых в отдельных участках проводника синусоидально распределенным магнитным полем, непрерывно изменяется вдоль проводника и элементарные э.д.с., индуцируемые на обоих концах проводника, сдвинуты по фазе на угол

$$\gamma_C = \frac{\sigma_C}{\tau} \pi,$$

где σ_C - величина скоса.

В этом случае для определения э.д.с. проводника $E_{\text{ПР}}$ необходимо сложить векторы э.д.с. отдельных участков проводника ΔE . В пределе, если рассматривать бесконечно малые участки проводников, $\Delta E \rightarrow 0$ и геометрическая сумма $E_{\text{ПР}}$ векторов $\Delta \dot{E}$ изобразится дугой и будет равна хорде окружности, опирающейся на центральный угол γ_C .

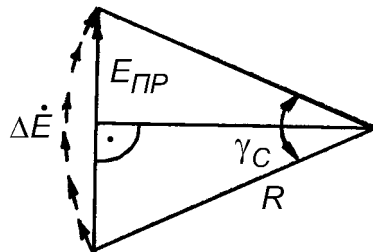


Рисунок II-2.1

При отсутствии скоса $\Delta \dot{E}$ складываются арифметически и их сумма равна длине дуги. Отношение длины хорды к ее дуге $k_C = \frac{2R \sin(\gamma_C/2)}{R \gamma_C} = \frac{\sin(\gamma_C/2)}{\gamma_C/2}$

определяет степень уменьшения э.д.с. $E_{\text{ПР}}$ при наличии скоса и называется **коэффициентом скоса пазов обмотки**. Подставив сюда приведенное выше значение угла γ_C , получим

$$k_C = \frac{\sin\left(\frac{bc}{\tau} \frac{\pi}{2}\right)}{\frac{bc}{\tau} \frac{\pi}{2}} \quad (2.1)$$

Очевидно, что при $bc \rightarrow 0$ будет $k_C = 1$.

Обычно скос относительно невелик и значение k_C близко к единице. Например, при $\sigma_C/\tau = 1/6$:

$$k_C = \frac{\sin \frac{\pi}{2 \cdot 6}}{\frac{\pi}{2 \cdot 6}} = \frac{12}{\pi} \sin 15^\circ = \frac{12}{\pi} \cdot 0.259 = 0.989,$$

т.е. э.д.с. $E_{\text{ПР}}$ уменьшается на 1,1%.

2.3 Коэффициент укорочения

Шаг витка и катушки обмотки переменного тока y по причинам, выясняемым ниже, чаще всего несколько укорачивают по сравнению с полюсным делением τ , так что относительный шаг меньше обычно единицы.

$$\beta = \frac{y}{\tau} \quad (2.2)$$

Э.д.с. двух активных сторон витка $E'_{\text{ПР}}$ и $E''_{\text{ПР}}$ имеют одинаковую величину, но сдвинуты по фазе на угол $\beta\pi$, так как активные проводники витка сдвинуты в магнитном поле на такой угол. Э.д.с. витка равна геометрической разности э.д.с. проводников:

$$\dot{E}_B = \dot{E}'_{\text{ПР}} - \dot{E}''_{\text{ПР}} \quad (2.3)$$

$$E_B = 2E_{\text{ПР}} \sin \frac{\beta\pi}{2}$$

Входящая в выражение (2.3) величина

$$K_y = \sin \frac{\beta\pi}{2} \quad (2.4)$$

равна отношению геометрической суммы э.д.с. проводника витка E_B к их арифметической сумме $2E_{\text{ПР}}$, учитывает уменьшение э.д.с. витка в результате укорочения шага и называется **коэффициентом укорочения шага обмотки**. Очевидно, что величина E_B максимальна при полном шаге ($y = \tau$, $\beta = 1$), когда $K_y \neq 1$.

Равенства

2.3 и 2.4
тельные также и
при удлиненном
шаге ($y > \tau$, $\beta > 1$).

Группа по-
следовательно
соединенных вит-
ков, уложенная в
одни и те же пазы
и имеющая, поми-

мо отдельных витков, также общую пазовую изоляцию от стенок пазы, называется **катушкой**. Если катушка содержит витков W_K , то э.д.с. катушки $E_K = W_K E_C$

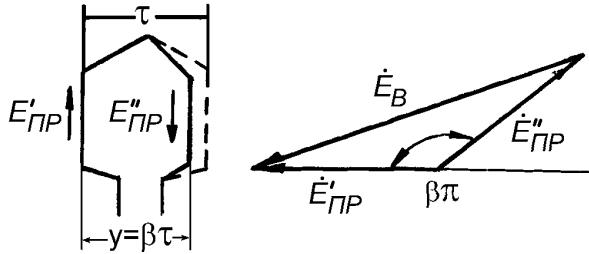


Рисунок II-2.2

2.4 Коэффициент распределения

Обычно для получения достаточного количества проводников и витков в фазе и сохранения в то же время приемлемых размеров пазов количество пазов в машине делают больше. При этом ряд (q) катушек, имеющих по одинаковому количеству витков W_K и лежа-

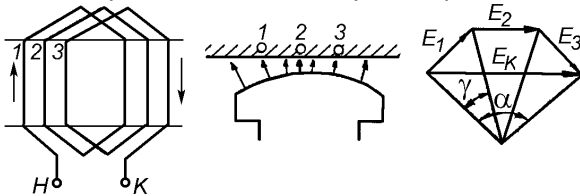


Рисунок II-2.3

щих в соседних пазых, соединяют последовательно. Такую группу катушек, принадлежащих одной фазе, называют катушечной группой. Э.д.с. соседних катушек группы сдвинуты на угол

соответственно сдвигу катушек относительно друг друга в магнитном поле. При этом вся группа из q катушек занимает по окружности якоря угол (электрический),

$$\gamma = \frac{2\pi p}{Z} \quad (2.5)$$

называемый углом **фазной зоны**.

$$\alpha = q\gamma = \frac{2\pi pq}{Z} \quad (2.6)$$

называемый углом **фазной зоны**.

Э.д.с. катушечной группы \dot{E}_q равна геометрической сумме э.д.с. отдельных катушек группы и меньше арифметической суммы э.д.с. этих катушек qE_K .

Отношение

$$K_P = \frac{E_q}{qE_K} \quad (2.7)$$

называется **коэффициентом распределения обмотки** и характеризует уменьшение э.д.с. катушечной группы вследствие распределения ее витков qW_K в q отдельных пазах.

Таким образом, согласно выражению (2.7)

$$E_q = qE_K K_P \quad (2.8)$$

Вокруг фигуры, образованной векторами \dot{E}_K можно описать окружность радиусом R . Тогда на основании этого рисунка:

$$E_q = 2R \sin \frac{\alpha}{2}$$

$$E_K = 2R \sin \frac{\gamma}{2} = 2R \sin \frac{\alpha}{2q}$$

Подставив эти значения E_q и E_K в (2.7) получим формулу для вычисления K_P :

$$K_P = \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2q}} \quad (2.9)$$

Очевидно, что при $q = 1$ $K_P = 1$ $q > 1$ $K_P < 1$.

Если в пределах угла фазной зоны α величину q увеличить, переходя ко все более мелким пазам, то в идеализированном предельном случае, когда $q = \infty$, получим так называемую **равномерно распределенную обмотку**. Для такой обмотки, заменив в знаменателе (2.9) в связи с малостью угла синус его аргументом, получим

$$K_{P\infty} = \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{\frac{\alpha}{2}} \quad (2.10)$$

2.5 Э.д.с. от высших гармоник магнитного поля

Полученные выражения нетрудно распространить на э.д.с. E_v , индуцируемую в обмотке высшей пространственной гармоникой магнитного поля. Действительно, полюсное деление ν -гармоники τ_v в ν раз меньше τ и поэтому, если сдвиг двух проводников витка относительно основной гармоники ($\nu = 1$) составляет угол $\beta\pi$, то относительно ν -й гармоники этот сдвиг равен $\nu\beta\pi$. В результате при определении коэффициента укорочения для ν -й гармоники вместо выражения 2.4. надо пользоваться равенством

$$K_{y\nu} = \sin \frac{\nu\beta\pi}{2} \quad (2.11)$$

Сдвиг фаз э.д.с. соседних катушек группы также будет в ν раз больше и поэтому коэффициент распределения надо вычислять по формулам:

$$K_{p\nu} = \frac{\sin \frac{\nu\alpha}{2}}{q \sin \frac{\nu\alpha}{2q}} \quad (2.12)$$

$$K_{p\nu} = \frac{\sin \frac{\nu\pi}{2}}{q \sin \frac{\nu\pi}{2mq}} \quad (2.13)$$

Аналогично угол скоса паза относительно поля ν -й гармоники также будет в ν раз больше, и поэтому для коэффициента скоса получим

$$K_{c\nu} = \frac{\sin \frac{\nu bc \pi}{\tau 2}}{\frac{\nu bc \pi}{\tau 2}} \quad (2.14)$$

Обмоточный коэффициент для высшей гармоники

$$K_{об.\nu} = K_{y\nu} \cdot K_{p\nu} \cdot K_{c\nu} \quad (2.15)$$

Полюсное деление для ν -й гармоники в ν раз меньше полюсного деления основной гармоники.

Частота э.д.с. от высшей гармоники поля зависит от скорости вращения этой гармоники. Например, все гармоники поля возбуждения синхронной машины вращаются со скоростью вра-

щения полюсов, т.е. с одинаковой скоростью. Однако число полюсов ν -й гармоники в ν раз больше, и поэтому в данном случае

$n_\nu = \frac{n_1}{\nu}$, т.е. высшие гармоники поля индуцируют э.д.с. высших

частот или высшие гармоники э.д.с. В других случаях все э.д.с. E_ν могут иметь одинаковую частоту.

Если э.д.с. от различных гармоник поля имеют различные частоты, то действующее значение суммарной, или полной э.д.с.:

$$E_\nu = \sqrt{E_1^2 + E_3^2 + E_5^2 + \dots + E_\nu^2} \quad (2.16)$$

2.6 Улучшение формы кривой э.д.с.

Высшие гармоники э.д.с. могут вызвать в электрических сетях и приемниках ряд нежелательных явлений. Поэтому необходимо принять меры к их подавлению. Первой из таких мер является улучшение формы кривой распределения самого магнитного поля и ее приближение к синусоидальной. Однако получить вполне приемлемые результаты при этом не удастся.

Поэтому стремятся подавлять высшие гармоники э.д.с. с помощью соответствующей конструкции обмоток. К таким конструктивным мерам относятся: 1) укорочение шага обмотки; 2) распределение обмотки по пазам таким образом, чтобы число катушек в катушечной группе было $q > 1$; 3) скос пазов обмотки.

Э.д.с. от третьей гармоники поля.

Три фазы обмотки А.В.С. сдвинуты относительно друг друга по отношению к гармонике поля $\nu = 1$ на 120° , по отношению к гармонике $\nu = 3$ на $3 \cdot 120^\circ = 360^\circ$ или 0° , по отношению к гармонике $\nu = 5$ на $5 \cdot 120^\circ = 600^\circ$ или 240° , по отношению к гармонике $\nu = 7$ на $7 \cdot 120^\circ = 840^\circ$ или 120° и т.д. На такие же углы сдвинуты соответствующие гармоники $\nu = 3$ и кратных им ($\nu = 9, 15, 21$ и т.д.) в разных фазах обмотки совпадают по фазе и поэтому при соединении обмотки в звезду в линейных напряжениях эти гармоники будут отсутствовать. При соединении обмотки в треугольник э.д.с. гармоник $\nu = 3$ складываются, вызывают ток третьей гармоники i_3 , циркулирующей по замкнутому треугольнику, и расходуются на падения напряжения внутри обмотки. По-

этому и в данном случае линейные напряжения не содержат третьих гармоник.

Укорочение шага обмотки.

При $\beta = 1$ для всех нечетных гармоник $K_{уд} = \pm 1$, т.е. в э.д.с. витка э.д.с. всех гармоник проявляются в полной мере. Однако соответствующим выбором шага обмотки можно в принципе добиться уничтожения любой определенной гармоники э.д.с. Например, если сократить шаг на $1/5$ полюсного давления, то для $\nu = 5$ $\beta = 4/5$

$$K_{уд} = \sin \frac{5 \cdot 4\pi}{5 \cdot 2} = \sin 2\pi = 0.$$

и поэтому также $E_5 = 0$. Такой результат объясняется тем, что при указанном укорочении шага э.д.с. от 5-й гармоники поля в двух активных проводниках витка совпадают по фазе и в контуре витка действует встречено друг другу. Такого же результата можно достичь, если взять $\beta = 6/5$, однако удлинение шага невыгодно, так как в большинстве случаев это вызывает увеличение расхода обмоточного провода.

Если желательно уничтожить 7-ю гармонику, то следует укоротить шаг на $1/7$ полюсного деления, т.е. взять $\beta = 6/7$ и т.д.

Достичь одновременно уничтожения всех гармоник невозможно. Поэтому следует стремиться к наибольшему ослаблению наиболее сильных гармоник, которыми обычно являются гармоники наименьшего порядка, т.е. $\nu = 5$ и $\nu = 7$. Для этой цели подходит укорочение шага на $1/6 \tau$, когда $\beta = 5/6 = 0.833$. При этом

$$K_{y5} = \sin \frac{5 \cdot 5 \cdot 180}{6 \cdot 2} = \sin 375^\circ = \sin 15^\circ = 0.259$$

$$K_{y7} = \sin \frac{7 \cdot 5 \cdot 180}{6 \cdot 2} = \sin 525^\circ = \sin 165^\circ = 0.259,$$

т.е. э.д.с. этих гармоник уменьшаются почти в четыре раза по сравнению со случаем, когда $\beta = 1$. В тоже время при $\beta = 5/6$.

$$K_{y1} = \sin \frac{5 \cdot 180}{6 \cdot 2} = \sin 75^\circ = 0.966$$

т. е. основная гармоника э. д. с. уменьшается незначительно.

Укорочение шага возможно только на целое число зубцовых делений. Поэтому не всегда можно иметь $\beta = 5/6$ и обычно берут $\beta = 0.8 \div 0.86$.

Распределение обмотки.

При $q = 1$ для всех гармоник $K_{pv} = \pm 1$ и поэтому ослабления гармоник э.д.с. в обмотке за счет ее распределения в пазах не происходит. Однако, если $q > 1$, то для многих гармоник $|K_{pv}| < K_{p1}$ и э.д.с. соответствующих гармоник значительно уменьшаются. Это объясняется тем, что э.д.с. катушек катушечной группы для v -й гармоники сдвинуты на углы $v\gamma$ вместо углов γ для $v = 1$, в результате чего эти э.д.с. складываются под большими углами и их сумма уменьшается. В то же время для $v = 1$ значения $K_{p1} = K_p$ близки к единице, т.е. распределение обмотки мало влияет на основную гармонику э.д.с.

Гармоники зубцового порядка и скос пазов.

При $q > 1$ для ряда гармоник $K_{pv} = \pm 1$, т.е. ослабления э.д.с. этих гармоник не происходит. Такие гармоники $v = v_z$ называются **гармониками зубцового порядка**. Их порядок

$$v_z = 2mqk \pm 1 = k \frac{Z}{P} \pm 1, \quad (2.17)$$

где $k = 1, 2, 3, \dots$, при $k = 1$ близок к количеству зубцов на пару полюсов Z/P , чем и обусловлено их название. Для трехфазной обмотки

$$v_z = 6kq \pm 1, \quad (2.18)$$

где $k = 1, 2, 3, \dots$,

Например, при $q = 2$, $v_z = 11, 13, 23, 25, \dots$. При $q = 1$ все гармоники $v_z = 5, 7, 11, 13, \dots$ являются гармониками зубцового порядка. В связи с этим не только коэффициенты распределения, но и коэффициенты укорочения шага для гармоник $v = 1$ и $v = v_z$ одинаковы. Таким об-

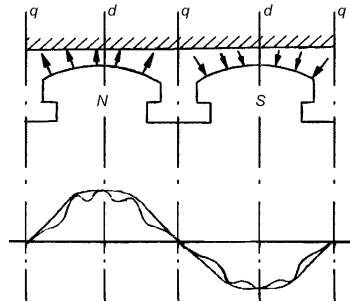


Рисунок II-2.4

разом, укорочением шага обмотки и выбором целого числа $q > 1$ нельзя достичь уничтожения или ослабления высших гармоник э.д.с. от гармоник поля зубцового порядка. Однако при увеличении q увеличивается порядок гармоник v_z , и поскольку гармоники высших порядков в кривой поля выражены слабее, то увеличение q все же способствует улучшению формы кривой э.д.с. обмотки.

Уменьшение высших гармоник э.д.с., в частности, от гармоник поля зубцового порядка возможно также осуществлением скоса пазов или полюсных наконечников. Если, например, выбрать величину скоса $bc = 2\tau_v = 2\tau/v$ то, $K_{cv} = 0$ и $E_v = 0$. Физически это объясняется тем, что при этом в отдельных участках проводника индуцируются одинаковые по величине и обратные по направлению э.д.с.

Наиболее сильными являются первые гармоники зубцового порядка, для которых $K = 1$. Э.д.с. одной из этих гармоник будет равна нулю, если взять

$$bc = \frac{2\tau}{v_z} = \frac{2p\tau}{Z \pm p}$$

На практике обычно величину скоса берут равной зубцовому делению

$$bc = \frac{2p\tau}{Z} \quad (2.19)$$

и тогда э.д.с. от всех гармоник зубцового порядка будут значительно ослаблены.

Влияние пазов.

Рассмотрим влияние пазов статора на кривую поля возбуждения синхронной машины и на э.д.с. обмотки статора. Пазы искажают кривую поля. Можно представить себе, что наличие пазов и зубцов вызывает ряд дополнительных гармоник поля, которые накладываются на первоначальную кривую поля и могут быть названы зубцовыми гармониками поля. Если первоначальное поле синусоидально, то при наличии пазов возникают дополнительные вращающиеся гармоники поля, имеющие порядок

$$v_z = k \frac{Z}{p} \pm 1; \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (2.20)$$

Эти гармоники содержат в ν_z раз больше полюсов, чем основная гармоника, но вращаются, как можно показать, также с ν_z раз меньшей скоростью и поэтому индуцируют в обмотке статора э.д.с. основной частоты.

Таким образом, если поле возбуждения при отсутствии пазов синусоидально, то наличие пазов, несмотря на искажение кривой поля, не приводит к искажению кривой э.д.с. Искажение кривой э.д.с. связано только с наличием высших гармоник в первоначальной кривой поля. Более подробный анализ этого вопроса показывает, что при Z/p , равном целому четному числу, наличие пазов вызывает многократное увеличение тех высших гармоник э.д.с., которые индуцируются нечетными гармониками зубцового порядка ν_z , содержащимися в первоначальной кривой поля. В этом и заключается вредное влияние пазов на форму кривой э.д.с. При Z/p , равном целому четному числу, эффективной мерой борьбы с этим влиянием является скос пазов или полюсных наконечников. При Z/p , не равном целому четному числу, получаются так называемые дробные обмотки, которые обеспечивают хорошую форму кривой э.д.с.

3. Намагничивающие силы обмоток переменного тока

3.1 Намагничивающая сила фазы обмотки

Приступая к изучению магнитного поля, создаваемого обмоткой переменного тока в воздушном зазоре, допустим сначала, что:

- 1) магнитная проницаемость стали сердечников $\mu_c = \infty$;
- 2) пазы и явно выраженные полюсы отсутствуют и воздушный зазор является равномерным;
- 3) катушечные стороны расположены в воздушном зазоре и имеют в сечении вид бесконечно тонкой ленты с шириной, равной величине зазора δ ;
- 4) величина зазора δ мала по сравнению с радиусом статора и полюсным делением. При этих условиях линии магнитной индукции в воздушном зазоре прямолинейны и перпендикулярны поверхностям зазора.

Рассмотрим прежде всего обмотку с целым числом пазов на полюс и фазу.

Н.с. катушек с полным шагом.

Пусть на каждом двойном полюсном делении 2τ расположено по одной катушке с W_K витками и шагом $y = \tau$. Эти катушки сдвинуты относительно друг друга на 2τ , принадлежат одной фазе и нагружены током i_K . Применим к одной из магнитных линий закон полного тока:

$$\oint Hdl = W_K i_K \quad (3.1)$$

Так как, согласно принятому допущению, для $\mu_c = \infty$, то в сердечниках $H_c = 0$ и вместо (3.1) получим

$$2H\delta = W_K i_K \quad (3.2)$$

где H - напряженность магнитного поля в зазоре

На основании выражения (3.1) индукция в зазоре $B = \mu_0 H = \frac{\mu_0}{\delta} \cdot \frac{W_K i_K}{2}$ назовем величину

$$\lambda_\delta = \frac{\mu_0}{\delta} \quad (3.3)$$

удельной магнитной проводимостью воздушного зазора и величину -

$$F_{Kt} = \frac{W_K i_K}{2} \quad (3.4)$$

намагничивающей силой (н.с.) или магнитодвижущей силой (м.д.с.) катушки на один зазор. Тогда

$$B = \lambda_\delta F_{Kt} \quad (3.5)$$

Указанный ряд катушек создает в зазоре прямоугольную

волну магнитной индукции B . Эта волна в другом масштабе представляет собой также волну н.с. данного ряда катушек. Так как, величина B пропорциональ-

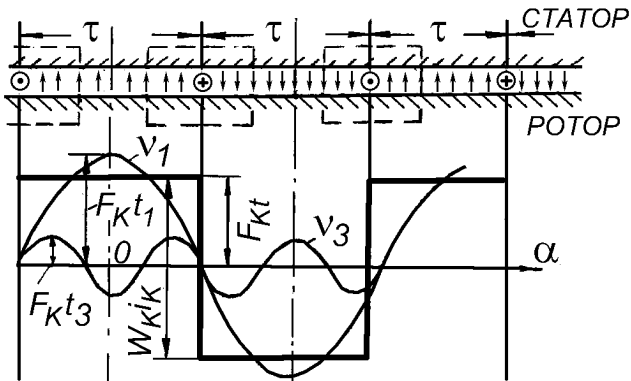


Рисунок II-3.1

ная F_{Kt} , то в дальнейшем можно рассматривать эти силы.

Прямоугольную волну н.с. F_{Kt} можно разложить в ряд Фурье. Так как отрицательные полупериоды этой волны при их сдвиге на угол симметричны (относительно оси абсцисс) положительными полупериодами, то волна содержит только нечетные гармоники ($\nu = 1, 3, 5, \dots$). Выберем начало осей по оси симметрии катушки. Тогда кривая будет симметрична относительно оси ординат и содержать только косинусные члены.

Таким образом,

$$F_K = F_{Kt1} \cos \alpha + F_{Kt3} \cos 3\alpha + \dots + F_{Kt\nu} \cos \nu\alpha \quad (3.6)$$

Согласно теории рядов Фурье, амплитуда ν -й гармоники

$$F_{Kt\nu} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F_K \cos \nu\alpha d\alpha$$

а для симметричной кривой

$$F_{Kt\nu} = \frac{4}{\pi} \int_0^{2\pi} F_{Kt} \cos \nu\alpha d\alpha = \frac{4}{\nu\pi} F_{Kt} \sin \frac{\nu\pi}{2} \quad (3.7)$$

Если ток катушки переменный

$$i_K = \sqrt{2} I_K \cos \omega t \quad (3.8)$$

то на основании выражений (3.4) и (3.7)

$$F_{Kt\nu} = F_{K\nu} \cos \omega t \quad (3.9)$$

где

$$F_{K\nu} = \frac{2\sqrt{2}}{\nu\pi} W_K I_K \sin \frac{\nu\pi}{2} \quad (3.10)$$

Равенство (3.6) при этом приобретает вид

$$F_K = \sum_{\nu=1,3,5} F_{K\nu} \cos \omega t \cos \nu\alpha \quad (3.11)$$

Согласно равенству (3.11), н.с. рассматриваемого ряда катушек состоит из бесконечного ряда гармоник ν , каждая из которых изменяется в пространстве ($\cos \nu\alpha$) и во времени ($\cos \omega t$) по синусоидальному закону. Иными словами, н.с. этого разряда катушек представляет собой ряд неподвижных пространственных гармоник, амплитуды которых $F_{K+\nu}$ пульсируют во времени по синусоидальному закону в пределах от $+F_{K\nu}$ до $-F_{K\nu}$. Каждая гармоника н.с. создает подобную же гармонику магнитного поля в соответствии с соотношением (3.5). Прямоугольная волна н.с. и

магнитного поля также пульсирует во времени, и ее ординаты F_{K1} изменяются от значения $+F_{K1m}$ до $-F_{K1m}$, причем на основании выражений (3.4) и (3.8)

$$F_{K1m} = \frac{\sqrt{2}}{2} W_{K1} I_k \quad (3.12)$$

Н.с. катушечной группы с полным шагом.

Катушечная группа из $q = 3$ катушек, имеющих полный шаг и сдвинутых относительно друг друга на угол

$$\gamma = \frac{2\pi p}{Z} = \frac{\pi}{mq} \quad (3.13)$$

Там же в виде кривых 1,2,3 изображены основные гармоники н.с. этих катушек для момента времени, когда $\cos \omega t = 1$. При этом предполагается, что такие катушечные группы расположены на каждом двойном полюсном делении.

Синусоидальные пространственные кривые 1,2,3 на рис. II-2.2

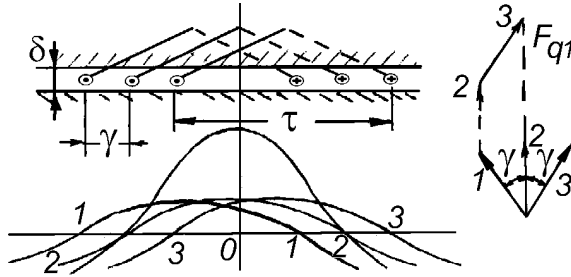


Рисунок II-3.2

Сдвинуты относительно друг друга на угол γ , и их можно изображать в виде трех пространственных векторов точно так же, как мы изображаем в виде временных векторов токи, изменяющиеся синусоидально во времени и сдвинуты относительно друг друга по фазе на угол γ .

Сумма синусоидальных кривых 1.2.3 на рис. II-2.2 также является синусоидальной (сплошная кривая) и представляет собой основную гармонику н.с. катушечной группы. Амплитуда н.с. катушечной группы F_{q1} при этом равна сумме векторов. Суммирование векторов F_{K1} происходит точно также, как и суммирование э.д.с. катушечных групп причем углы γ в обоих случаях равны. Поэтому

$$F_{q1} = q F_{K1} K_{p1} \quad (3.14)$$

где K_{p1} - коэффициент распределения обмотки для $\nu = 1$. Н.с. ν -х гармоник катушек катушечной группы сдвинуты относительно друг другу на угол, больший в ν раз, т.е. $\nu\gamma$. Просуммировав эти н.с. так же, как на рис. II-2.2 получим амплитуду н.с. ν -й гармоники группы

$$F_{qv} = qF_{\nu}K_{p\nu}, \quad (3.15)$$

где коэффициент распределения н.с. катушечной группы совпадает с осью симметрии группы. Поэтому н.с. группы при выборе начала координат выражает равенством (3.11) при замене $F_{K\nu}$ на F_{qv} .

Для н.с. фазы в целом действительности выражение

$$F_{\phi t} = \sum_{\nu=1,3,5,7} F_{\phi\nu} \cos \omega t \cos \nu\alpha \quad (3.16)$$

которое получим из соотношения (3.11) при замене $F_{K\nu}$ на $F_{\phi\nu}$. Начало осей при этом совпадает с осью фазы обмотки.

Согласно равенству (3.16), н.с. фазы $F_{\phi t}$ также представляет собой сумму неподвижных с пространстве и пульсирующих во времени гармоник.

Как будет установлено в последующих главах, высшие гармоники н.с. вызывают в машинах ряд нежелательных явлений (добавочные вращающие моменты и потери, увеличение индуктивных сопротивлений обмоток и пр). Поэтому целесообразно добиваться их уменьшения.

Величина $F_{\phi\nu}$ обратно пропорциональная порядковому номеру гармоники ν и зависит от обмоточного коэффициента $k_{об\nu}$.

Поскольку $K_{y\nu}$ и $K_{p\nu}$ вычисляются по тем же выражениям, что и при определении э.д.с. обмотки, то отсюда следует, что меры, принимаемые для подавления высших гармоник э.д.с. (укорочение шага и распределение обмотки), приводят также к подавлению высших гармоник н.с.

Коэффициент скоса пазов $K_{c\nu}$ в формулы не входит, так как н.с., создаваемая обмоткой ориентирована вдоль ее пазов, как по направляющим, и поэтому скос пазов вызывает лишь скос волн н.с. в тангенциальном направлении, но не изменяет их амплитуды.

Для гармоники н.с. зубцового порядка ν_z , коэффициент $K_{\nu\nu}K_{p\nu} = \pm K_{y1}K_{p1}$ и поэтому из числа высших гармоник эти гармоники выражены наиболее сильно. При $q = 2$, например, гармониками зубцового порядка будут $\nu = \nu_z = 11, 12, 23, 25, \dots$, а при $q = 3$ - соответственно $\nu = \nu_z = 17, 19, 35, 37, \dots$ При $q = 1$ все высшие гармоники н.с. являются гармониками зубцового порядка. Их ослабления можно достичь только увеличением q , так как при этом порядок ν_z увеличивается.

Вращающиеся волны н.с.

Используя известную тригонометрическую формулу, каждый член равенства (3.16) можно выразить в следующем виде:

$$F_{\phi\nu} \cos \omega t \cos \nu \alpha = \frac{1}{2} F_{\phi\nu} \cos(\omega t - \nu \alpha) + \frac{1}{2} F_{\phi\nu} \cos(\omega t + \nu \alpha) \quad (3.17)$$

Каждый из правых членов этого равенства представляет собой волну н.с., которая распределена в пространстве вдоль координаты α по синусоидальному закону и имеет амплитуду $\frac{1}{2} F_{\phi\nu}$. Действительно, вообразим, что мы наблюдаем за какими-либо точками этих двух волн, имеющими постоянное значение н.с. Тогда для этих точек

$$\cos(\omega t - \nu \alpha) = \text{const}; \quad \cos(\omega t + \nu \alpha) = \text{const}$$

и, следовательно,

$$\omega t - \nu \alpha = \text{const}; \quad \omega t + \nu \alpha = \text{const}$$

Дифференцируя последние равенства по t , найдем

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{\omega}{\nu}; \quad \frac{d\alpha}{dt} = -\frac{\omega}{\nu} \quad (3.18)$$

Производные в равенствах (3.18) представляют собой угловые скорости вращения волн, выражаемые в радианах (электрических) в секунду. Согласно равенствам (3.18), первый член правой части (3.17) представляет собой прямую волну ($\frac{d\alpha}{dt} > 0$), т.е. волну, вращающуюся в направлении положительных углов α , а второй член - обратную волну ($\frac{d\alpha}{dt} < 0$). Угловые скорости вращения гармонических волн обратно пропорциональны порядку

гармоники ν . Основные гармоники ($\nu = 1$) вращаются с электрической угловой скоростью

$$\Omega_1 = \omega = 2\pi f \quad (3.19)$$

что соответствует скорости вращения поля n_0 согласно выражению $n_0 = f_1/p$. Действительно, угловая скорость вращения поля в механических единицах угла

$$\Omega_{1\text{МЭХ}} = 2\pi n_0 = \frac{2\pi f_1}{p} \quad (3.20)$$

и в электрических единицах угла

$$\Omega_1 = p\Omega_{1\text{МЭХ}} = 2\pi f_1$$

3.2 Намагничивающие силы многофазных обмоток н.с. трехфазной обмотки при симметричной нагрузке.

Допустим, что трехфазная обмотка с целым числом пазов на полюс и фазонагружена симметричными токами:

$$\begin{aligned} i_a &= \sqrt{2}I \cos \omega t \\ i_b &= \sqrt{2}I \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ i_c &= \sqrt{2}I \cos \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \end{aligned} \quad (3.21)$$

Нечетные гармоники $\nu = 1, 3, 5, \dots$ можно разбить на три группы:

$$\begin{aligned} \nu &= mk \quad (k = 1, 3, 5, \dots; \nu = 3, 9, 15, \dots); \\ \nu &= 2mk + 1 = 6k + 1 \quad (k = 0, 1, 2, 3, \dots; \nu = 1, 7, 13, 19, \dots); \\ \nu &= 2mk - 1 = 6k - 1 \quad (k = 1, 2, 3, \dots; \nu = 5, 11, 17, \dots). \end{aligned} \quad (3.22)$$

Для первой группы гармоник угол сдвига гармоник н.с. отдельных фаз составляет

$$(\nu - 1) \frac{2\pi}{3} = (3k - 1) \frac{2\pi}{3} = 2\pi k - \frac{2\pi}{3}$$

или -120° . Синусоидальные волны или векторы н.с. трех фаз поэтому сдвинуты относительно друг друга в пространстве на 120° , вследствие чего сумма этих гармоник равна нулю. Следовательно, прямые гармоники, кратные трем, в кривой н.с. отсутствуют.

Для второй группы гармоники угол сдвига равен

$$(\nu - 1)\frac{2\pi}{3} = (6k + 1 - 1)\frac{2\pi}{3} = 4\pi k$$

или 0^0 , и эти гармоники поэтому суммируются арифметически, т.е. утраиваются.

Для третьей группы гармоник угол сдвига составляет

$$(\nu - 1)\frac{2\pi}{3} = (6k - 1 - 1)\frac{2\pi}{3} = 4\pi k - \frac{4\pi}{3}$$

или 240^0 и сумма их поэтому также равна нулю.

Аналогичным образом можно убедиться в том, что из числа обратных гармоник, выраженных вторыми членами правой части равенств, обращаются в нуль суммы гармоник первых двух групп, а совпадают по фазе и суммируются арифметически гармоники третьей группы. Таким образом, н.с. трехфазной обмотки при симметричной нагрузке не содержит гармоник, кратных трем, и состоит из прямых гармоник $\nu = 6k + 1 = 1, 7, 13, 19 \dots$ и обратных $\nu = 6k - 1 = 5, 11, 17 \dots$. Основная гармоника ($\nu = 1$) является прямой и вращается в направлении чередования фаз обмотки.

Скорость вращения гармоник н.с. обратно пропорциональная ν , а их амплитуды

$$F_\nu = \frac{3}{2}F_{\phi\nu} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{WK_{об\nu}}{\nu_p} I = 1.35 \frac{WK_{об}}{\nu_p} I \quad (3.23)$$

В общем случае симметричная m -фазная обмотка при ее симметричной нагрузке создает только вращающиеся гармоники н.с., амплитуды которых на полюс равны

$$F_\nu = \frac{m}{2}F_{\phi\nu} = \frac{m\sqrt{2}}{\pi} \frac{WK_{об}}{\nu_p} I \quad (3.24)$$

Полная н.с. трехфазной обмотки при симметричной нагрузке в соответствии с изложенным выражается равенством

$$F_t = \sum_{\nu=6k\pm 1} F_\nu \cos(\omega t \mp \nu\alpha) \quad (3.25)$$

где верхние знаки относятся к прямым гармоникам и нижние - к обратным. Равенство (3.25) действительно и для других многофазных обмоток, однако состав высших гармоник является другим.

III. Трансформаторы

1. Принцип действия и устройство трансформаторов

1.1 Основные определения и принцип действия

Трансформатором называют статическое электромагнитное устройство, имеющие две или более индуктивно связанных обмоток и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной (первичной) системы переменного тока в другую (вторичную) систему переменного тока.

В общем случае вторичная система переменного тока может отличаться любыми параметрами: величиной напряжения и тока, числом фаз, формой кривой напряжения (тока), частотой.

Наибольшее применение в электротехнических установках, а также в энергетических системах передачи и распределения электроэнергии имеют силовые трансформаторы, посредством которых изменяют величину переменного напряжения и тока. При этом число фаз, форма кривой напряжения (тока) и частота остаются неизменными.

Простейший силовой трансформатор состоит из магнитопровода (сердечника, выполненного из ферромагнитного материала (обычно листовая электротехническая сталь)) и двух обмоток (катушек), расположенных на стержнях магнитопровода. Одна из обмоток присоединена к источнику переменного тока на напряжение U_1 ; эту обмотку называют **первичной**. К другой обмотке подключен потребитель; ее называют **вторичной**.

Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции. При подключении первичной обмотки к источнику переменного тока в витках этой обмотки протекает переменный ток i ; который создает в магнитопроводе магнитный проток Φ . Замыкаясь в магнитопроводе, этот поток сцепляется с обеими обмотками (первичной и вторичной) и индуцирует в них э.д.с.:

$$e_1 = -W_1(d\Phi / dt); \quad (1.1)$$

$$e_2 = -W_2\left(\frac{d\Phi}{dt}\right), \quad (1.2)$$

где W_1 и W_2 - число витков в первичной и вторичной обмотках трансформатора.

При подключении нагрузки r_H к выводам вторичной обмотки трансформатора под действием э.д.с. e_2 в цепи этой обмотки создается ток I_2 , а на выводах вторичной обмотки устанавливается напряжение U_2 . В повышающих трансформаторах $U_2 > U_1$, а в понижающих - $U_2 < U_1$.

Из (1.1) и (1.2) следует, что э.д.с. e_1 и e_2 отличаются друг от друга числом витков обмоток, в которых они наводятся. Поэтому, применяя обмотки с требуемым соотношением витков, можно изготовить трансформатор на любое отношение напряжений.

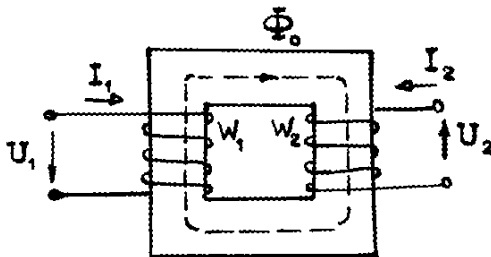


Рисунок III-1.1

Обмотку трансформатора, подключенную к сети с более высоким напряжением, называют **обмоткой более высокого напряжения** (ВН); обмотку, присоединенную к сети меньшего напряжения - **обмоткой низшего напряжения** (НН).

Трансформаторы обладают свойством обратимости: один и тот же трансформатор можно использовать в качестве повышающего и понижающего. Но обычно трансформатор имеет определенное назначение: либо он является повышающим, либо понижающим.

1.2 Классификация трансформаторов

Трансформаторы разделяют на следующие основные виды:

1. силовые, применяемые:
 - а) в системах передачи и распределения электроэнергии;
 - б) для установок со статическими преобразователями;
 - с) для получения требуемых напряжений в цепях управления электроприводами и в цепях местного освещения;
2. силовые специального назначения - печные, сварочные т.п.;
3. измерительные - для включения электрических измерительных приборов в сети высокого напряжения или силового тока;

4. испытательные - для получения высоких и сверхвысоких напряжений.

Трансформаторы одного и того же назначения могут различаться:

- по виду охлаждения - с воздушным охлаждением и масляным;
- по числу трансформируемых фаз - однофазные и многофазные;
- по форме магнитопровода - стержневые, броневые, бронестержневые, тороидальные;
- по числу обмоток – двухобмоточные и многообмоточные;
- по конструкции обмоток - с концентрическими и чередующимися обмотками.

1.3 Устройство трансформаторов

Основные части трансформатора - это магнитопровод и обмотки. Магнитопровод трансформатора выполняют из листовой электротехнической стали. Часть магнитопровода, на котором располагают обмотки, называют стержнем.

В стержневых трансформаторах имеются два стержня и соединяющих их два ярма. Броневые трансформаторы имеют разветвленный магнитопровод с одним стержнем и ярмами, частично прикрывающими ("бронирующими") обмотки.

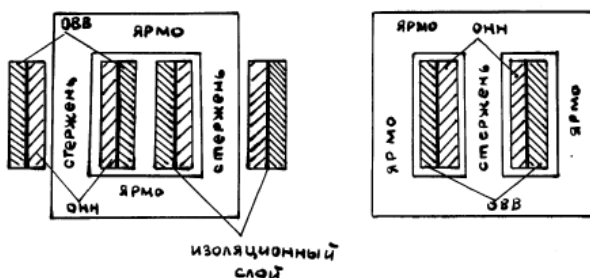


Рисунок III-1.2

Стержневая конструкция имеет наибольшее распространение, особенно в трансформаторах большой и средней мощности. Достоинства этой конструкции - простота изоляции обмоток, лучшие условия охлаждения, простота ремонта.

Форма поперечного сечения стержневой зависит от мощности трансформатора: в небольших трансформаторах применяют стержни прямоугольного сечения, в трансформаторах средней и большой мощности - стержни ступенчатого сечения с числом сту-

пений, возрастающим с увеличением мощности трансформатора. Ступенчатое сечение стержней обеспечивает лучшее использование площади внутренней обмотки, так как периметр ступенчатого стержня приближается к окружности. В трансформаторах большой мощности для улучшения теплоотдачи между пакетами стали магнитопровода устраивают вентиляционные каналы.

Обмотки трансформаторов выполняют из проводов круглого и прямо-

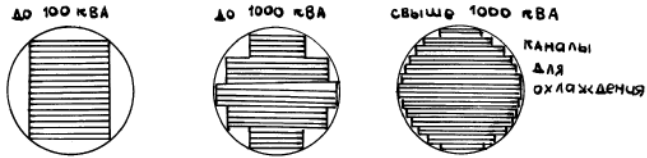


Рисунок III-1.3

угольного сечения, изолированных хлопчатобумажной пряжей или кабельной бумагой.

Обмотки бывают **цилиндрические**, располагаемые на стержнях концентрически и дисковые, располагаемые на стержнях в чередующем порядке.

Наиболее распространено равномерное **концентрическое** расположение обмоток на всех стержнях магнитопровода, так как это обеспечивает малую величину магнитного потока рассеяния. При этом обычно ближе к стержню располагают обмотку НН, так как она требует меньшей электрической изоляции от стержня (заземленного), затем укладывают слой изоляции из картона или бумаги и обмотку ВН.

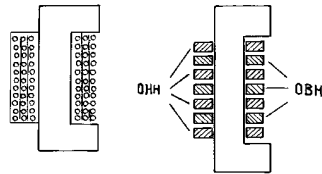


Рисунок III-1.4

В трансформаторах с **маслянистым охлаждением** магнитопровод с обмотками помещен в бак, наполненный трансформаторным маслом. В трансформаторах мощностью до 20-30 кВА применяют баки с гладкими стенками. У более мощных трансформаторов для увеличения охлаждаемой поверхности стенки бака делают ребристыми или же применяют трубчатые баки, как это показано на рис.

Для компенсации объема масла при изменении температуры, а также для защиты масла трансформатора от окисления и увлажнения при контакте с воздухом в трансформаторах приме-

няют расширитель. Трансформаторы средней и большой мощности снабжены газовым реле.

2. Основы рабочего процесса трансформатора

2.1 Уравнение электродвижущих сил

Основной переменный магнитный поток Φ в магнитопроводе трансформатора, сцепляясь с витками обмоток W_1 и W_2 , наводит в них э.д.с.:

$$e_1 = -W_1 \left(\frac{d\Phi}{dt} \right); \quad e_2 = -W_2 \left(\frac{d\Phi}{dt} \right); \quad (2.1)$$

$$\Phi = \Phi_{\text{макс}} \sin \omega t,$$

где $\Phi_{\text{макс}}$ - максимальное значение потока.

Подставив (2.1) в формулу э.д.с. Φ и дифференцируя, получим

$$e_1 = -\omega W_1 \Phi_{\text{макс}} \cos \omega t. \quad (2.2)$$

Но так как

$$\cos \omega t = -\sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \quad (2.3)$$

По аналогии,

$$e_2 = \omega W_2 \Phi_{\text{макс}} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right); \quad (2.4)$$

Из (2.3) и (2.4) следует, что э.д.с. e_1 и e_2 отстают по фазе от потока Φ на угол $\frac{\pi}{2}$. Максимальное значение э.д.с.

$$E_{1\text{макс}} = \omega W_1 \Phi_{\text{макс}}. \quad (2.5)$$

Разделив величину $E_{1\text{макс}}$ на $\sqrt{2}$ и подставив $\omega = 2\pi f$, получим формулу действующего значения первичной э.д.с. (В):

$$E_1 = \frac{E_{1\text{макс}}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} W_1 f \Phi_{\text{макс}} = 4,44 W_1 f \Phi_{\text{макс}}. \quad (2.6)$$

Аналогично, для вторичной э.д.с.

$$E_2 = 4,44 W_2 f \Phi_{\text{макс}}. \quad (2.7)$$

Отношение э.д.с. обмотки высшего напряжения к э.д.с. обмотки низшего напряжения называют коэффициентом **трансформации**

$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} \quad (2.8)$$

Токи в обмотках трансформатора I_1 и I_2 помимо основного магнитного потока Φ создают магнитные потоки рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$. Каждый из этих потоков сцеплен с витками лишь собственной обмотки и индуцирует в ней э.д.с. рассеяния; так, в первичной и во вторичной обмотках:

$$e_{\sigma 1} = -L_{\sigma 1} \left(\frac{di_1}{dt} \right); \quad e_{\sigma 2} = -L_{\sigma 2} \left(\frac{di_2}{dt} \right),$$

где $L_{\sigma 1}$ и $L_{\sigma 2}$ - индуктивности рассеяния.

Так как магнитные потоки рассеяния замыкаются главным образом в немагнитной среде (воздух, масло, медь), магнитная проницаемость которой постоянна, то и индуктивности $L_{\sigma 1}$ и $L_{\sigma 2}$ можно считать постоянными.

Действующие значения э.д.с. рассеяния пропорциональны токам в соответствующих обмотках:

$$-\dot{E}_{\sigma 1} = i_1 j x_1; \quad -\dot{E}_{\sigma 2} = j x_2 I_2, \quad (2.9)$$

где x_1 и x_2 - индуктивные сопротивления рассеяния первичной и вторичной обмоток, Ом. Значит минус в (2.9) свидетельствуют о реактивном характере э.д.с. рассеяния. Таким образом, в каждой обмотке трансформатора индуцируются основная э.д.с. и э.д.с. рассеяния.

Рассмотрим действие этих э.д.с. в обмотках трансформатора.

В первичной обмотке э.д.с. E_1 представляет собой э.д.с. самоиндукции, а поэтому она направлена против первичного напряжения \dot{U}_1 , т.е. находится с ним в противофазе. В связи с этим уравнение э.д.с. для первичной обмотки имеет вид

$$\dot{U}_1 = (-\dot{E}_1) + (-\dot{E}_{\sigma 1}) + i_1 r_1 \quad (2.10)$$

или

$$\dot{U}_1 = (-\dot{E}_1) + i_1 j x_1 + i_1 r_1$$

Выражение (2.10) является уравнением равновесия э.д.с., согласно которому напряжение уравновешивается суммой противодействующих э.д.с.

Произведение $i_1 r_1$ представляет собой **активное падение напряжения в первичной обмотке**. Обычно напряжение $i_1 j x_1$ и

$\dot{I}_1 r_1$ невелики, а поэтому с некоторым приближением можно считать, что подведенное к трансформатору напряжение \dot{U}_1 уравнивается э.д.с. \dot{E}_1 , т.е. $\dot{U}_1 \approx (\dot{E}_1)$.

Во вторичной обмотке ток \dot{I}_2 зависит от величины э.д.с. \dot{E}_2 , которая в значительной части идет на создание напряжения на выводах вторичной обмотки: $\dot{U}_2 = \dot{I}_2 z_H$. Оставшаяся часть э.д.с. \dot{E}_2 идет на компенсацию э.д.с. рассеяния и активного падения напряжения во вторичной обмотке $\dot{I}_2 r_2$. Таким образом, уравнение э.д.с. для вторичной цепи

$$\dot{E}_2 = \dot{U}_2 + (-\dot{E}_{\sigma 2}) + \dot{I}_2 r_2,$$

или

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 j x_2 - \dot{I}_2 r_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 z_2 \quad (2.11)$$

2.2 Уравнение намагничивающих сил и токов

Предположим, что трансформатор работает в режиме х.х. (рис. III-1.1) т.е. к зажимам его первичной обмотки подведено напряжение U_1 , а вторичная обмотка разомкнута ($I_2 = 0$).

Ток I_0 в первичной обмотке при этих условиях называют **током холостого хода**.

Намагничивающая сила, созданная этим током

$I_0 W_1$, наводит в магнитопроводе трансформатора основной магнитный поток, максимальное значение которого

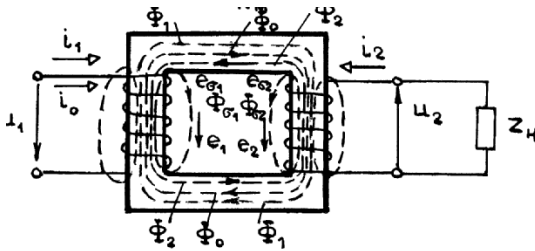


Рисунок III-2.1

$$\Phi_{\max} = \frac{\sqrt{2} I_0 W_1}{R_M} \quad (2.12)$$

где R_M - магнитное сопротивление магнитопровода. При замыкании вторичной обмотки на нагрузку z_H (рис. III-2.1) в ней возникает ток I_2 . При этом ток в первичной обмотке увеличивается до значения I_1 .

Теперь поток $\Phi_{\text{макс}}$ создается действием н.с. $I_1 W_1$ и н.с. $I_2 W_2$:

$$\Phi_{\text{макс}} = \frac{i_1 W_1 + i_2 W_2}{R_M} \sqrt{2}. \quad (2.13)$$

Этот поток можно также определить из (2.6):

$$\Phi_{\text{макс}} = \frac{E_1}{4,44 W_1 f},$$

или, принимая во внимание, что $\dot{U}_1 \approx (-\dot{E}_1)$, получим

$$\Phi_{\text{макс}} = \frac{U_1}{4,44 f W_1}. \quad (2.14)$$

Из (2.14) следует, что основной поток $\Phi_{\text{макс}}$ не зависит от нагрузки трансформатора, так как напряжение U_1 во всем диапазоне нагрузки трансформатора остается неизменным. Этот вывод дает право приравнять (2.12) и (2.13):

$$\frac{\dot{i}_0 W_1}{R_M} \sqrt{2} = \frac{\dot{i}_1 W_1 + \dot{i}_2 W_2}{R_M} \sqrt{2}, \text{ или} \\ \dot{i}_0 W_1 = \dot{i}_1 W_1 + \dot{i}_2 W_2 \quad (2.15)$$

Здесь $\dot{i}_0 W_0$ - н.с. необходимая для создания в магнитопроводе трансформатора основного магнитного потока Φ_0 .

Выражение (2.15) представляет собой **уравнение намагничивающих сил трансформатора**. Из этого уравнения следует, что сумма н.с. первичной $I_1 W_1$ и вторичной $I_2 W_2$ обмоток равна постоянной величине н.с. холостого хода $I_0 W_0$.

Разделив уравнение н.с. на W_1 , получим

$$\dot{i}_1 + \frac{\dot{i}_2 W_2}{W_1} = \dot{i}_0, \text{ или} \\ \dot{i}_1 + \dot{i}'_2 = \dot{i}_0, \quad (2.16)$$

где $\dot{i}'_2 = \dot{i}_2 W_2 / W_1$ - вторичный ток, приведенный к числу витков первичной обмотки, т.е. ток, который в обмотке с числом витков W_1 создает такую же н.с., что и ток I_2 во вторичной обмотке.

Из (2.16) получаем выражение $\dot{i}_1 = \dot{i}_0 + (-\dot{i}'_2)$, (2.17) называемое **уравнением токов трансформатора**. Из этого уравне-

ния следует, что первичный ток I_1 можно рассматривать как сумму двух составляющих: одна из них (I_0) создает основной магнитный поток, а другая ($-I'_2$) компенсирует размагничивающее действие вторичного тока.

Физически это объясняется следующим. Так как э.д.с. вторичной обмотки E_2 представляет собой э.д.с. взаимной индукции, то ток I_2 , созданный этой э.д.с. при подключении нагрузки, в соответствии с правилом Ленца оказывает размагничивающее влияние на магнитопровод трансформатора. Другими словами, ток I_2 создает н.с. $I_2 W_2$, направленную встречно н.с. первичной обмотки $I_0 W_1$. Но так как основной магнитный поток в магнитопроводе остается практически неизменным, то размагничивающее действие вторичного тока вызывает увеличение первичного тока до значения I_1 , превышающего ток I_0 на величину $-I'_2$, необходимую для размагничивающего действия вторичного тока:

$$I_0 W_1 = I_1 W_1 + I_2 W_2 = I_0 W_1 + (-I'_2 W_1) + I_2 W_2 = I_0 W_1.$$

Таким образом, **любое изменение величины тока во вторичной цепи трансформатора сопровождается соответствующим изменением первичного тока.**

Вследствие перемагничивания стали в магнитопроводе трансформатора возникают магнитные потери энергии от гистерезиса и вихревых токов.

Мощность этих потерь эквивалентна активной составляющей тока х.х. Следовательно, ток х.х. наряду с реактивной составляющей I_{0p} , создающей основной магнитный поток, имеет еще и активную составляющую I_{0a} :

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0p}^2} \quad (2.18)$$

Обычно активная составляющая I_{0a} не превышает 10% от тока I_0 и поэтому оказывает незначительное влияние на величину этого тока. Угол δ , на который вектор основного магнитного потока Φ макс остается по фазе тока х.х. I_0 , называют **углом магнитных потерь**.

Этот угол увеличивается с ростом активной составляющей тока х.х. I_{0a} , т.е. с ростом магнитных потерь в магнитопроводе.

Величина тока х.х. в трансформаторах большой и средней мощности соответственно составляет 2-10% от номинального первичного тока. Поэтому при нагрузке, близкой к номинальной, пренебрегая величиной тока I_0 и преобразуя (2.16), получим

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{W_2}{W_1} \quad (2.19)$$

т.е. токи в обмотках трансформатора обратно пропорциональны числам витков этих обмоток: величина тока больше в обмотке с меньшим числом витков, и наоборот. Поэтому обмотки низшего напряжения выполняют проводом большего сечения, чем обмотки высшего напряжения, имеющие большее число витков.

2.3 Приведенный трансформатор

В общем случае параметры первичной обмотки трансформатора отличаются от параметров вторичной обмотки. Эта разница наиболее ощутима при больших коэффициентах трансформации, что затрудняет расчеты и построение векторных диаграмм, так как в этом случае векторы электрических величин первичной обмотки значительно отличаются по своей длине от одноименных векторов вторичной обмотки. Указанные затруднения устраняются приведением всех параметров трансформатора к одинаковому числу витков, обычно к числу витков первичной обмотки W_1 . С этой целью все величины, характеризующие вторичную цепь трансформатора э.д.с., напряжение, ток и сопротивление пересчитывают на число витков W_1 (приводит к числу витков первичной обмотки).

Таким образом, вместо реального трансформатора с коэффициентом трансформации $k = W_1 / W_2$ получают эквивалентный трансформатор с $k = W_1 / W'_2 = 1$, где $W'_2 = W_1$. Такой трансформатор называют приведенным. Однако приведение вторичных параметров трансформатора не должно отразиться на его энергетических показателях: все мощности и фазовые сдвиги во вторичной обмотке приведенного трансформатора должны остаться такими, как и в реальном трансформаторе. Так, электромагнитная мощность вторичной обмотки реального трансформатора $E_2 I_2$ должна быть равна электромагнитной мощности вторичной обмотки приведенного трансформатора:

$$E_2 I_2 = E'_2 I'_2 \quad (2.20)$$

формулу приведенной вторичной э.д.с.

$$E'_2 = \frac{l_2}{l_2'} E_2 = \frac{l_2}{l_2'} \frac{W_1}{W_2} E_2 = E_2 \frac{W_1}{W_2}. \quad (2.21)$$

Аналогично определяют приведенное напряжение вторичной обмотки: так как $U_2 l_2 = U'_2 l'_2$, то

$$U'_2 = U_2 (W_1 / W_2). \quad (2.22)$$

Из условия равенства потерь в активном сопротивлении вторичной обмотки имеем

$$l_2^2 r_2 = l_2'^2 r'_2$$

Определим приведенное активное сопротивление:

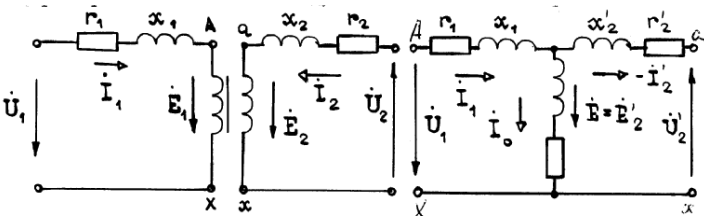


Рисунок III-2.2

Подставив значение приведенного вторичного тока $i'_2 = i_2 W_2 / W_1$, получим

$$r'_2 = r_2 (l_2 / l_2')^2 = r_2 \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^2 \quad (2.23)$$

Приведенное индуктивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки определяют из условия равенства реактивных мощностей, $l_2^2 x_2 = l_2'^2 x'_2$, откуда

$$x'_2 = x_2 \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^2. \quad (2.24)$$

Приведенное полное сопротивление вторичной обмотки трансформатора

$$z'_2 = r'_2 + jx'_2 = \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^2 (r_2 + jx_2) = z_2 \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^2. \quad (2.25)$$

Приведенное полное сопротивление нагрузки, подключенной на выводы вторичной обмотки, определим по аналогии с (2.25):

$$z'_H = z_H \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^2. \quad (2.26)$$

Уравнения э.д.с. и токов для приведенного трансформатора имеют вид:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= (-\dot{E}_1) + \dot{I}_1 z_1 = (-\dot{E}_1) + \dot{I}_1 jx_1 + \dot{I}_1 r_1; \\ \dot{U}_2 &= \dot{E}_2 - \dot{I}'_2 z'_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}'_2 jx'_2 - \dot{I}'_2 r'_2 = \dot{I}'_2 z'_H; \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2). \end{aligned} \quad (2.27)$$

2.4 Электрическая схема замещения трансформатора

Еще одним средством, облегчающим исследование электромагнитных процессов и расчет трансформаторов, является применение электрической схемы замещения приведенного трансформатора.

Как было установлено, в приведенном трансформаторе $k=1$, а поэтому $E_1 = E_2$. В результате точки А и а, а также точки Х и х

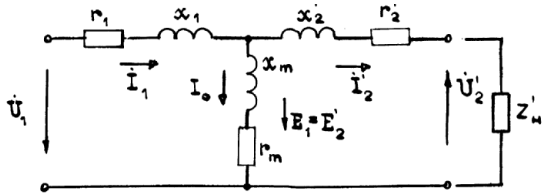


Рисунок III-2.3

на приведенном трансформаторе имеют одинаковые потенциалы, что позволяет электрически соединить указанные точки, получив Т-образную схему замещения приведенного трансформатора. В электрической схеме замещения трансформатора магнитная связь между цепями замещена электрической.

Схема замещения трансформатора удовлетворяет всем уравнениям э.д.с. и токов приведенного трансформатора (2.27) и представляет собой совокупность трех ветвей: первичной – сопротивлением $Z_1 = r_1 + jx_1$ и током I_1 ; намагничивающей – сопротивлением $Z_m = r_m + jx_m$ и током I_0 и вторичной ветви с двумя сопротивлениями - сопротивлением $Z'_2 = r'_2 + jx'_2$ собственно вторичной ветви и сопротивлением нагрузки $Z'_H = r'_H \pm jx'_H$ и током $-I'_2$. Изменением сопротивления нагрузки Z'_H на схеме замещения могут быть воспроизведены все режимы работы трансформатора.

Необходимо обратить внимание, что знак минус тока \dot{I}'_2 указывает на то, что н.с. вторичной обмотки направлена встречно н.с. первичной обмотки.

Параметры ветви намагничивания $Z_m = r_m + jx_m$ определяются величиной тока х.х. Наличие в этой ветви активной составляющей обусловлено магнитными потерями в трансформаторе.

Все параметры схемы замещения, за исключением Z'_H являются постоянными для данного трансформатора и могут быть определены из опыта х.х. и опыта к.з.

2.5 Векторная диаграмма трансформатора

Воспользовавшись схемой замещения приведенного трансформатора и основными уравнениями э.д.с. и токов (2.27), построим векторную диаграмму трансформатора, наглядно показывающую соотношения между токами, э.д.с. и напряжениями трансформатора. Векторная диаграмма – графическое выражение основных уравнений приведенного трансформатора.

Построение диаграммы следует начинать с вектора максимального значения основного магнитного потока:

$$\Phi_{\text{макс}} = \frac{E_1}{4,44fW_1}.$$

Вектор тока \dot{I}_0 опережает по фазе вектор потока на угол δ , а э.д.с. \dot{E}_1 и \dot{E}_2 отстают на угол 90° . Далее строим вектор \dot{I}'_2 . Для определения угла сдвига фаз между \dot{E}'_2 и \dot{I}'_2 следует знать характер нагрузки. Предположим, что нагрузка трансформатора активно-индуктивная. Тогда вектор \dot{I}'_2 отстает по фазе от \dot{E}'_2 на угол

$$\psi_2 = \text{arctg} \frac{x'_2 + x'_H}{r'_2 + r'_H}, \quad (2.28)$$

определяемый как родом внешней нагрузки, так и собственными сопротивлениями вторичной обмотки.

Для построения вектора вторичного напряжения \dot{U}'_2 необходимо из вектора э.д.с. \dot{E}'_2 вычесть векторы падения напряжения $j\dot{I}'_2 x'_2$ и $\dot{I}'_2 r'_2$. С этой же целью из конца вектора \dot{E}'_2 опускаем перпендикуляр на направление вектора потока \dot{I}'_2 и откладываем

на нем вектор $-j\dot{I}_2'x_2'$. Затем проводим прямую, параллельную \dot{I}_2' и на ней откладываем вектор $-\dot{I}_2'r_2'$. Построим вектор $-\dot{I}_2'z_2'$, получим треугольник внутренних падений напряжения во вторичной цепи. Затем из точки О проводим вектор $\dot{U}_2' = \dot{E}_2' - \dot{I}_2'z_2'$, который опережает ток \dot{I}_2' на угол $\varphi_2 = \text{arctg}(x_2'/r_2')$.

Вектор первичного тока строим как векторную сумму $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}_2')$. Вектор $-\dot{I}_2'$ проводим из конца вектора \dot{I}_0 противоположно вектору \dot{I}_2' . Построим вектор $\dot{U}_1 = (-\dot{E}_1) + j\dot{I}_1x_1 + \dot{I}_1r_1$, для чего к вектору $-\dot{E}_1$, опережающему вектор потока $\Phi_{\text{макс}}$ на 90° , прибавляем векторы внутренних падений напряжения первичной обмотки: вектор \dot{I}_1r_1 , параллельный току \dot{I}_1 , и вектор $j\dot{I}_1x_1$, опережающий вектор тока \dot{I}_1 на угол 90° . Соединив точку О

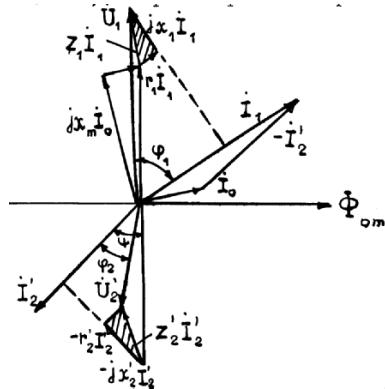


Рисунок III-2.4

с концом вектора \dot{I}_1z_1 , получим вектор \dot{U}_1 , который опережает по фазе вектор \dot{I}_1 тока на угол φ_1 .

В случае активно-емкостной нагрузки, векторная диаграмма трансформатора имеет вид, показанный на рисунке. Порядок построения диаграммы остается прежним, но вид ее несколько изменяется.

Ток \dot{I}_2' в этом случае опережает по фазе э.д.с. \dot{E}_2' на угол.

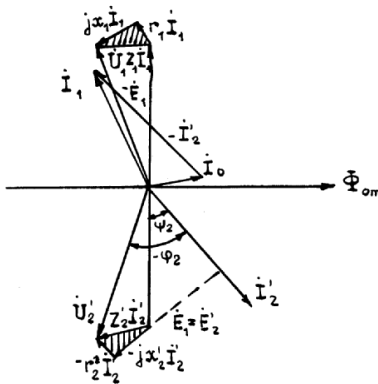


Рисунок III-2.5

$$\psi_2 = \arctg \frac{x'_2}{r'_2 + r'_H} \frac{x'_H}{r'_2 + r'_H}. \quad (2.28a)$$

3. Параметры и характеристики трансформаторов

3.1 Предварительные замечания

Полученная в предыдущей главе электрическая схема замещения позволяет с достаточной точностью исследовать свойства трансформаторов в любом режиме. Использование этой схемы для определения характеристик имеет наибольшее практическое значение для трансформаторов мощностью 50 кВА и выше, так как исследование таких трансформаторов методом непосредственной нагрузки связано с некоторыми техническими трудностями; непроизводительный расход электроэнергии, необходимость в громоздких и дорогостоящих нагрузочных устройствах. Определение параметров схемы замещения $Z_1 = r_1 + jx_1$; $Z_m = r_m + jx_m$; $Z'_2 = r'_2 + jx'_2$ возможны либо расчетным путем (в процессе расчета трансформатора), либо опытным.

3.2 Опыт холостого хода

Холостым ходом называют режим работы трансформатора при разомкнутой вторичной обмотке ($Z_H = \infty$, $I_2 = 0$). В этом случае уравнения э.д.с. и токов (2.27) принимают вид:

$$\dot{U}_1 = (-\dot{E}_1) + \dot{I}_0 jx_1 + \dot{I}_0 r_1; \quad \dot{U}'_{20} = \dot{E}'_2; \quad \dot{I}_1 = \dot{I}_0 \quad (3.1)$$

Так как полезная мощность при работе трансформатора вхолостую равна нулю, мощность на входе трансформатора в режиме х.х. P_0 расходуется на магнитные потери в магнитопроводе P_M и электрические потери в меди одной лишь первичной обмотки ($I_0^2 r_1$). Однако

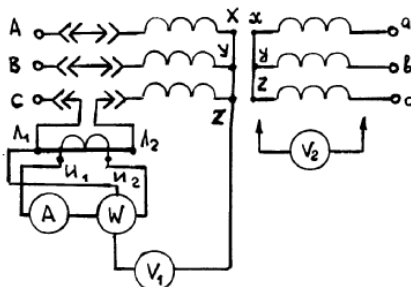


Рисунок III-3.1

ввиду небольшой величины тока I_0 , который обычно не превышает 2-10% от $I_{1\text{ном}}$, электри-

ческими потерями $I_0^2 r_1$ можно пренебречь и считая, что вся мощность х.х. представляет собой мощность магнитных потерь в ли магнитопровода. Поэтому магнитные потери в ре принято называть **потерями холостого хода**.

Комплект электроизмерительных приборов, включенных в схему, дает возможность непосредственно измерить: напряжение U_1 , подведенное к первичной обмотке; напряжение U_{20} на вторичной обмотке; мощность х.х.

P_0 и ток х.х.

Обычно напряжение к первичной обмотке трансформатора подводят через регулятор напряжения РН, позволяющий постепенно повышать напряжение от $0,5U_{1\text{ном}}$ до $1,1U_{1\text{ном}}$. При этом

черезопределенные

интервалы этого на-

пряжения снимают по-

казания приборов, а затем строят характеристики х.х., представляющие собой зависимости тока I_0 , мощности P_0 и коэффициента

мощности $\cos \varphi_0$ от первичного напряжения.

В случае трехфазного трансформатора характеристики х.х. строят по средним (фазным) значениям тока и напряжения для трех фаз:

$$U_1 = \frac{U_{1a} + U_{1b} + U_{1c}}{3} \quad (3.2)$$

$$I_0 = \frac{I_{0a} + I_{0b} + I_{0c}}{3} \quad (3.3)$$

Для однофазного трансформатора коэффициент мощности

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_1 I_0}; \quad (3.4)$$

для трехфазного трансформатора

$$\cos \varphi_0 = \frac{P'_0 + P''_0}{3 U_1 I_0} = \frac{P_0}{3 U_1 I_0} \quad (3.5)$$

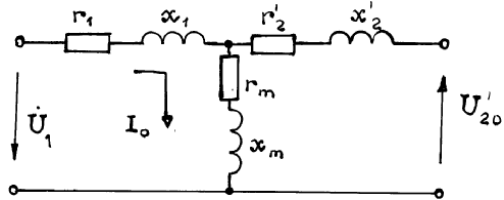


Рисунок III-3.2

где P_0' и P_0'' - показания однофазных ваттметров; U_1 и I_0 - фазные значения напряжения и тока.

По данным опыта х.х. можно определить коэффициент трансформации $k = \frac{U_1}{U_{20}} = \frac{W_1}{W_2}$; ток х.х. $I_{0 \text{ ном}}$ при $U_{1 \text{ ном}}$ обычно выражающегося в процентах от номинального первичного тока,

$$i_0 = \frac{I_{0 \text{ ном}}}{I_{1 \text{ ном}}} \cdot 100 \quad (3.6)$$

потери х.х. P_0 .

В трехфазном трансформаторе токи х.х. в фазах неодинаковы и образуют несимметричную систему, поэтому мощность P_0 следует измерять двумя ваттметрами по схеме. Падение напряжения в первичной ветви схемы замещения в режиме х.х. $I_0(r_1 + jx_1)$ составляет весьма незначительную величину, поэтому, не допуская заметной ошибки, можно пользоваться следующими выражениями для расчета параметров ветви намагничивания:

$$z_m = \frac{U_1}{I_0}; \quad r_m = z_m \cos \varphi_0; \quad x_m = \sqrt{z_m^2 - r_m^2}. \quad (3.7)$$

3.3 Опыт короткого замыкания

Короткое замыкание трансформатора - это такой режим, когда вторичная обмотка замкнута накоротко ($z_H = 0$), при этом вторичное напряжение $U_2 = 0$. В условиях эксплуатации, когда к трансформатору подведено номинальное напряжение $U_{1 \text{ ном}}$, короткое замыкание является аварийным режимом и представляет большую опасность для трансформатора.

Опыт к.з. имеет практическое значение тогда, когда вторичную обмотку трансформатора замыкают накоротко, а к первичной обмотке подводят пониженное напряжение, постепенно повышая его регулятором

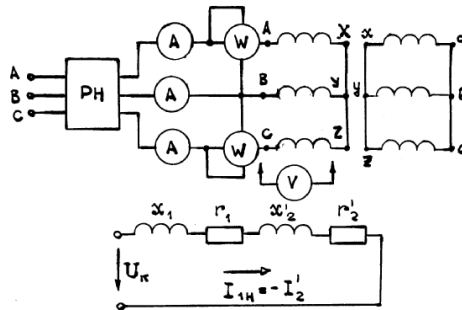


Рисунок III-3.3

напряжения РН до некоторого значения $U_{k \text{ ном}}$, при котором токи к.з. в обмотках трансформатора становятся равными номинальным токам: $I_{1к} = I_{1 \text{ ном}}$, $I_{2к} = I_{2 \text{ ном}}$. В этом случае снимают показания приборов и строят характеристики к.з.: $I_{1к}, \cos \varphi_k, P_k$ в зависимости от U_k . В случае трехфазного трансформатора значения фазных напряжений и токов будут средними для трех фаз:

$$U_k = \frac{U_{kA} + U_{kB} + U_{kC}}{3}; \quad (3.8)$$

$$I_k = \frac{I_{kA} + I_{kB} + I_{kC}}{3}. \quad (3.9)$$

По этим значениям измеренных величин определяют

$$\cos \varphi_k = \frac{P'_k + P''_k}{3 U_k I_{1к}} = \frac{P_k}{3 U_k I_{1к}}. \quad (3.10)$$

Напряжение, при котором токи в обмотках короткозамкнутого трансформатора равны номинальным, называют **номинальным напряжением короткого замыкания** и обычно выражают в процентах:

$$u_k = \frac{U_k}{U_{1 \text{ ном}}} \cdot 100 \quad (3.11)$$

Для силовых трансформаторов $U_k = 5 \div 10 \%$ от номинального первичного напряжения.

Как следует из (2.14), магнитный поток в магнитопроводе трансформатора пропорционален первичному напряжению U_1 , но так как это напряжение при опыте к.з. составляет не более 10% от $U_{1 \text{ ном}}$, то такую же не-

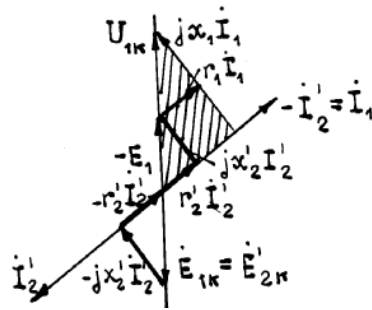


Рисунок III-3.4

большую величину составляет магнитный поток. Для создания такого магнитного потока требуется малый намагничивающий ток, что величиной его можно пренебречь. В этом случае уравнение токов (2.17) принимает вид

$$I_{1к} = -I'_{2к} \quad (3.12)$$

а схема замещения трансформатора для опыта к.з. не содержит ветви намагничивания. Для этой схемы можно записать уравнение э.д.с.

$$\dot{U}_k = \dot{i}_{1k}(r_1 + r'_2) + j\dot{i}_{1k}(x_1 + x'_2), \quad (3.13)$$

или

$$\dot{U}_k = \dot{i}_{1k}r_k + j\dot{i}_{1k}x_k = \dot{i}_{1k}z_k, \quad (3.14)$$

где z_k - сопротивление трансформатора при опыте к.з.

$$z_k = r_k + jx_k \quad (3.15)$$

r_k и x_k - активное и индуктивное сопротивление трансформатора при опыте к.з.

Воспользовавшись уравнениями тока (3.12) и э.д.с. (3.13) для опыта к.з. построим векторную диаграмму трансформатора при к.з. Построение диаграммы начнем вектора $\dot{U}_k = \dot{i}_1 z_k$. Затем под углом φ_k к вектору \dot{U}_k проводим вектор тока $\dot{i}_{1k} = -\dot{i}'_{2k}$. Построив векторы падений напряжения в первичной $\dot{i}_{1k}r_1$ и $j\dot{i}_{1k}x_1$ и во вторичной $-\dot{i}'_{2k}r'_2$ и $-j\dot{i}'_{2k}x'_2$ обмотках, получим прямоугольный треугольник АОВ, который называют **треугольником короткого замыкания**. Здесь $U_{k,a}$ и $U_{k,p}$ - активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания:

$$U_k = \sqrt{U_{k,a}^2 + U_{k,p}^2}. \quad (3.16)$$

Параметры схемы замещения при опыте к.з. определяют по формулам:

$$z_k = \frac{U_k}{I_{1k}}; \quad r_k = z_k \cos \varphi_k; \quad x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}. \quad (3.17)$$

Полученные значения сопротивлений r_k и z_k , а также коэффициент мощности $\cos \varphi_k$ и напряжение к.з. U_k приводят к рабочей температуре обмоток ($+75^\circ\text{C}$):

$$r_{k75} = r_k [1 + \alpha(75^\circ - t_1)]; \quad z_{k75} = \sqrt{r_{k75}^2 + x_k^2};$$

$$\cos \varphi_{k75} = r_{k75} / z_{k75}; \quad U_{k75} = \frac{I_{1\text{НОМ}} z_{k75}}{U_{1\text{НОМ}}} \cdot 100, \quad (3.18)$$

где t_1 - температура обмоток во время опыта.

Так как при опыте к.з. основной поток $\Phi_{\text{макс}}$ составляет всего лишь несколько процентов по сравнению с его значением при номинальном первичном напряжении, можно пренебречь. Следовательно, можно считать, что мощность P_k , потребляемая трансформатором при опыте к.з., идет полностью на покрытие электрических потерь в обмотках трансформатора:

$$P_k = I_{1k}^2 r_1 + I_{1k}^2 r'_2 = I_{1k}^2 r_k.$$

Мощность к.з. приводит к рабочей температуре обмоток (+75°C):

$$P_{k75} = 3I_{1k}^2 r_{k75}. \quad (3.19)$$

3.4 Упрощенная векторная диаграмма трансформатора

Векторная диаграмма нагруженного трансформатора наглядно показывает соотношение между параметрами трансформатора. Ввиду своей сложности эта диаграмма не может быть использована для практических расчетов. С целью упрощения диаграммы и придания ей практического значения в силовых трансформаторах, работающих с нагрузкой, близкой к номинальной, пренебрегая током х.х.

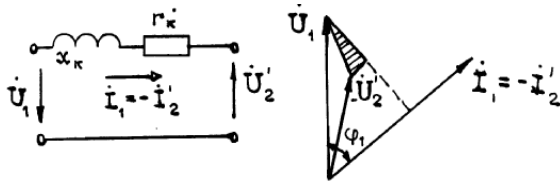


Рисунок III-3.5

и считают, что $I_1 = -I'_2$. Полученная в этом случае ошибка вполне допустима, так как ток по сравнению с токами I_1 и I'_2 невелик.

При сделанном допущении схема замещения трансформатора приобретает упрощенный вид, так как не имеет ветви намагничивания и состоит только из последовательных участков $r_k = r_1 + r'_2$ и $x_k = x_1 + x'_2$

Соответственно упрощенной схеме замещения построена и упрощенная векторная диаграмма, в которой прямоугольный треугольник ABC представляет собой треугольник короткого замыкания.

Упрощенная векторная диаграмма строится по заданным $U_1; I_1; \cos \varphi_2 = r'_n / z'_n$ и параметрам треугольника короткого замыкания $U_k; U_{k.a.}; U_{k.p.}$

$$U_{1\text{НОМ}} - U'_2 = U_{\text{к.а}} \cos \varphi_2 + U_{\text{к.р}} \sin \varphi_2. \quad (3.20a)$$

Изменение вторичного напряжения (3.20)

$$\Delta U_{\text{НОМ}} = \frac{U_{\text{к.а}} \cos \varphi_2 + U_{\text{к.р}} \sin \varphi_2}{U_{1\text{НОМ}}} 100 \quad (3.20б)$$

Обозначим $\frac{U_{\text{к.а}}}{U_{1\text{НОМ}}} \cdot 100 = u_{\text{к.а}}$; $\frac{U_{\text{к.р}}}{U_{1\text{НОМ}}} \cdot 100 = u_{\text{к.р}}$

тогда (3.20б) принимает вид

$$\Delta U_{\text{НОМ}} = u_{\text{к.а}} \cos \varphi_2 + u_{\text{к.р}} \sin \varphi_2. \quad (3.21)$$

Формула (3.21) дает возможность определить $\Delta U_{\text{НОМ}}$ лишь при номинальной нагрузке трансформатора. При необходимости расчета величины изменения вторичного напряжения при любой нагрузке в (3.21) следует ввести коэффициент нагрузки

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2\text{НОМ}}}$$

$$\Delta U = \beta(u_{\text{к.а}} \cos \varphi_2 + u_{\text{к.р}} \sin \varphi_2) \quad (3.22)$$

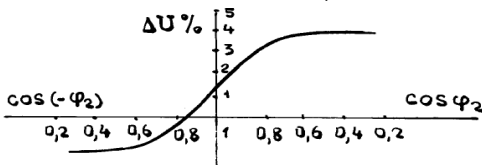


Рисунок III-3.8

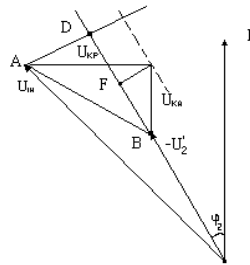


Рисунок III-3.7

Зависимость вторичного напряжения U_2 трансформатора от на-

грузки I_2 называют **внешней характеристикой** (рис 3.8).

Вид внешней характеристики зависит от характера нагрузки трансформатора ($\cos \varphi_2$).

Внешняя характеристика трансформатора может быть построена путем расчета ΔU для разных значений β и $\cos \varphi_2$ (рис III-3.9)

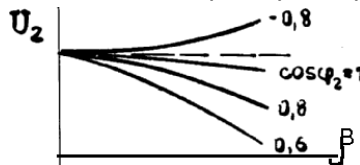


Рисунок III-3.9

3.6 Потери и к.п.д. трансформатора

В процессе передачи энергии от первичной обмотки ко вторичной активная мощность P_1 , поступает из сети, частично рас-

ходуется на электрические потери, связанные с нагревом первичной обмотки $P_{\Sigma 1} = I_1^2 r_1$.

Оставшаяся мощность посредством магнитного поля передается вторичной обмотке, частично расходуясь при этом на магнитные потери P_M , которые складываются из потерь на вихревые токи $P_{вх}$ и на перемагничивание (гистерезис) P_H , величина этих потерь пропорциональна активной составляющей тока х.х. $P_M = E_1 I_{оа}$. Оставшаяся после этого активная мощность полностью поступает во вторичную цепь и называется **электромагнитной** мощностью $P_{\Sigma 2} = P_1 - P_{\Sigma 1}$ $P_M = I_2^2 E_2' \cos \psi_2$.

Полученная вторично обмоткой мощность, частично истраченная на нагрев вторичной обмотки $P_{\Sigma 2} = I_2^2 r_2'$ (**электрические потери**), отдается трансформатором во вторичную цепь $P_2 = P_{\Sigma 2} - P_{\Sigma 2}$.

К.п.д. трансформатора определяется отношением активных мощностей на выходе и входе трансформатора:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_{\Sigma 1} + P_M + P_{\Sigma 2}} = 1 - \frac{P_{\Sigma 1} + P_M + P_{\Sigma 2}}{P_2 + P_{\Sigma 1} + P_M + P_{\Sigma 2}} \quad (3.24)$$

К.п.д. трансформатора выше, чем электрических машин, что частично объясняется отсутствием механических потерь. Даже в трансформаторах мощностью, измеряемой сотнями кВА, к.п.д. достигает значения 98-99%. Поэтому определение к.п.д. трансформаторов с достаточной мощностью возможно лишь косвенным методом - путем определения потерь по результатам опытов х.х и к.з. Метод непосредственного определения к.п.д. путем измерения активных мощностей P_1 и P_2 дает значительную ошибку из-за погрешностей измерения.

Магнитные потери P_M определяются мощностью х.х. при номинальном подведенном напряжении $P_{о ном}$. Следует отметить, что магнитные потери меньше $P_{о ном}$ на величину потерь на нагрев первичной обмотки в режиме х.х. ($P_M = P_{о ном} - I_{о ном}^2 r_1$). Однако значения $I_{о ном}$ обычно невелики, а поэтому величина $I_{о ном}^2 r_1$ настолько мала по сравнению с $P_{о ном}$, что ею пренебрегают, считая $P_o = P_{о ном}$.

Магнитные потери зависят от частоты переменного тока ($P_M = f^{1,3}$) и магнитной индукции ($P_M \equiv B^2$). При неизменном пер-

вичном напряжении магнитные потери от нагрузки не зависят, а поэтому их называют **постоянными**.

Электрические потери, т.е. потери в обмотках трансформатора, связанные с их нагревом, называют **переменными**, как величина этих потерь прямо пропорциональная квадрату тока в обмотках. Как установлено, в 3.3 величина электрических потерь принимается равной потерям к.з.

$$P_{\Sigma} = P_{\Sigma 1} + P_{\Sigma 2} = I_{1K}^2 r_K = P_K. \quad (3.25)$$

Если известна мощность $P_{K,НОМ}$ при номинальных токах, то электрические потери при любой нагрузке

$$P_{\Sigma} = \beta^2 P_{K,НОМ}, \quad (3.26)$$

где β - коэффициент нагрузки.

Суммарные потери в трансформаторе

$$P = P_{\Sigma 1} + P_M + P_{\Sigma 2} = P_{O,НОМ} + \beta^2 P_{K,НОМ}. \quad (3.27)$$

Возвращаясь к (3.24), получим

$$\eta = 1 - \frac{P_{O,НОМ} + \beta^2 P_{K,НОМ}}{P_2 + P_{O,НОМ} + \beta^2 P_{K,НОМ}}. \quad (3.28)$$

Активная мощность на выходе трансформатора

$$P_2 = m I_2 U_2 \cos \varphi_2 = \beta S_{НОМ} \cos \varphi_2, \quad (3.29)$$

где $S_{НОМ} = m I_{2НОМ} U_2$ - номинальная мощность трансформатора, ВА; m - число фаз трансформатора, для трехфазового трансформатора $m=3$

В итоге получаем

$$\eta = 1 - \frac{P_{O,НОМ} + \beta^2 P_{K,НОМ}}{\beta S_{НОМ} \cos \varphi_2 + P_{O,НОМ} + \beta^2 P_{K,НОМ}} \quad (3.30)$$

Величина к.п.д. трансформатора зависит от величины нагрузки (β) и ее характера ($\cos \varphi_2$). Максимальное значение к.п.д. соответствует такой нагрузке, при которой магнитные потери равны электрическим ($P_{O,НОМ} = \beta^2 P_{K,НОМ}$). Отсюда значение коэффициента нагрузки соответствующее максимальному к.п.д.,

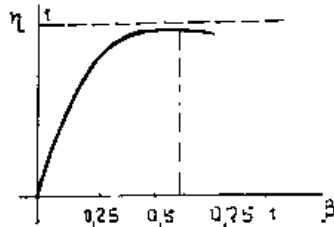


Рисунок III-3.10

$$\beta' = \sqrt{\frac{P_{\text{о.ном}}}{P_{\text{к.ном}}}}. \quad (3.31)$$

Обычно к.п.д. имеет максимальное значение при $\beta' = 0,5 \div 0,6$.

4. Трехфазный трансформатор

4.1 Конструкция трехфазного трансформатора

Трансформирование трехфазной системы напряжений можно осуществить тремя однофазными трансформаторами, соединенными в трансформаторную группу. Однако относительная громоздкость, большой вес и повышенная стоимость являются недостатками трансформаторной группы, поэтому она применяется только в установках большой мощности с целью уменьшения веса и габаритов единицы оборудования, что важно при его монтаже и транспортировке (рис III-4.1).

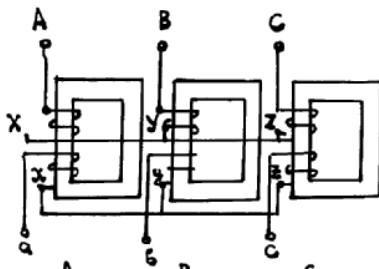


Рисунок III-4.1

В установках мощностью примерно до 60 000 кВА обычно применяют трехфазные трансформаторы, у которых обмотки расположены на трех стержнях, объединенных в общий магнитопровод двумя ярами (рис. III-4.2).

Но полученный таким образом магнитопровод является несимметричным: магнитное сопротивление потоку средней фазы меньше магнитного сопротивления потока крайних фаз Фа и Фс.

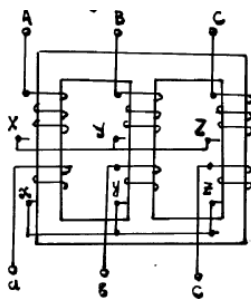


Рисунок III-4.2

Для уменьшения магнитной несимметрии трех стержневого магнитопровода, т.е. уменьшения магнитного сопротивления потокам крайних фаз, сечение ярем делают на 10-15% больше сечения стержней, что уменьшает их магнитное сопротивление.

4.2 Схемы соединения обмоток трехфазных трансформаторов

Обмотки трехфазных трансформаторов принято соединять: в звезду, в звезду с нулевым выводом, в треугольник, в зигзаг с нулевым выводом (Y/Y -, $-Y/\Delta$, $-Y/Z$).

Соединение в зигзаг применяют только в специализированных трансформаторах, например в трансформаторах для выпрямителей. Для выполнения соединения каждую фазу обмотки НН делят на две части, располагая их на разных стержнях. Указанные части обмоток соединяют так, чтобы конец одной части фазной обмотки был присоединен к концу другой части этой же обмотки, расположенной на другом стержне.

4.3 Группы соединения

До сих пор считали, что при построении векторных диаграмм э.д.с. \dot{E}_1 и \dot{E}_2 совпадают по фазе. Но это соответствует действительности лишь при условии намотки первичной и вторичной катушек в одном направлении и одноименной маркировке выводов этих катушек.

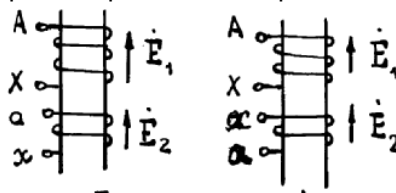


Рисунок III-4.3

Если же в трансформаторе изменить направление намотки катушки низшего напряжения или же переставить обозначения ее выводов, то э.д.с. \dot{E}_2 окажется сдвинутой по фазе относительно э.д.с. \dot{E}_1 на 180° .

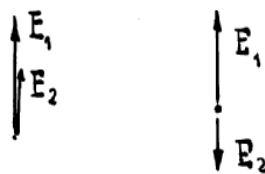


Рисунок III-4.4

Сдвиг фаз между э.д.с. \dot{E}_1 и \dot{E}_2

принято выражать **группой соединения**. Так как этот сдвиг фаз может изменяться от 0 до 360, а кратность сдвига составляет 30, то для обозначения группы соединения принят ряд чисел 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 0.

Угол смещения векторов линейных э.д.с. обмотки НН по отношению к векторам линейных э.д.с. обмотки ВН определяется умножением числа, обозначающего группу соединения, на 30° . Угол смещения отсчитывают от вектора э.д.с. обмотки ВН по часовой стрелке до одноименного вектора э.д.с. обмотки НН. На-

пример, группа соединения 5 указывает, что вектор э.д.с. НН отстает по фазе от вектора э.д.с. ВН на угол $5 \cdot 30^\circ = 150^\circ$.

Для лучшего понимания принятого обозначения групп соединения пользуются сравнением с часами. При этом вектор э.д.с. обмотки высшего напряжения соответствует минутной стрелке, установленной на цифре 12, а вектор э.д.с. обмотки низшего напряжения – часовой стрелке.

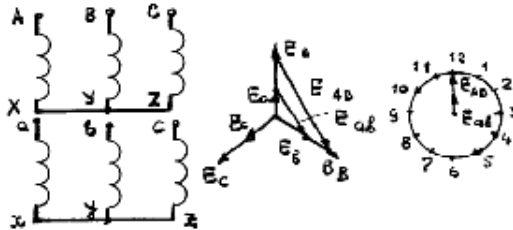


Рисунок III-4.5

Применение разных способов

соединения обмоток в трехфазных трансформаторах можно создать двенадцать различных групп соединения. Рассмотрим в качестве примера схему соединений «звезда-звезда». Векторные диаграммы э.д.с. показывают, что сдвиг между линейными э.д.с. $\dot{E}_1 (AB)$ и $\dot{E}_2 (ab)$ в данном случае равен нулю. В этом можно убедиться, совместив точки A и a при наложении векторных диаграмм э.д.с. обмоток ВН и НН.

Следовательно, при указанных схемах соединения бмоток имеет место группа 0; обозначается -0. Если же на стороне НН в нулевую точку соединить зажимы a, в и с, а снимать э.д.с. с зажимов X, Y и Z, то э.д.с. $E_2 (a в)$ изменит фазу на 180 и трансформатор будет принадлежать группе 6 (Y/Y -6).

При соединении обмоток «звезда-треугольник», показанном на рис III-4.6, имеет место группа 11 (Y/Δ - 11). Если же поменять местами начала

и концы фазных обмоток НН, то вектор $\dot{E}_2 (a в)$ повернется на 180 и трансформатор будет относиться к группе 5 (Y/Δ - 5).

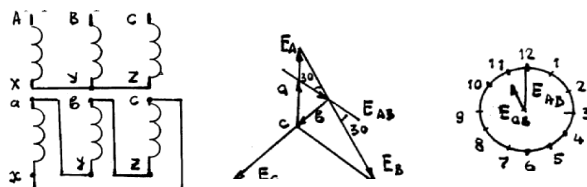


Рисунок III-4.6

ГОСТ 11677–65 определяет схемы и группы соединения, применяемые для силовых двухобмоточных трансформаторов общепромышленного назначения.

Путем соединения обмотки НН в зигзаг в сочетании с соединением обмотки ВН в звезду или треугольник можно получить практически любой угол сдвига фаз между э.д.с. обмоток ВН и НН. Этого достигают разделением обмотки НН на две части с различным соотношением витков в этих частях, а следовательно, и с различным значением угла.

4.4 Явления, возникающие при намагничивании магнитопроводов трансформаторов

Допустим, что к первичной обмотке трансформатора подведено синусоидальное напряжение. При этом поток в магнитопроводе не будет синусоидальным.

Однако вследствие магнитного насыщения магнитный поток при синусоидальном потоке Φ намагничивающий ток i_p является несинусоидальным. Для определения формы кривой этого тока $i_{op} = f(t)$ воспользуемся кривой намагничивания магнитопровода и $\Phi = f(i_{op})$ графиком изменения потока $\Phi = f(t)$.

На рис. III- 4.7 дано построение графика намагничивающего тока $i_{op} = f(t)$.

Здесь в левом верхнем квадранте показана синусоидальная кривая $\Phi(t)$, а в верхнем правом квадранте – кривая намагничивания $\Phi(i_{op})$ ма-

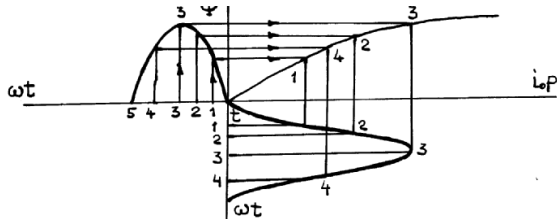


Рисунок III-4.7

териала магнитопровода. Для получения графика намагничивающего тока х.х. $i_{op} = f(t)$ расположенного в правом нижнем квадранте, поступают следующим образом. На графике $\Phi(t)$ выбирают ряд точек (1,2,3), проектируют их на кривую намагничивания и определяют значения намагничивающего тока, соответствующие выбранным значениям магнитного потока. Затем проводят вертикальные линии через точки 1,2,3 на оси i_{op} в правый нижний квадрант с горизонтальными линиями, проведенными из

точек 1,2,3 на оси времени этого квадранта, и получают геометрическое место точек кривой намагничивающего тока $i_{op} = f(t)$. Из сделанных построений видно, что при синусоидальной форме кривой $\Phi(t)$ намагничивающий ток имеет пикообразную форму. В целях упрощения построений в этом случае воспользовались кривой намагничивания $\Phi(i_{op})$ построенной без учета гистерезиса.

После разложения кривой тока $i_{op}(t)$ на составляющие видно, что в этом токе кроме основной (первой) гармоники i_{op1} ярко выражена третья i_{op3} . Так, в трансформаторе с магнитопроводом из высоколегированной стали при индукции $B=1,4$ Т третья гармоника составляет примерно 30% основной гармоники намагничивающего тока. Сказанное относится лишь к реактивной составляющей х.х., так как активная составляющая i_{oa} является синусоидальной. Но I_{oa} обычно не превышает 10% от тока х.х., поэтому с некоторым приближением можно принять, что кривая тока х.х. с не отличается от кривой i_{op} .

4.5 Э.д.с. трехфазных обмоток трансформатора

В общем случае э.д.с. e_A , e_B , e_C в фазных обмотках А, В и С несинусоидальны. Предполагая наличие только нечетных гармонических и принимая начальную фазу $\psi = 0$, имеем для обмотки А:

$$e_A = E_{m1} \sin \omega t + E_{m2} \sin 3\omega t + E_{m5} \sin 5\omega t + E_{m7} \sin 7\omega t + \dots \quad (4.1)$$

Соответственно для фаз В и С:

$$e_B = E_{m1} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + E_{m3} \sin 3\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \\ + E_{m5} \sin 5\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + E_{m7} \sin 7\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \dots \quad (4.2)$$

$$e_C = E_{m1} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) + E_{m3} \sin 3\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) + \\ + E_{m5} \sin 5\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) + E_{m7} \sin 7\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) + \dots \quad (4.3)$$

Из уравнений мы видим, что:

а) первые гармонические э.д.с.в фазах А, В и С образуют симметричную трех лучевую звезду с порядком следования фаз $\dot{E}_{A1} - \dot{E}_{B1} - \dot{E}_{C1}$

б) третьи гармонические э.д.с. и соответственно гармонические, кратные трем, во всех фазных обмотках совпадают по фазе и, следовательно, независимо от способа соединения обмоток направлены в каждой фазной обмотке либо от ее начала к ее концу, либо в обратном направлении;

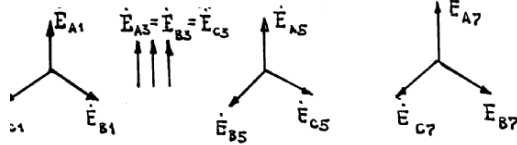


Рисунок III-4.8

в) пятая и седьмая, гармонические э.д.с. образуют такие же, как первая гармоническая, симметричные трех лучевые звезды, но по сравнению с первой пятая гармоническая имеет обратный порядок следования фаз $\dot{E}_{A5} - \dot{E}_{C5} - \dot{E}_{B5}$, а седьмая гармоническая - тот же порядок следования фаз, что и первая. В общем случае гармонические порядка $3s+1$, где любое s - любое четное число, имеют тот же порядок следования фаз, что и первая гармоническая, получаемая при $s=0$, а гармонические порядка $3s-1$ - обратный порядок.

4.6 3-я гармоника в трансформаторе при соединении его обмоток по способу $Y/Y - 12$

При изучении режима холостого хода однофазного трансформатора мы видели, что при подведенном синусоидальном напряжении кривые первичной э.д.с. и основного потока синусоидальны, а кривая тока содержит наряду с первой гармонической сильно выраженную третью гармоническую.

Возьмем теперь трансформаторную группу, состоящую из трех одинаковых однофазных трансформаторов, обмотки которых соединены по способу $Y/Y - 12$.

Основное, что отличает работу при холостом ходе такой трансформаторной группы от работы при холостом ходе однофазного трансформатора состоит в том, что в ней нет **третьих гармонических тока**. Это непосредственно вытекает из сказанного ранее. Аналогично формулам (4.1), (4.2) для третьих гармонических тока имеем:

$$i_{oA3} = I_{o3m} \sin \omega t; \quad (4.4)$$

$$i_{oB3} = I_{o3m} \sin \omega t; \quad (4.5)$$

$$i_{oC3} = I_{o3m} \sin \omega t; \quad (4.6)$$

Таким образом, третьи гармонические токи, так же как третьи гармонические э.д.с. совпадают по фазе во времени, и, следовательно, каждая из этих гармонических направлена в любой момент времени либо от начала обмотки к ее концу, либо в обратном направлении. Следовательно, при соединении обмоток звездой токи третьей гармонической выпадают из кривой тока холостого хода, поскольку в каждый момент они направлены либо все к нейтральной тока, либо от нее.

Токи пятой гармонической продолжают существовать в кривой тока холостого хода, но, в соответствии со сказанным выше, с обратным порядком следования фаз.

Отсутствие третьей гармонической в кривой тока холостого хода искажает кривую магнитного потока. На рис. III-4.9 изображены кривые

тока и потока Φ при наличии третьей гармонической i_{o3} в кривой

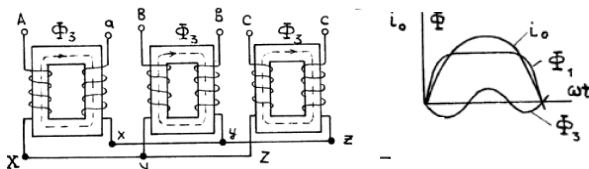


Рисунок III-4.9

этой кривой. В первом случае кривая потока Φ синусоидальна. Выпадение третьей гармонической i_{o3} можно представить как наложение на кривую тока i_o на рис. кривой тока третьей гармонической, но обратной направленности, т.е. $-i_{o3}$. Соответственно на синусоидальную кривую потока Φ нужно наложить кривую потока Φ_3 , создаваемого током $-i_{o3}$ (тонкие штриховые линии на рис. III-4.9); кривая результирующего потока Φ показана на рис. III-4.9 жирной штриховой линией.

Так как каждая из фаз трансформатора имеет самостоятельную магнитную систему, то магнитный поток Φ_3 замыкается по тому же пути, что и поток Φ_1 , т.е. по пути, имеющему малое магнитное сопротивление.

Поэтому в трехфазной группе величина потока в отдельных случаях составляет 15-20% от Φ_1 . При резко выраженной третьей гармонической потока Φ_3 кривая результирующего потока Φ приобретает седлообразный характер.

Поток Φ_3 наводит э.д.с. e_{13} и e_{23} в первичной и вторичной обмотках трансформатора и, так как он изменяется с частотой $f_3 = 3f_1$, то наводимые им э.д.с. тройной частоты достигают 45-60% от э.д.с. e_1 и e_2 . При этом, как видно из сопоставления кривых э.д.с. e_1 и e_2 , амплитуды этих гармонических складываются. Это повышает на те же 45-60% наибольшее значение фазной э.д.с. и на 10-17% ее действующее значение $\sqrt{1^2 + (0,45 \div 0,6)^2}$. Такое повышение э.д.с. нежелательно и в ряде случаев опасно. Поэтому, например, в трансформаторах большой мощности повышенного напряжения соединения $Y/Y - 12$ в чистом виде не применяется.

Несмотря на резкое изменение кривых **фазных** напряжений, **линейные напряжения остаются синусоидальными**, так как при соединении обмоток звездой третьей гармонические э.д.с. в линейных напряжениях исчезают.

Иначе обстоит дело в трехстержневом трансформаторе, в котором магнитные цепи представляют собой замкнутую систему. Действительно, потоки третьих гармонических во всех трех фазах, так же как и токи совпадают по времени. Это значит, что потоки третьих гармонических в каждый момент времени равны друг другу по величине и в стержнях трансформатора направлены все в одну сторону. Это приводит к тому, что линии третьей гармонической потока во всех трех фазах выступают из сердечника и замыкаются от ярма через воздух. Этот путь имеет большое магнитное сопротивление; поэтому потоки третьей гармонической невелики, и при нормальных насыщениях стали кривые фазных напряжений, как правило, остаются практически синусоидальными.

Потоки третьей гармонической, замыкаясь через воздух, пульсируют с частотой $3f$. Они естественно, стремятся идти по пути, имеющему наименьшее сопротивление, т.е., через стенки бака, стяжные болты и т.д. В результате в этих частях возникают вихревые токи, вызывающие местные нагревания и понижающие к.п.д. трансформатора.

Исследования показывают, что уже при индукции в стержне порядка 1,4 Тл потери в баке составляют около 10 % от потерь в сердечнике; при увеличении индукции в стержне потери в баке быстро растут и при индукции 1,6 Тл достигают 50 – 65 % от потерь в сердечнике.

4.7 3-я гармоника в трансформаторе при соединении его обмоток по способу Δ/Y

Первичный треугольник трансформатора представляет собой контур, по которому все три тока третьей гармонической протекают в одном направлении. Но если в токе холостого хода имеется третья гармоническая,

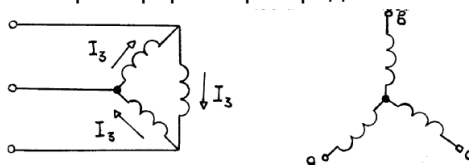


Рисунок III-4.10

то форма кривых магнитного потока и естественно первичной и вторичной э.д.с. приближаются к синусоиде. Это составляет весьма ценное преимущество соединения обмоток по способу Δ/Y перед соединением по способу Y/Y .

4.8 3-я гармоника в трансформаторе при соединении его обмоток по способу Y/Δ

То обстоятельство, что здесь, в противоположность соединению Δ/Y , звездой соединяется первичная обмотка, а треугольником – вторичная, не имеет существенного значения. Действительно, при соединении первичной обмотки звездой из кривой тока холостого хода выпадает третья гармоническая и кривая потока приобретает упрощенную

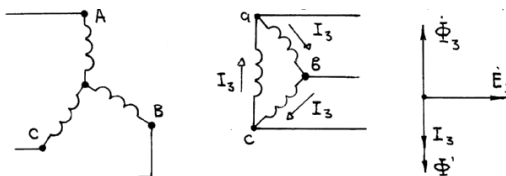


Рисунок III-4.11

форму. Третья гармоническая потока Φ_3 наводит в каждой фазе вторичной обмотки третью гармоническую э.д.с. E_{23} создают токи, отстающую от потока Φ_3 по фазе на 90° . Э.д.с. E_{23} создают токи I_{23} , замыкающиеся по вторичному треугольнику и отстающие от э.д.с. почти на 90° , так как контур вторичной обмотки

имеет значительное индуктивное сопротивление. Мы видим, что ток I_3 находится почти в противофазе с третьей гармонической потока, т.е. создает поток Φ_3 ; вследствие этого кривые рующего потока и соответственно э.д.с. приближаются к де. Таким образом, соединение Y/Δ , так же как и соединение Δ/Y вполне защищает трансформатор от всякого рода вредных воздействий третьих гармонических потока и э.д.с.

4.9 Соединение $Y/Y-12$ трехфазного трансформатора с третичной обмоткой

Соединение $Y/Y-12$ не применяют в мощных трансформаторах высокого напряжения из-за недостатков, о которых мы говорили выше. Но иногда считают выгодным заземлить трансформатор, как со стороны первичной обмотки, так и со стороны вторичной. В этом случае обе обмотки соединяют звездой, но уstraивают так называемую **третичную обмотку**, которая представля-

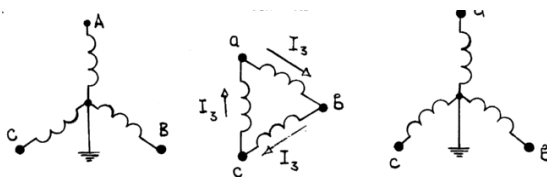


Рисунок III-4.12

ет собой добавочную обмотку, соединенную треугольником и замкнутую на себя. По отношению к этой третичной обмотке поток третьей гармонической будет действовать совершенно так же и с теми же результатами, что и при соединении $Y/\Delta-11$.

Трансформаторы с третичной обмоткой встречаются относительно редко, так как обычно заземляются только обмотки ВН.

5. Параллельная работа трансформаторов

5.1 Условие параллельной работы трансформаторов

Параллельно включенные трансформаторы работают наилучшим образом, если соблюдены следующие условия параллельной работы трансформаторов:

1. Номинальные первичные напряжения и соответственно номинальные вторичные напряжения всех параллельно работающих трансформаторов должны быть равны, т.е.

$$U_{1l} = U_{1II} = U_{1III} = \dots U_{1n} \quad (5.1)$$

и

$$U_{2l} = U_{2II} = U_{2III} = \dots U_{2n} \quad (5.2)$$

Практически первое условие сводится к требованию, чтобы были равны коэффициенты трансформации, т.е. чтобы было

$$k_I = k_{II} = k_{III} = \dots k_n \quad (5.3)$$

2. Параллельно работающие трансформаторы должны принадлежать к одной группе;

3. Активные и индуктивные составляющие напряжения короткого замыкания всех трансформаторов должны быть равны, т.е.

$$U_{к.аI} = U_{к.аII} = U_{к.аIII} = \dots U_{к.а(n)} \quad (5.4)$$

и

$$U_{к.рI} = U_{к.рII} = U_{к.рIII} = \dots U_{к.рn} \quad (5.5)$$

Практически третье условие сводится к требованию, чтобы были равны напряжения короткого замыкания, т.е. чтобы было

$$U_{кI} = U_{кII} = U_{кIII} = \dots U_{кn} \quad (5.6)$$

Если трансформаторы удовлетворяют всем поставленным выше условиям, то векторные диаграммы их работы под нагрузкой, построенные в относительных единицах, совпадают. В этом случае все трансформаторы нагружаются пропорционально их номинальным мощностям, нагрузочные токи трансформаторов арифметически складываются.

На практике должно быть, безусловно, выполнено только второе условие; первое и третье условие выполнения с известными отступлениями, для которых димо установить практически допустимые границы.

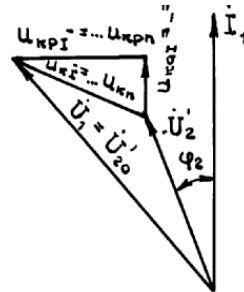


Рисунок III-5.1

5.2 Параллельная работа трансформаторов при неодинаковых коэффициентах трансформации

А. Параллельная работа двух трансформаторов при холостом ходе.

Предположим, что два параллельно включенных трансформатора 1 и 2 удовлетворяют второму и третьему условиям, но не удовлетворяют первому условию, причем $k_I < k_{II}$. Будем считать, что напряжение первичной сети равно номинальным первичным напряжениям каждого из параллельно включенных трансформаторов, т.е. $U_1 = U_{1нI} = U_{1нII}$

Тогда $U_{2I} = \frac{U_1}{k_I} > U_{2II} = \frac{U_1}{k_{II}}$,

причем векторы $U_{2I} = \overline{OA_1}$ и $U_{2II} = \overline{OA_2}$ совпадают по фазе. Под действием разности напряжений $U_{2I} - U_{2II} = \Delta U = \overline{OД}$ в трансформаторах 1 и 2 возника-

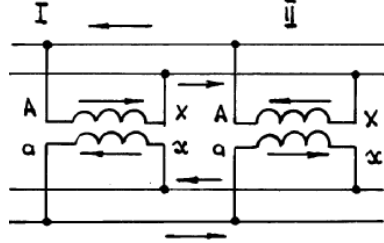


Рисунок III-5.2

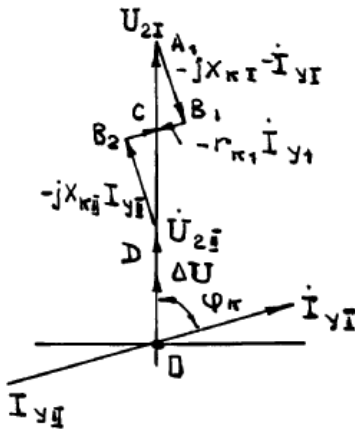


Рисунок III-5.3

ет **уравнительный ток** I_y , мгновенное распределение которого в трансформаторах 1 и 2 показано на рис III-5.2. Мы видим, что по отношению к току I_y трансформаторы 1 и 2 находятся в режиме короткого замыкания; причем этот ток течет по обмоткам трансформаторов в противоположных направлениях; соответственно этому на рис III-5.3 уравнительный ток показан двумя

векторами: I_{yI} в трансформаторе 1 и $I_{yII} = -I_{yI}$ в трансформаторе 2.

$$i_y = \frac{\Delta \dot{U}}{z_{kI} + z_{kII}}$$

Б. Параллельная работа двух трансформаторов под нагрузкой.

Будем по-прежнему считать, что $k_I < k_{II}$ и что второе и третье условия параллельной работы трансформаторов выполнены.

В основу изучения рассматриваемого режима кладется метод **наложения** двух режимов. Действительно, наличие уравнительного тока обеспечивает равенство вторичных напряжений обоих трансформаторов напряжению \overline{OC} . Поэтому, когда появляется внешняя нагрузка, то внешний нагрузочный ток распреде-

ляется между трансформаторами пропорционально их номинальным мощностям. Таким образом, все происходит так, как если бы в каждом из трансформаторов существовали два тока – **уравнительный** I_y и **нагрузочный** ток $I_{нг}$, соответствующий внешней нагрузке. В действительности существует только результирующий ток, представляющий собой геометрическую сумму обоих токов.

Так как при нагрузке вторичные напряжения обоих трансформаторов снижаются практически на одну и ту же величину, то напряжения и соответственно уравнительные токи I_{yI} и I_{yII} в пределах обычных нагрузок не зависят от режима работы трансформаторов.

При этом трансформатор 1 перегружен, а трансформатор 2 недогружен. При неравенстве коэффициентов трансформации следует предпочесть, чтобы трансформатор меньшей мощности имел больший коэффициент трансформации. Так как трансформаторы нельзя перегружать во избежание перегрева, то, очевидно, необходимо снизить внешнюю нагрузку так, чтобы поставить перегруженный трансформатор в нормальные условия работы. При этом второй трансформатор будет недогружен и система хуже использована.

Из сказанного следует, что сколько-нибудь значительное неравенство коэффициентов трансформации недопустимо. Согласно ГОСТ, для трансформаторов с коэффициентом трансформации меньше 3 и трансформаторов для собственных нужд подстанций $\Delta k \leq 1\%$, для все прочих трансформаторов $\Delta k \leq 0,5\%$.

5.3 Параллельная работа трехфазных трансформаторов с различными группами соединения обмоток

При параллельном включении двух трехфазных трансформаторов, имеющих одинаковые коэффициенты трансформации, но принадлежащих к различным группам, между зажимами $a_1 - a_2, b_1 - b_2, c_1 - c_2$ всегда будет действовать напряжение, $\Delta U = U_{o2I} - U_{o2II}$, обусловленное углом сдвига α между вторичными напряжениями трансформаторов. При равенстве вторичных напряжений $U_{o2I} = U_{o2II} = U_{o2}$ величина напряжений ΔU определяется из равнобедренного треугольника oa_1a_2 как

$$\Delta U = 2U_{o2} \sin \frac{\alpha}{2}.$$

Под действием этого напряжения в обмотках трансформаторов появится уравнительный ток, I_y величина которого определяется по уравнению, а именно:

$$I_y = \frac{\Delta U}{Z_{k(1)} + Z_{k(2)}}. \quad (5.7)$$

Известно, что наименьшее значение угла α может быть 30° , когда один трансформатор принадлежит, например, к группе $Y/Y-12$, а второй – к группе $\Delta/Y-11$. При равенстве мощностей трансформаторов ($P_1 = P_2, I_{2I} = I_{2II} = I_2$) и равенстве их напряжений короткого замыкания, ($u_{kl} = u_{kII} = 5\%$) т.е. в наиболее благоприятном случае – при параллельном включении трансформаторов, даже при холостом ходе уравнительный ток будет

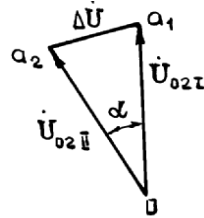


Рисунок III-5.4

$$I_{y*} = \frac{2 \cdot 1 \cdot \sin 15^\circ}{0,05 + 0,05} = 5. \quad (5.8)$$

5.4 Параллельная работа трансформаторов с неодинаковыми напряжениями короткого замыкания

Предположим, что первое и второе условия параллельной работы выполнены, но $u_{kl} \neq u_{kII}$. Говоря о напряжениях короткого замыкания, следует иметь в виду, что они могут отличаться друг от друга как по величине, так и в отношении своих составляющих. Сначала рассмотрим влияние второго фактора. Возьмем, например, трансформаторы мощностью 10 и 100 кВ.А. Согласно ГОСТ, трансформатор на 10 кВА имеет: $u_{к.р} = 4,36\%$; $u_{к} = 5,5\%$, $u_{к.а} = 3,35\%$; соответственно трансформатор на 100 кВ.А. имеет: $u_{к} = 5,5\%$, $u_{к.а} = 2,4\%$ и $u_{к.р} = 4,95\%$. Совместив гипотенузы треугольников короткого замыкания AB_1C и AB_2C получим диаграмму. Если пренебречь током холостого хода, то можно считать, что с составляющей $\overline{CB_1}$ совпадает по фазе ток I_{2I} , а с со-

ставляющей $\overline{C\bar{B}}_2$ – ток I_{2I} ; следовательно, токи I_{2I} и I_{2II} смещены относительно друг друга по фазе на угол $\Delta\varphi_K = \varphi_{KII} - \varphi_{KI}$ и $I_c = I_{2I} + I_{2II}$. Но, как это видно из диаграммы на рис., даже при относительно большой разнице между составляющими $u_{k,a}$ и $u_{k,p}$ взятых нами трансформаторов угол $\Delta\varphi_K$ весьма невелик, и поэтому можно считать, что токи I_{2I} и I_{2II} складываются арифметически, т.е.

$$I_c = I_{2I} + I_{2II}. \quad (5.9)$$

Этот вывод имеет достаточно общий характер, т.е. его можно распространить на любое число трансформаторов.

Теперь предположим, что $u_{kI} \neq u_{kII}$. Так как при параллельной работе трансформаторов первичные и вторичные напряжения совпадают как по величине, так и по фазе, то падения напряжения во всех трансформаторах должны быть равны, т.е.

$$I_1 z_{kI} = I_{II} z_{kII} = \dots I_m z_{k,m} = \dots I_n z_{k,n}.$$

Следовательно,

$$I_1 : I_{II} : \dots I_m : \dots I_n = S_1 : S_{II} : \dots S_m : \dots S_n = \frac{1}{z_{kI}} : \frac{1}{z_{kII}} : \dots \frac{1}{z_{k,m}} : \dots \frac{1}{z_{k,n}}; \quad (5.10)$$

где S_1, S_{II}, S_m, S_n – мощность каждого из параллельно работающих трансформаторов.

Из формулы следует, что

$$\begin{aligned} \frac{S_m}{\sum_1^n S_m} &= \frac{\frac{1}{z_{k,m}}}{\sum_1^n \frac{1}{z_{k,m}}} = \frac{1}{z_{k,m} \sum_1^n \frac{1}{z_{k,m}}} = \frac{1}{\frac{u_{k,m} U_{1H}}{I_{1H,m}} \sum_1^n \frac{I_{1H,m}}{u_{k,m} U_{1H}}} = \\ &= \frac{1}{\frac{u_{k,m}}{I_{1H,m} U_{1H}} \sum_1^n \frac{I_{1H,m} U_{1H}}{u_{k,m}}}; \end{aligned}$$

$$S_m = \frac{S_m \sum_1^n S_m}{u_{k,m} \sum_1^n \frac{S_m}{u_{k,m}}}; \quad \text{т.к. } z_k = z_{k*} \frac{U_{1H}}{I_{1H}}.$$

Следовательно, мощность m -го трансформатора будет

$$S_m = \frac{S_{m,n} \sum_1^n S_{m,n}}{U_{k,m} \sum_1^n \frac{S_{m,n}}{U_{k,m}}} \quad (5.11)$$

Пусть, например, даны три трехфазных масляных трансформатора по 100 кВ.А. причем $U_{k1} = 3,5\%$, $U_{k2} = 4,0\%$ и $U_{k3} = 5,5\%$.

Общая нагрузка $\sum_1^n S_{m,n} = 300$ кВА.

Согласно формуле (5.11) имеем

$$\sum_1^n \frac{S_{m,n}}{U_{k,m}} = \frac{100}{3,5} + \frac{100}{4} + \frac{100}{5,5} = 71,8.$$

Следовательно,

$$S_1 = \frac{300}{71,8} \cdot \frac{100}{3,5} = 119,5 \text{ кВА};$$

и

$$S_2 = \frac{300}{71,8} \cdot \frac{100}{4} = 104,5 \text{ кВА};$$

$$S_3 = \frac{300}{71,8} \cdot \frac{100}{5,5} = 76 \text{ кВА};$$

т.е. первый трансформатор перегружен на 19,5% а третий недогружен на 24%.

Уменьшая внешнюю нагрузку на 19,5%, мы получим новое распределение нагрузок на трансформаторы:

$$S_1 = 100 \text{ кВА}, S_2 = 87,2 \text{ кВА}, S_3 = 63,5 \text{ кВА}.$$

В этом случае первый трансформатор будет нормально нагружен, но два другие недогружены. Такие условия параллельной работы нельзя признать удовлетворительными. Поэтому ГОСТ требует, чтобы трансформаторы, предназначенные для параллельной работы, имели напряжения короткого замыкания u_k , отклоняющиеся от их арифметического среднего значения не более чем на $\pm 10\%$.

Если параллельно работают трансформаторы разной мощности, то лучше, если трансформатор меньшей мощности имеет большее напряжение u_k . Действительно, при нагрузке он окажется недогруженным, но это не представляет большого неудобства, так как недогрузка трансформатора меньшей мощности сказыва-

ется на общей мощности системы слабее, чем недогрузка большого трансформатора. Наоборот, если бы меньший трансформатор имел меньшее напряжение u_k , то он лимитировал бы работу всей системы, поскольку ее нужно было бы разгрузить так, чтобы меньший трансформатор не оказался перегруженным.

Возможные отступления от наиболее благоприятных условий работы тем больше, чем больше разница между мощностями параллельно работающих трансформаторов. Поэтому ГОСТ рекомендует, чтобы для параллельно соединенных трансформаторов отношение наибольшей мощности к наименьшей не превышало 3:1.

6. Трех обмоточные трансформаторы

Широкое применение в энергетике нашли трех обмоточные трансформаторы, у которых имеется одна первичная и две вторичные обмотки. Такие трансформаторы используются на электрических станциях и подстанциях для питания распределительных сетей с различными номинальными напряжениями и позволяют достичь экономии в капитальных затратах за счет установки меньшего количества трансформаторов.

Коэффициенты трансформации:

$$k_{12} = \frac{W_1}{W_2}; \quad k_{13} = \frac{W_1}{W_3}; \quad (6.1)$$

Схема замещения трех обмоточного трансформатора, в отличие от схемы замещения двух обмоточного трансформатора и будет иметь две вторичные цепи. У мощных трех обмоточных силовых трансформаторов намагничивающий ток мал и им можно пренебречь. Изменение нагрузки одной вторичной обмотки влияет на напряжение другой вторичной обмотки, так как при этом изменяется падение напряжения первичной обмотки.

Векторные диаграммы трех обмоточного трансформатора можно составить на основе замещения (рис. III-6.1).

Параметры схемы замещения

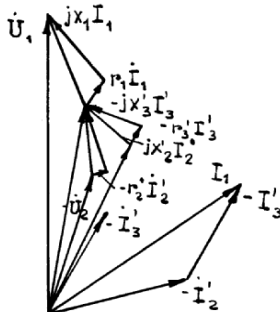


Рисунок III-6.1

можно определить расчетным путем или из данных трех опытов короткого замыкания трех обмоточного трансформатора. По опытным значениям короткого замыкания (рис. III-6.2).

$$\begin{aligned} Z_{k12} &= Z_1 + Z'_2 = r_{k12} + jX_{k12}; \\ Z_{k13} &= Z_1 + Z'_3 = r_{k13} + jX_{k13}; \\ Z'_{k23} &= Z'_2 + Z'_3 = r'_{k23} + jX'_{k23} \end{aligned} \quad (6.2)$$

можно найти

$$\begin{aligned} Z_1 &= \frac{Z_{k12} + Z_{k13} - Z_{k23}}{2}; \\ Z_2 &= \frac{Z_{k12} + Z_{k23} - Z_{k13}}{2}; \\ Z_3 &= \frac{Z_{k13} + Z_{k23} - Z_{k12}}{2}. \end{aligned} \quad (6.3)$$

По аналогичным формулам через активные и индуктивные составляющие Z_{k12} Z_{k13} Z_{k23} выражаются также r_1 r_2 r_3 и X_1 X_2 X_3 .

Данные опыта короткого замыкания между обмотками 2 и 3 должны быть приведены к первичной обмотке с коэффициентом приведения

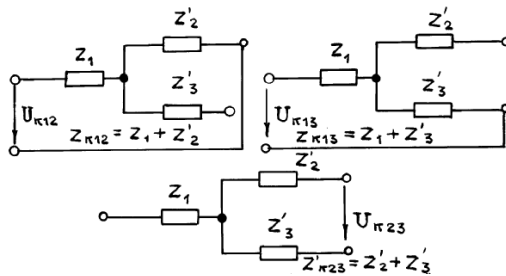


Рисунок III-6.2

$$k_{12} = \frac{W_1}{W_2}. \quad (6.4)$$

В опытах короткого замыкания определяются и также напряжения короткого замыкания U_{k12} , U_{k13} , U_{k23} значения, которых в относительных единицах равны соответствующим сопротивлениям короткого замыкания. Следует отметить, что индуктивное сопротивление рассеяния обмотки, расположенной между двумя другими, близко к нулю или имеет небольшое отрицательное значение, что формально эквивалентно емкостному сопротивлению.

Мощности обмоток трех обмоточного трансформатора

$$S_1 = mU_1I_1; \quad S_2 = mU_2I_2; \quad S_3 = mU_3I_3 \quad (6.5)$$

в случае, если обмотка 1 является первичной, находятся в соотношении

$$S_1 \leq S_2 + S_3,$$

так как коэффициенты мощности $\cos \varphi_2$ и $\cos \varphi_3$ обычно различны, токи I_2 и I_3 сдвинуты по фазе и поэтому $I_1 < I_2 + I_3$.

Практикуется изготовление трех обмоточных трансформаторов со следующими вариантами соотношений номинальных мощностей трех обмоток:

100%, 100%, 100%;
100%, 100%, 67%;
100%, 67%, 100%;
100%, 67%, 67%.

Напряжения короткого замыкания u_{k12} , u_{k13} , u_{k23} определяются при токах, которые соответствуют номинальной мощности наиболее мощной (первичной) обмотки.

Трехфазные трансформаторы выполняются с группами соединений $Y/Y/\Delta$ -12-11 или $Y/\Delta/\Delta$ -11-11, а однофазные – с группой соединений 1/1/1/-12-12.

Трех обмоточные трансформаторы с двумя первичными обмотками и одной вторичной изготавливаются при установке на мощных электростанциях. При этом первичные обмотки имеют одинаковое номинальное напряжение и к ним присоединяется по одному мощному генератору, а вторичная обмотка, имеющая две параллельные ветви, соединяется через подстанцию с линиями передачи. Трансформаторы выполняются однофазными и соединяются в трехфазную группу.

При таком устройстве трансформатора облегчается изготовление первичных обмоток, имеющих большие токи, и в случае короткого замыкания на зажимах одного генератора между двумя генераторами действуют активные и индуктивные сопротивления двух первичных обмоток трансформатора, что приводит к уменьшению тока короткого замыкания.

7. Автотрансформаторы

В обычных трансформаторах первичные и вторичные обмотки имеют между собой только магнитную связь. В ряде случаев вместо таких трансформаторов экономически целесообразно применять трансформаторы, в которых первичные и вторичные

обмотки имеют также электрическую связь. Такие трансформаторы называются автотрансформаторами.

В автотрансформаторе первичная обмотка W_1 включается в сеть параллельно, а вторичная W_2 – последовательно. Устройство обмоток и их расположение на стержнях такие же, как и в обычном трансформаторе, однако, ввиду электрической связи изоляция каждой из них относительно корпуса должна быть рассчитана на напряжение сети высшего напряжения $U_{в.н.}$.

На рис. III-7.1. показаны две возможные схемы соединения

обмоток трансформатора, причем каждая схема представлена в двух различных изображениях. На рис. III-7.1а первичная обмотка включается в сеть низшего напряжения $U_{н.н.}$, а на рис. III-7.1 б – в сеть высшего напряжения $U_{в.н.}$. В обоих случаях

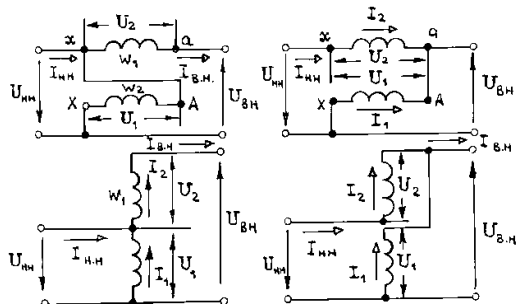


Рисунок III-7.1 а, б

напряжение вторичной обмотки U_2 складывается с напряжением $U_{н.н.}$, и при пренебрежении падениями напряжениями

$$U_{в.н.} = U_{н.н.} + U_2. \quad (7.1)$$

Автотрансформатор может служить как для повышения, так и для понижения напряжения. В первом случае сеть с напряжением $U_{н.н.}$ на рис.7.1 является первичной, и энергия передается из этой сети в сеть с напряжением $U_{в.н.}$. Во втором случае первичной является сеть с напряжением $U_{в.н.}$ и направление передачи энергии изменяется на обратное.

Рассмотрим энергетические соотношения в автотрансформаторе, пренебрегая потерями, падениями напряжения и намагничивающим током.

Э.д.с. и токи обмоток автотрансформатора связаны такими же соотношениями, как и в обычном трансформаторе:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{W_1}{W_2} = k_{AT} \quad (7.2)$$

С другой стороны, коэффициент трансформаций напряжений и токов первичной и вторичной сетей у автотрансформатора

$$k_{\text{ТР}} = \frac{U_{\text{в.н}}}{U_{\text{н.н}}} = \frac{I_{\text{н.н}}}{I_{\text{в.н}}} \quad (7.3)$$

отличается от чисел витков W_1 и W_2 .

Внутренняя или **расчетная мощность трансформатора**, передаваемая посредством магнитного поля из первичной обмотки во вторичную, как и в обычном трансформаторе равна

$$S_{\text{P}} = E_1 I_1 = E_2 I_2.$$

Внешняя или **проходная мощность автотрансформатора** передаваемая из одной сети в другую и равная

$$S_{\text{ПР}} = U_{\text{н.н}} I_{\text{н.н}} = U_{\text{в.н}} I_{\text{в.н}} \quad (7.5)$$

больше S_{P} , так как часть мощности передается из одной сети в другую непосредственно электрическим путем. Расход материалов, габариты и стоимость автотрансформаторов определяются мощностью S_{P} , и так как у трансформатора $S_{\text{P}} < S_{\text{ПР}}$, то в принципе применение автотрансформаторов выгоднее применения обычных трансформаторов, в которых $S_{\text{P}} = S_{\text{ПР}}$.

Если пренебречь током х.х. (не отличающихся от обычного трансформатора) $W_1 I_1 + W_2 I_2 = 0$; $I_1 = -\frac{I_2}{k}$

э.д.с. вторичной цепи, $E_2 = E_1 - \Delta E$ где $\Delta E = \frac{W_1 - W_2}{W_1} = E_1(1 - \frac{1}{k})$ с достаточной точностью можно записать

$$U_2 = U_1 - U_1(1 - \frac{1}{k}) \quad \text{или} \quad U_1 = U_1 \frac{1}{k} + U_1(1 - \frac{1}{k})$$

умножив на I_1 , получим

$$S_1 = S_1 \frac{1}{k} + S_1(1 - \frac{1}{k}) \quad (7.6)$$

где $S_1 \frac{1}{k} = S_{\text{эл}}$ – электрическая мощность, передаваемая по проводам; $S_1(1 - \frac{1}{k}) = S_{\text{эм}}$ – электромагнитная мощность, передаваемая электромагнитными связями.

$k > 1$ т.к. всегда берется отношение ВН к НН.

Чем ближе k к 1 коэффициент трансформации, тем меньше $S_{эм}$, следовательно, меньше вес и габариты сердечника.

В параллельной обмотке $I_{12} = I_1 - I_2$ т.к. в понижающем трансформаторе I_2 в противофазе ($-I_2$), то $-I_2 = I_1 + I_{12}$ т.к. $I_{12} = (-I_2) - I_1$ т.е. I_2 имеет две составляющих I_1 передается непосредственно, I_{12} - передается эл.магн. связью.

Сопротивление последовательного участка а-А составит

$$r_{aA} = r_1 \frac{W_1 - W_2}{W_1} = r_1 \left(1 - \frac{1}{k}\right) - \text{меньше, чем у обычного трансформатора. Таким образом, к.п.д. а-т выше обычного.}$$

Ток на параллельном участке А-Х $-I_{12} = I_1 \left(1 - \frac{1}{k}\right)$ - меньше, чем у обычного. Таким образом, можно уменьшить сечение проводов - экономия меди. В опыт к.з. $u_{кАТ} = u_k \left(1 - \frac{1}{k}\right)$ - мало, следовательно велик ток к.з. что весьма опасно. z_k снижается при к.з. от насыщения сердечника (при нормальной работе Н.С А-х уравновешивает н.с.

а-х при к.з. $W_1 I_{12} \ll I_2 (W_2 - W_1)$).

Экономичная работа трансформатора при $k = 1,25 \div 2$.

8. Трансформаторы специального назначения

8.1 Трансформаторы для преобразования числа фаз переменного тока

При питании электропечных установок, преобразования переменного тока в постоянный ток в ряде других случаев возникает необходимость в изменении числа фаз системы переменного тока. Такое преобразование можно осуществить при помощи трансформаторов специального исполнения.

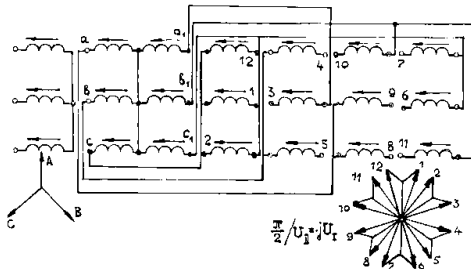


Рисунок III-8.1

При симметричной нагрузке ток в шестифазной ветви в 1,93 раза больше, чем в 12-фазной.

8.2 Трансформаторы для преобразования частоты

При помощи трансформаторов можно осуществить преобразование частоты переменного тока. Практическое применение получили удвоение и утроение частоты.

На рис. III-8.3 показана простейшая схема удвоения частоты. Трансформатор имеет разветвленную магнитную систему в виде двух не-

зависимых подсистем α и β . Первичная обмотка 1, имеющая W_1 витков, охватывает обе подсистемы.

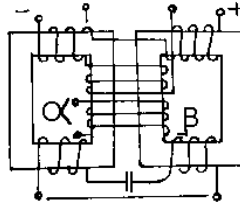
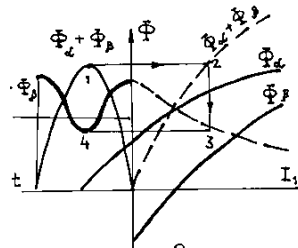


Рисунок III-8.3



При помощи

обмотки 0 подсистемы подмагничиваются в противоположных направлениях постоянным током I_0 , н.с. которого $F_0 = I_0 W_0$. В обмотке 3, состоящей из двух частей с равным числом витков W_3 , расположенных на разных подсистемах и включенных встречно, генерируется при этом э.д.с. двойной частоты.

В квадрате 1 построены магнитные характеристики $\Phi_\alpha = f_\alpha(i_1)$ $\Phi_\beta = f_\beta(i_1)$ подсистем α и β при действии н.с. F_0 в противоположных направлениях. Складывая ординаты этих характеристик, получаем магнитную характеристику суммарного потока $\Phi = \Phi_\alpha + \Phi_\beta$, сцепленного с обмоткой 1. При приложенном синусоидальном напряжении U_1 магнитный поток Φ будет практически также синусоидальным (квадрат 2). Потокосцепление с обмоткой 3 $(\Phi_\alpha - \Phi_\beta) W_3$, пропорционально разности потоков Φ_α и Φ_β , будет меняться в зависимости от намагничивающего тока I_1 . Эта зависимость показана в квадрате 1. Задаваясь мгновенным значениям э.д.с. e_1 и находя соответствующие им мгновенные

значения магнитного потока $\Phi = \frac{e}{4,44fW_1}$ легко по точкам 1-2-3-4

построить зависимость $(\Phi_\alpha - \Phi_\beta) = f(t)$ показанную в квадрате 2. Она имеет пульсирующий характер с частотой пульсаций, равной $2f_1$. Кривая э.д.с. e_3 получается при этом несимметричной и имеет четные гармонические. Для снижения падения напряжения в цепи обмотки 3 при присоединении к ней нагрузки следует последовательно с обмоткой включить соответственно рассчитанную емкость C , компенсирующую индуктивность обмотки.

Утроение частоты при помощи трансформаторов можно осуществить по схеме, представленной на рис.

При соединении в звезду первичных обмоток 1 трех однофазных трансформаторов нарушается условия свободного намагничивания и в магнитном потоке каждой фазы (помимо основной гармонической) возникает значительная третья гармоническая. Эта составляющая магнитного

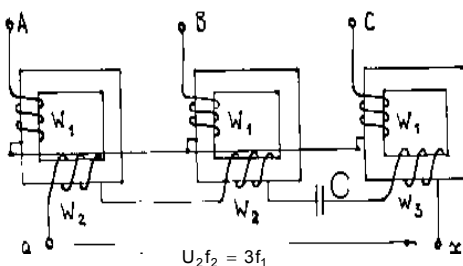


Рисунок III-8.4

потока наводит в обмотках каждой фазы э.д.с. тройной часты. Если поэтому обмотки всех трансформаторов соединить последовательно по схеме открытого треугольника, то на зажимах а-х будет действовать напряжение U_2 частоты $f_2 = 3f_1$; первая гармоническая в напряжении U_2 будет отсутствовать, так в трех фазах в сумме первая гармоническая равна нулю. Для компенсации падения в обмотках 2 при нагрузке следует включить в цепь обмоток соответственно рассчитанную емкость C .

8.3 Трансформаторы для питания дуговых электрических печей

Дуговые электрические печи потребляют однофазный или трехфазный переменный ток низкого напряжения. Поэтому они присоединяются к сети через понижающие трансформаторы с относительно низким номинальным вторичным напряжением 100 В. Мощность электропечных трансформаторов в ряде случаев достигает многих тысяч киловольт-ампер, поэтому их вторичный номинальный ток измеряется десятками, а иногда и сотнями тысяч ампер.

При таких токах вторичную обмотку приходится выполнять с большим числом параллельных цепей, имеющих малое число витков, иногда один или два. При концентрических обмотках первичная размещается внутри, а вторичная – снаружи для более удобного соединения параллельных цепей и присоединения к ним отводов. При дисковых чередующихся обмотках соблюдается строгая симметрия параллельных цепей при работе на всех ответвлениях первичной обмотки. В отличие от обычных силовых трансформаторов в трансформаторах для дуговых электропечей требуется регулировка вторичного напряжения в широких пределах, достигающих до $\pm 50\%$. Регулировка осуществляется как с первичной, так и со вторичной сторон. Регулировка осуществляется как с первичной, так и со вторичной стороны менее удобна из-за значительных вторичных токов; она осуществляется ступенями путем переключения отдельных групп витков с параллельного соединения на последовательное. Регулировка с первичной стороны выполняется обычным способом при помощи ряда ответвлений в сочетании с переключением на треугольник.

Отводы трансформатора для электропечей со вторичной стороны выполняются в виде массивных медных шин. Так как вторичная обмотка состоит из малого числа витков большого сечения, то активное и реактивное падение напряжения в отводах соизмеримы с падением напряжения в обмотке. Отводы и вводы печных трансформаторов располагаются, поэтому таким образом, чтобы их индуктивность была наименьшей. На рис. III-8.5 оказана транспозиция отводящих шин.

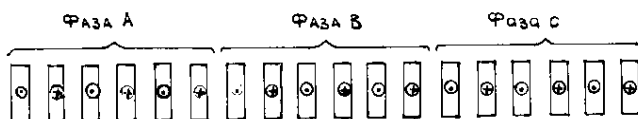


Рисунок III-8.5

Электропечные трансформаторы часто работают в тяжелых условиях резко меняющейся нагрузки, колеблющейся от холостого хода до короткого замыкания. Поэтому механические крепления обмоток в таком трансформаторе должны быть особенно надежны, чтобы противостоять значительным условиям, возникающим при возможных коротких замыканиях.

Для ограничения тока короткого замыкания иногда в первичную цепь включают дополнительную реактивную катушку.

8.4 Трансформаторы для дуговой электросварки

Для дуговой электросварки при помощи трансформатора осуществляют понижения напряжения сети до напряжения зажигания дуги, которое обычно лежит в пределах 40-70В. Характерным для сварочного трансформатора является прерывистый режим работы с резкими переходами от холостого хода к короткому замыканию и обратно.

Для устойчивого и непрерывного горения дуги требуется, во-первых, чтобы при колебаниях сопротивления внешней цепи ток изменялся незначительно, т.е. необходима круто падающая внешняя характеристика источника тока; во-вторых, необходима значительная индуктивность в сварочной цепи ($=0,4 \div 0,5$). Для этого трансформатор, питающий электросварочный аппарат,

должен обладать большим рассеянием. Большая индуктивность

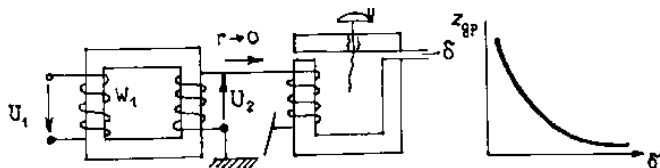


Рисунок III-8.6

сварочного трансформатора требуется и для ограничения тока короткого замыкания. Который не должен по возможности превосходить двукратного номинального значения. Поэтому индуктивное сопротивление цепи сварочного трансформатора приходится искусственно увеличивать.

По способу увеличения индуктивного сопротивления сварочные трансформаторы можно разделить на две группы:

1. Трансформаторы с увеличенным магнитным рассеянием. Сюда относятся трансформаторы с расположением обмоток на разных стержнях, с последовательным расположением обмоток вдоль стержня, с магнитными шунтами для увеличения полей рассеяния и др.

2. Трансформаторы с последовательно включенной реактивной катушкой. В сварочных трансформаторах обычно предусматривается возможность регулирования сварочного тока в соответствии с диаметром электрода. Наиболее простым способом регулирования является изменение коэффициента трансформации или числа витков в дополнительной реактивной

$$U_2 = E_2 = 4,44W_2f\Phi; \Phi = \frac{WI}{R_M}; z_{др} = \frac{U}{I} = \frac{4,44W^2}{R_M}; R_M = \frac{1}{\delta}$$

катушке. Применяется также регулирование при помощи изменений магнитного сопротивления отдельных частей магнитной системы трансформатора или дополнительной реактивной катушки.

8.5 Пик – трансформаторы

В электронной технике в ряде случаев, например при регулировании сетевого напряжения тиратронов, возникает потребность в получении периодического напряжения резко заостренной (пикообразной) формы. Для этой

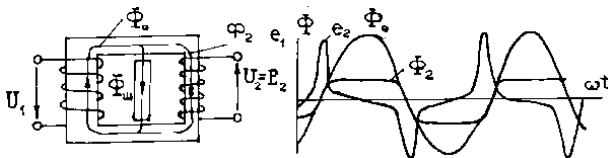


Рисунок III-8.7

цели используют трансформаторы специальной конструкции, получившие название “пик-трансформаторы”.

Вторичная обмотка располагается на относительно тонком стержне 2, параллельно которому устанавливается магнитный шунт с почти линейной характеристикой. При синусоидальном магнитном потоке $\Phi = \Phi_2 + \Phi_{ш}$ его составляющие Φ_2 и $\Phi_{ш}$ будут несинусоидальны, причем поток Φ_2 будет иметь из-за быстрого насыщения стержня 2 уплощенную форму, при которой э.д.с. обмотки 2 получит пикообразный характер.

Вторичная обмотка располагается на относительно тонком стержне 2, параллельно которому устанавливается магнитный шунт с почти линейной характеристикой. При синусоидальном магнитном потоке $\Phi = \Phi_2 + \Phi_{ш}$ его составляющие Φ_2 и $\Phi_{ш}$ будут несинусоидальны, причем поток Φ_2 будет иметь из-за быстрого насыщения стержня 2 уплощенную форму, при которой э.д.с. обмотки 2 получит пикообразный характер.

9. Регулирование напряжения обмоток трансформатора

9.1 Регулирование контактное с отключением

Стандартные трансформаторы малой и средней мощностей имеют первичной или вторичной обмотке пять ответвлений, из которых среднее соответствует номинальному напряжению, а два других – напряжениям, отличающимся от номинального на $\pm 2,5$ и $\pm 5\%$.

Трансформаторы большой мощности имеют обычно большее число ответвлений с возможностью регулирования напряжения относительно номинального в установленных пределах. При

необходимости широкого регулирования напряжения применяют обмотки с большим числом ответвлений.

При конструировании трансформаторов всегда стремятся к тому, чтобы линейные нагрузки были равномерно распределены вдоль первичной и вторичной обмоток и взаимно магнитно уравновешены (рис. III-9.1).

Отключение части витков нарушает равномерность магнитного поля рассеяния. У вектора индукции B магнитного поля появляется поперечная (радиальная)

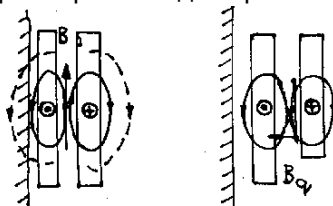


Рисунок III-9.1

составляющая B_q , которая

взаимодействуя с током обмоток, создает электромагнитные силы, стремящиеся сдвинуть витки обмотки в осевом направлении.

Эти силы наносят опасными при коротком замыкании и могут привести к разрушению обмоток.

В обмотках других конструкций ответвления размещают в средней части обмотки в одном или двух местах. Иногда в трехфазных трансформаторах для применения более простого и дешевого переключения применяют "оборотную схему", позволяющую разместить ответвления у нулевой точки и в то же время в средней части обмотки. Из-

менение числа витков обмотки осуществляется обычно при помощи контактного переключателя. В простейшем случае он имеет систему неподвижных контактов, соединенных с ответвлениями

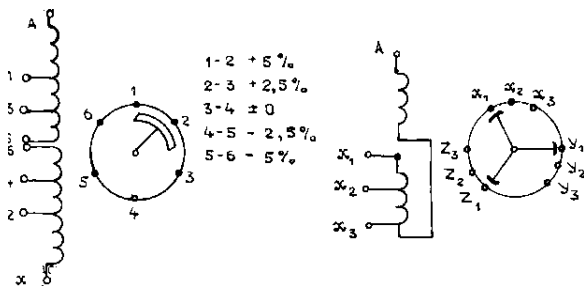


Рисунок III-9.2

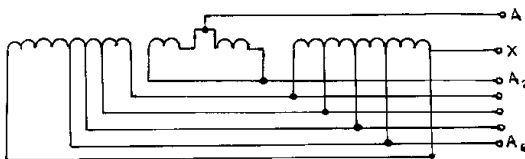


Рисунок III-9.3

менение числа витков обмотки осуществляется обычно при помощи контактного переключателя. В простейшем случае он имеет систему неподвижных контактов, соединенных с ответвлениями

обмотки, и систему движущихся контактов, замыкающих разные пары неподвижных контактов. Привод переключателя осуществляется при помощи рукоятки, устанавливаемой на крышке или стенке бака трансформатора. Переключение производят только после отключения трансформатора от первичной и вторичной сетей во избежание возможного короткого замыкания отдельных частей обмотки и разрыва цепи под током в процессе переключения.

9.2 Регулирование контактное без отключения

Широкое распространение получило также переключение ответвлений под нагрузкой без разрыва цепи тока трансформатора при помощи переключателей более сложных конструкций.

На рис. III-9.4 показана схема переключения под нагрузкой с применением токоограничивающего реактора. Позиция 1 соответствует рабочему положению переключающего устройства

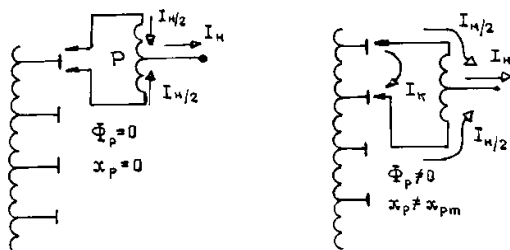


Рисунок III-9.4

на ответвлении X_3 . В переключающем устройстве, состоящем из реактора P , двух выключателей B_1 и B_2 и двух переключателей Π_1 и Π_2 , для рабочего тока имеются две параллельные цепи. В рабочем положении ток, протекая по параллельным цепям реактора в противоположных направлениях, не намагничивает его, и потому индуктивное сопротивление реактора близко к нулю.

В промежуточном положении в цепи переключающего устройства и обмотки между ответвлениями X_3 и X_4 не возникает большого тока, так как последний ограничивается индуктивным сопротивлением реактора.

Переключатели Π_1 и Π_2 и реактор P размещаются в масляном баке трансформатора. Выключатели B_1 и B_2 во избежание загрязнения масла располагаются в специальном баке, мон-

тируемом на боковой стенке основного бака, трансформатора. Управление переключателем автоматизируется.

На рис. III-9.5. показана схема переключения под нагрузкой с применением токоограничивающих активных сопротивлений.

Положение переключателей П, П₁ и П₂, изображенное на этом рисунке, соответствует работе трансформатора на ответвлении X₂. Для перехода на соседнее ление, например X₃,

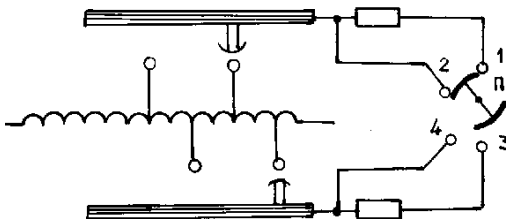


Рисунок III-9.5

переключатель П поворачивают (по часовой стрелке), и он последовательно размыкает контакт 12 и соединяет контакты 3 и 4, становясь в положение, симметричное тому; которое показано на рис. III-9.2. Весь процесс переключения автоматизирован и происходит в течение сотых долей секунды. Быстродействующий переключатель П совместно с токоограничивающими сопротивлениями монтируется в специальном масляном баке или на вводных изоляторах трансформатора.

9.3 Трансформаторы с плавным регулированием напряжения

В ряде случаев возникает потребность в плавном регулировании вторичного напряжения трансформатора под нагрузкой (без отключений трансформатора в процессе регулирования).

Эта проблема до настоящего времени не получила своего полного практического разрешения. Одним из возможных решений задачи является применение скользящих по поверхности обмотки контактов. В этом случае витки обмотки штампуются из листовой меди и при укладке на стержень изолируются друг от друга ками из пресованного картона. По неизолированной внешней поверхности обмотки передвигается специальная система контактных щеток, позволяющая осуществлять соединение отдельных витков с выводным концом обмотки. Токи,

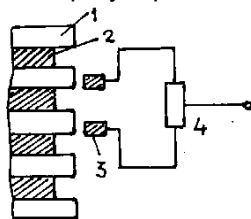


Рисунок III-9.6

возникающие при замыкании витков движущимися контактами, ограничиваются сопротивлениями, включенными между щетками.

Регулирование напряжения происходит небольшими ступенями примерно до 1 В соответственно напряжению витка. Вдоль обмотки может одновременно передвигаться ряд контактов, раздельно регулирующих напряжение в нескольких цепях (U_2 , U_3 и т.д.).

По такой схеме стоят сухие однофазные и трехфазные трансформаторы для освещения театральные сцены и других установок при мощностях до 250 кВА и регулирование напряжения в пределах от 0 до 220/380 В. Недостатком таких трансформаторов является сравнительно сложная и громоздкая конструкция подвижных щеточных контактов.

9.4 Бесконтактное регулирование

I. Трансформатор имеет броневую конструкцию; средний его стержень, несущий вторичную обмотку 2, допускает плавное осевое перемещение, так что обмотка 2 может передвигаться относительно первичной обмотки I из положения α в положение β и γ . При этом вторичное напряжение будет изменяться от значения $+U_2$ до значения $-U_2$. Недостатком такого трансформатора является сложность конструкции, связанная с наличием подвижного стержня.

II. На замкнутой магнитной системе располагаются две системы обмоток α и β и короткозамкнутая обмотка К, которую можно перемещать в осевом направлении вдоль стержня сердечника поверх обмоток.

Первичные и вторичные витки обмоток α и β соединяются последовательно и встречено, как показано на рис. III-9.7. Поэтому все устройство можно рассматривать как два отдельных трансформатора, с разомкнутыми магнитными

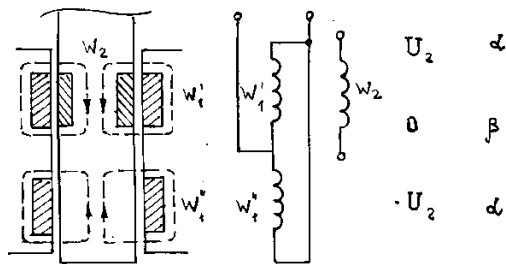


Рисунок III-9.7

ми системами. Коэффициенты трансформации $k_{\alpha 12} = \frac{W_{1\alpha}}{W_{2\alpha}}$;

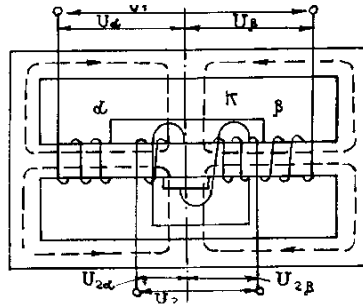
$k_{\beta 12} = \frac{W_{1\beta}}{W_{2\beta}}$ необходимо

рвать разными.

При центральном, симметричном в магнитном отношении, положении катушки k индуктированная с ней э.д.с. равна нулю и катушка не оказывает влияния на распределение первичного напряжения U и вторичного U_2 между обмотками α и β :

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_{1\alpha} + \dot{U}_{1\beta} \text{ и}$$

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_{2\alpha} + \dot{U}_{2\beta} \approx -(U_{1\alpha} k_{\alpha 21} + U_{1\beta} k_{\beta 21}). \quad \text{Рисунок III-9.8}$$



Допустим, что при холостом ходе соотношение параметров обмоток таково, что $\dot{U}_{1\beta} = \xi U_{1\alpha}$. Если катушку K передвигать в направлении обмотки α или β , то в ней возникает ток и это приведет к изменениям отношения ξ . Так как $\dot{U}_1 = \dot{U}_{1\alpha}(1 + \xi)$, то

$$-\dot{U}_2 \approx U_1 \frac{k_{\alpha 21} + \xi k_{\beta 21}}{1 + \xi}.$$

Это равенство показывает, что при $k_{\alpha 21} \neq k_{\beta 21}$ изменение отношения ξ при передвижении катушки K будет вызывать плавное изменение вторичного напряжения.

Подобная система регулирования напряжения была применена для питания ламп накаливания, установленных в рубиновых звездах московского Кремля.

10. Измерительные трансформаторы

Измерительные трансформаторы широко применяются в установках переменного тока:

- 1) для отделения цепей измерительных приборов (или реле) от сети высокого напряжения для безопасности пользования приборами и упрощения изоляции их токоведущих частей и

2) для преобразования тока или напряжения в значения, более удобные для измерения их стандартными приборами (амперметрами до 5А и вольтметрами до 150В).

Измерительные трансформаторы изготавливают мощностью от 5 до нескольких сот вольт ампер. Столь небольшие номинальные мощности измерительных трансформаторов и требования малых погрешностей при преобразовании токов и напряжений предъявляют особые требования к расчету и конструкции измерительных трансформаторов.

10.1 Трансформаторы тока

При измерении тока первичную обмотку однофазного трансформатора включают последовательно в измеряемую цепь, а вторичную замыкают на измерительные или релейные устройства с относительно малым сопротивлением. Первичный и вторичный токи связаны равенством

$$\dot{i}'_2 = -i_1 \frac{z_0}{z_0 + z'_2 + z'}, \quad (10.1)$$

где $z' = z \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^2$ - полное приведенное сопротивление нагрузки,

т.е. в случае трансформации тока - сопротивление прибора или аппарата, подключаемого ко вторичной обмотке. Равенство 10.1 показывает, что сдвиг по фазе измеряемого тока \dot{i}'_1 и регистрируемого во вторичной обмотке тока будет ближе к 180° (или к 0°) и отношение их амплитуд будет тем ближе к обратному отношению чисел витков обмоток ($I_2 = I_1 \frac{W_1}{W_2}$), чем меньше модуль сум-

мы сопротивлений по сравнению с сопротивлением z_0 . Поэтому в трансформаторах тока всегда стремятся к малым значениям сопротивлений z'_2 и z' .

По допускаемым значениям погрешностей различают пять классов точности трансформаторов тока: 0,2; 0,5; 1; 3 и 10. Эти цифры указывают на допускаемую для данного класса токовую погрешность в процентах при номинальном первичном токе.

Трансформаторы тока класса 0,2 применяют при точных лабораторных измерениях, классов 0,5 и 1 - для технических измерений. Для включения счетчиков используют трансформаторы класса 0,5. Для включения релейной аппаратуры применяют

обычно трансформаторы классов 1 и 3 в зависимости от особенностей релейной схемы.

Первичные номинальные токи трансформаторов тока стандартизованы в пределах 1-40000А. Вторичные номинальные токи имеют четыре стандартных значения: 1; 2; 2,5 и 5А. Сопротивления нагрузки, включаемой во вторичную цепь, колеблются в пределах 0,2-2Ом при номинальном токе 5А и 5-30Ом- при номинальном токе 1А.

Трансформаторы тока должны выдерживать (без чрезмерного перегрева обмоток и их механических деформаций) кратковременные аварийные повышения первичного тока, возможные в условиях эксплуатации.

По способу выполнения первичной обмотки различают трансформаторы тока:

- 1) многовитковые (первичная обмотка имеет два или более витков);
- 2) одновитковые (первичная обмотка представляет собой стержень или трубу, через которую проходит виток);
- 3) шинные (первичной обмоткой является шина распределительного устройства).

По роду изоляции трансформаторы тока подразделяют на:

- 1) сухие с воздушной фарфоровой или другой твердой изоляцией;
- 2) масляные;
- 3) заполненные масляной массой.

10.2 Трансформаторы напряжения

При измерениях напряжения в высоковольтных сетях и питании цепей напряжения релейной аппаратуры применяют понижающие однофазные и трехфазные трансформаторы напряжения. Сопротивление нагрузки таких трансформаторов обычно значительно превосходит

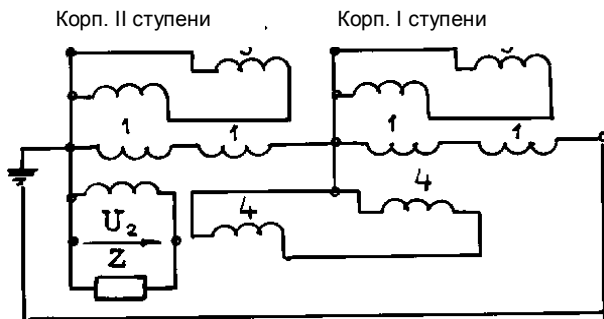


Рисунок III-10.1

их сопротивление короткого замыкания, так что трансформаторы напряжения работают в режиме, близком к холостому ходу.

В трансформаторе первичное и приведенное вторичное напряжения связаны между собой равенством

$$\dot{U}'_2 = -\dot{U}_1 \frac{z'}{z_1 + c_1 z'_2 + c_1 z'}$$

где $c_1 = 1 + \frac{z_1}{z_0}$.

Последнее равенство показывает, что в трансформаторе напряжения отношение напряжений U_1/U_2 будет тем ближе к отношению чисел витков W_1/W_2 и сдвиг по фазе векторов \dot{U}_1 и $-\dot{U}'_2$ тем ближе к нулю, чем ближе отношение $\frac{z'}{z_1 + c_1 z'_2 + c_1 z'}$ к единице. Поэтому для снижения погрешностей измерений стремятся иметь малое сопротивление $z_1 + c_1 z'_2$ обмотки и величину c_1 , близкую к единице.

ГОСТ устанавливает максимальную мощность, на которую трансформатор напряжения может быть длительно нагружен по условиям нагрева, независимо от точности его показаний; эта мощность в 8 раз превышает мощность класса 0.5 и колеблется в пределах 200:2000ВА. Трансформаторы напряжения выполняют с одной или двумя вторичными обмотками при номинальном первичном напряжении от 380 до $500000/\sqrt{3}$. В трехфазных схемах применяется группа 0; при наличии вспомогательной вторичной обмотки последнюю включают по схеме открытого треугольника, на зажимах которого действуют напряжение нулевой последовательности, используемой в схемах релейной защиты. В зависимости от первичного напряжения трансформаторы изготавливаются сухими с воздушной или фарфоровой изоляцией, с заполнением обмоток заливочной массой или с масляной изоляцией.

При напряжениях 220кВ и выше в ряде случаев применяют каскадные трансформаторы напряжения. В каскадной схеме основными являются обмотки 1 и 2. Обмотка 4 возбуждения осуществляет электромагнитную связь между ступенями каскада. Уравнительные обмотки 3 служат для снижения магнитного рассеяния, поскольку обмотки 1 и 4 и 1 и 2 размещены частично на разных стержнях.

При каскадной схеме облегчается изоляция обмоток относительно магнитной системы и корпуса, так как магнитная система и корпус первой ступени сами находятся под напряжением $U_2/2$.

11. Несимметричные режимы работы трехфазных трансформаторов

При неравенстве токов в фазных обмотках трансформатора в нем возникает ряд добавочных явлений, обычно отрицательно влияющих на работу трансформатора: искажение линейных и фазных напряжений, добавочные потери в стали и в обмотках, значительные местные превышения температуры и т.д.

11.1 Метод симметричных составляющих

Основным методом анализа несимметричных режимов работы электрических машин и трансформаторов является метод симметричных составляющих.

Как известно, любую несимметричную трехфазную систему можно в общем случае разложить на три симметричные системы: с прямой, обратной и нулевой последовательностью фаз, или для краткости, прямую, обратную и нулевую.

При обычно принятом направлении вращения векторов против часовой стрелки прямая система токов образует симметричную звезду векторов $I_{A1}|I_{B1}|I_{C1}$, следующих друг за другом в порядке следования соответствующих букв алфавита.

Соответственно обратная связь токов образует другую симметричную

звезду векторов, следующих друг за другом в порядке $I_{A2}|I_{B2}|I_{C2}$, обратном порядку следования букв алфавита.

Нулевая система токов

представляет собой три вектора токов $I_{A0}|I_{B0}|I_{C0}$, равных по величине и совпадающих по фазе.

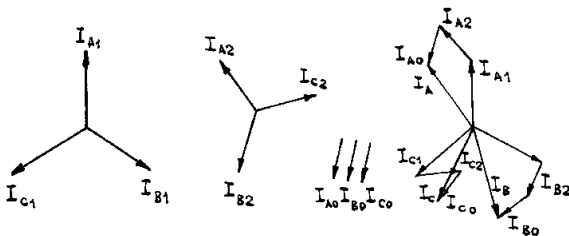


Рисунок III-11.1

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{A0}; \quad (11.1a)$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{B2} + \dot{I}_{B0} \quad (11.16)$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{C1} + \dot{I}_{C2} + \dot{I}_{C0} \quad (11.1v)$$

Примем вектор тока I_{A1} за исходный. Тогда векторы токов I_{B1} и I_{C1} можно записать в виде:

$$\dot{I}_{B1} = a^2 \dot{I}_{A1} \quad \text{и} \quad \dot{I}_{C1} = a \dot{I}_{A1} \quad (11.2)$$

здесь a - так называемый **оператор поворота**, т.е. множитель, показывающий, что данный вектор нужно повернуть относительно исходного на угол $120^\circ = 2\pi/3$ по направлению вращения векторов. Подставляя эти значения токов в уравнения (11.1a), (11.16) и (11.1v) и решая их относительно токов I_{A1} , I_{A2} и I_{A0} , получаем:

$$\dot{I}_{A1} = 1/3(\dot{I}_A + a\dot{I}_B + a^2\dot{I}_C); \quad (11.3a)$$

$$\dot{I}_{A2} = 1/3(\dot{I}_A + a^2\dot{I}_B + a\dot{I}_C); \quad (11.36)$$

$$\dot{I}_{A0} = 1/3(\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C). \quad (11.3v)$$

11.2 Несимметричная нагрузка при отсутствии тока нулевой последовательности

При отсутствии во вторичных линейных и фазных токах трансформатора составляющих нулевой последовательности справедливы равенства

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0 \quad (11.4)$$

и

$$\dot{I}_{A\phi} + \dot{I}_{B\phi} + \dot{I}_{C\phi} = 0. \quad (11.5)$$

Если вторичная обмотка соединена звездой, то фазные токи будут равны линейным:

$$I_{A\phi} = I_A; I_{B\phi} = I_B; I_{C\phi} = I_C.$$

При соединении вторичной обмотки в треугольник

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{A\phi} - \dot{I}_{B\phi}; \dot{I}_B = \dot{I}_{B\phi} - \dot{I}_{C\phi}; \dot{I}_C = \dot{I}_{C\phi} - \dot{I}_{A\phi} \quad (11.6)$$

Решая совместно уравнения получаем:

$$I_{A\phi} = 1/3(I_A - I_C); I_{B\phi} = 1/3(I_B - I_A); I_{C\phi} = 1/3(I_C - I_B). \quad (11.7)$$

На рис. III-11.2. показана векторная диаграмма линейных и фазных токов. Из этой диаграммы следует, что при соединении обмоток в треугольник центр звезды фазных токов совпадает с центром тяжести треугольника линейных токов.

Первичные фазные токи определяют из условия равновесия первичных и вторичных н.с.:

$$I_{A\Phi} = -I_{a\Phi}; \quad I_{B\Phi} = -I_{b\Phi}; \quad I_{C\Phi} = -I_{c\Phi};$$

следовательно,

$$I_{a\Phi} + I_{b\Phi} + I_{c\Phi} = 0 \quad (11.8)$$

Если первичная обмотка соединена в звезду, то фазные токи равны линейным. При соединении первичной обмотки в треугольник

$$\begin{aligned} I_A &= I_{A\Phi} - I_{B\Phi}; \\ I_B &= I_{B\Phi} - I_{C\Phi}; \\ I_C &= I_{C\Phi} - I_{A\Phi}. \end{aligned} \quad (11.9)$$

Учитывая равенство (11.7) получаем:

$$\begin{aligned} I_{A\Phi} &= 1/3(I_A - I_C); \\ I_{B\Phi} &= 1/3(I_B - I_A); \\ I_{C\Phi} &= 1/3(I_C - I_B). \end{aligned} \quad (11.10)$$

Поэтому можно утверждать, что при соединении первичной обмотки в треугольник центр звезды фазных первичных токов совпадает в центром тяжести треугольника линейных токов независимо от того, соединена ли вторичная обмотка звездой или треугольником.

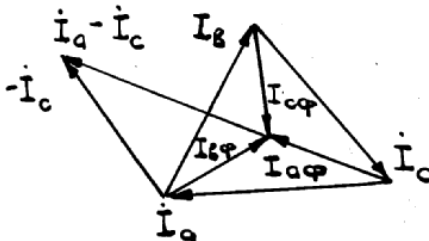


Рисунок III-11.2

Аналогичные соотношения можно установить между фазными и линейными первичными и вторичными напряжениями трансформаторов.

Фазные первичные и вторичные напряжения при наличии магнитного равновесия токов в каждой фазе связаны равенством

$$\begin{aligned} \dot{U}_A - I_{A\Phi} Z_k &= -\dot{U}_a; \\ \dot{U}_B - I_{B\Phi} Z_k &= -\dot{U}_b; \\ \dot{U}_C - I_{C\Phi} Z_k &= -\dot{U}_c. \end{aligned} \quad (11.11)$$

Если одна из обмоток соединена в треугольник, то сумма фазных напряжений в ней равна нулю; поэтому можно утверждать, что и в другой обмотке независимо от того, соединена ли она в треугольник или звезду, сумма фазных напряжений равна нулю:

$$\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 0; \quad (11.12)$$

$$\dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}_c = 0. \quad (11.13)$$

В обмотке, соединенной в звезду, линейные и фазные напряжения связаны равенствами допустим, что в звезду соединена, как это обычно бывает, обмотка высшего напряжения):

$$\begin{aligned} \dot{U}_{AB} &= \dot{U}_A - \dot{U}_B; \\ \dot{U}_{BC} &= \dot{U}_B - \dot{U}_C; \end{aligned} \quad (11.14)$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A.$$

Из этих равенств и уравнения (11.11) находим фазные напряжения:

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= 1/3(\dot{U}_{AB} - \dot{U}_{CA}); \\ \dot{U}_B &= 1/3(\dot{U}_{BC} - \dot{U}_{AB}); \\ \dot{U}_C &= 1/3(\dot{U}_{CA} - \dot{U}_{BC}). \end{aligned} \quad (11.15)$$

Следовательно, при наличии одной из обмоток, соединенной в треугольник, центр звезды фазных напряжений другой обмотки, соединенной в звезду, совпадает с центром тяжести треугольника линейных напряжений.

Остается выяснить, как связаны между собой линейные и фазные напряжения при соединении обмоток по схеме звезда-звезда. Допустим, что первичной обмоткой является обмотка высшего напряжения: тогда для нее можно написать следующие уравнения:

$$\begin{aligned} \dot{U}_A - \dot{I}_A z_1 &= -\dot{E}_A; \\ \dot{U}_B - \dot{I}_B z_1 &= -\dot{E}_B; \\ \dot{U}_C - \dot{I}_C z_1 &= -\dot{E}_C. \end{aligned} \quad (11.16)$$

где \dot{E}_A, \dot{E}_B и \dot{E}_C - э.д.с. соответствующих фаз. Соединение обмоток по схеме у/у применяется только в трехстержневых трансформаторах, в которых $\dot{\Phi}_A + \dot{\Phi}_B + \dot{\Phi}_C \approx 0$ и, следовательно, $\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0$.

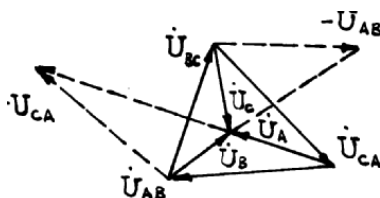


Рисунок III-11.3

Поэтому для схем соединений у/у также справедливы равенства (11.11), (11.12) и (11.13).

Таким образом следует прийти к заключению, что при отсутствии составляющей нулевой последовательности в первичных и вторичных токах трансформатор (это всегда имеет место при соединении обмоток по схемам Y/Y , Y/Δ , Δ/Y и Δ/Δ) каждую фазу трансформатора при несимметричных нагрузках можно рассматривать независимо как однофазный трансформатор. Если при этом первичная обмотка соединена в звезду, то первичное напряжение каждой фазы определяется из равенств (11.15). Если нагрузка трансформатора задана вторичными линейными токами и вторичная обмотка соединена треугольником, то фазные токи нагрузки определяются из равенства (11.6).

Следует заметить, что исследование трансформатора при несимметричной нагрузке практически приходится проводить различными приемами в зависимости от того, какие величины заданы и какие требуется определить. Однако во всех случаях необходимо бывает пользоваться основными соотношениями, которые были установлены выше.

11.3 Несимметричная нагрузка при наличии тока нулевой последовательности

Если вторичная обмотка трансформатора соединена в звезду (или зигзаг-звезду), нулевая точка которой присоединена к нейтральному (нулевому) проводу или заземлена, то при несимметричной нагрузке возможны случаи, когда

$$\dot{i}_a + \dot{i}_b + \dot{i}_c = \dot{i}_d, \quad (11.17)$$

где \dot{i}_d - ток нулевого провода.

Если $\dot{i}_d \neq 0$, то трехфазную систему токов \dot{i}_a , \dot{i}_b и \dot{i}_c можно, как известно, разложить на составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей. Составляющие прямой и обратной последовательностей можно рассматривать совместно:

$$\begin{aligned} \dot{i}_a &= \dot{i}'_a + \dot{i}_{a0}; \\ \dot{i}_b &= \dot{i}'_b + \dot{i}_{b0}; \\ \dot{i}_c &= \dot{i}'_c + \dot{i}_{c0}, \end{aligned} \quad (11.18)$$

где \dot{i}'_a , \dot{i}'_b , \dot{i}'_c - сумма токов прямой и обратной последовательностей соответствующих фаз; $\dot{i}_{a0} = \dot{i}_{b0} = \dot{i}_{c0} = 1/3\dot{i}_d$ - токи нулевой последовательности.

Так как $i'_a + i'_b + i'_c$, вторичным токам i'_a , i'_b , i'_c в первичной обмотке ($k=1$) будут соответствовать магнитно уравнивающие их токи $-i'_A - i'_B - i'_C$.

Токи нулевой последовательности i_{a0} , i_{b0} , i_{c0} могут быть магнитно уравниваны с первичной стороны только в том случае, если в первичной обмотке возможно протекание токов нулевой последовательности, т.е. если она соединена в звезду с нулевым проводом или треугольник. В этих случаях в фазах первичной обмотки возникнут токи i_{A0} , i_{B0} , i_{C0} и результирующие токи в фазах будут равны:

$$\begin{aligned} i_{A\Phi} &= -(i'_A + i_{A0}) = -i_a; \\ i_{B\Phi} &= -(i'_B + i_{B0}) = -i_b; \\ i_{C\Phi} &= -(i'_C + i_{C0}) = -i_c. \end{aligned} \quad (11.19)$$

При соединении первичной обмотки в звезду с нулевым проводом линейные токи будут равны фазным: $i_A = i_{A\Phi}$; $i_B = i_{B\Phi}$; $i_C = i_{C\Phi}$, а ток в нулевом проводе $i_D = -i_d$.

При соединении первичной обмотки в треугольник линейные токи будут связаны с фазными токами равенствами (11.8).

Если первичная обмотка соединена в звезду без нулевого провода, т.е. трансформатор соединен по схеме y/y_0 , то по первичной обмотке токи нулевой последовательности протекать не могут. В этом случае первичные фазные и линейные токи будут равны:

$$i_{A\Phi} = i_A = -i'_a; \quad i_{B\Phi} = i_B = -i'_b; \quad i_{C\Phi} = i_C = -i'_c.$$

Токи нулевой последовательности, протекая только по вторичной обмотке, будут создавать магнитное поле, которое наведет в фазах первичной и вторичной обмоток значительные э.д.с. нулевой последовательности. Токи нулевой последовательности во всех обмотках совпадают по фазе, поэтому создаваемое ими поле нулевой последовательности будет однофазным и его индукционные линии, проходя по

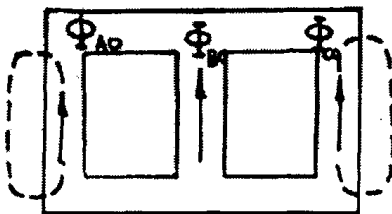


Рисунок III-11.4

будет однофазным и его индукционные линии, проходя по

стержням, будут замыкаться между ярмами вне магнитной системы трансформатора.

При наличии в обмотках трансформатора токов нулевой последовательности справедлива система уравнений

$$\begin{aligned}\dot{U}_A - \dot{I}_{A\Phi} z_1 &= -\dot{E}_A - \dot{E}_0; \\ \dot{U}_B - \dot{I}_{B\Phi} z_1 &= -\dot{E}_B - \dot{E}_0; \\ \dot{U}_C - \dot{I}_{C\Phi} z_1 &= -\dot{E}_C - \dot{E}_0,\end{aligned}\quad (11.20)$$

где \dot{E}_A , \dot{E}_B и \dot{E}_C - э.д.с., наводимые основным трехфазным магнитным полем; \dot{E}_0 - э.д.с., наводимые полем нулевой последовательности.

Если трансформатор соединен по схеме Y/Y_0 , то в уравнениях 11.20

$$\dot{I}_{A\Phi} + \dot{I}_{B\Phi} + \dot{I}_{C\Phi} = 0$$

и

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

и, следовательно,

$$\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = -3\dot{E}_0 = 3\dot{I}_0 z_{00}, \quad (11.21)$$

где $z_{00} = -\frac{E_0}{I_0}$ - полное сопротивление взаимной индукции нулевой последовательности.

Из уравнений 11.13. и 11.20. можно найти фазные напряжения первичной обмотки:

$$\begin{aligned}\dot{U}_A &= \dot{U}'_A + \dot{I}_0 z_{00}; \\ \dot{U}_B &= \dot{U}'_B + \dot{I}_0 z_{00}; \\ \dot{U}_C &= \dot{U}'_C + \dot{I}_0 z_{00}.\end{aligned}\quad (11.22)$$

На рис. III-11.5 показана векторная диаграмма линейных и фазных напряжений, соответствующих уравнениям. Из диаграммы видно, что в данном случае центр звезды фазных напряжений сдвинут относительно центра тяжести треугольника линейных напряжений.

Вычитая из найденных по формуле 11.22 первичных напряжений падения напряжения в обмотках, по-

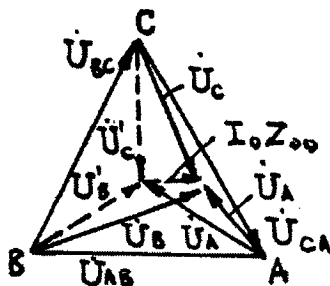


Рисунок III-11.5

лучим значения вторичных фазных напряжений:

$$\begin{aligned} -\dot{U}_a &= \dot{U}_A - \dot{I}_A z_k + \dot{I}_0 z_2; \\ -\dot{U}_b &= \dot{U}_B - \dot{I}_B z_k + \dot{I}_0 z_2; \\ -\dot{U}_c &= \dot{U}_C - \dot{I}_C z_k + \dot{I}_0 z_2. \end{aligned} \quad (11.23)$$

Если трансформатор соединен по схеме Δ/Y_0 , то токи нулевой последовательности свободно протекают по первичным и вторичным обмоткам, поэтому расчет вторичных фазных напряжений можно производить по формуле 11.10. В этом случае векторы вторичных фазных напряжений не образуют замкнутого треугольника, так как согласно равенствам 11.19 $\dot{I}_{A\Phi} + \dot{I}_{B\Phi} + \dot{I}_{C\Phi} = -\dot{I}_d$ и следовательно, $\dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}_c = -\dot{I}_d z_k$, т.е. центр звезды вторичных фазных напряжений сдвинут относительно центра тяжести треугольника линейных напряжений на $-1/3 \dot{I}_d z_k = -\dot{I}_0 z_k$.

11.4 Работа трансформатора при отключении одной фазы

При работе трехфазной группы с соединением обмоток по схеме Y/Δ в случае повреждения одной фазы возможна временная передача энергии двумя фазами. Допустим, что фаза А вышла из строя: тогда до замены ее резервной или до окончания ремонта поврежденной фазы возможен несимметричный (неполно фазный) режим работы трехфазной группы. Допустим, что трансформатор

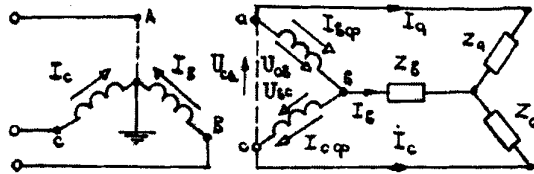


Рисунок III-11.6

работает в качестве понижающего. Тогда при глухом заземлении нейтрали первичные напряжения U_B и U_C будут равны и сдвинуты между собой на угол 120° и, следовательно, при холостом ходе векторы вторичных линейных напряжений U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} будут образовывать замкнутый равносторонний треугольник. Предположим, что вторичная система линейных токов I_a , I_b и I_c задана характером нагрузки. Тогда, как видно из рисунка III-11.6,

$I_{\text{вФ}} = -I_a$; $I_{\text{сФ}} = -I_c$; $I_{\text{вФ}} - I_{\text{сФ}} = I_B$. При $k=1$ из условия магнитного равновесия следует:

$$I_B = -I_{\text{вФ}} = I_a; I_{\text{сФ}} = -I_{\text{сФ}} = -I_c,$$

и ток в нулевом проводе $I_D = I_B + I_C = I_a - I_c$.

Вторичные и первичные напряжения будут при этом связаны обычными соотношениями: $-\dot{U}_B = -\dot{U}_{\text{ав}} = \dot{U}_B - i_B z_k$;

и $-\dot{U}_C = -\dot{U}_{\text{вс}} = \dot{U}_C - i_C z_k$.

Неполнофазный режим возможен также при повышении напряжения двумя однофазными трансформаторами при соединении их обмоток по схеме двухлучевая глухозаземленная звезда - разомкнутый треугольник, а также при применении трехфазного трансформатора, у которого с одного из стержней снята для ремонта обмотка.

12. Переходные процессы в трансформаторах

12.1 Общая характеристика переходных процессов

Переходные процессы возникают в трансформаторах при всяком изменении режима их работы: присоединение трансформатора к сети, резкое изменение нагрузки, короткое замыкание в первичной или вторичной сети, волновые процессы в линии, питающей трансформатор, и в ряде аналогичных случаев.

При переходных процессах в обмотках трансформатора возникают дополнительные электромагнитные явления, требующие специального рассмотрения, так как их необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации трансформатора.

12.2 Включение трансформатора

Рассмотрим случай включения однофазного трансформатора вхолостую, когда вторичная обмотка его разомкнута.

Ток холостого хода трансформатора в установившемся режиме обычно невелик, не превосходит нескольких процентов номинального и только в трансформаторах небольшой мощности он достигает 10% и более.

Однако при включении трансформатора вхолостую может иметь место кратковременный переходный процесс, при котором намагничивающий ток в первичной обмотке резко возрастает, превышая в некоторых случаях номинальное значение тока этой обмотки.

При исследовании процесса включения и определения тока будем исходить из закона равновесия э. д. с. (рис. III-12.1).

$$u_1 = i_1 r_1 + W_1 \frac{d\Phi}{dt}. \quad (12.0)$$

Это уравнение является нелинейным. Решая его приближенно, исключим ток i_1 , сделав предположение, что между намагничивающим током и магнитным потоком существует линейная зависимость, а именно

$$i_1 = \frac{W_1 \Phi}{L_{II}}, \quad (12.1)$$

где L_{II} - индуктивность первичной обмотки трансформатора. Эта индуктивность не является постоянной, она меняется, постепенно возрастая до значения, которое она имеет при установившемся процессе. В дальнейшем для упрощения решения задачи в первом приближении будем считать эту индуктивность постоянной.

Подставляя (12.0) в (12.1) и полагая приложение напряжения синусоидальным, получаем:

$$\frac{r_1}{L_{II}} \Phi + \frac{d\Phi}{dt} = \frac{u_1}{W_1} = \frac{U_{1m}}{W_1} \sin(\omega t + \psi), \quad (12.2)$$

где ψ - фазный угол, определяющий мгновенное значение синусоидального напряжения в момент включения трансформатора.

Решение уравнения может быть представлено в виде двух слагаемых:

$$\Phi = \Phi' + \Phi'', \quad (12.3)$$

где Φ' - мгновенное значение установившегося потока;

Φ'' - мгновенное значение переходного или свободного потока.

Установившийся поток

$$\Phi' = \Phi_m \sin(\omega t + \psi - \frac{\pi}{2}) = -\Phi_m \cos(\omega t + \psi) \quad (12.4)$$

Значение переходного потока определяется из уравнения

$$\Phi'' = C e^{-\frac{r_1 t}{L_{II}}}. \quad (12.5)$$

Частный интеграл этого уравнения

$$.$$

(12.6)

Постоянная интегрированная C определяется из начальных условий.

В момент включения магнитный поток Φ равен нулю или остаточному потоку, который может иметь любой знак в зависимости от направления остаточного поля, поэтому в общем случае при $t=0$ должно существовать условие

$$\Phi' + \Phi'' = -\Phi_m \cos \psi + C = \pm \Phi_{\text{ост.}} \quad (12.7)$$

откуда $C = \Phi_m \cos \psi \pm \Phi_{\text{ост.}}$

и согласно (12.6)

$$\Phi'' = (\Phi_m \cos \psi \pm \Phi_{\text{ост.}}) e^{-\frac{r_1}{L_{II}} t}, \quad (12.8)$$

Подставляя 12.4 и 12.8 в 12.3 получаем:

$$\Phi = \Phi_m \left[\cos \psi \cdot e^{-\frac{r_1}{L_{II}} t} - \cos(\omega t + \psi) \right] \pm \Phi_{\text{ост.}} e^{-\frac{r_1}{L_{II}} t} \quad (12.9)$$

Наиболее благоприятные условия включения будут при $\psi = \frac{\pi}{2}$ и $\Phi_{\text{ост.}} = 0$. В этом случае

$$\Phi = -\Phi_m \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = \Phi_m \sin \omega t. \quad (12.10)$$

т.е. с первого момента устанавливается нормальный магнитный поток и переходного процесса практически не возникает.

Наиболее резко переходный процесс выявляется, если включение происходит в момент, когда $\psi = 0$ и поток $\Phi_{\text{ост.}}$ противоположен по знаку потоку Φ . В этом случае

$$\Phi = \Phi_m \left(e^{-\frac{r_1}{L_I} t} - \cos \omega t \right) + \Phi_{\text{ост.}} e^{-\frac{r_1}{L_I} t}. \quad (12.11)$$

Поток Φ достигает максимального значения приблизительно через полпериода после включения, т.е. при $\omega t \approx \pi$. В этот момент поток

$$\Phi_{\text{max}} = \Phi_m \left(1 + e^{-\frac{r_1}{\omega L} \pi} \right) + \Phi_{\text{ост.}} e^{-\frac{r_1}{\omega L} \pi} \quad (12.12)$$

Обычно $r_1 \ll \omega L_{II}$ и в первом приближении можно считать,

что значение $e^{-\frac{r_1}{\omega L} \pi}$ будет мало отличаться от единицы, особенно в больших трансформаторах.

Остаточный же поток может быть весьма значительным и достигать в отдельных случаях половинного значения нормально-го потока. Полагая

$$e^{-\frac{r_1}{\omega L} \pi} \approx 1 \text{ и } \Phi_{\text{ост}} = \Phi_m / 2, \text{ получим:}$$

$$\Phi_{\text{max}} \approx 2,5\Phi_m.$$

На рис. III-12.1 приведены кривые, характеризующие изменения во времени магнитного потока Φ и его составляющих при процессе включения однофазного трансформатора, протекающего согласно уравнению 12.9.

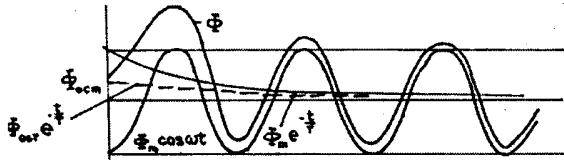


Рисунок III-12.1

При помощи магнитной характеристики (рис. III-12.2 I квадрант) от мгновенных значений разности магнитных потоков $\Phi - \Phi_{\text{ост}}$ (II и III квадранты) можно перейти к мгновенным значениям тока и получить графическим путем зависимость тока включения i_1 от времени (III и IV квадранты).

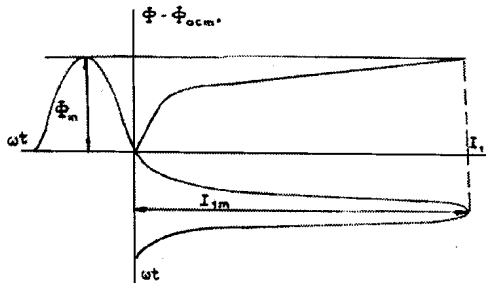


Рисунок III-12.2

При включении насыщенного трансформатора, как показывает опыт, бросок тока включения может в 100 раз и более превысить нормальное значение намагничивающего тока.

На рис. III-12.3 приведена типичная осциллограмма тока включения насыщенного трансформато-

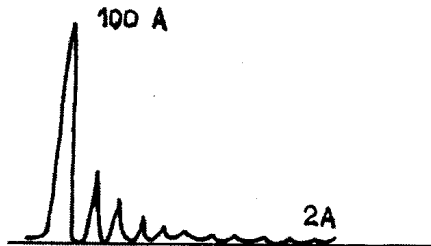


Рисунок III-12.3

ра. Как видно из осциллограммы, длительность переходного процесса включения невелика и не превосходит нескольких периодов.

С возрастанием номинальной мощности трансформатора отношение обычно уменьшается, поэтому у трансформаторов малой мощности переходный процесс при включении протекает быстрее и связан с меньшими бросками тока.

В трехфазном трансформаторе процесс включения в отдельных фазах протекает различно, так как магнитные потоки фаз сдвинуты между собой на 120° . Однако уравнение (12.9) для каждой фазы в отдельности остается справедливым.

В условиях эксплуатации токи включения трансформатора приходится учитывать главным образом при регулировке аппаратуры защиты во избежание неправильных отключений масляных выключателей, вызываемых токами включения. Известную опасность представляют также электромагнитные силы взаимного притяжения, возникающие при токах включения между витками первичной обмотки.

12.3 Внезапное короткое замыкание трансформатора

В условиях эксплуатации короткое замыкание обычно возникает внезапно и в результате различных неисправностей в электрических сетях (электрический пробой или механическое повреждение изоляции, ошибочные действия персонала и т.д.). При этом в трансформаторе возникает резкий переходный процесс, сопровождаемый большими токами, которые могут вызвать опасность повреждения трансформатора. Рассмотрим процесс внезапного короткого замыкания на вторичных зажимах однофазного трансформатора, полагая при этом, что действующее значение первичного напряжения $U_{1н}$ остается неизменным. Особенности этого процесса характерны и для случая короткого замыкания на вторичных зажимах трансформатора.

При установившемся коротком замыкании намагничивающий ток весьма мал по сравнению с полным током обмотки. Это же верно и для случая внезапного короткого замыкания. Кроме того, вследствие большой величины тока короткого замыкания падение напряжения в активном сопротивлении r_k и индуктивном сопротивлении рассеяния x_k первичной обмотки велико.

Действительно, обычно $z_1 \approx z'_2$ и согласно схеме рис. III-12.4 при коротком замыкании $I_1 z_1 \approx 0,5E_1$.

Поэтому э.д.с. E_1 и поток сердечника Φ почти в два раза меньше своих нормальных значений и сердечник трансформатора не насыщен. По этим причинам при внезапном коротком замыкании также можно пренебречь намагничивающим током и положить в основу расчета упрощенную схему трансформатора рис. III-12.4. Параметры этой схемы

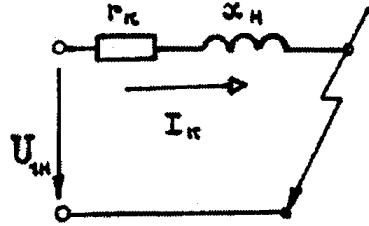


Рисунок III-12.4

$r_k = r_1 + r_2'$; $L_k = \frac{x_k}{\omega} = \frac{x_1 + x_2'}{\omega}$ можно

считать постоянными.

Согласно схеме, процесс внезапного короткого замыкания на вторичных зажимах трансформатора описывается дифференциальным уравнением

$$U_{1m} \sin(\omega t + \psi) = r_k i_{1k} + L_k \frac{di_{1k}}{dt}. \quad (12.14)$$

В рассматриваемом случае ток короткого замыкания i_{1k} также состоит из двух составляющих: установившегося тока i'_{1k} и свободного тока i''_{1k} , т.е.

$$i_{1k} = i'_{1k} + i''_{1k}. \quad (12.15)$$

При этом установившийся ток

$$i'_{1k} = I_{1mk} \sin(\omega t + \psi - \varphi_k); \quad (12.16)$$

$$I_{1mk} = \frac{U_{1m}}{\sqrt{r_k^2 + x_k^2}}; \quad \varphi_k = \arctg \frac{x_k}{r_k} \quad (12.17)$$

Свободный ток i''_{1k} определяется решением уравнения

$$0 = r_k i''_{1k} + L_k \frac{di''_{1k}}{dt}$$

из которого находим

$$i''_{1k} = i''_{1k0} \cdot e^{-\frac{r_k t}{L_k}}, \quad (12.18)$$

где i''_{1k0} - значение свободного тока при $t = 0$.

В общем случае, когда перед коротким замыканием трансформатор работал под нагрузкой,

$$[i_{1k}]_{t=0} = [i'_{1k} + i''_{1k}]_{t=0} = i_{10}; \quad (12.19)$$

$$\text{где: } i_{10} = I_{\text{НГТ}} \sin(\psi - \varphi_{\text{НГ}}) \quad (12.20)$$

представляет собой мгновенное значение тока нагрузки в момент короткого замыкания. Естественно, что

$$I_{\text{НГТ}} < I_{\text{км}}.$$

Подставим значения $i'_{1к}$, $i''_{1к}$, i_{10} из (12.20) найдем

$$i''_{1к0} = I_{\text{НГТ}} \sin(\psi - \varphi_{\text{НГ}}) - I_{\text{км}} \sin(\psi - \varphi_{\text{к}}) \quad (12.21)$$

Полный ток короткого замыкания

$$i_{1к} = I_{\text{км}} \sin(\omega t + \psi - \varphi_{\text{к}}) - [I_{\text{км}} \sin(\psi - \varphi_{\text{к}}) - I_{\text{НГТ}} \sin(\psi - \varphi_{\text{НГ}})] e^{-\frac{t}{T}} \quad (12.22)$$

Если короткое замыкание произошло на холостом ходу, то имеем

$$i_{1к} = I_{\text{км}} \sin(\omega t + \psi - \varphi_{\text{к}}) - I_{\text{км}} \sin(\psi - \varphi_{\text{к}}) e^{-\frac{t}{T}} \quad (12.23)$$

Ток короткого замыкания имеет индуктивный характер, и $0 < \varphi_{\text{к}} < 90^\circ$. Обычно нагрузка трансформатора также имеет индуктивный характер, и поэтому $0 < \varphi_{\text{НГ}} < 90^\circ$. При этих условиях предшествующая нагрузка вызывает уменьшение свободного апериодического тока, а тем самым и уменьшение пиковых значений тока короткого замыкания. Наоборот, при емкостном характере предшествующей нагрузки $i''_{1к0}$ увеличивается. На практике емкостная нагрузка трансформатора встречается редко, и поэтому обычно наиболее неблагоприятным является случайным и будем в виду в дальнейшем.

В зависимости от величины угла $\psi - \varphi_{\text{к}}$ кривая $i_{1к}(t)$ имеет различный характер.

При $\psi - \varphi = \pm \frac{\pi}{2}$ свободный апериодический ток и пики тока имеют наибольшее значение. Полагая $\psi - \varphi_{\text{к}} = -\pi/2$ имеем

$$i_{1к} = -I_{\text{км}} \cos \omega t + I_{\text{км}} e^{-\frac{t}{T}} \quad (12.24)$$

Максимальное или ударное значение тока достигается приблизительно при или через промежуток времени после начала короткого замыкания. При этом в соответствии с выражением (12.24)

$$i_{1к\text{у}} = I_{\text{км}} \left(1 + e^{-\frac{\pi}{x_{\text{к}}}} \right). \quad (12.25)$$

Множитель в скобках этого выражения

$$k_{уд} = 1 + e^{-\frac{\pi r_k}{x_k}} \quad (12.26)$$

называется **ударным коэффициентом** и показывает во сколько раз ударный ток короткого замыкания больше амплитуды установившегося тока короткого замыкания. В зависимости от величины r_k/x_k этот коэффициент может изменяться в пределах $k_{уд} = 1 \div 2$. Для мощных трансформаторов $k_{уд} = 1,7 \div 1,8$, а для малых $k_{уд} = 1,2 \div 1,3$. Например, у трансформатора мощностью 1000 кв.а напряжение короткого замыкания и его составляющие равны: $u_k = 6,5\%$, $u_k = 1,5\%$ и $u_k = 6,32\%$. При этом

$$k_{уд} = 1 + e^{-\frac{\pi r_k}{x_k}} = 1 + e^{-\frac{\pi u_{ка}}{u_{кр}}} = 1 + e^{-\frac{1,5\pi}{6,32}} = 1,475$$

и ударный ток в

$$\frac{100}{u_k} k_{уд} = \frac{100}{6,5} 1,475 = 22,7$$

раза больше амплитуды номинального тока.

При внутренних коротких замыканиях в трансформаторе, когда вследствие повреждения изоляции накоротко замыкается часть витков обмотки трансформатора, кратность тока в поврежденной части еще больше, так как напряжение или э.д.с. этой части обмотки уменьшаются пропорционально числу витков в первой степени, а индуктивное сопротивление уменьшается пропорционально квадрату числа витков.

Действие токов короткого замыкания выражается в усиленном нагреве обмоток трансформатора и в возникновении значительных электромагнитных сил, действующих на обмотки.

При к.з. ток возрастает в 20:30 раз. Вся мощность P_k превращается в тепло. Тепловой режим при к.з. считается адиабатным, т.к. при кратковременном процессе тепло не рассеивается. Опыт и анализ показали, что нарастание температуры Θ С выражается эмпирической формулой

$$\frac{d\Theta}{dt} = 0,005 \Delta_k^2 \quad (12.27)$$

где Δ_k - плотность тока при к.з.

В трансформаторах до 1000кВА - $\Delta_k = 65:70$ А/мм². В трансформаторах более 1000кВА - $\Delta_k = 30:35$ А/мм². Соответственно нарастание температуры 24 и 6° сек. Если защита срабатывает в течение 1:3 сек, перегрев незначителен.

Из рассмотрения картины магнитного поля следует, что на обмотки действуют электромагнитные силы двоякого рода: радиальные силы F_p , стремящиеся сжать внутреннюю обмотку и растянуть наружную обмотку в радиальном направлении; аксиальные силы F_a стремящиеся сжать обмотки в аксиальном направлении рис. III-12.5.

При отключении части витков (например, при регулировании напряжения) характер распределения поля рассеяния меняется, что приводит также к изменению действующих электромагнитных сил. При этом заметным образом возрастают аксиальные силы.

Действующие на обмотку электромагнитные силы пропорциональны квадрату тока, и при коротких замыканиях они весьма велики. В связи с этим обеспечение необходимой надежности крепления обмоток является одной из важных задач проектирования трансформаторов.

Максимальная сила выражается $F = BI l$

$$\frac{F}{l} = BI; B \cdot S = \Phi; \Phi = \frac{Wl}{R}; f = I^2,$$

где f - сила на единицу длины проводника.

При нормальных условиях эксплуатации трансформатора $f = 1\text{кг/м}$.

При возрастании токов к.з. в 20 ÷ 30 раз величина f растет до 400 ÷ 900кг/м

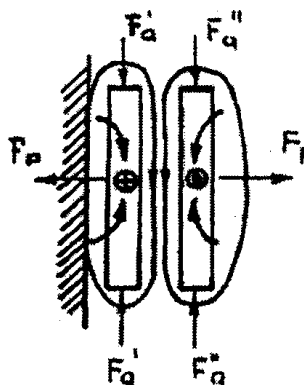


Рисунок III-12.5

13. Перенапряжения в трансформаторе

13.1 Общие сведения о перенапряжениях

При работе электрических сетей в них возникают кратковременные импульсы напряжений, величины которых могут во

много раз превышать нормальные рабочие напряжения. Такие импульсы напряжения называются **перенапряжениями**. Перенапряжения вызываются различными причинами:

- 1) коммуникационными операциями (включение и выключение линий, трансформаторов и вращающихся электрических машин);
- 2) замыканиями на землю через электрическую дугу;
- 3) грозовыми разрядами непосредственно в линиях электропередачи или вблизи от них.

В последнем случае высокое напряжение в проводах линии электропередачи

индуцируется токами молнии. Наиболее опасными обычно являются атмосферные перенапряжения, вызываемые грозовыми разрядами.

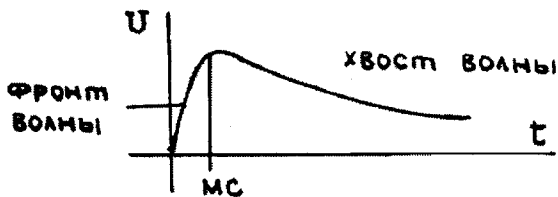


Рисунок III-13.1

Амплитуды атмосферных перенапряжений достигают значений, измеряемых миллионами вольт.

Перенапряжения имеют характер кратковременных апериодических или периодических импульсов волн. Возникающие на каком либо участке сети волны перенапряжения распространяются по воздушным линиям электропередачи со скоростью, близкой к скорости света, и достигает подстанций с установленным на них оборудованием, в том числе трансформаторов. Для защиты электрических сетей и подстанций от перенапряжений устанавливаются разрядники, существенным элементом которых являются искровые промежутки. Одни полюсы искровых промежутков соединены с линией, а другие - с землей. При напряжениях искровой промежуток пробивается и электрический заряд волны перенапряжения отводится в землю. Однако волна перенапряжения при этом полностью не исчезает, так как величину искрового промежутка необходимо выбрать настолько большой, чтобы после отвода заряда волны перенапряжения в землю на искровом промежутке не возникла электрическая дуга под воздействием нормального рабочего напряжения сети.

13.2 Схема замещения обмоток трансформатора при перенапряжениях

Между отдельными витками и катушками обмоток, а также между ними и заземленными частями трансформатора (сердечник, бак и т.д.) существуют определенные емкости, которые шунтируют указанные элементы обмоток. Эти емкости столь малы, что соответствующие емкости сопротивления

$$x_c = \frac{1}{\omega C}$$

при рабочей частоте $f=50$ Гц весьма невелика и не оказывают какого-либо заметного влияния на работу трансформаторов. Поэтому выше, при рассмотрении нормальных и аварийных процессов, протекающих с нормальной частотой, эти емкости во внимание не принимались. Однако при действии волн перенапряжений, которые движутся и измеряются с большей скоростью или большей частотой, влияние этих емкостей имеет первостепенное значение.

На рис. III-13.2, индуктивности L представляют собой индуктивности элементов обмотки витков и катушек), C'_d емкости между этими элементами, или так называемые **продольные емкости**, а C'_q - емкости

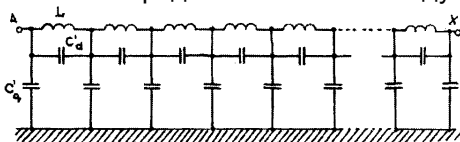


Рисунок III-13.2

между указанными элементами и землей, или так называемые **поперечные емкости**. Активные сопротивления элементов обмотки на схеме.

Таким образом, обмотка представляется в виде однородной электрической цепи, полная продольная емкость которой

$$C_d = \frac{1}{\sum \frac{1}{C'_d}}$$

и полная поперечная емкость

$$C_q = \sum C'_q.$$

Заряд входной емкости. При подходе волны перенапряжения к зажимам трансформатора напряжение на них вследствие большой крутизны фронта волны очень быстро возрастает. Скорость этого процесса настолько велика, что о ток, создаваемых

электрическим зарядом волны, из-за большой индуктивности обмотки сначала проходит не по виткам обмотки, а по ее емкостной цепи. Поэтому в момент подхода волны трансформатор в целом действует как некоторая емкость, называемая **входной емкостью** рис. III-13.3.

Процесс заряда емкостей цепи обмотки при подходе волны длится доли микросекунды. Этот процесс называется **зарядом входной емкости**, а устанавливающееся в результате его распределения потенциалов или напряжения вдоль цепи обмотки - **начальным распределением напряжения**. В начале этого процесса напряжение волны на зажимах трансформатора падает до нуля, а затем волна отражается и напряжение на зажимах возрастает до двукратного значения амплитуды волны U_A .

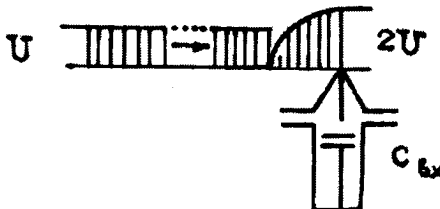


Рисунок III-13.3

13.3 Начальное распределение напряжения

При начальном заряде обмотки токи и электрические заряды распределяются по цепочке продольных емкостей неравномерно, так как по мере продвижения от начала обмотки А к ее концу Х все больше тока и зарядов ответвляется через поперечные емкости на землю. Поэтому через ближайшие к началу обмотки А продольные емкости проходит ток и они несут большие электрические заряды, а по направлению к концу обмотки Х заряды продольных емкостей уменьшаются. В результате и падения напряжения на элементах продольных емкостей уменьшаются от начала обмотки А к ее концу Х. Вследствие этого начальное распределение вдоль обмотки получается неравномерным.

Коэффициент распределения равен

$$\alpha = \sqrt{\frac{C_q}{C_d}} \quad (13.1)$$

Начальное распределение напряжения вдоль обмотки для разных значений α приведено на рис. III-13.4. Обычно $C_q > C_d$ и $\alpha = 5 \div 15$. При таких значениях распределение напряжения для заземленных и незаземленных обмоток практически одинаково.

Кроме того, при $\alpha \geq 5$ распределение напряжения вдоль обмотки весьма неравномерно.

При неравномерном начальном распределении напряжения на первой катушке, например, при $\alpha = 10$ в 10 раз больше, чем при равномерном распределении. Это вызывает необходимость усиления междувитковой и между катушечной изоляции в начале обмотки.

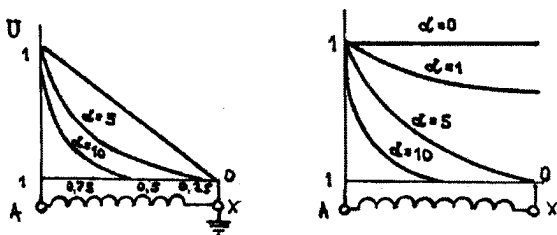


Рисунок III-13.4

13.4 Защита трансформаторов от перенапряжений

Волны перенапряжений, достигающие трансформатора, могут вызвать опасность повреждения его изоляции, вследствие чего возникает необходимость борьбы с этой опасностью. Для этой цели начальные и концевые катушки высоковольтных обмоток трансформатора выполняются с усиленной изоляцией, а нейтрали обмоток с напряжением 35 кВ и больше заземляются либо непосредственно, либо через сопротивления, значения которых для высоковольтных колебательных процессов малы. Кроме того принимаются меры, направленные к частичному или более полному предотвращению электромагнитных колебаний в обмотке.

Простейшим мероприятием подобного рода является применение емкостных колец у начала обмотки на 35 кВ и выше. Такое кольцо представляет собой картонный механизированный диск, разрезанный по радиусу во избежание образования короткозамкнутого витка и соединенный с началом обмотки. Емкость этого кольца по отношению к виткам начальной катушки представлена на схеме емкостной цепочки обмотки в виде емкости C_3 . Эта емкость шунтирует продольные

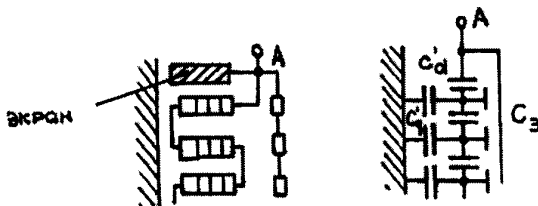


Рисунок III-13.5

емкости витков начальной катушки и повышает их потенциал.

Лучшие результаты можно получить, если кроме того, охватить экранными кольцами также ряд последующих катушек обмотки. Наличие таких колец приводит к повышению потенциала начальных и последующих катушек обмотки, причем можно получить почти равномерное начальное распределение напряжения, (рис. III-13.5 и рис. III-13.6)

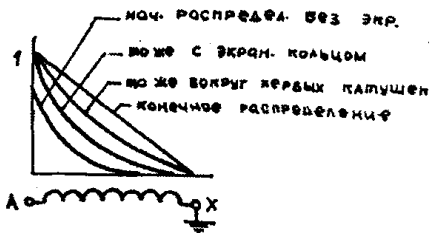


Рисунок III-13.6

Трансформаторы с подобной защитой называются **грузоупорными** или **нерезонирующими**, поскольку в них практически устранена опасность возникновения значительных резонансных электромагнитных колебаний под воздействием волн перенапряжений.

IV. Асинхронные машины

1. Принцип действия и конструкция трехфазного асинхронного двигателя

1.1 Принцип действия трехфазного асинхронного двигателя

Неподвижная часть асинхронного двигателя - статор – имеет трехфазную обмотку, при включении которой в сеть возникает вращающееся магнитное поле. Частота вращения этого поля

$$n_0 = \frac{60f_1}{p} \quad (1.1)$$

В расточке статора расположена вращающаяся часть двигателя - **ротор**, состоящий из вала, сердечника и обмотки. Обмотка ротора представляет собой несколько стержней, уложенных в пазы сердечника и замкнутых с двух сторон кольцами.

Вращающееся поле статора пересекает стержни обмотки ротора и наводит в них э.д.с. Но так как обмотка ротора замкнута, то в стержнях возникают токи. Взаимодействие этих токов с полем статора создает на проводниках обмотки ротора электромагнитные силы $F_{эм}$, направление которых определяют по правилу «левой руки». Силы $F_{эм}$ стремятся повернуть ротор в направлении вращения магнитного поля статора. Совокупность сил $F_{эм}$, приложенных к стержням, создает на роторе электромагнитный момент M , приводящий его во вращение с частотой n . Вращение ротора посредством вала передается исполнительному механизму.

Таким образом, электрическая энергия, поступающая из сети в обмотку статора, преобразуется в механическую энергию вращения вала двигателя.

Направление вращения магнитного поля статора, а следовательно и направление вращения ротора зависит от порядка следования фаз напряжения, подводимого к обмотке статора. Частота вращения ротора n называется *асинхронной*, всегда меньше частоты вращения поля n_0 , так как только в этом случае происходит наведение э.д.с. в обмотке ротора асинхронного двигателя. Разность частот ротора и вращающегося поля статора характеризуется скольжением:

$$S = \frac{n_0 - n}{n_0} \quad (1.2)$$

Скольжение асинхронного двигателя может изменяться в пределах от 0 до 1. При этом $S = 0$ соответствует режиму х.х., когда ротор двигателя почти не испытывает противодействующих моментов, $S = 1$ соответствует режиму к.з., когда при включении в сеть противодействующий момент на валу двигателя равен пусковому моменту и поэтому ротор двигателя неподвижен ($n = 0$). Для двигателей нормального исполнения мощностью от 1 до 1000 кВт номинальное скольжение приблизительно составляет соответственно $0,06+0,001$, т.е. $6+1\%$.

Частота вращения ротора асинхронного двигателя

$$n = n_0(1 - S) \quad (1.3)$$

Частота тока (э.д.с.), наведенного в обмотке вращающегося ротора, пропорциональна частоте вращения магнитного поля относительно ротора

$$n_s = n_0 - n$$

или

$$f_2 = \frac{p \cdot (n_0 - n)}{60}$$

$$f_2 = \frac{p(n_0 - n)}{60} \cdot \frac{n_0}{n_0} = \frac{pn_0}{60} \cdot \frac{n_0 - n}{n_0} = f_1 S \quad (1.4)$$

т.е. частота тока (э.д.с.) ротора пропорциональна скольжению.

Для асинхронных двигателей общепромышленного применения эта частота обычно не велика и при $f_1 = 50$ Гц не превышает нескольких Гц. Так, при $S_{\text{ном}} = 5\%$ частота $f_2 = 50 \cdot 0,05 = 2,5$ Гц.

Ток ротора создает вращающуюся н.с., частота вращения которой относительно ротора

$$n_s = \frac{f_2 60}{p} = \frac{f_1 S 60}{p} = n_0 S$$

Частота вращения н.с. ротора относительно статора больше на величину n :

$$n_s + n = n_0 S + n_0(1 - S) = n_0$$

т.е. н.с. обмотки ротора вращается в пространстве с синхронной частотой вращения независимо от частоты вращения ротора.

Таким образом, в асинхронном двигателе действуют две намагничивающие силы - статора и ротора, которые вращаются

синхронно и образуют единое результирующее магнитное поле машины.

1.2 Устройство асинхронных двигателей

По своему устройству асинхронные двигатели разделяют на два типа, отличающиеся друг от друга лишь конструкцией ротора: двигатели с **короткозамкнутым** ротором и двигателем с **фазным** ротором, которые называют также двигателями с контактными кольцами.

Статор асинхронного двигателя состоит из корпуса, сердечника и обмотки. Корпус статора служит для крепления сердечника с обмоткой и подшипниковых щитов. В небольших двигателях корпус отливают из алюминиевого сплава, стали или чугуна, в крупных машинах – делают сварным.

Сердечник статора собирают из листов электротехнической стали толщиной 0,35 или 0,5 мм, которые до сборки покрывают с обеих сторон

изоляционной пленкой (обычно лаком), что ограничивает величину вихревых

токов в сердечнике. На

внутренней поверхности сердечника статора имеются пазы, в которых уложена активные стороны трехфазной обмотки статора.

Обычно к зажимам выводов присоединяют все шесть концов трехфазной обмотки. Это дает возможность применять одни и те же двигатели на различные напряжения сети, находящиеся в отношении при этом соединении звездой соответствует высшие напряжение. Например, если в паспорте двигателя указаны напряжение 220/380 В, то при напряжении 380 В обмотки статора следует соединить звездой, а при напряжении 220 В - треугольником. В обоих случаях фазное напряжение останется равным 220В. Для упрощения указанных переключений зажимы обмоток располагают в определенном порядке.

Ротор асинхронного двигателя состоит из вала, сердечника и обмотки. Сердечник ротора имеет цилиндрическую форму, его собирают из листов электротехнической стали. В двигателях с

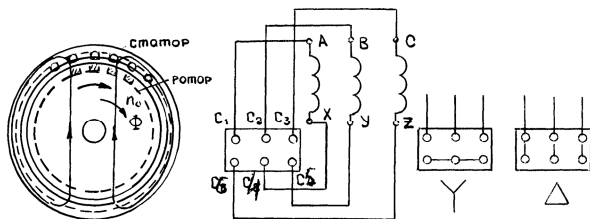


Рисунок IV-1.1

короткозамкнутым ротором обмотка ротора представляет собой ряд медных или алюминиевых стержней, расположенных в пазах сердечника ротора и замкнутых по торцам кольцами. В двигателях мощностью до 100 кВт обмотку ротора выполняют заливкой пазов расплавленным алюминием под давлением. При этом одновременно отливают и замыкающие кольца вместе с вентиляционными крыльями. В этом случае для упрощения процесса заливки алюминия пазы ротора обычно делают закрытыми круглой или овальной формы.

Двигатель с фазным ротором помимо указанных выше частей имеет на валу три контактных кольца, изолированных от вала и друг от друга.

2. Рабочий процесс асинхронной машины

2.1 Э.д.с., наводимые в обмотках асинхронного двигателя

Как следует из принципа работы асинхронного двигателя, обмотка ротора не имеет электрической связи с обмоткой статора. Между этими обмотками существует только магнитная связь, и энергия из одной обмотки передается в другую посредством магнитного поля. В этом отношении асинхронная машина аналогична трансформатору, в котором обмотка статора является первичной, а обмотка ротора - вторичной.

Э.д.с., наводимые в обмотке статора. Основной магнитный поток Φ , вращающийся с частотой n_0 , наводит в неподвижной обмотке статора э.д.с. E_1 , величина которой определяется выражением $E_1 = 4,44W_1f_1\Phi$.

Магнитный поток рассеяния статора $\Phi_{\sigma 1}$ наводит в обмотке статора э.д.с. рассеяния, величина которой определяется индуктивным падением напряжения в обмотке статора:

$$-\dot{E}_{\sigma 1} = jx_1\dot{i}_1 \quad (2.1)$$

где x_1 - индуктивное сопротивление рассеяния одной фазы обмотки статора.

Кроме того, в обмотке статора имеет место падение напряжения в активном сопротивлении:

$$\dot{E}_r = r_1\dot{i}_1 \quad (2.2)$$

где r_1 - активное сопротивление одной фазы обмотки статора.

Таким образом, напряжение сети U_1 , подведенное к обмотке статора, уравнивается суммой э.д.с., наведенных в этой обмотке:

$$\dot{U}_1 = (-\dot{E}_1) + (-\dot{E}_{\sigma 1}) + \dot{E}_r \quad (2.3)$$

или

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + jx_1 \dot{i}_1 + r_1 \dot{i}_1$$

Выражение 2.3 представляет собой уравнение э.д.с. обмотки статора асинхронного двигателя.

Э.д.с., наводимые в обмотке ротора. В процессе работы двигателя ротор вращается в сторону вращения магнитного поля статора с частотой n . Поэтому частота вращения поля статора относительно ротора разности частот $n_0 - n$. Основной магнитный поток Φ , обгоняя ротор со скоростью $n_0 - n$, индуцирует в обмотке ротора э.д.с.

$$E_{2s} = 4,44f_2\Phi W_2 K_{об2} \quad (2.4)$$

где f_2 - частота э.д.с. E_2 ; W_2 - число последовательно соединенных витков одной фазы обмотки ротора; $K_{об2}$ - обмоточный коэффициент обмотки ротора.

$$E_{2s} = 4,44f_1\Phi W_2 K_{об2} = E_2 S \quad (2.5)$$

Здесь E_2 - э.д.с., наведенная в обмотке ротора при скольжении $S = 1$, т.е. при неподвижном роторе.

Поток рассеяния ротора $\Phi_{\sigma 2}$ индуцирует в обмотке ротора э.д.с. рассеяния, величина которой определяется индуктивным падением напряжения в этой обмотке:

$$E_{\sigma 2} = -jx_2 S \dot{i}_2 \quad (2.6)$$

где x_2 - индуктивное сопротивление рассеяния обмотки при неподвижном роторе ($S = 1$).

Так как в процессе работы двигателя обмотка ротора замкнута накоротко, то сумма э.д.с. в цепи ротора равна нулю, т.е.

$$SE_2 - jx_2 S \dot{i}_2 - r_2 \dot{i}_2 = 0 \quad (2.7)$$

где r_2 - активное сопротивление цепи ротора.

Разделив все члены равенства (2.7) на S , получим уравнение э.д.с. для обмотки ротора

$$\dot{E}_2 - jx_2 \dot{i}_2 - \frac{r_2}{S} \dot{i}_2 = 0 \quad (2.8)$$

2.2 Уравнения намагничивающих сил и токов асинхронного двигателя

Основной магнитный поток Φ в асинхронном двигателе создается действием н.с. обмоток статора F_1 и ротора F_2 :

$$\dot{\Phi} = \frac{F_2 + F_1}{R_M} = \frac{F_0}{R_M} \quad (2.9)$$

где R_M - магнитное сопротивление магнитной системы двигателя потоку Φ : F_0 - результирующая н.с. асинхронного двигателя, численно равная н.с. обмотки статора в режиме х.х.

$$F_0 = 0,45m_1 \frac{W_{10}^i}{P} K_{об1} \quad (2.10)$$

I_0 - ток в обмотке статора в режиме х.х.

Намагничивающие силы обмоток статора и ротора в режиме нагруженного двигателя:

$$F_1 = 0,45m_1 \frac{W_{11}^i}{P} K_{об1} \quad (2.11)$$

$$F_2 = 0,45m_2 \frac{W_{22}^i}{P} K_{об2} \quad (2.12)$$

где m_2 - число фаз в обмотке ротора; $K_{об2}$ - обмоточный коэффициент обмотки ротора.

При изменениях нагрузки на валу двигателя меняются токи I_1 и I_2 , что вызывает соответствующие изменения намагничивающих сил обмоток статора и ротора. Но основной магнитный поток Φ при этом сохраняется неизменным, так как напряжение, подведенное к обмотке статора, неизменно ($U_1 = \text{const}$) и почти полностью уравнивается э.д.с. обмотки статора:

$$\dot{U}_1 \approx (-\dot{E}_1) \quad (2.13)$$

Но поскольку э.д.с. E_1 пропорциональная основному потоку Φ , то последний при изменениях нагрузки остается неизменным. Этим и объясняется то, что, несмотря на изменения н.с. F_1 и F_2 , результирующая н.с. остается неизменной, т.е. $F_0 = F_1 + F_2 = \text{const}$.

Подставив вместо F_1, F_2, F_0 их значения, получим

$$0,45m_1 \frac{W_1 i_0}{P} K_{об1} = 0,45m_1 \frac{W_1 I_1}{P} K_{об1} + 0,45m_2 \frac{W_2 I_2}{P} K_{об2}$$

Разделив это равенство на $\frac{m_1 W_1 K_{об1}}{P}$, получим уравнение токов асинхронного двигателя

$$i_0 = i_1 + \frac{m_2 W_2 K_{об2}}{m_1 W_1 K_{об1}} i_2 = i_1 + I'_2 \quad (2.14)$$

Величина $I'_2 = \frac{1}{K_i} I_2$ представляет собой ток ротора, приведенный к обмотке статора.

Преобразовав уравнение (2,14), получим выражение тока статора

$$i_1 = i_0 - i'_2 \quad (2.15)$$

из которого следует, что ток статора асинхронного двигателя имеет две составляющие: I_0 - намагничивающую и I'_2 - составляющую, которая компенсирует размагничивающее действие тока ротора.

Следовательно, ток ротора I_2 оказывает на магнитную систему двигателя такое же размагничивающее влияние, как и ток вторичной обмотки трансформатора. Следовательно, любое изменение нагрузки на валу двигателя сопровождается соответствующим изменением тока в обмотке статора I_1 , так как изменение нагрузки на валу двигателя вызывает изменение скольжения S . Это в свою очередь влияет на э.д.с. обмотки ротора, а следовательно, и на величину тока ротора. Но так как этот ток оказывает размагничивающее влияние на магнитную цепь двигателя, то его изменения вызывают соответствующие изменения тока в цепи статора I_1 , за счет составляющей I'_2 . Так, в режиме х.х., когда нагрузка на валу двигателя отсутствует и $S = 0$, ток $I_2 \approx 0$. В этом случае ток в обмотке статора $I_1 \approx I_0$. Если же ротор затормозить, не отключая обмотки статора от сети, (режим короткого замыкания), то скольжение $S = 1$ и э.д.с. обмотки ротора E_{2s} достигнет своего наибольшего значения E_2 . Также наибольшего значения достигнут ток I_2 , а следовательно, и ток в обмотке статора I_1 .

2.3 Приведение параметров обмотки ротора к обмотке статора

Чтобы векторы величин обмоток статора и ротора можно было изобразить на одной векторной диаграмме, параметры обмотки ротора приводят к обмотке статора. При этом обмотку ротора с числом фаз m_2 обмоточным коэффициентом $K_{об2}$ и числом витков фазы W_2 заменяют обмоткой $m_1 \cdot K_{об1}$ и W_1 . При такой замене у приведенного ротора мощности и углы фазных сдвигов векторов должны остаться такими же, что и до приведения.

Пересчет реальных параметров обмотки ротора на приведенные ведется по последующим формулам: приведенная э.д.с. ротора при $S = 1$

$$E'_2 = K_u E_2 \quad (2.16)$$

где $K_u = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1 K_{об1}}{W_2 K_{об2}}$ - коэффициент трансформации напряжения в асинхронной машине при неподвижном роторе.

Приведенный ток ротора

$$I'_2 = \frac{1}{K_i} I_2 \quad (2.17)$$

где $K_i = \frac{m_1 W_1 K_{об1}}{m_2 W_2 K_{об2}}$ - коэффициент трансформации тока асинхронной машины.

В отличие от трансформатора в асинхронных двигателях коэффициент $K_u = K_i$, так как в общем случае число фаз в обмотке статора m_1 и в обмотке ротора m_2 неодинаково; лишь в двигателях с фазным ротором, у которых $m_1 = m_2$, эти коэффициенты равны.

Активное и индуктивное приведенные сопротивления обмотки ротора:

$$r'_2 = r_2 K_i K_u \quad (2.18)$$

$$x'_2 = x_2 K_i K_u \quad (2.19)$$

Следует обратить внимание на некоторую специфику определения m_2 и W_2 в короткозамкнутой обмотке ротора. Каждый стержень этой обмотки можно рассматривать как фазную обмотку. Поэтому число витков одной фазы обмотки ротора $W_2 = 0,5$;

обмоточный коэффициент обмотки ротора $K_{об2} = 1$, а число фаз $m_2 = Z$, т.е. равно числу стержней.

2.4 Векторная диаграмма асинхронного двигателя

Для асинхронного двигателя можно построить векторную диаграмму токов э.д.с.

Величину $\frac{r'_2}{S}$ можно представить в виде

$$\frac{r'_2}{S} = \frac{r'_2}{S} - \frac{r'_2 S}{S} + r'_2 = r'_2 + r'_2 \frac{1-S}{S} \quad (2.20)$$

Тогда для ротора уравнение э.д.с. в приведенных параметрах

$$0 = E'_2 - jx'_2 i_2 - r'_2 i_2 - r'_2 \frac{1-S}{S} i_2 \quad (2.21)$$

Угол сдвига фаз между э.д.с. и током ротора

$$\psi_2 = \arctg \frac{x'_2 \cdot S}{r'_2} \quad (2.22)$$

Так как векторную диаграмму асинхронного двигателя строят по уравнениям э.д.с. и токов, аналогичным уравнениям трансформатора, то порядок построения этой диаграммы такой же, что и векторной диаграммы трансформатора.

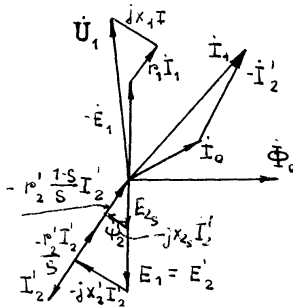


Рисунок IV-2.1

2.5 Схема замещения асинхронного двигателя

Уравнения э.д.с. и токов, а также векторной диаграмме асинхронного двигателя соответствует электрическая схема, которую называют **схемой замещения асинхронного двигателя**.

Таким образом, асинхронная машина с электромагнитной связью статорной и роторной цепей заменена эквивалентной электрической схемой.

Активное сопротивление $r'_2 \frac{1-S}{S}$ можно рассматривать как внешнее сопротивление, включенное в обмотку неподвижного ротора.

В этом случае асинхронная машина работает как трансформатор, имеющий активную нагрузку. Сопротивление

$r'_2 \frac{1-S}{S}$ - единственный переменный параметр схемы. Величина этого сопротивления определяется скольжением, а следовательно механической нагрузкой на валу асинхронного двигателя. Так, если нагрузочный момент на валу двигателя $M_2 = 0$, то скольжение $S = 0$. При этом величина $r'_2 \frac{1-S}{S} = \infty$, что соответствует работе двигателя в режиме х.х. Если же нагрузочный момент на валу двигателя превышает его вращающийся момент, то ротор останавливается ($S = 1$). При этом величина $r'_2 \frac{1-S}{S} = 0$, что соответствует режиму к.з. асинхронного двигателя.

Полученная Т-образная схема замещения асинхронного двигателя может быть преобразована в более простой вид. С этой целью намагничивающий контур $Z_m = r_m + jx_m$ выносят на общие зажимы. Чтобы при этом намагничивающий ток I_0 не изменял своей величины, в этот контур последовательно

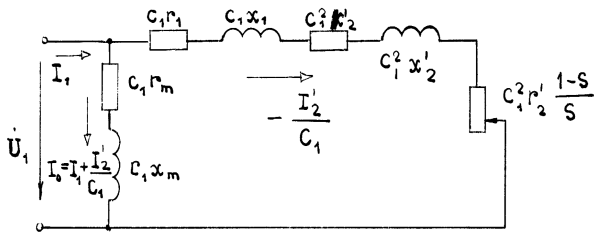


Рисунок IV-2.2

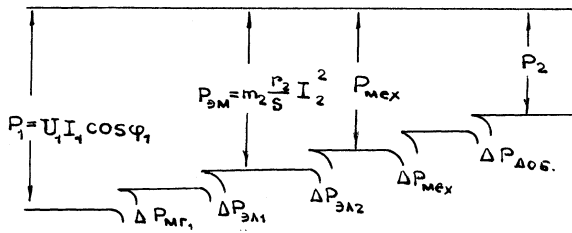


Рисунок IV-2.3

включают сопротивление r_1 и x_1 . В полученный Г-образной схеме замещения сопротивления контуров статора и ротора соединены последовательно; они образуют рабочий контур, параллельно которому включен намагничивающий контур.

Такой переход к Г-образной схеме замещения несколько упрощен. Однако возникающие при этом погрешности для двига-

телей мощностью от 10 кВт и выше весьма незначительны. Кроме того, переход к Г-образной схеме замещения существенно облегчает расчеты и упрощает анализ электромагнитных процессов в асинхронных двигателях.

Величина тока в рабочем контуре упрощенной схемы замещения

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r'_2 + r'_2 \frac{1-S}{S})^2 + (x_1 + x'_2)^2}} \quad (2.23)$$

или используя (2.20),

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + \frac{r'_2}{S})^2 + (x_1 + x'_2)^2}} \quad (2.24)$$

где U_1 - фазное напряжение, подводимое к обмотке статора.

3. Электромагнитный момент и рабочие характеристики асинхронного двигателя

3.1 Потери и к.п.д. асинхронного двигателя

Преобразование энергии в асинхронном двигателе, как и в других электрических машинах, связано с потерями энергии. Эти потери делят на механические, магнитные и электрические.

Из сети в обмотку статора поступает мощность P_1 . Часть этой мощности расходуется на покрытие магнитных потерь в сердечнике статора $\Delta P_{\text{мг1}}$, также электрических потерь в обмотке статора, обусловленных нагревом обмотки.

$$\Delta P_{\text{эл1}} = m_1 r_1 I_1^2 \quad (3.1)$$

Оставшаяся часть мощности магнитным потоком передается на ротор и поэтому называют ее **электромагнитной мощностью**.

$$P_{\text{эм}} = P_1 - \Delta P_{\text{мг1}} - \Delta P_{\text{эл1}} \quad (3.2)$$

Часть электромагнитной мощности затрачивается на покрытие электрических потерь в обмотке ротора:

$$\Delta P_{\text{эл2}} = m_1 I_2'^2 r_2' = m_2 r_2 I_2^2 \quad (3.3)$$

Эти потери также можно определить произведением э.д.с. ротора E_{2s} на ток в роторе I_2 и на косинус угла между ними

$$\Delta P_{\text{эл2}} = m_2 E_2 S I_2 \cos \psi_2 \quad (3.3a)$$

Остальная часть электромагнитной мощности преобразуется в механическую мощность двигателя, называемую **полной механической мощностью**

$$P_2 = P_{эм} - \Delta P_{эл2} \quad (3.4)$$

Воспользовавшись (2.23) и (3.4), запишем выражение полной механической мощности:

$$P_2 = \Delta P_{эл2} \frac{1-s}{s}$$

Это выражение представим в (3.4):

$$\Delta P_{эл2} \frac{1-s}{s} = P_{эм} - \Delta P_{эл2}$$

Преобразовав это уравнение, получим

$$\Delta P_{эл2} = P_{эм} s \quad (3.5)$$

т.е. **мощность электрических потерь в роторе пропорциональна скольжению**. Поэтому работа асинхронного двигателя более экономична при малых скольжениях.

Следует отметить, что в роторе двигателя возникают также магнитные потери, которые настолько малы, что ими можно пренебречь из-за небольшой частоты тока ротора $f_2 = f_1 s$.

Механическая мощность на валу двигателя P_2 меньше полной механической мощности $P_{мех}$ на величину механических $\Delta P_{мех}$ и добавочных $\Delta P_{доб}$ потерь:

$$P_2 = P_{мех} - \Delta P_{мех} - \Delta P_{доб} \quad (3.6)$$

Механические потери в асинхронном двигателе обусловлены трениями в подшипниках и вращающихся частей о воздух. Добавочные потери вызваны наличием в двигателе полей рассеивания и пульсацией поля в зубцах ротора и статора.

Согласно ГОСТ 183-66, величину добавочных потерь в номинальном режиме принимают равной 0,5% от подводимой к двигателю мощности. Таким образом, полезная мощность асинхронного двигателя

$$P_2 = P_1 - \sum \Delta P,$$

где сумма потерь в асинхронном двигателе

$$\sum \Delta P = \Delta P_{эл1} + \Delta P_{мг1} + \Delta P_{эл2} + \Delta P_{мех} + \Delta P_{доб} \quad (3.7)$$

Благодаря отсутствию коллектора к.п.д. асинхронных двигателей выше, чем у двигателей постоянного тока, и при мощно-

сти более 1 кВт $\eta = 80 \div 95\%$ (верхний предел соответствует двигателям большой мощности).

3.2 Электромагнитный момент асинхронного двигателя

Электромагнитный момент асинхронного двигателя создается взаимодействием тока в обмотке ротора с вращающимся магнитным полем. Электромагнитный момент M пропорционален электромагнитной мощности:

$$M = \frac{P_{эм}}{\omega_1} \quad (3.9)$$

где $\omega_1 = \frac{2\pi n_0}{60}$ - угловая частота вращения магнитного поля.

Так как синхронная частота $n_0 = \frac{60f_1}{P}$, то

$$\omega_1 = \frac{2\pi 60f_1}{60P} = \frac{2\pi f_1}{P} \quad (3.10)$$

Подставив в (3.9) значение электромагнитной мощности по (3.5), получим

$$M = \frac{P_{эм2}}{\omega_1 S} = \frac{m_1 I_2'^2 r_2'}{\omega_1 S} \quad (3.11)$$

т.е. электромагнитный момент асинхронного двигателя пропорционален мощности электрических потерь в обмотке ротора.

Подставляя в (3.10) значения тока I_2' по (2.24) получим электромагнитный момент (Н·м):

$$M = \frac{m_1 P U_1 r_2'}{S \cdot 2\pi f_1 [(r_1 + \frac{r_2'}{S})^2 + (x_1 + x_2')^2]} \quad (3.12)$$

Если в знаменатель (3.12) внести 9,81, то момент выражают в килограммометрах.

Воспользовавшись (3.11) и (3.3а), получим еще одно выражение электромагнитного момента:

$$M = \frac{m_2 E_2 I_2 \cos \varphi_2}{\omega_1}$$

Учитывая (3.10) и (2.5) и помня, что $4,44 = 2\pi/\sqrt{2}$, получим

$$M = \frac{m_2 p W_2 K_{об2}}{\sqrt{2}} \Phi I_2 \cos \psi_2 = C_M \Phi I_2 \cos \psi_2 \quad (3.12a)$$

$$\text{где } C_M = \frac{m_2 p W_2 K_{об2}}{\sqrt{2}}.$$

Выражение момента (3.12a) справедливо для электрических машин всех типов. Это еще раз подтверждает единую природу создания электромагнитного момента во всех электрических машинах.

Выражение момента (3.12) дает возможность построить график зависимости электромагнитного момента двигателя от скольжения $M = f(S)$, называемого *механической характеристикой* двигателя. При построении этой характеристики исходят из положения, что все величины, входящие в (3.12), за исключением скольжения S являются постоянными, так как величины m, r, r'_2, x_1, x'_2 задаются конструкцией двигателя, а f и U_1 - неизменные параметры сети, питающей двигатель.

В момент пуска двигателя в ход $n_0 = 0$, $S = 1$. Развиваемый при этом пусковой момент (Н·м)

$$M_n = \frac{m_1 p U_1^2 r'_2}{2\pi f [(r_1 + r'_2)^2 + (x_1 + x'_2)^2]} \quad (3.13)$$

Под действием этого момента ротор двигателя приводится во вращение, при этом скольжение уменьшается, а момент увеличивается. При скольжении $S_{кр}$ момент достигает **максимального** значения. Величину критического скольжения $S_{кр}$, соответствующую максимальному моменту, можно найти, взяв производную от выражения момента (3.12) по S и приняв ее нулю: $\frac{dM}{dS} = 0$. Отсюда искомое значение критического значения скольжения

$$S_{кр} = \pm \frac{r'_2}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x'_2)^2}} \quad (3.14)$$

Здесь знак плюс соответствует работе асинхронной машины в режиме двигателя.

Пренебрегая величиной сопротивления r_1 , которое обычно не превышает 10 ÷ 12% от $x_1 + x'_2$, получим простое выражение критического скольжения

$$S_{кр} = \pm \frac{r'_2}{x_1 + x'_2} \quad (3.15)$$

Подставив (3.14) в (3.12), получим формулу максимального электромагнитного момента асинхронного двигателя (Н·м)

$$M_{max} = \frac{m_1 p U_1^2}{4\pi f_0 [r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x'_2)^2}]} \quad (3.16)$$

При достижении электромагнитного момента максимального значения наступает предел устойчивой работы двигателя.

Следовательно, для устойчивой работы асинхронного двигателя необходимо, чтобы при скольжении $S < S_{кр}$ номинальный момент был меньше максимального.

В этом случае двигатель будет работать устойчиво не только при номинальной нагрузке, но будет способен выдерживать некоторые перегрузки, что необходимо для надежной работы двигателя в электроприводе. Другими словами, двигатель должен обладать **перегрузочной способностью**, которая определяется отношением максимального момента M_{max} к номинальному $M_{ном}$. Для асинхронных двигателей общего применения

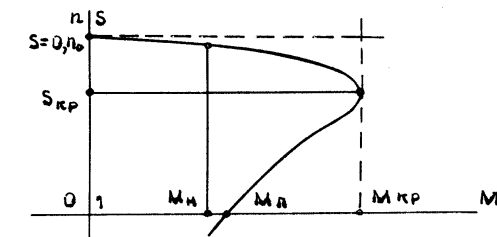


Рисунок IV-3.1

$$\frac{M_{max}}{M_{н}} = 1,7 \div 2,5.$$

Следует так же обратить внимание на то, что работа двигателя при скольжении $S < S_{кр}$, т.е. на рабочем участке механической характеристики, является наиболее экономичной, так как она соответствует малым значениям скольжения, а следовательно и меньшим значением электрических потерь в обмотке ротора $\Delta P_{эл2} = SP_{эм}$.

3.3 Влияние напряжения сети и активного сопротивления обмотки ротора на механическую характеристику асинхронного двигателя

Электромагнитный момент асинхронного двигателя, а также его пусковые и максимальное значение пропорциональны квадрату напряжения, подводимого к обмотке статора $M \equiv U_1^2$.

В то же время величина критического скольжения не зависит от напряжения U_1 . Это дает нам

возможность построить механические характеристики $M = f(S)$ для разных значений напряжения, из которых следует, что колебания напряжения U_1 относительно его номинального значения сопровождается не

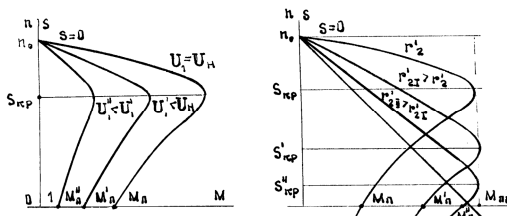


Рисунок IV-3.2

только изменениями максимального и пускового моментов, но и изменениями частоты вращения.

Как следует из (3.16), величина максимального момента двигателя не зависит от активного сопротивления r_2' . Что же касается критического скольжения $S_{кр}$, то

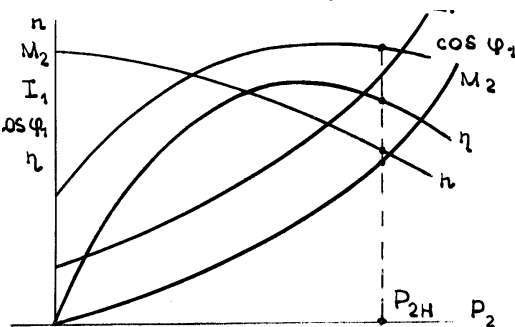


Рисунок IV-3.3

как это видно из (3.14), оно пропорционально сопротивлению r_2' .

Таким образом, если в асинхронном двигателе постепенно увеличивать активное сопротивление цепи ротора, то величина максимального момента будет оставаться неизменной, а критическое скольжение увеличится. При этом пусковой момент двигателя $M_п$ с увеличением сопротивления r_2' до некоторого значения увеличивается.

3.4 Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Рабочие характеристики асинхронного двигателя представляют собой зависимости частоты вращения n , коэффициента полезного действия η , полезного момента M_2 , коэффициента мощности $\cos \varphi_1$ и величины тока I_1 от полезной мощности P_2 при $U_1 = \text{const}$, $f = \text{const}$.

Скоростная характеристика $n = f(P_2)$. Из формулы скольжения (1.1) следует, что $n = n_0 \cdot (1 - S)$. Но в то же время согласно (3.5)

$$S = \frac{\Delta P_{\text{эл2}}}{P_{\text{эм}}} \quad (3.17)$$

т.е. скольжение двигателя, а следовательно его частота вращения, определяется отношением электрических потерь в роторе $\Delta P_{\text{эл2}}$ к электромагнитной мощности $P_{\text{эм}}$.

Пренебрегая электрическими потерями в обмотке ротора при работе двигателя без нагрузки, можно принять $\Delta P_{\text{эл2}} = 0$, поэтому $S \approx 0$, $n \approx n_0$. По мере увеличения нагрузки отношение (3.17) растет, достигая значений $0,01 \div 0,06$ при номинальной нагрузке. В соответствии с этим зависимость $n = f(P_2)$ представляет собой кривую, слабо наклоненную к оси абсцисс. Однако при увеличении активного сопротивления ротора r'_2 угол наклона этой кривой увеличивается. В этом случае изменения частоты вращения ротора при колебаниях нагрузки P_2 возрастают. Объясняется это тем, что с увеличением r'_2 возрастают электрические потери в роторе (3.3).

Зависимость $M_2 = f(P_2)$. Зависимость полезного момента на валу двигателя мощности P_2 определяется выражением

$$M_2 = \frac{P_2}{\omega} = \frac{60 \cdot P_2}{2 \cdot \pi \cdot n} \quad (3.18)$$

где P_2 - полезная мощность двигателя, Вт.

Из этого выражения следует, что если бы $n = \text{const}$, то график $M_2 = f(P_2)$ имел бы вид прямой. Но в асинхронном двигателе с увеличением P_2 частота вращения уменьшается, а поэтому полезный момент M_2 с увеличением нагрузки возрастает не-

сколько быстрее, чем P_2 , и, следовательно, график $M_2 = f(P_2)$ имеет криволинейный вид.

Зависимость $\cos \varphi_1 = f(P_2)$. В связи с тем, что ток статора имеет реактивную (индуктивную) составляющую, необходимо для создания магнитного поля статора, коэффициент мощности асинхронного двигателя меньше единицы. Наименьшее значение коэффициента мощности соответствует режиму х.х. Объясняется это тем, что величина тока х.х. I_0 при любой нагрузке остается практически неизменной. При малых нагрузках двигателя, когда ток ротора I_2' невелик, ток статора $I_1 = I_0 - I_2'$ в значительной части является реактивным и поэтому сдвинут по фазе относительно напряжения U_1 на угол φ_1 , который лишь немногим меньше 90° . Коэффициент мощности асинхронных двигателей в режиме х.х. обычно не превышает 0,2. При увеличении нагрузки двигателя растет активная составляющая тока I_1 . В этом случае коэффициент мощности возрастает, достигая наибольшей величины (0,80 ÷ 0,90) при нагрузке, близкой к номинальной.

Дальнейшее увеличение нагрузки сопровождается уменьшением $\cos \varphi_1$, что объясняется увеличением индуктивного сопротивления ротора ($x_2 \cdot S$) за счет увеличения скольжения, а следовательно, и частоты тока в роторе.

3.5 Генераторный и тормозной режим асинхронной машины

Двигательный режим для асинхронной машины является основным. Но возможны и другие режимы работы асинхронной машины - генераторный и тормозной.

Генераторный режим. Если ротор асинхронной машины, включенный в сеть, вращать при помощи первичного двигателя (ПД) в направлении вращающегося поля статора, но с частотой вращения $n > n_0$, то движение ротора относительно поля статора изменится (по сравнению с двигательным режимом этой машины), так как ротор будет обгонять поле статора. При этом скольжение станет отрицательным, э.д.с. E , наведенная в обмотке статора, увеличится и превысит напряжение сети, что приведет к изменению направления тока I_1 . В результате электромагнитный момент на роторе также изменит направление и станет **противодействующим** (по отношению к вращающему моменту первично-

го двигателя). В этих условиях асинхронная машина будет работать в генераторном режиме, преобразуя механическую энергию первичного двигателя в электрическую.

При генераторном режиме асинхронной машины скольжение может изменяться в диапазоне $-\infty < S < 0$, при этом частота э.д.с. асинхронного генератора остается неизменной, так как она определяется частотой вращения поля статора.

В генераторном режиме асинхронной машины условия создания вращающегося поля статора такие же, что и в двигательном режиме: и в том и в другом режимах обмотка статора включена в сеть с напряжением U_1 и потребляет из сети намагничивающий ток I_0 . Таким образом, асинхронная машина в генераторном режиме обладает особыми свойствами: она потребляет реактивную энергию из сети, необходимую для создания вращающегося поля статора, но отдает в сеть активную энергию, получаемую в результате преобразования механической энергии первичного двигателя. Работа асинхронных генераторов возможно лишь при их совместной работе с синхронными генераторами, которые в этом случае необходимы как источники реактивной энергии.

В отличие от синхронных асинхронные генераторы не подвержены опасностям выпадения из синхронизма.

Асинхронный генератор может работать и в автономных условиях, т.е. без включения в общую сеть. Но в этом случае для получения реактивной мощности, необходимой для намагничивания генератора, используют батарею конденсаторов, включенных параллельно нагрузке на выводы генератора.

Непременное условие автономной работы асинхронных генераторов наличие остаточного намагничивания стали ротора, что необходимо для процесса самовозбуждения генератора.

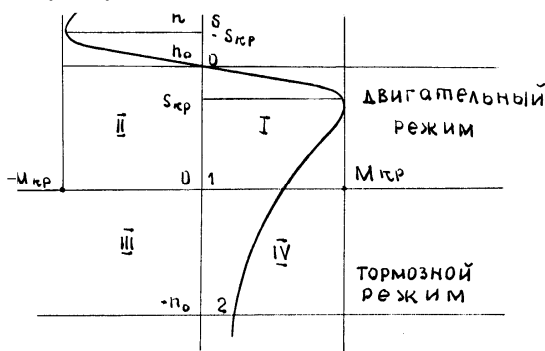


Рисунок IV-3.4

Тормозной режим. Этот режим работы асинхронной машины наблюдается в том случае, если вращающееся после машины и ее ротор вращаются в разные стороны. Например, этот режим можно наблюдать в следующих условиях: асинхронный двигатель вращает барабан, на который наматывается трос, поднимающий груз. Если постепенно увеличивать вес груза, то создаваемый им противодействующий момент сначала остановит ротор двигателя $S = 1$, а затем начнет вращать его в противоположную сторону, при этом электромагнитный момент двигателя, оставаясь прежним по направлению, окажется тормозящим, а скольжение будет возрастать, приобретая значения больше единицы:

$$S = \frac{n_0 - (-n_0)}{n_0} > 1$$

Кривая момента в тормозном режиме представляет собой продолжение кривой момента в двигательном режиме двигателя. Практически тормозной режим применяют при необходимости быстрой остановки ротора асинхронного двигателя. В этом случае переключением фаз на зажимах двигателя изменяют направление вращения магнитного поля, т.е. применяют **противовключение** двигателя, а так как ротор под действием сил инерции вращающихся масс продолжает вращаться в прежнем направлении, то электромагнитный момент становится тормозящим. Электрические потери в цепи ротора $\Delta P_{эл2} = S \cdot P_{эм}$ в тормозном режиме вращают электромагнитную мощность двигателя:

$$\Delta P_{эл2} \approx P_{эм} + P_{пн} \quad (3.19)$$

где $P_{пн}$ - мощность, развиваемая вращающимися по инерции массами ротора и исполнительного механизма.

3.6 Паразитные моменты в асинхронном двигателе

Каждая из гармоник создает в машине вращающееся магнитное поле, частота вращения которого в ν раз меньше частоты вращения поля основной гармоники. При этом высшие пространственные гармоники н.с. порядка $\nu = 6 \cdot k + 1$ создают **прямовращающиеся** (прямые) магнитные поля, а гармоники порядка $\nu = 6 \cdot k - 1$ **обратновращающиеся** (обратные) поля.

Асинхронные моменты. Магнитные поля от высших пространственных гармоник, взаимодействия с обмоткой ротора, наводят в ней э.д.с. и создают в двигателе собственные электро-

магнитные асинхронные моменты, которые называют **паразитными**, так как они ухудшают свойства электрической машины.

На рис. IV-3.5 представлены кривые моментов асинхронного двигателя $M_v = f(S)$ от прямого поля седьмой гармоники и обратного поля пятой гармоники, где S - скольжение ротора относительно поля основной гармоники.

Обратное поле пятой гармоники при $S = 0 \div 1$ создает отрицательный момент M_5 (тормозной режим); прямое поле седьмой гармоники при $0,857 < S < 1$ - положительный момент (двигательный режим), а при $S < 0,857$ - отрицательный момент (генераторный режим).

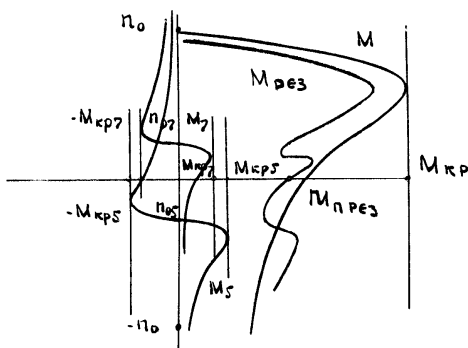


Рисунок IV-3.5

Сложив ординаты моментов M_7 и M_5 с ординатами момента M от поля основной гармоники, получим кривую результирующего асинхронного момента $M_{рез} = M + M_5 + M_7$.

Провалы кривой $M_{рез}$ (участок при $0,7 < S < 0,85$, на котором $M_{рез} < M_{кр}$ затрудняют процесс разгона двигателя и могут вызвать «застывание» ротора на малой частоте вращения.

Заметное влияние на форму кривой момента оказывают асинхронные моменты от гармоник поля зубцового порядка (обусловленных наличием зубцов на статоре и роторе):

$$v_{z1} = \frac{Z_1}{P} \pm 1; \quad v_{z2} = \frac{Z_2}{P} \pm 1 \quad (3.20)$$

Эффективным средством ослабления влияния высших гармоник поля является скос пазов ротора на одно зубцовое деление статора, так как в этом случае э.д.с. в стержнях ротора от зубцовых гармоник поля статора снижаются почти до нуля.

Действие высших гармоник поля также ослабляют правильным выбором числа пазов статора Z_1 и ротора Z_2 . Рекомендуется соотношение $Z_2 \leq 1,25 \cdot (Z_1 \pm P)$.

Синхронные моменты. Между магнитными полями высших гармоник статора и ротора, имеющими одинаковый порядок, возникают силы магнитного взаимодействия и на роторе появляется синхронный момент M_{cv} . В общем случае эти поля вращаются с разными частотами ($n_{v1} \neq n_{v2}$), а поэтому момент M_{cv} меняет свое направление в зависимости от взаимного расположения магнитных полюсов взаимодействующих полей. Обычно частота изменения знака M_{cv} велика, и из-за большой инерции ротора момент M_{cv} не оказывает заметного влияния на вращение. Но при некоторой частоте вращения ротора $n_2 = n_v$ поля высших гармоник статора и ротора вращаются с одинаковой частотой ($n_{v1} = n_{v2}$). В этом случае направление синхронного момента становится устойчивым. В зависимости от взаимного положения полюсов магнитных полей момент M_{cv} может оказаться положительным или отрицательным.

Синхронные моменты в асинхронном двигателе нежелательны, т.е. являются паразитными, так как они могут вызвать провалы в кривой результирующего момента. Наибольшего значения синхронные моменты достигают при наличии зубцовых гармоник поля статора и ротора одинакового порядка, т.е. при $v_{z1} = v_{z2}$. Из (3.20) следует, что это имеет место при $\frac{Z_1}{P} = \frac{Z_2}{P}$, т.е. синхронные моменты наиболее опасны при следующих соотношениях пазов статора Z_2 и ротора Z_2 :

$$Z_1 = Z_2; Z_1 - Z_2 = \pm 2P \quad (3.21)$$

Особенно нежелательно равенство $Z_1 = Z_2$, так как оно может привести к «прилипанию» ротора к статору: зубцы ротора силами магнитного притяжения удерживаются под зубцами статора. Уменьшению синхронных моментов также способствует скос пазов на роторе.

4. Круговая диаграмма асинхронного двигателя

4.1 Обоснование круговой диаграммы

При исследовании или расчете асинхронных машин их рабочие характеристики определяют при **помощи круговой диаграммы**, представляющей собой геометрическое место концов

вектор тока статора I_1 при различных нагрузках машины и разных режимах ее работы.

Рассмотрим электрическую цепь переменного тока, составленную из последовательно соединенных активного r и индуктивного x_L сопротивлений. Электрический ток I в этой цепи вызывает паде-

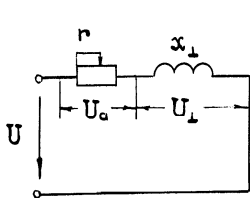
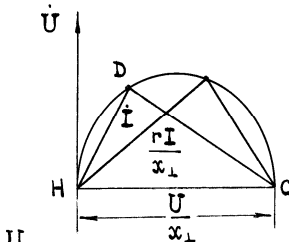


Рисунок IV-4.1



ние напряжения на ее участках, так что напряжение U имеет две составляющие: активную $U_a = r \cdot I$ и индуктивную $U_L = x_L \cdot I$. Изобразив эти напряжения векторами, получим треугольник напряжений. Если изменить величину активного сопротивления r , то изменится величина тока цепи, и катеты треугольника изменятся.

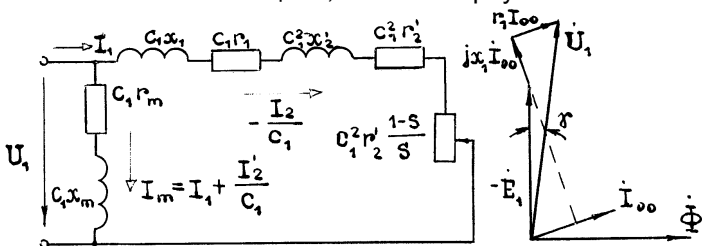


Рисунок IV-4.2

Но гипотенуза треугольника $\frac{U}{x_L}$ останется неизменной. Таким образом, новый режим работы электрической цепи будет определен на диаграмме положением точки D_1 . Если же активное сопротивление цепи изменять в широких пределах (от нуля до бесконечности), то вектор тока I будет занимать различные положения на диаграмме, описывая своим концом (точка D) окружность диаметром $\frac{U}{x_L} = \text{const}$. При $r = 0$ (нагрузка чисто индуктивная) точка D совместится с точкой C . При $r = \infty$ ток $I = 0$, а поэтому точка D совместится с точкой H . При любом промежуточном значении

D совместится с точкой C . При $r = \infty$ ток $I = 0$, а поэтому точка D совместится с точкой H . При любом промежуточном значении

сопротивления конец вектора тока I занимает различные положения на окружности, которую называют **окружностью токов**.

Схема замещения асинхронного двигателя с вынесенным намагничивающим контуром содержит две ветви: намагничивающую ветвь с током I_0 и главную (рабочую) с током $-I_2'$. Обе ветви работают как бы независимо друг от друга. Параметром намагничивающей ветви, содержащей постоянные сопротивления, определяется диаграммой, представленной на рис. IV-4.2.

Главная ветвь схемы замещения, подобно электрической схеме, содержит постоянное индуктивное сопротивление $x_1 + x_2'$ и переменное активное сопротивление $r_1 + \frac{r_2'}{S}$. Различные режимы

работы этой ветви при изменении скольжения S определяются положением вектора тока на диаграмме. Совмещением диаграмм намагничивающей и главной ветвей получают круговую диаграмму асинхронного двигателя, на которой ток статора I_1 равен геометрической сумме:

$$\vec{i}_1 = \vec{i}_0 + (-\vec{i}_2') = O\vec{N} + H\vec{D}$$

Диаметр окружности токов круговой диаграммы

$$H\vec{C} = \frac{U_1}{x_1 + x_2'}$$

При обосновании полученной круговой диаграммы исходят из предположения, что индуктивные сопротивления схемы замещения асинхронной машины (x_m, x_1, x_2') постоянны, т.е. не зависят от нагрузки машины. Однако это предположение приближено, а поэтому полученную круговую диаграмму называют *упрощенной*. Приближенность упрощенной круговой диаграммы для большинства случаев исследования и расчета асинхронных машин вполне допустима.

4.2 Построение упрощенной круговой диаграммы

Для построения круговой диаграммы асинхронной машины необходимо знать: напряжение сети (фазное) U_1 , ток х.х. (фазный) I_0 , угол сдвига фаз между током и напряжением в режиме х.х. φ_0 , ток к.з. $I_{1к}$, угол сдвига фаз между током и напряжением в режиме к.з. φ_k и активное сопротивление фазы обмотки статора r_1 . Для определения этих параметров обычно используют либо

результаты расчетов, либо данные опытов х.х. и к.з. асинхронного

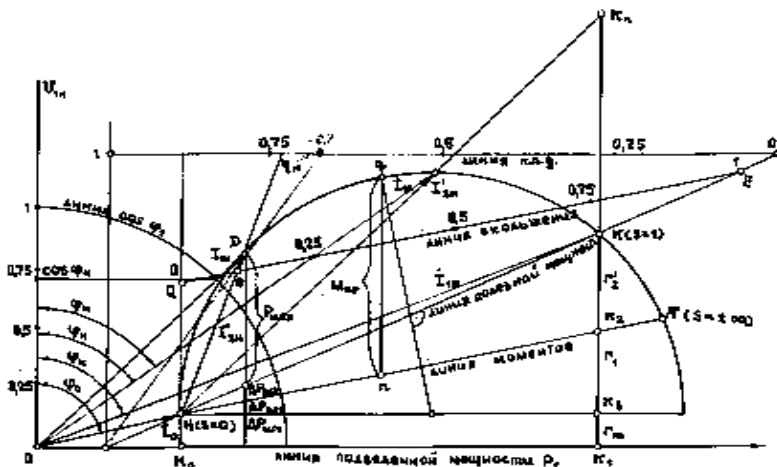


Рисунок IV-4.3

двигателя.

Опыт холостого хода.

При нормальном напряжении $U_{1н}$, подводимом к обмотке статора, по показаниям измерительных приборов определяют ток I_0 и мощность, а затем коэффициент мощности:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_{10}}{m_1 U_{1н} I_0} \tag{4.1}$$

Опыт короткого замыкания.

Опыт проводят при пониженном напряжении $U_{кз} = (0,15 \div 0,3) \cdot U_{1н}$. Ротор двигателя предварительно затормаживают. При напряжении $U_{1н}$, соответствующем номинальному току статора $I_{1н}$, по показанию ваттметров определяют мощность к.з. $P_{кз}$, а затем вычисляют

$$\cos \varphi_k = \frac{P_{кз}}{m_1 U_{1н} I_{1н}} \tag{4.2}$$

При номинальном подведенном напряжении $U_{1н}$ величина тока к.з.

$$I_{1кн} = I_{1к} \frac{U_{1н}}{1к} \quad (4.3)$$

Построение окружности токов.

Проведя оси координат, строят вектор напряжения $U_{1н}$. Затем, выбрав масштаб тока $m_i \frac{A}{мм}$ вектор \dot{I}_0 (под углом φ_0 к $\dot{U}_{1н}$) и вектор $\dot{I}_{1кн}$ (под углом φ_k к $\dot{U}_{1н}$), получают точки Н и К. Соединив эти точки прямой КН и проведя прямую НС (параллельно оси абсцисс), восстанавливают к середине НК перпендикуляр МН до пересечения с прямой НС. Из точки O_1 радиусом $O_1Н$ проводят окружность токов.

4.3 Применение упрощенной круговой диаграммы для определения параметров асинхронного двигателя

Токи.

Из точки О в масштабе токов (мм) отложим вектор тока статора \dot{I}_1 так, чтобы конец этого вектора (точка D) лежал на окружности токов $\overline{OD} = \frac{I_1}{m_i}$. Затем, соединив точку D с точкой Н, получим треугольник токов ODN, стороны которого определяют токи:

$$\dot{I}_0 = m_i \overline{OH}; \quad \dot{I}'_2 = m_i \overline{HD}; \quad \dot{I}_1 = m_i \overline{OD}$$

Кроме того, опустив перпендикуляр из точки D на ось абсцисс, получим прямоугольный треугольник ODa, из которого определяем активную и реактивную составляющие тока статора:

$$\dot{I}_{1а} = m_i \overline{Da}; \quad \dot{I}_{1р} = m_i \overline{Oa}$$

Подведенная мощность P_1 .

Известно, что $P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1$. Но так как $U_1 = \text{const}$, а $I_1 \cdot \cos \varphi_1 = I_{1а}$, то мощность P_1 пропорциональная активной составляющей тока статора ($P \equiv I_{1а}$).

На круговой диаграмме величина $I_{1а}$ определяется отрезком \overline{Da} , поэтому подведенная мощность:

$$P_1 = m_p \cdot \overline{Da}$$

где $m_p = m_1 \cdot U_{1н} \cdot m_i$ - масштаб мощности, Вт/мм.

Подведенную мощность отсчитывают от оси абсцисс, которую называют **линией подведенной мощности** P_1 , до заданной точки на окружности токов.

Полезная мощность P_2 .

Полезную мощность на круговой диаграмме отсчитывают по вертикали от окружности токов до прямой, соединяющей точки на окружности, в которых полезная мощность равна нулю. Одной из таких точек является точка х.х. Н, другой - точка к.з. К. Таким образом, линия МК является линией полезной мощности P_2 .

Для заданной точки на окружности токов $P_2 = m_p \cdot \bar{D}b$

Электромагнитная мощность и электромагнитный момент.

Величину электромагнитной мощности на круговой диаграмме определяют положением линии электромагнитной мощности $P_{эм}$. Для построения этой линии необходимо провести прямую через точки на окружности токов, в которых электромагнитная мощность (т.е. мощность, передаваемая вращающимся полем со статора на ротор) равную нулю. Такими точками являются Н и Т. Первая точка соответствует скольжению $S = 0$, вторая $S = \pm\infty$. Но если точка Н может быть получена по данным опыта х.х., то точку Т экспериментально получить нельзя. Поэтому линию электромагнитной мощности строим по точкам Н и K_2 , причем точку K_2 определяют делением отрезка KK_3 на две части в

отношении $\frac{K\bar{K}_3}{K_2K_3} = \frac{r_k}{r_1}$ где $r_k = \frac{P_k}{m_1 \cdot I_{1н}^2}$ - активное сопротивление

одной фазы двигателя при опыте к.з.; r_1 - активное сопротивление одной фазы обмотки статора.

Для данной точки D на окружности токов электромагнитная мощность

$$P_{эм} = m_p \cdot \bar{D}c$$

Электромагнитный момент двигателя

$$M = \frac{P_{эм}}{\omega_1} = \frac{30P_{эм}}{\pi n_0} = \frac{30m_p \cdot \bar{D}c}{\pi n_0}$$

или

$$M = m_m \cdot \bar{D}c$$

$$\text{где } m_m = \frac{30m_p}{\pi n_0} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{мм}}$$

$$\text{или } m_m = \frac{0,975m_p}{n_0} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{мм}} - \text{масштаб моментов.}$$

Линию НТ называют также **линией моментов М**.

Коэффициент мощности.

Для определения коэффициента мощности $\cos \varphi_1$, на оси ординат строят полуокружность произвольного диаметра. Тогда для заданной точки на окружности токов имеем $\cos \varphi_1 = \overline{On}/\overline{Of}$.

Для удобства расчетов целесообразно диаметр полуокружности принять равным 100 мм. В этом случае $\cos \varphi_1 = \frac{\overline{On}}{100}$.

Скольжение.

Скольжение S на круговой диаграмме определяют по шкале скольжения, для построения которой в точке на оси абсцисс восстанавливают перпендикуляр H_0Q проходящий через H . Затем из точки Q параллельно линии электромагнитной мощности проводят прямую QE до пересечения с продолжением линии полезной мощности. Отрезок QE делят на сто равных частей и получают шкалу скольжений. Для заданной точки D на окружности токов скольжение определяют продолжением линии HD до пересечения со шкалой скольжения в точке e . Соответствующая этой точке цифра на шкале скольжений выражает величину скольжения.

Участок шкалы QE , соответствующий дуге окружности токов H_0K , определяет скольжение для двигательного режима асинхронной машины ($0 < S < 1$); участок шкалы вправо от точки E , соответствующий дуге окружности токов KT , определяет скольжение для тормозного режима ($1 < S < \infty$); участок шкалы влево от точки Q , соответствующий дуге окружности токов, содержащей нижнюю половину окружности и отрезок TC верхней половины окружности, определяют скольжение для генераторного режима ($0 > S > -\infty$).

К.п.д. двигателя.

Известно, что $\eta = \frac{P_2}{P_1}$. На круговой диаграмме $P_2 = D b m_p$;

$$P_1 = D a m_p; \text{ тогда } \eta = \frac{\overline{D} b}{D a}.$$

Определение к.п.д. двигателя указанным способом дает погрешность, так как при этом не учитываются все виды потерь. Эта погрешность становится значительной для двигателей с к.п.д. превышающим 80% (двигатель мощностью свыше 1,5 кВт.) Поэтому к.п.д. асинхронных двигателей целесообразно определять по (3.8), используя результаты опытов х.х. и к.з.: сумма механических магнитных потерь в стали ротора

$$\Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{мг1}} = P_{01} - m_1 l_0^2 r_1 \quad (4.4)$$

Построение рабочих характеристик.

Задаваясь различными значениями токов статора, например $I_1 = (1/4; 2/4; 3/4; 1; 5/4) \cdot I_{1н}$ и отметив на окружности токов $D_1, D_2, D_3 \dots$ и т.д., определяют данные, необходимые для построения характеристик двигателя.

$$\eta, \cos \varphi_1, I_1, P_1 = f(P_2).$$

5. Асинхронные микромашины

5.1 Принцип действия однофазного асинхронного двигателя

При подключении двигателя к однофазной сети обмотка статора создает пульсирующее магнитное поле, которое можно разложить на два круговых поля, вращающихся в разные стороны с одинаковой частотой вращения n_0 . Если ротор двигателя неподвижен, то эти поля создают два равных и противоположно направленных вращающих момента, которые взаимно уравновешиваются, так что результирующий момент на роторе равен нулю.

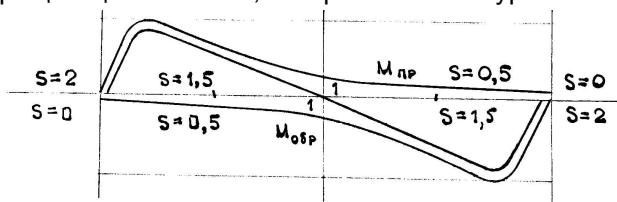


Рисунок IV-5.1

Допустим, ротор однофазного двигателя вращается в направлении одного из

круговых полей, называемого в этом случае прямым. Тогда скольжение относительно **прямого поля**

$$S_{\text{пр}} = \frac{n_0 - n}{n_0} \quad (5.1)$$

а относительно обратного поля

$$S_{\text{обр}} = \frac{-n_0 - n}{n_0} = \frac{n_0 + n}{n_0} \quad (5.2)$$

Прямое поле наводит в обмотке ротора э.д.с. $E'_{2\text{пр}}$, а обратное - э.д.с. $E'_{2\text{обр}}$. Эти э.д.с. создают в обмотке ротора токи $I'_{2\text{пр}}$ и $I'_{2\text{обр}}$. Известно, что частота тока в роторе пропорциональна скольжению: $f_2 = f_1 \cdot S$. Так как $S_{\text{пр}} < S_{\text{обр}}$, то частота тока $I'_{2\text{обр}}$ намного больше частоты тока $I'_{2\text{пр}}$. Так, для однофазного двигателя $n_0 = 1500$ об/мин, $n = 1450$ об/мин и $f_1 = 50$ Гц

$$S_{\text{пр}} = \frac{(1500 - 1450)}{1500} = 0,033 ; f_{2\text{пр}} = 0,033 \cdot 50 = 1,8 \text{ Гц}$$

$$S_{\text{обр}} = \frac{(1500 + 1450)}{1500} = 1,96 ; f_{2\text{обр}} = 1,96 \cdot 50 = 98 \text{ Гц}$$

Индуктивное сопротивление обмотки ротора току $I'_{2\text{обр}}$ во много раз больше ее активного сопротивления. Поэтому ток $I_{2\text{обр}}$ будет почти чисто реактивным (индуктивным), оказывающим сильное размагничивающее действие на обратное поле. В результате обратное поле двигателя и создаваемый им момент $M_{\text{обр}}$ значительно ослаблены и ротор двигателя в дальнейшем будет самостоятельно вращаться под действием электромагнитного момента

$$M = M_{\text{пр}} - M_{\text{обр}}$$

где $M_{\text{пр}}$ - момент от прямого поля.

При $S_{\text{обр}} = S_{\text{пр}} = 1$ моменты $M_{\text{пр}}$ и $M_{\text{обр}}$ равны, а поэтому вращающий пусковой момент однофазного двигателя равен нулю. Следовательно, **однофазный асинхронный двигатель не может самостоятельно прийти во вращение при подключении его к сети**, а нуждается в первоначальном толчке, так как лишь при $S < 1$ на ротор двигателя начинает действовать вращающий момент.

5.2 Пуск однофазного асинхронного двигателя

Для создания необходимого пускового момента однофаз-

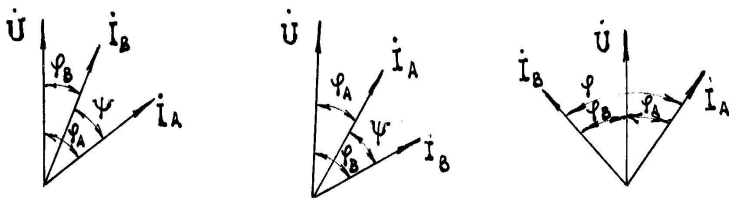


Рисунок IV-5.2

ный двигатель снабжают пусковой обмоткой. Эту обмотку размещают в оставшейся незаполненной $\frac{1}{3}$ пазов статора таким образом, чтобы ее н.с. была сдвинута на 90 эл. град относительно н.с. рабочей (основной) обмотки статора. Кроме того, в цепь пусковой обмотки включают фазосмещающий элемент (ФЭ), что необходимо для создания фазного сдвига между токами в рабочей \dot{i}_A и пусковой \dot{i}_B обмотках. В качестве ФЭ могут применять активное сопротивление, индуктивность или емкость. После того как ротор двигателя разгонится до частоты вращения, близкой к установившейся, пусковую обмотку исключают.

Для получения вращающегося поля посредством двух обмоток на статоре, смещенных в пространстве относительно друг друга на угол 90 эл. град, необходимо соблюдать следующие условия: н.с. рабочей F_A и пусковой F_B обмоток должны быть равны и сдвинуты в пространстве относительно друг друга на 90 эл. град; токи в обмотках статора \dot{i}_A и \dot{i}_B должны быть сдвинуты по фазе относительно друг друга на 90° . При строгом соблюдении указанных условий вращающееся поле статора является круговым, что соответствует наибольшему значению электромагнитного момента. При нарушении какого-либо из указанных выше условий вращающееся поле становится эллиптическим, состоящим из двух не равных по величине, вращающихся в разные стороны круговых полей: прямого и обратного. Обратное вращающееся поле создает на роторе тормозной момент и ухудшает рабочие свойства двигателя. Активное сопротивление или индуктивность не обеспечивают фазового сдвига ψ между токами в обмотках

статора \dot{i}_A и \dot{i}_B в 90° . Лишь только емкость C в качестве ФЭ обеспечивает $\psi = 90^\circ$. Величину этой емкости выбирают такой, чтобы ток пусковой обмотки в момент пуска двигателя ($S = 1$) опережал по фазе напряжение на угол φ_B , дополняющий угол φ_A до 90 : $\psi = \varphi_A + \varphi_B = 90^\circ$.

5.3 Асинхронные конденсаторные двигатели

Асинхронный конденсаторный двигатель имеет на статоре две обмотки, занимающие одинаковое число пазов и сдвинутые в

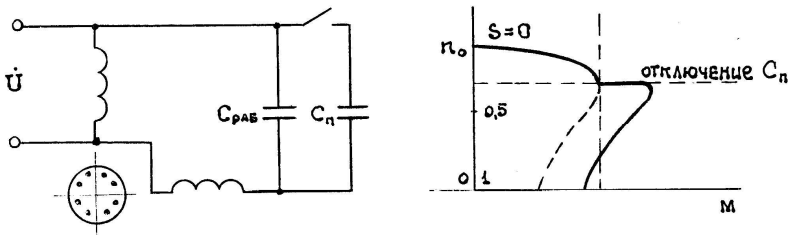


Рисунок IV-5.3

пространстве относительно друг друга на угол 90 эл. град. Ротор двигателя делают короткозамкнутым. Одну из обмоток статора - главную - включают непосредственно в однофазную сеть а другую - вспомогательную - включают в эту же сеть, но через **рабочий** конденсатор C .

В отличие от рассмотренного ранее однофазного асинхронного двигателя в конденсаторном двигателе вспомогательная обмотка после пуска не отключается и остается включенной в течении всего процесса работы двигателя. Емкость C в цепи вспомогательной обмотки создает сдвиг по фазе между токами \dot{i}_A и \dot{i}_B .

Таким образом, если однофазный асинхронный двигатель по окончании процесса пуска работает с пульсирующей н.с. статора, то конденсаторный электродвигатель - с вращающейся н.с. статора. Поэтому конденсаторные асинхронные двигатели по своим свойствам приближаются к трехфазным асинхронным двигателям. Емкость $C_{\text{раб}}$ обеспечивает получение кругового вращающегося поля лишь при одном, вполне определенном режиме работы двигателя, иначе меняются \dot{i}_A и \dot{i}_B . Таким образом, при

отклонениях режима работы двигателя от расчетного вращающееся поле становится **эллиптическим** и рабочие свойства двигателя ухудшаются. Чаще всего конденсаторные двигатели рассчитывают так, чтобы круговое вращающееся поле при номинальной или близкой к ней нагрузке.

Конденсаторные двигатели имеют сравнительно высокий к.п.д. и коэффициент мощности ($\cos \varphi = 0,8 \div 0,95$). Однако пусковые свойства двигателя неудовлетворительны. Дело в том, что при пуске в ход магнитное поле двигателя эллиптическое, так как круговое вращающееся поле возникает лишь при определенной нагрузке. Поэтому пусковой момент конденсаторного двигателя с рабочей емкостью обычно не превышает 50% номинального. Для повышения пускового момента конденсаторного двигателя в схему включают два конденсатора. *Пусковой* конденсатор $C_{\text{пуск}}$ включают лишь во время пуска. Величину емкости $C_{\text{пуск}}$ выбирают из условия получения наибольшего пускового момента. После разгона ротора конденсатор $C_{\text{пуск}}$ следует отключить, как так при небольших скольжениях в цепи обмотки, содержащей C и L , возможен резонанс напряжений или состояние, близкое к резонансу. В результате напряжение на конденсаторе $C_{\text{пуск}}$ и в обмотках статора в 2 раза превышает напряжение сети.

5.4 Работа трехфазного асинхронного двигателя от однофазной сети

На практике иногда возникает необходимость применения трехфазного асинхронного двигателя для работы от однофазной сети.

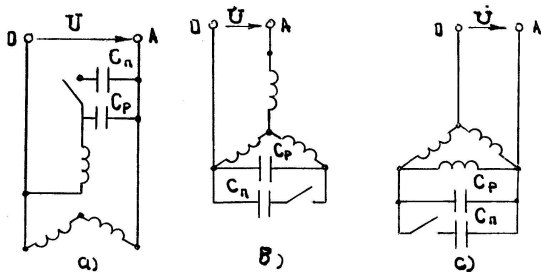


Рисунок IV-5.4

В этом случае трехфазный двигатель используют как конденсаторный, включив его по одной из схем, отображенных на рис. IV-5.4.

Величину рабочей емкости $C_{\text{раб}}$ (мкФ) при

промышленной частоте (50 Гц) можно ориентировочно определить по одной из эмпирических формул:

$$\text{для схемы рис. а) } C_p = 2700 \cdot I_{1H} / U_H ;$$

$$\text{для схемы рис. б) } C_p = 2800 \cdot I_{1H} / U_H ;$$

$$\text{для схемы рис. в) } C_p = 4800 \cdot I_{1H} / U_H ;$$

При подборе рабочей емкости необходимо следить за тем, чтобы величина тока в обмотке статора при установившемся режиме работы с требуемой нагрузкой на валу не превышала номинального значения, указанного в паспорте двигателя. Если пуск двигателя осуществляется в холостую или с небольшой нагрузкой на валку, то пусковая емкость не требуется. Если же двигатель пускается в ход со значительной нагрузкой на валу, то пусковая емкость $C_{\text{пуск}}$ необходима. Величину этой емкости принимают $C_{\text{пуск}} = (2,5-3) C_{\text{раб}}$. В этом случае пусковой момент становится близким к номинальному. При необходимости дальнейшего увеличения пускового момента $C_{\text{пуск}}$ следует увеличивать до (6-8)

$C_{\text{раб}}$. При использовании трехфазного двигателя в одном конденсаторном режиме его полезная мощность не превышает 70-80% номинальной мощности при его работе от трехфазной сети,

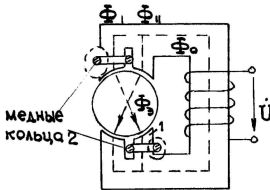
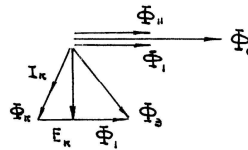


Рисунок IV-5.5



а при однофазном режиме с отключением одной фазной обмотки (без ФЭ) полезная мощность двигателя не превы-

шает 60% от мощности в трехфазном режиме.

5.5 Однофазный двигатель с экранированными полюсами

Для создания пускового вращающего момента в однофазных двигателях малой мощности (5-25 Вт) применяют конструкцию с **явно выраженными** экранированными полюсами, на которых располагают однофазную обмотку.

Полюса 1 имеют расщепленную на две части конструкцию, причем на одну из частей каждого полюса надет **короткозамкну-**

ТЫЙ ВИТОК (экран) в виде медного кольца 2. Ротор двигателя имеет обычную короткозамкнутую конструкцию. При подключении обмотки статора к сети под действием создаваемого ею магнитного потока в короткозамкнутом витке возникает ток, препятствующий нарастанию потока и вызывающий фазовый сдвиг в этой части полюса. В результате потоки в обеих частях каждого полюса оказываются сдвинутыми по фазе относительно друг друга, что в свою очередь приводит к образованию в двигателе вращающегося магнитного поля. Для улучшения пусковых и рабочих характеристик двигателя часто между полюсами помещают магнитные шунты в виде отдельных пластинок.

Однофазные двигатели с явно выраженными полюсами обычно применяют в устройствах (в небольших вентиляторах, электропроигрывателях и т.п.), не требующих больших пусковых моментов.

5.6 Асинхронный исполнительный двигатель

Асинхронные исполнительные двигатели (ИД) применяют в устройствах автоматики.

Они предназначены для преобразования электрических сигналов в механическое перемещение. На статоре такого двигателя расположена трехфазная обмотка. Одна из фазных обмоток - обмотка возбуждения ОВ - постоянно включена в сеть с напряжением U_1 ,

а на другую - обмотку управления ОУ - напряжение (сигнал управления) U_c подается лишь при необходимости приве-

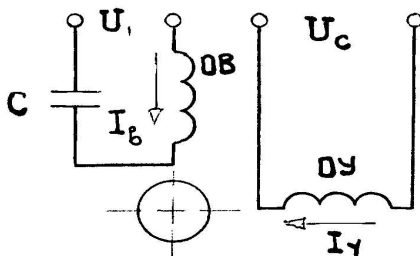


Рисунок IV-5.6

дения ротора двигателя во вращение.

Одно из основных требований, предъявляемых к ИД - отсутствие самохода. Известно, что обычные асинхронные двигатели имеют небольшое активное сопро-

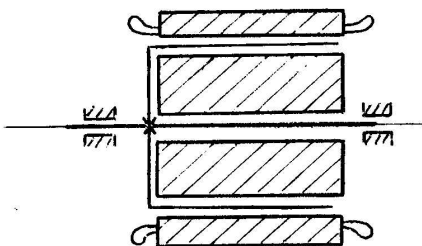


Рисунок IV-5.7

тивление обмотки ротора, т.е. работают с малым критическим скольжением. Такие двигатели нельзя использовать в качестве исполнительных, так как у них имеет место самоход, т.е. при снятии сигнала управления двигатель будет продолжать работать как однофазный.

Если увеличить активное сопротивление ротора, то форма кривых прямого $M_{пр}$, обратного $M_{обр}$ и результирующего $M = M_{пр} + M_{обр}$ моментов изменится: максимумы моментов $M_{пр}$ и $M_{обр}$ сместятся в область больших скольжений ($S_{кр} > 1$). Теперь после прекращения сигнала управления, т.е. при переходе двигателя в однофазный режим, электромагнитный момент становится отрицательным M_T и оказывает на ротор тормозящее действие, устраняя самоход.

К исполнительным двигателям предъявляют также требованием **малоинерционности** (быстродействия), т.е. чтобы при подаче сигнала управления ротор двигателя как можно быстрее достигал установившейся скорости.

В этом случае применяют асинхронные двигатели с *полым ротором*, представляющим собой тонкостенный алюминиевый стакан, что обеспечивает повышенное активное сопротивление ротора, устранение самохода и малый момент инерции ротора.

Двигатель имеет два статора: внешний и внутренний без обмотки, входящий внутрь полюса ротора. Внутренний статор необходим для уменьшения магнитного сопротивления основному потоку.

5.7 Способы управления исполнительными двигателями

Различают три основных метода изменения напряжения на обмотке управления, т.е. три способа управления скоростью вращения исполнительного двигателя: амплитудное, фазовое и амплитудно-фазовое управление.

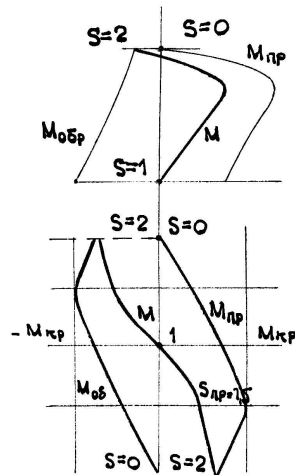


Рисунок IV-5.8

При **амплитудном управлении** изменяется только величина напряжения управления или пропорциональное ей действующее значение U_y этого напряжения. Величина напряжения управления может быть оценена коэффициентом сигнала

$$\alpha = \frac{U_y}{U_B} \quad (5.3)$$

Векторы напряжений управления и возбуждения при всех значениях коэффициента α образуют угол 90° .

Фазовое управление характерно тем, что напряжение управления U_y остается неизменным по величине, а регулирование скорости достигается изменением угла сдвига фаз β между векторами напряжений возбуждения и управления. В качестве коэффициента сигнала при фазовом управлении принимается величина, равная синусу угла сдвига фаз между векторами напряжений U_y и U_B , т.е. $\alpha = \sin \beta$.

При **амплитудно-фазовом управлении** изменяются как амплитуда напряжения, так и угол сдвига фаз между напряжениями U_y и U_B , подаваемыми на обмотки статора. Этот способ осуществляется практически путем включения в цепь обмотки возбуждения конденсатора, поэтому схема амплитудно-фазового управления частот называется **конденсаторной**.

Во всех методах управления скорость асинхронного двигателя изменяется за счет создания несимметричного эллиптического магнитного поля, которое можно представить в виде двух круговых вращающихся полей прямой и обратной последовательностей. Изменение напряжения на обмотке управления по величине или фазе приводит к изменению соотношений между амплитудами потоков прямой и обратной последовательностей. В связи с этим меняется вид механической характеристики, а следовательно, и скорость вращения ротора двигателя. Требования, предъявляемые к исполнительным двигателям. К исполнительным двигателям, работающим в автоматических устройствах, предъявляются ко всем машинам (малые габариты и вес, дешевизна, высокий к.п.д., надежность работы и т.д.), предъявляются и специфические требования, главными из которых являются: управляемость двигателя при всех режимах работы (отсутствие самохода), линейность механических и регулировочных характеристик, высокое быстродействие, бесшумность работы, малая

мощность управления, отсутствие радиопомех и т.п. Указанные специфические требования являются определяющими и заставляют в ряде случаев отказываться от традиционных конструкций машин общего применения, что ведет к увеличению габаритных размеров и веса, уменьшению к.п.д. и пр.

5.8 Асинхронный тахогенератор

Тахогенераторы применяются в автоматических устройствах для преобразования механического вращения в электрический сигнал. В идеальном случае тахогенератор должен давать на выходе напряжение, пропорциональное скорости вращения:

$$U = kn \quad (5.4)$$

или

$$U = k \frac{d\theta}{dt} \quad (5.5)$$

где n - скорость вращения, об/мин;

θ - угол, на который переместился механизм.

Зависимость $U = f(n)$ в тахогенераторе является основной и называется **выходной характеристикой**.

Тахогенераторы служат главным образом для следующих целей:

измерения скорости вращения;

выработки ускоряющих и замедляющих сигналов;

выполнение операции дифференцирования.

Главным требованием является по возможности строгая пропорциональность между скоростью вращения и выходным электрическим сигналом.

Помимо основного требования к линейности выходной характеристики, к тахогенераторам предъявляются и другие требования, главные из которых: надежность работы в широком диапазоне изменения температуры и влажности, при вибрациях и ударных нагрузках; высокое быстродействие; простота устройства; малые размеры и вес; бесшумность и отсутствие радиопомех.

Наиболее полно этим требованиям удовлетворяет асинхронный тахогенератор с полым немагнитным ротором.

Конструкция асинхронного тахогенератора аналогична конструкции асинхронного исполнительного двигателя с полным немагнитным ротором. Так как активное сопротивление полого ротора во много раз больше индуктивного, то э.д.с. e_r и вызываемый ею в роторе ток i_r практически совпадают по фазе. При этом

условии создаваемая током i_T намагничивающая сила ротора F_{d2} будет действовать по продольной оси машины. Поскольку для обмотки возбуждения справедливо условие $U_B - E_B = 0$, то при возникновении н.с. роторов F_{d2} в обмотке возбуждения появляется компенсирующий ток (аналогично тому, как в трансформаторе), н.с. $F_{вд}$ которого компенсирует действие н.с. F_{d2} .

При вращении ротора каким-либо посторонним механизмом в его элементарных проводниках, помимо трансформаторной э.д.с. индуцируется еще и э.д.с. вращения e_B :

$$e_B = B \cdot l \cdot v \quad (5.6)$$

где B - индукция в воздушном зазоре в рассматриваемой точке в данное мгновение;

l - длина ротора в магнитном поле;

v - окружная скорость ротора.

Поскольку поток Φ_d пульсирует во времени с частотой сети f , то и индуцируемые им э.д.с. e_B также будут пульсировать с этой же частотой. При синусоидальном распределении индукции B вдоль окружности ротора максимальное значение э.д.с. e_B в любой момент времени будет иметь место в элементарном проводнике, расположенном по продольной оси машины.

При любой скорости вращения направление э.д.с. в элементах ротора, расположенного по обе стороны от поперечной оси, будет противоположным. Если пренебречь индуктивным сопротивлением полого ротора, то направление тока i_B в каждом элементе будет совпадать с направлением э.д.с. e_B . При этом условия токи ротора i_B будут создавать намагничивающую силу F_{q2} и пульсирующий магнитный поток Φ_q , которые будут направлены по поперечной оси. Поток не сцеплен непосредственно с обмоткой возбуждения; в выходной обмотке Γ он индуцирует э.д.с.

$$E_\Gamma = 4,44f_1 W_\Gamma K_{об\Gamma} \Phi_{qm} \quad (5.7)$$

где W_Γ и $K_{об\Gamma}$ - число витков и обмоточный коэффициент выходной обмотки.

Очевидно, что частота э.д.с. в выходной обмотке не зависит от скорости вращения ротора и при любых условиях равна частоте изменения э.д.с. e_B в роторе, т.е. частоте сети f_1 , питающей

обмотку возбуждения. Неизменность частоты выходного напряжения является ценным свойством асинхронного генератора.

5.9 Поворотные трансформаторы

Поворотными трансформаторами называют электрические микромашины переменного тока, преобразующие угол поворота ротора α в напряжение, пропорциональное некоторым функциям этого угла или самому углу. В зависимости от закона изменения напряжения на выходе машины они подразделяются на следующие типы:

- синусно-косинусный трансформатор, позволяющий получать на выходе два напряжения, одно из которых пропорционально $\sin \alpha$, а другое $\cos \alpha$;

- линейный поворотный трансформатор, выходное напряжение которого пропорционально углу α ;

- трансформатор-построитель, выходное напряжение которого связано с подаваемыми напряжениями U_1 и U_2 формулой

$$U_{\text{вых}} = c \cdot \sqrt{U_1^2 + U_2^2}$$

где C - постоянная.

Для получения поворотных трансформаторов различных типов может быть использована одна и та же машина с двумя обмотками на статоре и двумя на роторе при различных способах включения обмоток.

Поворотные трансформаторы широко применяются в автоматических и вычислительных устройствах, предназначенных для решения геометрических и тригонометрических задач, связанных с выполнением различных математических операций, построением треугольников, преобразованием координат, разложением и построением векторов и пр. В системах автоматического регулирования они используются в качестве измерителей рассогласования, фиксирующих отклонение системы от некоторого заданного положения. Конструктивно поворотный трансформатор выполняется также как асинхронный двигатель с фазным ротором. На статоре и роторе размещаются по две одинаковые однофазные распределенные обмотки, сдвинутых между собой в пространстве на 90° . Магнитопровод изготовляют из листов электротехнической стали или пермаллоя, изолированных друг от друга.

Синусно-косинусный поворотный трансформатор.

Рассмотрим работу поворотного трансформатора при подключении к синусной обмотке S некоторой нагрузки Z_{HS} . В этом случае по обмотке S будет протекать ток

$$I_{HS} = \frac{E_S}{Z_S + Z_{HS}} \quad (5.8)$$

где Z_S - сопротивление обмотки S, которое будем считать постоянным.

Ток I_{HS} создает н.с. ротора, максимальное значение которой

$$F_S = \sqrt{2} I_{HS} W_2 K_{об2} \quad (5.9)$$

ось этой н.с. совпадает с осью фазы S поэтому ее можно представить в виде векторной суммы двух составляющих:

$F_{sd} = F_S \cdot \sin \alpha$ продольной
и $F_{sq} = F_S \cdot \cos \alpha$ поперечной

Продольная составляющая F_{sd} создает в обмотке возбуждения B компенсирующий ток, н.с. которого F_s , так же как и в обычном трансформаторе, компенсирует действие F_{sd} . Результирующий продольный поток Φ_d индуцирует в обмотке S э.д.с.

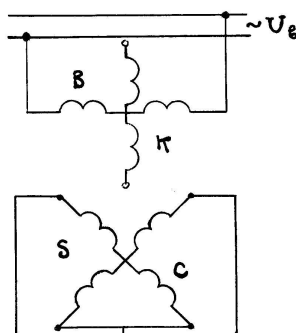


Рисунок IV-5.9

$$E_{sd} = K E_B \sin \alpha \quad (5.10)$$

Поперечная составляющая F_{sq} создает в поворотном трансформаторе поперечный поток Φ_q .

По отношению к поперечному потоку Φ_q обмотка S является косинусной и, следовательно, в ней индуцируется э.д.с.

$$E_{sq} = 4,44 f_1 W_2 K_{об2} \Phi_{qm} \cos \alpha = K E_B \cos \alpha \quad (5.11)$$

Линейный поворотный трансформатор.

При любом включении обмоток поворотного трансформатора уравнение, связывающее его выходное напряжение с углом поворота α ротора,

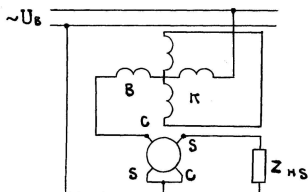


Рисунок IV-5.10

будет содержать функции $\sin \alpha$ и $\cos \alpha$.

Широкий диапазон изменения угла, в пределах которого выходная характеристика может с достаточной точностью считаться линейной, можно получить, если выходное напряжение представить в виде функции

$$U_{\text{вых}} = c \frac{\sin \alpha}{1 + k \cos \alpha}$$

При $k = 0,52 \div 0,56$ отклонение этой функции от линейной зависимости составляет примерно 0,1% в диапазоне изменения угла α от -55 до +55. Для получения указанной зависимости могут быть применены две схемы соединения обмоток поворотного трансформатора: с первичным симметрированием (на статоре) и со вторичным симметрированием (на роторе).

Трансформатор-построитель.

Трансформатор-построитель может быть использован для определения гипотенузы прямоугольного треугольника по двум заданным катетам. В этом трансформаторе обмотки статора В и К присоединяются к одной и той же однофазной сети через потенциометры, посредством которых на них подаются различной величины U_B и U_K . Одна из роторных обмоток, например, S является выходной.

На статоре в пазах уложены две обмотки, сдвинутые в пространстве на 90° . Одна из обмоток В (возбуждения) постоянно включена в сеть, другая обмотка Г (генераторная) присоединяется к нагрузке, т.е. является выходной.

По обмотке возбуждения В, подключенной к сети, проходит переменный ток, благодаря чему создается магнитный поток Φ_d , пульсирующий с частотой

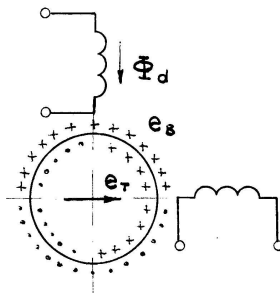


Рисунок IV-5.11

сети f . Этот поток распределен в пространстве практически синусоидально и ось его совпадает с осью обмотки возбуждения, называемой **продольной осью**; поэтому поток, создаваемый обмоткой возбуждения называется **продольным**. Рассмотрим, какие э.д.с. и токи при взаимодействии этого потока с ротором и обмотками статора при неподвижном и вращающемся роторе.

При неподвижном роторе магнитный поток Φ_d пересекает обмотку возбуждения В, индуцируя в ней э.д.с.

$$E_B = 4,44f_1 W_B K_{об.в} \Phi_{dm} \quad (5.6)$$

где $W_B \cdot K_{об.в}$ - число витков и обмоточный коэффициент обмотки возбуждения.

Пренебрегая активным сопротивлением, обусловленным потоками рассеяния, для обмотки возбуждения можно написать обычное уравнение

$$\dot{U}_B + \dot{E}_B = 0$$

Поскольку выходная обмотка Г расположена со сдвигом на 90 по отношению к обмотке возбуждения, продольный магнитный поток непосредственно индуцировать э.д.с. в выходной обмотке не может, так как он не сцеплен с ней. Следовательно, будет равно нулю и напряжение на нагрузке. Однако практически точной магнитной симметрии осей указанных обмоток достигнуть невозможно. Поэтому часть потока оказывается трансформаторно связанной с выходной обмоткой Г и индуцирует в ней э.д.с., называемую **остаточной**.

В каждом элементарном проводнике полого ротора пульсирующий поток индуцирует э.д.с. e_T , называемую **трансформаторной** и присоединяется к измерительному прибору V, а другая С - к управляющей обмотке исполнительного двигателя ИД.

Обмотки статора В и К создают в трансформаторе результирующий магнитный поток.

Если машина не насыщена, то величина результирующего потока

$$\Phi_{рез.м} = \sqrt{\Phi_{dm}^2 + \Phi_{qm}^2} = \frac{1}{4,44 W_1 K_{об1} f} \sqrt{U_B^2 + U_K^2} \quad (5.12)$$

В обмотке ротора С результирующий поток $\Phi_{рез}$ индуцирует э.д.с.

$$E_C = 4,44f W_2 K_{об2} \Phi_{рез.м} \cos \gamma \quad (5.13)$$

где γ - угол между осью обмотки С и осью результирующего потока.

Э.д.с. Е подается на управляющую обмотку исполнительного двигателя ИД, который вращает ротор поворотного трансформатора до тех пор, пока э.д.с. Е не станет равной нулю. Таким образом, ротор остановится, когда

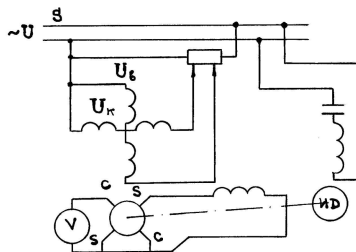


Рисунок IV-5.12

угол γ станет равным 90^0 .

В выходной обмотке S результирующий поток индуцирует э.д.с.

$$E_s = 4,44fW_2K_{об2}\Phi_{резм} \sin\gamma$$

При неподвижном роторе ($\gamma = 90^0$) имеем

$$U_{вых} \approx E_{sm} = 4,44fW_2K_{об2}\Phi_{резм} = K\sqrt{U_B^2 + U_K^2}.$$

Таким образом, измерительный прибор, присоединенный к обмотке S , при неподвижном роторе показывает напряжение, пропорциональное гипотенузе прямоугольного треугольника, катеты которого пропорциональны.

5.10 Сельсины

Электрические машины синхронной связи служат для синхронного и синфазного поворота или вращения двух или нескольких осей, механически не связанных между собой. В простейшем случае синхронная передача угла (синхронная связь) осуществляется с помощью двух одинаковых электрически соединенных между собой индукционных машин, называемых **сельсинами** (от слов **self synchronizing** - самосинхронизирующийся). Одна из этих машин механически соединяется с ведущей осью и называется приемником.

Сельсины имеют две обмотки: первичную, или обмотку возбуждения, и вторичную, или обмотку синхронизации. В зависимости от числа фаз обмотки возбуждения различают однофазные и трехфазные сельсины; обмотка синхронизации в обоих типах сельсинов обычно выполняется по типу трехфазной. В системах автоматики преимущественно применяются однофазные сельсины.

Однофазные сельсины могут быть выполнены контактными и бесконтактными. В контактных сельсинах одна из обмоток расположена на статоре, а другая - на роторе. Принцип действия сельсина не зависит от места расположения каждой из обмоток. Однако чаще всего применяют сельсины, у которых обмотка возбуждения расположена на роторе, а обмотка синхронизации - на статоре. Такие сельсины более надежны в работе и имеют большую точность.

Однофазный сельсин представляет собой асинхронную машину, в которой обмотка возбуждения создает пульсирующий магнитный поток. Этот поток индуцирует в трех фазах обмотки

синхронизации э.д.с., величина которых зависит от угла поворота ротора θ . При повороте ротора взаимдуктивность между обмотками возбуждения и каждой из фаз обмотки синхронизации плавно изменяется по закону косинуса, вследствие чего э.д.с., индуцируемая в этих фазах, пропорциональна $\cos\theta$. Следует отметить, что э.д.с., индуцированные во всех трех фазах обмотки синхронизации, имеют одну и ту же временную фазу, поэтому более правильно было бы назвать их не фазами, а лучами. Однако в дальнейшем будем употреблять более распространенный термин «фаза».

Различают два основных режима работы сельсинов: индикаторный и трансформаторный.

Индикаторный режим применяют в том случае, когда к ведомой оси приложен весьма малый момент сопротивления (когда ось нагружена стрелкой или шкалой).

Трансформаторный режим применяют тогда, когда к ведомой оси приложен значительный момент сопротивления, т.е. когда приходится проворачивать какой-либо механизм. В этом случае сельсин-приемник обрабатывает заданный угол не самостоятельно, а с помощью электрически и механически связанного с ним исполнительного двигателя.

Трансформаторный режим работы однофазных сельсинов.

При работе сельсинов в трансформаторном режиме обмотка возбуждения сельсина-датчика СД, механически связанного с ведущей осью O_1 , подключается к сети однофазного тока, а обмотка возбуждения сельсина-приемника СП- к усилителю У, подающему питание на обмотку управления исполнителя двигателя ИД. Обмотки синхронизации обоих сельсинов соединяются между собой линией связи ЛС.

Переменный ток, исходящий по обмотке возбуждения сельсина-датчика, создает в нем пульсирующий магнитный поток, который индуцирует э.д.с. в трех фазах обмотки синхронизации. Так как обмотки синхронизации

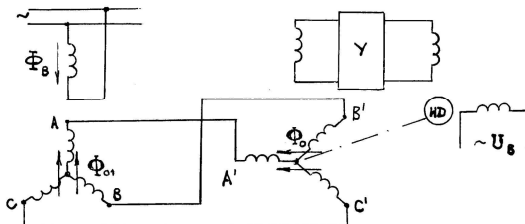


Рисунок IV-5.13

датчика и приемника соединены между собой линией связи, то по ним будет протекать ток, вследствие чего в сельсине-приемнике создается свой пульсирующий магнитный поток. Направление оси этого потока зависит от углового положения ротора.

Если при этом в сельсине-приемнике возникает продольная составляющая потока, то она индуцирует в его обмотки возбуждения некоторую э.д.с., т.е. на зажимах этой обмотки возникает некоторое выходное напряжение. Это напряжение подается через усилитель на обмотку управления исполнительного двигателя, который поворачивает ведомую ось **О** совместно с ротором сельсина-приемника. Когда ось магнитного потока, создаваемого ротором сельсина-приемника, будет перпендикулярна к оси обмотки возбуждения, выходное напряжение станет равным нулю и вращение ведомой оси прекратится.

Таким образом, для работы рассмотренной системы необходимо, чтобы ток в роторе сельсина-приемника создавал продольную составляющую магнитного потока. В согласованном положении роторов продольная составляющая потока должна отсутствовать.

Индикаторный режим работы однофазных сельсинов.

При индикаторном режиме на валу сельсина-приемника имеется незначительный момент сопротивления, поэтому для поворота ротора приемника вслед за поворотом ротора датчика требуется небольшой вращающий момент, который может быть получен от самого сельсина-приемника без дополнительных устройств. При работе сельсинов в рассматриваемом режиме обмотки возбуждения В сельсина-датчика СД и сельсина-приемника СП включены в общую сеть переменного тока, а обмотки синхронизации соединены между собой линией связи ЛС. Пульсирующие магнитные потоки, создаваемые обмотками возбуждения датчика и приемника, индуцируют в трех фазах обмоток синхронизации э.д.с. Если между ротором датчика и приемника имеется некоторый угол рассогласования θ , то по обмоткам синхронизации будут протекать токи, которые, взаимодействуя с потоком возбуждения, создают в датчике и приемнике синхронизирующие моменты. Эти моменты имеют противоположные направления и стремятся свести к нулю угол рассогласования. Обычно ротор датчика заторможен, поэтому его синхронизирующий момент воспринимается механизмом, поворачивающим ведущую ось; синхронизирующий же момент приемника поворачивает его ротор

в ту же сторону и на тот же угол, на который поворачивается ротор датчика.

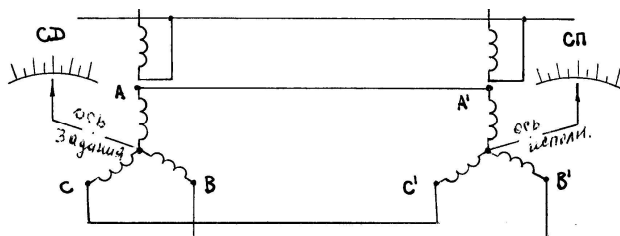


Рисунок IV-5.14

6. Специализированные асинхронные машины

6.1 Индукционный регулятор и фазорегулятор

Индукционный регулятор (ИР). Представляет собой асинхронную машину с фазным ротором, предназначенную для плавного регулирования напряжения. Ротор ИР заторможен обычно посредством червячной передачи, которая не только удерживает его в заданном положении, но и позволяет плавно поворачивать относительно статора. Обмотки ротора и статора в ИР имеют автотрансформаторную связь, поэтому ИР иногда называют **поворотным автотрансформатором**.

Напряжение сети \dot{U}_1 подводится к обмотке ротора, которая может быть соединена в звезду или треугольник. При этом ротор создает вращающееся магнитное поле, наводящее в обмотке ротора э.д.с.

$$\dot{E}_1 = -\dot{U}_1$$

а в обмотке статора - э.д.с. \dot{E}_2

Фазовый сдвиг этих э.д.с. относительно друг друга зависит от взаимного пространственного положения осей обмоток ротора и статора, определяемого углом α . При $\alpha = 0$ оси обмоток совпадают, вращающееся поле одновременно сцепляется с обеими обмотками и э.д.с. \dot{E}_1 и \dot{E}_2 совпадают по фазе (E_2 и U_1 находятся в противофазе). При $\alpha = 180$ эл. град э.д.с. \dot{E}_1 и \dot{E}_2 окажутся в противофазе (E_2 и U_1 совпадают по фазе).

Если пренебречь внутренними падениями напряжения, то напряжение на выходе ИР определяется геометрической суммой:

$$\dot{U}_\perp = \dot{U}_1 + \dot{E}_2 \quad (6.1)$$

При повороте ротора концы торов \dot{E}_1 и \dot{E}_2 описывают окружность, при этом \dot{U}_2 меняется от $\dot{U}_{2\min} = \dot{U}_1 - \dot{E}_2$ при $\alpha = 0$ до $\dot{U}_{2\max} = \dot{U}_1 + \dot{E}_2$ при $\alpha = 180$ эл. град. Поворот ротора осуществляется либо вручную штурвалом, либо дистанционно исполнительным электродвигателем.

Индукционный регулятор применяют во всех случаях, где необходимо при неизменном напряжении сети получить различные вторичные напряжения (лабораторные исследования), а также для преобразования высокого напряжения (3 или 6 кВ) в низкое или, наоборот, с одновременным регулированием напряжения на выходе.

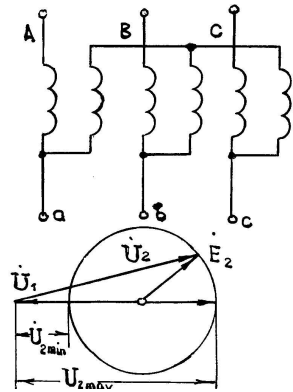


Рисунок IV-6.1

Фазорегулятор.

Предназначен для изменения фазы вторичного напряжения относительно первичного при неизменной величине вторичного напряжения. В отличие от ИР обмотки ротора и статора ФР электрически не соединены друг с другом, т.е. имеют трансформаторную связь. Поэтому ФР иногда называют **поворотным трансформатором**.

Изменение фазы вторичного напряжения осуществляется поворотом ротора относительно статора. В ФР первичной обмотки обычно является обмотка статора. Фазорегуляторы применяют в автоматике (для фазового управления устройства) и измерительной технике (для проверки ваттметров и счетчиков).

6.2 Асинхронный преобразователь частоты

Как известно, частота тока в цепи ротора асинхронной машины зависит от скольжения, т.е. определяется разностью частот вращающегося поля и ротора, т.е. $f_2 = f_1 S$. Указанное свойство позволяет использовать асинхронную машину в качестве асинхронного преобразователя частоты (АПЧ).

Обмотку статора АПЧ подключают к трехфазной сети с частотой f , а ротор приводным двигателем ПД приводят во вращение против поля статора. В этом случае в обмотке ротора наво-

дятся э.д.с. E_2 частотой $f_2 > f$, так как скольжение $S > 1$. Указанная э.д.с. подается на выход АПЧ через контактные кольца и щетки.

Если требуется получить на выходе АПЧ напряжение частотой $f_2 < f$, то ротор вращается в направлении поля статора с частотой $n < n_0$ (при этом $S < 1$). Мощность на выходе АПЧ складывается

из электромагнитной мощности $P_{эм}$, передаваемой в обмотку ротору вращающим полем статора, и механической мощностью приводного двигателя т.е. $P_2 = P_{эм} + P_{пд}$.

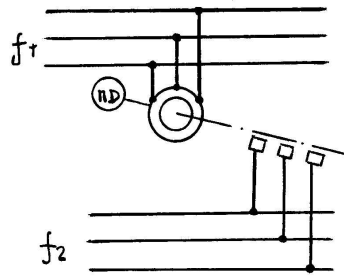


Рисунок IV-6.2

V. Синхронные машины

1. Принцип действия и конструкция синхронных генераторов

1.1 Принцип действия синхронного генератора

Работа синхронного генератора основана на явлении электромагнитной индукции и заключается в преобразовании механической энергии в электрическую энергию переменного тока.

Вращающуюся часть генератора называют ротором, неподвижную – статором.

Частота переменной э.д.с. генератора определяется частотой вращения ротора: при одной паре возбуждения ($p = 1$) одному обороту ротора соответствует один период переменного тока. В общем случае частота э.д.с. синхронного генератора f (Гц) прямо пропорциональна частоте вращения ротора n об/мин, т.е.

$$f = \frac{Pn_0}{60} \quad (1.1)$$

Отсутствие коллектора упрощает конструкцию машины и дает возможность обмотку, в которой индуцируется э.д.с., расположить на неподвижной части генератора - статоре. При этом обмотку возбуждения располагают на роторе. Такая конструктивная схема наиболее рациональна в синхронных машинах большой мощности, так как при расположении рабочей обмотки на роторе пришлось бы передавать в рабочую обмотку через контактные кольца значительные

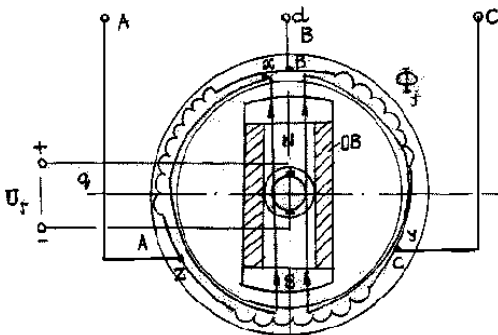


Рисунок V-1.1

мощности при напряжении до 20 кВ. В этих условиях работа контактных колец и щеток стала бы весьма ненадежной, а потери энергии в щеточном контакте - значительны. При расположении рабочей обмотки на статоре выводы этой обмотки присоединяют

непосредственно к электрической сети. Величина тока возбуждения в десятки раз меньше рабочего (переменного) тока, а жение не превышает 450 В, щеточный контакт работает более надежно, а потери энергии в нем невелики.

На роторе расположена обмотка возбуждения, при подключении которой к источнику постоянного тока (возбудителю) возникает магнитное поле возбуждения. Посредством первичного двигателя (ПД) ротор генератора приводят во вращение со скоростью n_0 . При этом магнитное поле ротора также вращается и индуцирует в трехфазной обмотке статора э.д.с. E_A , E_B , E_C , которые будучи одинаковыми по величине и сдвинутыми по фазе относительно друг друга на $1/3$ периода (120 эл.град), образуют трехфазную симметричную систему.

1.2 Возбуждение синхронных машин

В синхронных машинах применяют два способа возбуждения: электромагнитное и возбуждение постоянными магнитами.

При **электромагнитном возбуждении** основной магнитный поток создается посредством обмотки возбуждения. В синхронных генераторах с электромагнитным возбуждением распространение получила **электромашинная** система возбуждения синхронных машин, при которой источником постоянного тока для питания обмотки возбуждения синхронной машины является генератор постоянного тока, называемый **возбудителем**.

За последние годы все более широкое распространение получают системы самовозбуждения, в которых энергия, необходимая для возбуждения отбирается от рабочей (статорной) обмотки синхронной машины, преобразуется посредством ионных, полупроводниковых или механических выпрямителей и подается в цепь возбуждения синхронной машины.

Мощность, затрачиваемая на возбуждение синхронных машин, обычно составляет от $0,2$ до 5% мощности синхронной машины при напряжении до 450 В.

1.3 Типы синхронных машин и их конструкция

Синхронная машина состоит из статора и ротора. Статор синхронной машины устроен так же, как и статор асинхронной машины, т.е. состоит из корпуса, сердечника и обмотки.

Конструктивное исполнение статора в синхронных машинах может быть различным в зависимости от габаритов и назна-

чения машины. Статоры машин большой мощности для удобства сборки и транспортировки вместе с сердечником статора делают из отдельных сегментов, которые при монтаже машины образуют цилиндр статора.

Роторы синхронных машин могут иметь две принципиально разные конструкции: явнополюсную и неявнополюсную.

В силовых установках переменного тока в качестве первичных двигателей синхронных генераторов применяют паровые или гидравлические турбины и двигатели внутреннего сгорания (дизели). В первом случае синхронные генераторы называют **гидрогенераторами** и **турбогенераторами**, во втором случае – **дизель - генераторами**. Все эти типы синхронных генераторов конструктивно отличаются друг от друга.

Так как гидравлическая турбина работает при сравнительно небольшой частоте вращения (60-500 об/мин), то для получения переменного тока промышленной частоты в гидрогенераторе применяют ротор с большим числом полюсов. Поэтому роторы турбогенераторов имеют явнополюсную конструкцию, т.е. явно выраженными полюсами, при которой каждый полюс выполняют в виде отдельного узла, состоящего из сердечника, полюсного наконечника и полюсной катушки. Все полюса закрепляют на ободу, который является также и ярмом, через которое замыкаются магнитные поля полюсов. Полюсы явнополюсного ротора обычно собирают (шихтуют) из штампованных листов конструкционной стали толщиной 1-1,5 мм, которые сжимают с двух сторон толстыми нажимными щеками, предотвращающими распушение пакета полюса. В отдельных случаях применяют литые полюса. Ярмо явнополюсного ротора выполняют массивным (литым или сварным) или же шихтованным из листовой стали толщиной 1-6 мм. Листы стягивают шпильками. Для улучшения вентиляции со значительной осевой длиной ярмо и полюса разделяют на несколько пакетов, между которыми оставляют вентиляционные каналы (радиальные) для прохождения охлаждающего газа.

Гидрогенераторы обычно выполняют с вертикальным расположением вала.

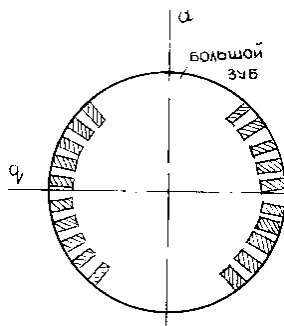


Рисунок V-1.2

Паровая турбина работает при большой частоте вращения, поэтому турбогенераторы являются быстроходными синхронными машинами и их роторы, как правило, выполняются двухполюсными ($n_0 = 3000$ об/мин).

В процессе работы турбогенератора на ротор действуют значительные центробежные силы. Поэтому явнополюсная конструкция ротора в турбогенераторах непригодна по условиям механической прочности. Обычно в турбогенераторах применяют неявнополюсный ротор, имеющий вид удлиненного стального цилиндра с профрезерованными на поверхности продольными пазами для обмотки возбуждения.

Сердечник неявнополюсного ротора изготавливают в виде цельной стальной поковки вместе с хвостовиками (концами вала) или же делают его сборным.

Обмотка возбуждения неявнополюсного ротора занимает лишь $2/3$ его поверхности (по периметру). Оставшаяся $1/3$ поверхности образует два больших зуба (полюса). Для защиты лобовых частей обмотки ротора от разрушения действием центробежных сил ротор с двух сторон прикрывают стальными бандажными кольцами (каппами), изготавливаемыми обычно из немагнитной стали.

Турбогенераторы и дизель - генераторы выполняют с горизонтальным расположением вала. Дизель - генераторы рассчитывают на частоту вращения 600-1500 об/мин и выполняют с явнополюсным ротором.

2. Реакция якоря и характеристики синхронного генератора

2.1 Магнитное поле синхронной машины

В неявнополюсной синхронной машине воздушный зазор равномерен, а поэтому пространственное положение вектора н.с. статора относительно оси полюсов ротора не влияет на величину и график

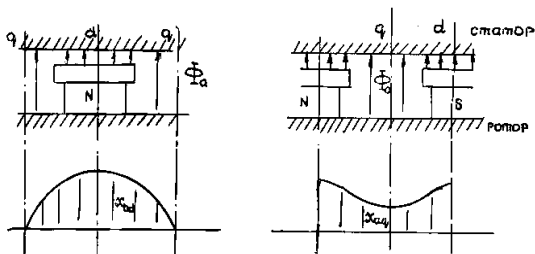


Рисунок V-2.1

распределения магнитного поля статора.

В явнополюсной синхронной машине воздушный зазор неравномерен из-за наличия значительного межполюсного пространства, не заполненного сталью и магнитное сопротивление потока статора по продольной оси $a'd$ намного меньше магнитного сопротивления по поперечной оси qq' . Поэтому величина и график распределения магнитного поля статора в воздушном зазоре в этих машинах зависит от пространственного положения вектора н.с. обмотки статора или его составляющих.

2.2 Реакция якоря синхронной машины

В процессе работы нагруженного синхронного генератора в нем одновременно действует две н.с. возбуждения F_f и н.с. статора (якоря) F_q .

При этом н.с. статора (якоря) воздействует на н.с. возбуждения, усиливая или ослабляя поле возбуждения или же искажая его форму. Этот процесс воздействия н.с. обмотки статора (якоря) на н.с. обмотки возбуждения называется реакцией якоря.

Активная нагрузка.

В рассматриваемый момент времени ротор занимает вертикальное положение, что соответствует максимуму э.д.с. в фазной обмотке. Так как ток при активной нагрузке совпадает по фазе с э.д.с., то указанное положение ротора соответствует также и максимуму тока.

Н.с. статора (якоря) F_a направлена перпендикулярно н.с. возбуждения F_f . Этот вывод также подтверждается векторной диаграммой, построенной для этого же случая.

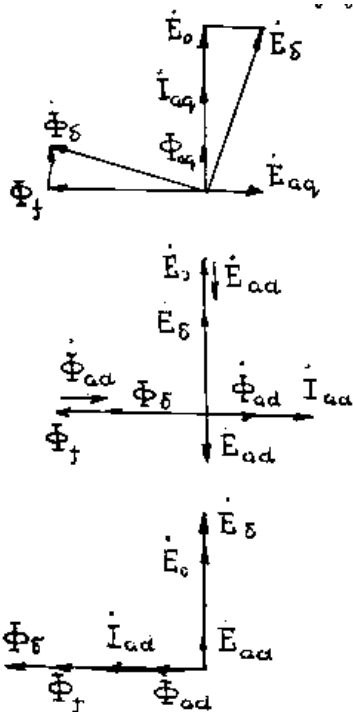


Рисунок V-2.2

Такое взаимодействие н.с. $F_{я}$ и F_f аналогично реакции якоря в генераторе постоянного тока при расположении щеток на геометрической нейтрале: **магнитное поле машины ослабляется под набегающим краем полюса, и усиливаются под сбегающим краем полюса**. Вследствие насыщения магнитной цепи результирующее магнитное поле машины несколько ослабляется.

Индуктивная нагрузка.

При чисто индуктивной нагрузке ток статора отстает по фазе от э.д.с. на 90° . Поэтому он достигает максимального значения лишь после поворота ротора на 90° относительно его положения, соответственно максимуму э.д.с. E_0 . При этом н.с. F_a действует по оси полюсов ротора встречно н.с. возбуждения F_f . Такое действие н.с. статора (якоря) ослабляет поле машины. Следовательно, **реакция якоря в синхронном генераторе при чисто индуктивной нагрузке оказывает продольное размагничивающее действие**.

Емкостная нагрузка.

Так как ток при емкостной нагрузке опережает по фазе э.д.с., E_0 на 90° , то своего наибольшего значения он достигает раньше, чем э.д.с., E_0 . Намагничивающая сила статора (якоря) F_a так же как и в предыдущем случае, действует по оси полюсов, но теперь уже согласно н.с. возбуждения.

При этом происходит усиление магнитного поля возбуждения. Таким образом, при чисто емкостной нагрузке реакцией якоря оказывает продольно – намагничивающее действие.

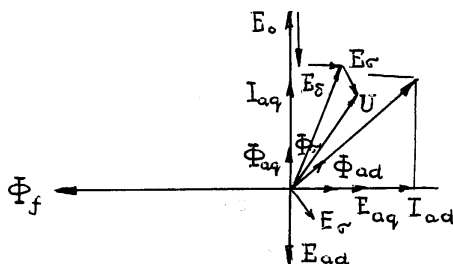


Рисунок V-2.3

Смешанная нагрузка.

При смешанной нагрузке синхронного генератора ток статора I_q сдвинут по фазе относительно э.д.с. E_0 на угол ψ , значения, которого находятся в пределах $0 < \psi < \pm 90^\circ$.

При **активно-индуктивной нагрузке** вектор I_a отстает от вектора E_0 на угол $\psi < 90^\circ$. Разложим вектор F_a на две составляющие: продольную составляющую н.с. статора (якоря) $F_{ad} = F_a \sin \psi$ и поперечную составляющую н.с. статора (якоря) $F_{aq} = F_a \cos \psi$. Такое же разложение н.с. якоря на составляющие можно сделать в случае активно-емкостной нагрузки. Поперечная составляющая н.с. статора (якоря) F_{aq} представляющая собой н.с. реакции якоря по поперечной оси, пропорциональна активной составляющей тока нагрузки

$$I_{aq} = I_a \cos \psi, \text{ т.е. } F_{aq} = F_a \cos \psi,$$

а продольная составляющая н.с. статора (якоря) F_{ad} , представляющая собой н.с. **реакции якоря по продольной оси**, пропорциональна реактивной с оставляющей тока нагрузки $I_{ad} = I_a \sin \psi$, т.е. $F_{ad} = F_a \sin \psi$.

При этом если активная составляющая тока нагрузки I_{ad} отстает по фазе от э.д.с. E_0 (нагрузка активно-индуктивная), то н.с. F_{ad} размагничивает генератор, если же реактивная составляющая тока I_{ad} опережает по фазе э.д.с. (нагрузка активно-емкостная), то н.с. F_{ad} подмагничивает генератор.

Направление вектора F_{ad} относительно вектора E_0 определяется характером реакции якоря, который при токе нагрузки I_a **отстающем** по фазе от э.д.с. E_0 , является размагничивающим, а при токе I_a **опережающим** по фазе E_0 , - подмагничивающим.

2.3 Индуктивные сопротивления реакции якоря

Э.д.с. E_{da} и E_{aq} можно также представить в виде $\dot{E}_{ad} = -jx_{ad}\dot{I}_d$ $\dot{E}_{aq} = -jx_{aq}\dot{I}_q$ где x_{ad} и x_{aq} - собственные индуктивные сопротивления обмотки якоря, соответствующие полям продольной и поперечной реакции якоря при симметричной нагрузке и называемое **индуктивными сопротивлениями продольной и поперечной реакции якоря**.

Если сталь сердечников машины не насыщена ($\mu_c = \infty$), то $k_u = k_{uq} = 1$. Значения x_{ad} и x_{aq} при этих условиях будем назы-

вать ненасыщенными и обозначать $x_{ad\infty}$, $x_{aq\infty}$. В соответствии с выражениями

$$x_{ad} = \frac{x_{ad\infty}}{k_{ud}}; \quad x_{aq} = \frac{x_{aq\infty}}{k_{uq}}.$$

Очевидно, что $x_{ad\infty} > x_{ad}$; $x_{aq\infty} > x_{aq}$.

Для неявнополюсной синхронной машины ввиду равномерности зазора $k_{ad} = k_{aq} = 1$ и $x_{ad} = x_{aq}$.

Из этих двух обозначений для неявнополюсной машины сохраним обозначение x_{ad} .

Чем сильнее реакция якоря, тем больше x_{ad} и x_{aq} и тем меньше запас статической устойчивости при работе.

При проектировании машины с заданной скоростью вращения, мощностью и способом охлаждения все величины, за исключением δ , могут измениться лишь в небольших пределах.

Поэтому величины x_{ad} и x_{aq} обратно пропорциональны величине воздушного зазора. Для ограничения влияния реакции якоря желательно, чтобы значения x_{ad} и x_{aq} не превосходили определенных пределов. Поэтому величина зазора δ в синхронных машинах приходится брать больше, чем это допустимо по механическим и иным условиям.

Необходимо, однако, иметь в виду, что увеличение δ требует усиления обмотки возбуждения, что связано с увеличением расхода обмоточного провода, а в ряде случаев в связи с затруднениями в размещении обмотки возбуждения требуется также некоторое увеличение габаритов машины.

Поэтому уменьшение x_{ad} и x_{aq} ведет к удорожанию машины.

2.4 Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря

Н.с. обмотки якоря, кроме основной гармоники, содержит также высшие гармоники. При равномерном зазоре поля высших гармоник индуктируют в обмотке якоря э.д.с. основной частоты, которые учитываются в виде индуктивного сопротивления дифференциального рассеяния. При неравномерном зазоре (в частности, в явнополюсной синхронной машине) поля высших гармоник, н.с. искажаются и поэтому индуктируют как э.д.с. основной,

так и э.д.с. высших частот. Э.д.с. основной частоты при этом также увеличивается в виде сопротивления дифференциального рассеяния, а высшими гармониками э.д.с. по изложенным выше причинам пренебрегают.

Кроме дифференциального рассеяния, существует также пазовое и лобовое рассеяние якоря. Вследствие магнитной несимметрии ротора явнополюсной синхронной машины токи I_d и I_q , создают различные поля и э.д.с. дифференциального и лобового рассеяния. Однако эта разница невелика, и ею пренебрегают. Поэтому индуктивные сопротивления рассеяния якоря x_{σ} принимают для обеих осей одинаковыми. Можно также считать, что в пределах до $I \approx (2,5 \div 2,5) \cdot I_H$ будет $x_{\sigma a} = \text{const}$. Обычно $x_{\sigma a^*} = 0,05 \div 0,20$.

Активное сопротивление фазы обмотки якоря r_a нетрудно вычислить по известным обмоточным данным. Обычно $r_{a^*} = 0,005 \div 0,02$, т.е. это сопротивление относительно мало.

Синхронные индуктивные сопротивления.

Потокоцепление рассеяния обмотки якоря $\psi_{\sigma a}$ также можно разложить на составляющие по осям d и q : $\psi_{\sigma ad} = \psi_{\sigma a} \sin \psi$; $\psi_{\sigma aq} = \psi_{\sigma a} \cos \psi$, и считать, что $\psi_{\sigma ad}$ и $\psi_{\sigma aq}$, создаются соответственно токами I_d и I_q . Точно также можно разложить на составляющую полную э.д.с. рассеяния якоря $E_{\sigma a}$, причем

$$E_{\sigma ad} = E_{\sigma a} \sin \psi = x_{\sigma a} I \sin \psi = x_{\sigma a} I_d;$$

$$E_{\sigma aq} = E_{\sigma a} \cos \psi = x_{\sigma a} I \cos \psi = x_{\sigma a} I_q;$$

Э. д.с. $E_{\sigma ad}$ и E_{ad} , а также э.д.с. $E_{\sigma aq}$ и E_{aq} совпадают по фазе. Поэтому эти э.д.с. можно попарно сложить арифметически:

$$E_d = E_{ad} + E_{\sigma ad} = x_{ad} I_d + x_{\sigma a} I_d$$

$$E_q = E_{aq} + E_{\sigma aq} = x_{aq} I_q + x_{\sigma a} I_q$$

или,

$$E_d = x_d I_d; \quad E_q = x_q I_q$$

где

$$x_d = x_{ad} + x_{\sigma a} \quad x_q = x_{aq} + x_{\sigma a}$$

Э.д.с. E_d и E_q являются составляющими полной э.д.с. самоиндукции якоря по осям d и q . Сопротивления x_d и x_q называют соответственно **продольным и поперечным синхронны-**

ми индуктивными сопротивлениями обмотки якоря, причем словом "синхронные" подчеркивается, что эти сопротивления соответствуют нормальному установившемуся синхронному режиму работы с симметричной нагрузкой фаз.

Величина $x_{\sigma a}$, значительно меньше x_{ad} и x_{aq} . Поэтому величины x_d и x_q также определяются главным образом величиной зазора машины δ . Значения x_d и x_q для современных синхронных машин указаны в табл. 32-1.

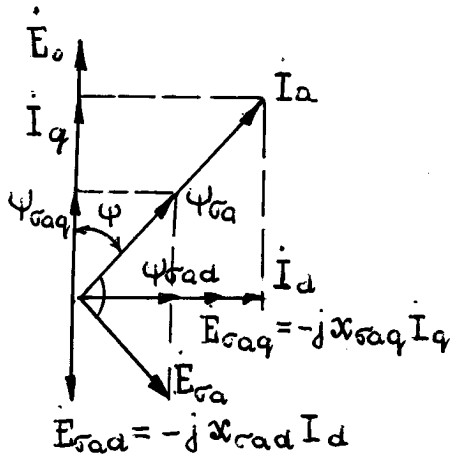


Рисунок V-2.4

2.5 Векторные диаграммы

Явнополюсная машина.

Напряжение фазы обмотки генератора равно сумме индуктируемых в этой обмотке э.д.с. минус падение напряжения в активном сопротивлении фазы обмотки якоря r_a .

Уравнение напряжения явнополюсного синхронного генератора:

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{\sigma a} - r_a \dot{I}_a \quad (2.1)$$

Э.д.с. реакции якоря и рассеяния можно выразить через соответствующие токи и индуктивные сопротивления:

$$\dot{E}_{ad} = -j x_{ad} \dot{I}_d; \quad \dot{E}_{aq} = -j x_{aq} \dot{I}_q; \quad \dot{E}_{\sigma a} = -j x_{\sigma a} \dot{I}_a \quad (2.2)$$

При этом вместо (2.1) получим

$$\dot{U} = \dot{E} - j x_{ad} \dot{I}_d - j x_{aq} \dot{I}_q - j x_{\sigma a} \dot{I}_a - r_a \dot{I}_a \quad (2.3)$$

Уравнение (2.3) можно прочесть также так: напряжение генератора U равно э.д.с. E_0 , индуктируемой током возбуждения, минус падения напряжения в индуктивных сопротивлениях якоря

x_{qd} и x_{ad} , индуктивное сопротивление рассеяния якоря $x_{a\sigma}$ и в активном сопротивлении якоря r_a .

Поскольку $x_{a\sigma}$ и r_a , относительно малы, то при $U = \text{const}$ величины э.д.с. E_δ и потока Φ_δ при изменении характера или величины нагрузки изменяются мало.

Угол Θ между векторами и называется **углом нагрузки**. В генераторном режиме работы э.д.с. всегда опережает и угол при этом считается положительным. Название этого угла происходит от того, что величина зависит от нагрузки генератора

$$P = m \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi.$$

Действительно, из диаграммы видно, что, например, при $U = \text{const}$ $I = \text{const}$

и при уменьшении абсолютной величины φ составляющая тока якоря I_q увеличивается, соответственно чему увеличивается также E_{aq} и Θ .

Векторная диаграмма называется в литературе диаграммой Блонделя.

Э.д.с. можно разложить на составляющие:

$$\dot{E}_{\sigma a} = -jx_{\sigma a} \dot{I}_a = -jx_{\sigma a} \dot{I}_d - jx_{\sigma a} \dot{I}_q$$

а сопротивления x_{ad} , x_{aq} можно объединить с сопротивлением $x_{\sigma a}$ в синхронные сопротивления:

$$x_d = x_{ad} + x_{\sigma a}; \quad x_q = x_{aq} + x_{\sigma a}$$

Тогда вместо уравнения (2.3) получим:

$$\dot{U} = \dot{E} - jx_d \dot{I}_d - jx_q \dot{I}_q - r_a \dot{I}_a \quad (2.5)$$

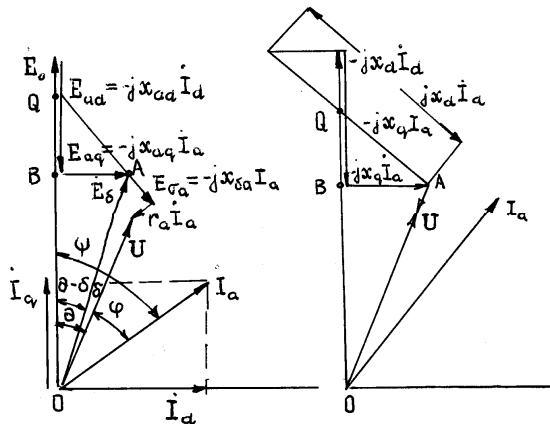


Рисунок V-2.5

Если из точек A провести перпендикулярно вектору I_a отрезки прямых для пересечения в точке Q с вектором E или его продолжением, то длины этих отрезков будут равны $x_{aq}I_a$. Это следует из того, что в прямоугольных треугольниках AQB угол при вершине A равен ψ , и поэтому

$$AQ = \frac{AB}{\cos \psi} = \frac{x_{aq}I_q}{\cos \psi} = \frac{x_{aq}I_a \cos \psi}{\cos \psi} = x_{aq}I_a;$$

$$AQ = \frac{AB}{\cos \psi} = \frac{x_q I_q}{\cos \psi} = \frac{x_q I_q \cos \psi}{\cos \psi} = x_q I_a;$$

Этим свойством можно воспользоваться для построения диаграмм в случае, когда заданы U , I_a и φ и необходимо найти E_0 . Тогда путем построения отрезков AQ сначала находят направление вектора \dot{E} и, следовательно, угол φ . После того ток I_a можно разложить на составляющие I_d , I_q и построить диаграмму.

Неявнополюсная машина.

В том случае $x_{aq} = x_{ad}$, $x_q = x_d$, поэтому нет необходимости разлагать ток I_a на составляющие I_d и I_q и можно откладывать на диаграмме падения напряжения $jx_{ad}I_a$ и $jx_d I_a$.

Для исследования некоторых вопросов явнополюсную машину иногда заменяют эквивалентной неявнополюсной машиной, у которой синхронное сопротивление по обеим осям равно x_d рассматриваемой явнополюсной машины. Такая эквивалентная машина имеет вместо э.д.с. E эквивалентную э.д.с. возбуждения E_a , причем угол нагрузки Θ не изменяется. Необходимо иметь в виду, что при постоянном токе возбуждения I_f и постоянной э.д.с. E величина э.д.с. E_a при изменении нагрузки меняется.

3. Характеристики синхронных машин

Среди разнообразных характеристик синхронных генераторов отдельную группу составляют характеристики, которые определяют зависимость между напряжением на зажимах якоря U , током якоря I_a и током возбуждения I_f при $f = f_n$ или $n = n_n$ и $\varphi = \text{const}$ в установившемся режиме работы. Эти характеристики

дают наглядное представление о ряде основных свойств синхронных генераторов.

3.1 Характеристика холостого хода

(Х.х.х.) определяет зависимость $U = f(I_f)$ при $I_a = 0$ и $f = f_n$.

Очевидно, что в режиме холостого хода $U = E$. Если х.х.х. различных синхронных генераторов изобразить в относительных единицах, полагая

$$U_* = \frac{U}{U_H}; I_{f*} = \frac{I_f}{I_{fHH}} \quad (3.1)$$

где I_{fHH} - ток холостого хода при $U = U_H$, то эти х.х.х. будут мало отличаться друг от друга. Поэтому при расчетах различных режимов работы энергетических систем, в которых работает много генераторов, для упрощения расчетов принимается, что х.х.х. всех турбогенераторов, выраженные в относительных единицах, одинаковы и соответствуют некоторым средним данным реальных характеристик генераторов. Такие х.х.х. называются **нормальными**.

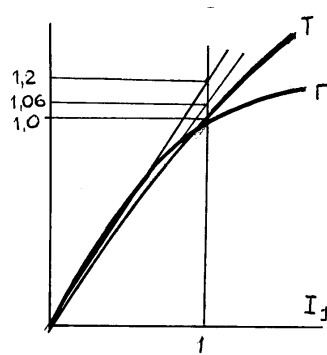


Рисунок V-3.1

I_{f*}	E_*	
	ТГ	ГГ
0,5	0,58	0,53
1	1,00	1,00
1,5	1,21	1,23
2,0	1,33	1,30

Наряду с реальной криволинейной х.х.х. рассматриваются также спрямленные ненасыщенная и насыщенная х.х.х. Нормальные насыщенные х.х.х. показаны на рис. штриховыми линиями.

Магнитные цепи турбогенераторов более насыщены, и, согласно рис. V-3.1 при $E = U_H$ для турбогенераторов $K_{уд} = 1,2$ и

для гидрогенераторов $K_{уд} = 1,06$.

3.2 Характеристика короткого замыкания (х.к.з.)

Х.к.з. снимается при замыкании зажимов всех фаз обмотки якоря накоротко (симметричное короткое замыкание) и определяет зависимость $I_a = f(I_f)$ при $U = 0$ и $f = f_H$.

Если пренебречь весьма незначительным активным сопротивлением цепи якоря в режиме короткого замыкания будет чисто индуктивным. Поэтому, $\psi = 90^\circ$, $I_q = 0$, $I_d = I_a$.

$$\dot{E}_0 = -jx_d \dot{I}_a$$

При коротком замыкании реакция якоря является чисто размагничивающей, э.д.с. E_δ от результирующего потока воздушного зазора, равная $\dot{E}_\delta = \dot{E}_0 - jx_{ad} \dot{I}_a = jx_{\sigma a} \dot{I}_a$ весьма мала, вследствие чего поток Φ_δ мал. Поэтому при коротком замыкании магнитная цепь не насыщена и х.к.з. $I_a = f(I_f)$ прямолинейна.

3.3 Опытное определение x_d

Опытные х.х.х. и х.к.з. позволяют определить опытное значение продольного синхронного сопротивления x_d . Обычно находят ненасыщенное значение этого сопротивления $x_{d\infty}$, которое в отличие от насыщенного значения x_d для каждой машины вполне определенное. Чтобы определить $x_{d\infty}$, для какого-либо значения тока возбуждения, например I_{f0} по спрямленной ненасыщенной х.х.х. 3 находят E_∞ и по х.к.з. 2 - ток, I_a после чего

$$x_{d\infty} = \frac{E_\infty}{I_a} \quad (3.4)$$

Если E_∞ и I_a выражены в относительных единицах, то и $x_{d\infty}$ получается в этих же единицах.

Если вместо E_∞ подставить значение E для той же величины I_∞ , то отношение

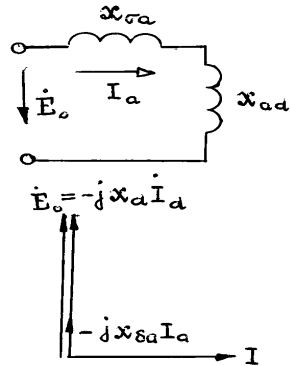


Рисунок V-3.2

$$x_d = \frac{E}{I} = \frac{E_\infty}{k_{ud} I} = \frac{x_{d\infty}}{k_{ud}} \quad (3.5)$$

будет определять насыщенное значение x_d при таком насыщении магнитной цепи, которое соответствует значению E .

3.4 Отношение короткого замыкания (о.к.з.)

Отношением короткого замыкания о.к.з., согласно ГОСТ 183-66, называется отношение установившегося тока короткого замыкания I_{k0} при токе возбуждения, который при холостом ходе и $n = n_H$ дает $E = U_H$, к номинальному току якоря $I_{ан}$

$$\text{О.К.З.} = \frac{I_{k0}}{I_H} \quad (3.6)$$

В соответствии с изложенным выше

$$I_{k0} = \frac{U_H}{x_d} \quad (3.7)$$

где x_d - насыщенное значение продольного синхронного сопротивления, соответствующее $E_\delta = U_H$.

На основании выражений (3.6) и (3.7)

$$\text{О.К.З.} = \frac{U_H}{x_d \cdot I_H} = \frac{1}{x_{d^*}} = \frac{k_{ud}}{x_{d\infty^*}} \quad (3.8)$$

то есть о.к.з. равно обратному значению x_{d^*} . У многих машин $x_{d^*} > 1$, и тогда ОКЗ < 1 , т.е. ток короткого замыкания в указанных

условиях меньше номинального. Отсюда можно сделать вывод, что установившийся ток короткого замыкания синхронных генераторов вообще относительно не очень велик, что объясняется

сильной размагничивающей реакцией якоря.

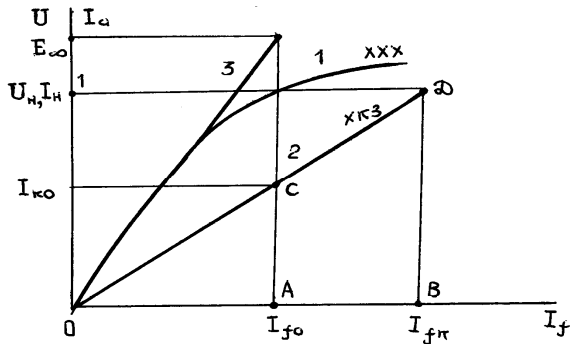


Рисунок V-3.3

Если I_{f0} и I_{fk} - соответственно токи возбуждения на холостом ходу, когда $I_k = I_H$, и при остановившемся коротком замыкании, когда $I_k = I_H$, то на основании подобия треугольников ОАС и ОВД .

$$\text{О.К.З.} = \frac{I_{f0}}{I_{fH}} \quad (3.9)$$

Как будет показано ниже, величина о.к.з., как и величина, определяет предельную величину нагрузки, которую способен нести генератор при установившемся режиме работы, причем, чем больше о.к.з., тем больше предельная нагрузка.

Поэтому о.к.з. является важным параметром синхронных машин. У гидрогенераторов обычно $\text{ОКЗ} = 0,8 \div 1,8$, а у турбогенераторов $\text{ОКЗ} = 0,4 \div 1,0$.

Величина о.к.з. тем больше, чем больше величина зазора между статором и ротором. Поэтому машины с большим о.к.з. дороже.

3.5 Внешняя характеристика

Определяет зависимость $U = f(I_a)$ при $I_f = \text{const}$, $\cos \varphi = \text{const}$, $f = f_H$ и показывает, как изменяется напряжение машины U при изменении величины нагрузки и неизменном токе возбуждения.

Величина тока возбуждения отрегулирована так, что при $I_a = I_{aH}$ также $U = U_H$. Величина I_f при номинальной нагрузке $U = U_H$ называется **номинальным током возбуждения**.

Вид внешних характеристик синхронного генератора объясняется характером действия реакции якоря. При отстающем токе существует значительная продольная размагничивающая реакция якоря, которая растет с увеличением тока нагрузки I_a , и поэтому U с увеличением I_a уменьшается. При чисто активной нагрузке также имеется продольная размагничивающая реакция якоря, но угол ψ между E и U меньше, чем в предыдущем случае, поэтому продольная размагничивающая реакция слабее и уменьшение U с увеличением I_a происходит медленнее. При опережающем токе возникает продольная намагничивающая реакция якоря и поэтому с увеличением I_a напряжение U растет.

Следует отметить, что значения I_a для трех характеристик различны и наибольшее I_f соответствует характеристике 1.

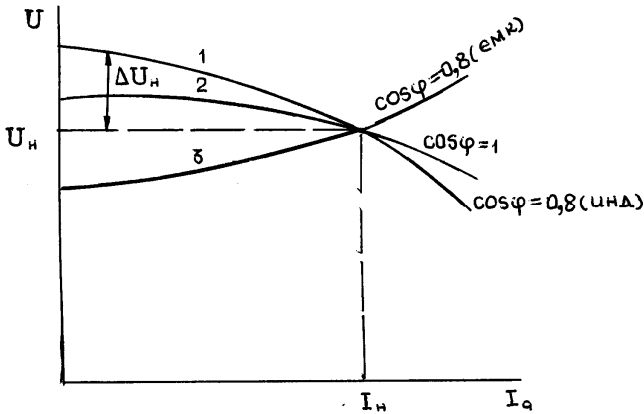


Рисунок V-3.4

3.6 Номинальное изменение напряжения синхронного генератора

- это изменение напряжения на зажимах генератора (при его работе отдельно от других генераторов) при изменении нагрузки от номинального значения до нуля и при неизменном токе возбуждения.

Синхронные генераторы обычно рассчитываются для работы с номинальной нагрузкой при отстающем токе и $\cos \varphi_n = 0,8$. Согласно кривой 1, при этом $\Delta U_n > 0$. Величина ΔU_n действующими ГОСТ не регламентируется. Обычно

$$\Delta U_{n\%} = \frac{\Delta U_n}{U_n} \cdot 100 = 25 \div 35\%$$

Величина ΔU_n у турбогенераторов больше, чем у гидрогенераторов, так как у первых x_d больше.

3.7 Регулировочная характеристика (р.х.)

Р.х. определяет зависимость при и показывает, как нужно регулировать ток возбуждения синхронного генератора, чтобы при изменении нагрузки его напряжение оставалось неизменным.

Вид регулировочных характеристик также объясняется характером действия реакции якоря. При отстающем токе (кривая 1) продольная реакция якоря является размагничивающей и для компенсации ее

влияния на величины U с увеличением необходимо значительно увеличивать ток возбуждения I_f .

При чисто активной нагрузке (кривая 2) размагничивающая продольная реакция якоря слабее и требуется меньшее увеличение I_f .

При опережающем токе (кривая 3) продольная реакция якоря стремится увеличивать Φ_δ и U , вследствие чего для сохранения $U = \text{const}$ необходимо с увеличением I_a уменьшать I_f . Обычно $\cos \varphi_H = 0,8$ и поэтому при переходе от холостого хода $U = U_H$, $i_a = 0$ к номинальной нагрузке $U = U_H$, $I_a = I_{aH}$ необходимо значительно (до 1,7-2,2 раза) увеличить ток возбуждения. Это увеличение тем больше, чем больше x_d .

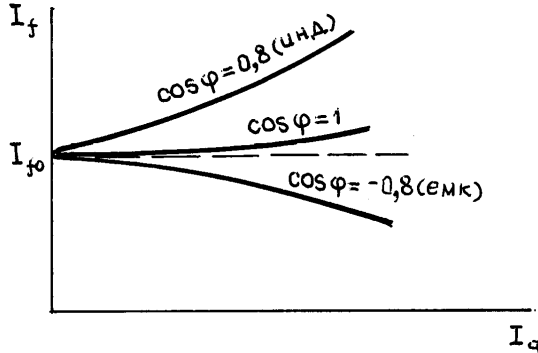


Рисунок V-3.5

3.8 Нагрузочная характеристика (н.х.)

Определяет зависимость $U = f(I_f)$ при $I_a = \text{const}$, $\cos \varphi = \text{const}$, $f = \text{const}$ и показывает, как изменяется напряжение генератора U с изменением тока возбуждения I_f при условии постоянства тока нагрузки I_a и $\cos \varphi_H$. Из числа разнообразных нагрузочных характеристик наибольший практический интерес представляет так называемая **индукционная нагрузочная характеристика**, которая соответствует чисто индуктивной нагрузке генератора, когда $\cos \varphi = 0$ (инд). Обычно она снимается для $I_a = I_{aH}$.

Векторная диаграмма синхронного генератора при $\cos \varphi = 0$ изображена на рис. V-3.6, причем принято, что $r_a = 0$.

Из этой диаграммы видно, что в режиме индукционной характеристики существует чисто продольная размагничивающая реакция якоря $I_q = I_a$, $\cos \psi = 0$, $I_d = I_a$, $\sin \psi = 1$. Поэтому индукционная характеристика (кривая 2) идет ниже характеристики холостого хода (кривая 1). Точка А на рис. соответствует симметричному установившемуся короткому замыканию генератора при $I_a = I_{ан}$, когда $U = 0$ и также $\psi = 90^\circ$. Так как $\psi = 90^\circ$, то в режиме индукционной характеристики н.с. возбуждения и якоря складываются алгебраически, а U_H - арифметически.

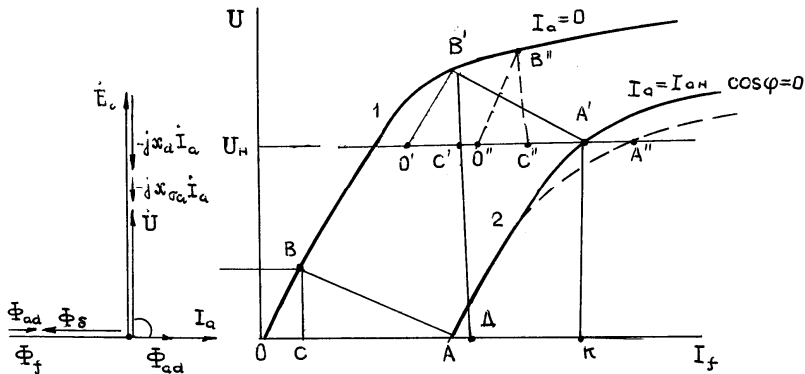


Рисунок V-3.6

3.9 Реактивный треугольник, или треугольник Потье

Реактивным треугольником синхронной машины называется ΔCBA , вертикальный катет CB которого равен падению напряжения в сопротивлении рассеяния якоря $x_{\sigma a}$, а горизонтальный катет CA равен н.с. реакции якоря в масштабе тока возбуждения $k_{id} \cdot I_H$. Если известны: 1) ток возбуждения $I_{fk} = OA$ при коротком замыкании и $I_a = I_{ан}$, 2) сопротивление $x_{\sigma a}$ и 3) начальная прямолинейная часть х.х., то реактивный треугольник CBA нетрудно построить. Составляющая OC тока возбуждения при коротком замыкании OA индуцирует э.д.с. $E_{\sigma a} = x_{\sigma a} \cdot I_a$. Другая составляющая этого тока CA компенсирует размагничивающее действие реакции якоря, и поэтому $CA = k_{id} \cdot I_{ан}$.

Н.с. реакции якоря и $x_{\sigma a} \cdot I_{an}$ в режиме индукционной характеристики постоянны, так как при $I_a = \text{const}$, $x_{\delta a}$ практически не зависит от величины результирующего потока в зазоре. Поэтому индукционную характеристику 2 можно построить с помощью х.х.х. 1 и реактивного треугольника СВА, передвигая последний параллельно самому так, чтобы его вершина В скользила по х.х.х. Тогда вершина А опишет характеристику 2. Одно из положений этого треугольника ($\Delta C'B'A'$ при $U = U_n$) и справедливость указанного построения можно пояснить следующим образом.

Согласно кривой 2 для получения $U_n = k'A'$ при $I = I_n$ и $\cos \varphi = 0$ необходим ток возбуждения ОК. Составляющая $CA = C'A'$ этого тока компенсирует чисто продольную размагничивающую реакцию якоря в этом режиме, а составляющая $OD = OK - DK$ должна индуцировать результирующую э.д.с. величиной

$$E_{\delta} = U + x_{\sigma a} \cdot I_a = DC' + C'B' = DB'$$

из х.х.х. 1 следует, что ток OD действительно индуцирует такую э.д.с.

Если $x_{\sigma a}$ и k_{id} неизвестны, то из изложенного следует, что с помощью характеристик 1 и 2 можно определить $x_{\sigma a}$ и величину н.с. реакции якоря. Действительно, при построении индукционной характеристики указанных выше образом вместо ΔCBA можно было бы перемещать параллельно самому себе также $\Delta C'B'A'$. Последний в рассматриваемом случае неизвестен, но известны его сторона $OA = O'A'$ и $\angle AOB = \angle A'O'B'$. Отложив поэтому из некоторой точки A' характеристики 2 рис. отрезок $A'O' = AO$ и проведя $O'B'$ параллельно OB , найдем точку пересечения B' с кривой 1. Опустив из точки B' вертикаль $B'C'$, получим

$$x_{\sigma a} = \frac{B'C'}{I_n}$$

а отрезок $C'A'$ определяет величину н.с. реакции якоря в масштабе I_f .

3.10 Индуктивное сопротивление Потье

Опыт показывает, что опытная индукционная нагрузочная характеристика в действительности не вполне совпадает с харак-

теристикой, построенной указанным выше образом с помощью х.х.х. и реактивного треугольника, а отклоняется от нее вправо тем больше, чем больше U . Причина этого заключается в том, что хотя для точки B' х.х.х. и точки A' индукционной характеристики величины э.д.с. E_δ и потока Φ_δ одинаковы, соответствующие токи возбуждения OD и OK неодинаковы. Так как $OK > OD$, то в режиме индукционной характеристики поток рассеяния обмотки возбуждения больше, что вызывает увеличение насыщения полюсов и ярма индуктора. Поэтому при одинаковых E_σ в режиме индукционной характеристики в действительности необходимо увеличение I_f на некоторую величину $A'A''$.

Вследствие изложенного при указанном выше методе определения $x_{\sigma a}$ вместо отрезка $A'C' = CA$ в действительности откладывается отрезок $A''C'' = CA$ и находится отрезок $C''B'' > C'B'$. Поэтому вместо $x_{\sigma a}$ получим сопротивление

$$x_p = \frac{C''B''}{I_H}$$

которое называется индуктивным сопротивлением Потье или расчетным и индуктивным сопротивлением рассеяния обмотки якоря.

У неявнополюсных машин $x_p \approx (1,05 \div 1,10) \cdot x_{\sigma a}$, а у явнополюсных $x_p \approx (1,1 \div 1,3) \cdot x_{\sigma a}$, причем величина x_p зависит также от расположения точки A'' на индукционной характеристике. Сопротивление x_p используется при некоторых расчетах и построениях.

3.11 Диаграмма Потье

При проектировании и эксплуатации синхронных машин возникает необходимость определения тока возбуждения, необходимого для обеспечения заданного режима работы ($U, I_a, \cos \varphi$), с учетом насыщения магнитной цепи. С этой целью для неявнополюсных генераторов пользуются диаграммой Потье, которая строится следующим образом.

При заданных $U, I_a, \cos \varphi$ строят векторы \dot{U} и \dot{i}_a и к вектору \dot{U} прибавляют векторы падений напряжения $r_a \cdot \dot{i}_a$ и $j \cdot x_{\sigma a} \cdot \dot{i}_a$. При этом получают э.д.с. \dot{E}_δ которая индуцируется ре-

зультатирующим потоком зазора Φ_{δ} и определяет поэтому степень насыщения магнитной цепи в данном режиме работы. Затем по

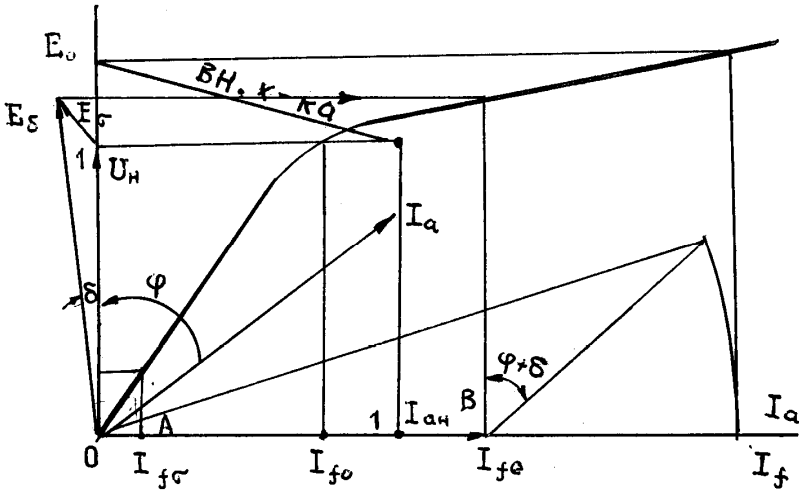


Рисунок V-3.7

х.х.х. находят необходимую для создания E_{δ} н.с. F_{fe} или ток I_{fe} возбуждения. Вектор $F_{fe}(I_{fe})$ опережает вектор \dot{E}_{δ} на 90° . Полная н.с. F_{fe} возбуждения равна разности F_{fe} и приведенной н.с. $F'_a = k_d F_a (I'_a = k_{iq} I_a)$ якоря.

Диаграмма Потье состоит, таким образом, из двух частей: диаграммы э.д.с. или напряжений и диаграммы н.с. Последнюю следует рассматривать как пространственную диаграмму н.с.

При практическом пользовании диаграммой Потье ее совмещают с х.х.х. При этом вектор U направляют по оси ординат, величину \dot{E}_{δ} сносят на эту же ось и на х.х.х., в результате чего находят ток I_{fe} . К этому току под углом $90 + \varphi + \delta$ прибавляют $I'_a = k_{iq} I_a$ в результате чего находят ток I_f . Если ток I_f снести на ось абсцисс, то по х.х.х. можно найти напряжение U_0 , которое получится после сброса нагрузки при неизменной величине I_f , а также изменение напряжения ΔU .

Диаграмма строится в относительных единицах для номинальной нагрузки $U_* = 1$, $I_{a*} = 1$ причем используют нормальную х.х.х. турбогенератора и принимают, что $r_a = 0$.

В диаграмме Потье н.с. реакции якоря не раскладывается на составляющие по осям d и q и поэтому диаграмма Потье действительна только для неявнополюсных машин. Тем не менее иногда ею пользуются также для явнополюсных машин, так как опыт показывает, что ошибка в определении I_f при этом в случае $\cos \varphi = 0,8$ обычно не превышает 5-10%. Приведение полного тока или н.с. якоря F_a к обмотке возбуждения производится также, как приведение продольного тока н.с. якоря.

При построении диаграммы Потье обычно вместо откладывают более точные результаты, так как при этом учитывается насыщение магнитной цепи индуктора от потока рассеяния возбуждения.

4. Параллельная работа синхронных машин

4.1 Включение синхронных генераторов на параллельную работу

На каждой электрической станции обычно бывает установлено несколько генераторов, которые включаются на параллельную работу в общую сеть. В современных энергосистемах на общую сеть, кроме этого, работает целый ряд электростанций, и поэтому параллельно на общую сеть работает большое число синхронных генераторов.

Все параллельно работающие генераторы должны отдавать в сеть ток одинаковой частоты. Поэтому они должны вращаться строго в такт или, как говорят, синхронно, т.е. их скорости вращения $n_1, n_2, n_3 \dots n_n$ должны быть в точности обратно пропорциональны числам пар полюсов:

$$n_1 = \frac{f}{P_1}, n_2 = \frac{f}{P_2} \dots n_n = \frac{f}{P_n} \quad (4.1)$$

Идеальные условия для включения генератора на параллельную работу достигаются при соблюдении следующих требований:

1) напряжение включаемого генератора U_f должно быть равно напряжению сети U_c или уже работающего генератора;

2) частота генератора f_r должна равняться частоте сети f_c ;
 3) чередование фаз генератора и сети должно быть одинаково;

4) напряжения U_r и U_c должны быть в фазе. При указанных условиях векторы напряжений генератора и сети совпадают и вращаются с одинаковой скоростью, разности напряжении между контактами выключателя при включении генератора равны:

$$\dot{U}_{ra} - \dot{U}_{ca} = \dot{U}_{rb} - \dot{U}_{cb} = \dot{U}_{rc} - \dot{U}_{cc} = 0$$

и поэтому при включении не возникает никакого толчка тока.

Синхронизация с помощью лампового синхроскопа может осуществляться по схеме на погасание или на вращение света.

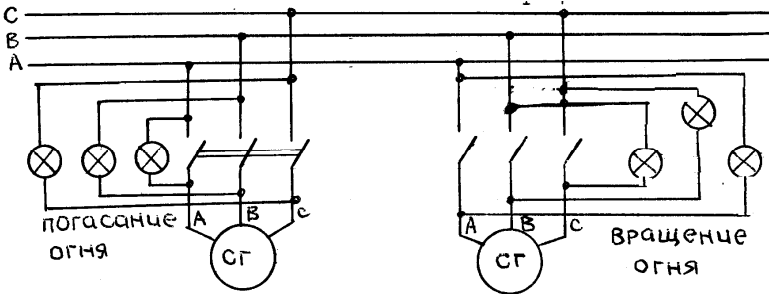


Рисунок V-4.1

Достичь такого равенства частот $f_r = f_c$ в течение даже небольшого промежутка времени практически невозможно и поэтому напряжения $U_r - U_c$ на лампах пульсируют с частотой $f_r - f_c$ и если эта частота мала, то лампы загораются и погасают с такой же частотой. Частота $f_r - f_c$ соответствует частоте пульсации напряжения. Путем регулирования частоты генератора необходимо добиться того, чтобы частота загорания и погасания ламп была минимальная (период 3-5 сек), и произвести затем включение выключателя В2 в момент времени, когда лампы не горят.

В СССР в последние годы широко внедрен **метод грубой синхронизации**, или **самосинхронизации**.

Сущность метода самосинхронизации заключается в том, что генератор включается в сеть в невозбужденном состоянии $U_r = 0$ при скорости вращения, близкой к синхронной (допускает-

ся отклонение до 2%). При этом отпадает необходимость в точном выравнивании частот, величины и фазы напряжений, благодаря чему процесс синхронизации предельно упрощается и возможность ошибочных действий исключается. После включения возбужденного генератора в сеть немедленно включается ток возбуждения и генератор втягивается в синхронизм (т.е. его скорость достигает синхронной и становится $f_r - f_c$).

При самосинхронизации неизбежно возникновение значительного толчка тока, так как включение возбужденного генератора в сеть с напряжением U_c эквивалентно внезапному короткому замыканию этого генератора при работе на холостом ходу с $E_o = E_c$. Однако толчок тока при самосинхронизации будет все же меньше, так как, кроме сопротивления генератора, в цепи будут действовать также сопротивления элементов (по выдающие трансформаторы, линия и т. д.). Кроме того, включение генератора производится при включенном сопротивлении гниения поля, что также снижает величину ударного тока и способствует быстрому затуханию переходных токов. По действующим в СССР правилам метод самосинхронизации можно применять в случаях, когда толчок тока не будет превышать $3,5 \cdot I_n$. В большинстве случаев это условие выполняется.

4.2 Синхронные режимы параллельной работы синхронных машин

Режим работы синхронной машины параллельно с сетью при синхронной скорости вращения называется **синхронным**.

$$\text{при } r_a \rightarrow 0 \quad i_a = \frac{\dot{E} - \dot{U}}{j \cdot x_d} = \frac{\Delta U}{j \cdot x_d}.$$

Изменение реактивной мощности. Режим синхронного компенсатора.

Предположим, что при включении на параллельную работу условия синхронизации возбужденного генератора были соблюдены в точности, т.е. $U_r = U_c$ или $E_o = U_c = U$. Тогда I_a т.е. машина, не примет на себя никакой нагрузки.

Изменение тока возбуждения синхронной машины вызовет в ней только реактивные токи или изменение реактивного тока и реактивной мощности. При $E_o > U$ синхронная машина называется **перевозбужденной**, а при $E_o < U$ - **невозбужденной**. При

равенстве активной мощности нулю перевозбужденная синхронная машина по отношению к сети эквивалентна емкости, а перевозбужденная - индуктивности.

Синхронная машина, не несущая активной нагрузки и нагруженная реактивным током, называется **синхронным компенсатором**. Такие компенсаторы применяются для повышения коэффициента мощности и поддержания нормального уровня напряжения в сетях.

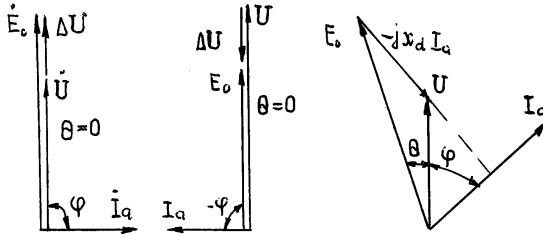


Рисунок V-4.2

Изменение активной мощности. Режимы генератора и двигателя. Чтобы включенная на параллельную работу машина приняла на себя активную нагрузку и работала в режиме генератора, необходимо увеличить движущий механический вращающий момент на ее валу, увеличив, например, поступление воды или пара в турбину. Тогда равенство моментов на валу нарушится, ротор генератора, а следовательно, и вектор э.д.с. генератора E_0 забегают вперед на некоторый угол Θ . При этом возникнет ток I_a , отстающий, как и ранее, от $\Delta \dot{U} = \dot{E} - \dot{U}$ на 90° , в данной случае $-90^\circ < \varphi < 90^\circ$ и $P = mUI \cos \varphi$, т.е. машина отдает в сеть активную мощность.

Если, наоборот, притормозить ротор, машины, создав на его валу механическую нагрузку, то э.д.с. E_0 отстанет от \dot{U} на некоторый угол $-\Theta$, ток I_a будет отставать от \dot{U} на угол $90^\circ < \varphi < 270^\circ$.

При этом мощность машины $P = mUI \cos \varphi < 0$ и машина будет работать в режиме двигателя, потребляя активную мощность из сети.

У генератора вектор \dot{U} отстает от вектора E_0 , а у двигателя наоборот.

Угол нагрузки Θ в перрон случае будем считать положительным, во втором - отрицательным.

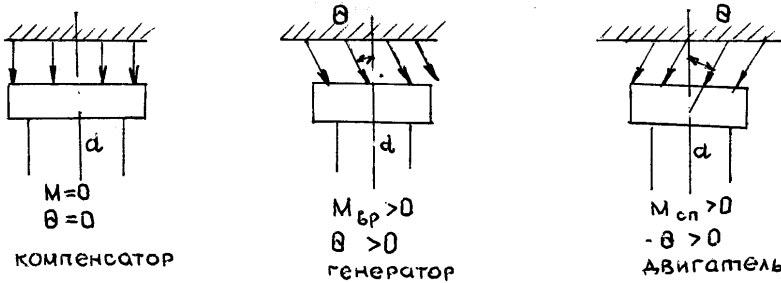


Рисунок V-4.3

У генераторов ось полюсов сдвинута относительно оси потока на поверхности статора на угол Θ вперед, по направлению вращения $\Theta > 0$, а у двигателя - против направления вращения $-\Theta > 0$. Угол Θ можно назвать внутренним углом нагрузки. Образование электромагнитного вращающего момента M и направление его действия можно объяснить даже тяжением магнитных линий.

4.3 Угловые характеристики синхронных машин

Мощность синхронной машины P зависит от угла нагрузки Θ между векторами э.д.с. E_0 и напряжения U машины. Зависимость $P = f(\Theta)$ при $E_0 = \text{const}$ и $U = \text{const}$ называется **угловой характеристикой активной синхронной машины**. Изучение этой зависимости позволяет выявить ряд важных свойств синхронной машины. Выведем математическое выражение для угловой характеристики мощности, приняв $r_a = 0$, так как это сопротивление весьма мало влияет на вид угловой характеристики.

Спроектируем векторы э.д.с., напряжений и падений напряжения на направление вектора E_0 и на направление, перпендикулярное ему. Тогда получим при $r_a = 0$ $E = x_d I_d + U \cos \Theta$
 $x_q I_q = U \sin \Theta$, откуда

$$I_d = \frac{E - U \cos \Theta}{x_d} \quad (4.2)$$

$$I_q = \frac{U \sin \Theta}{x_q} \quad (4.3)$$

Учитывая, что, $\varphi = \psi - \Theta$ для мощности генератора имеем

$$\begin{aligned} P &= mUI \cos \varphi = mUI \cos(\psi - \Theta) = \\ &= mU(I \cos \psi \cos \Theta + I \sin \psi \sin \Theta) = \\ &= mU(I_q \cos \Theta + I_d \sin \Theta) \end{aligned}$$

Заменяя здесь I_q , и I_d , получим

$$\begin{aligned} P &= \frac{mU^2}{x_q} \sin \Theta \cos \Theta + \frac{mEU}{x_d} \sin \Theta - \frac{mU^2}{x_d} \sin \Theta \cos \Theta \\ P &= \frac{m \cdot E \cdot U}{x_d} \cdot \sin \Theta + \frac{m \cdot U^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cdot \sin 2\Theta \end{aligned} \quad (4.4)$$

4.4 Статическая устойчивость

Машина работает параллельно с сетью бесконечной мощности и поэтому $U = \text{const}$, $f = \text{const}$ и ток возбуждения генератора не изменяется. Для простоты предложим также, что $\mu_c = \text{const}$ и, следовательно, $x_d = \text{const}$, $x_q = \text{const}$

У неявнополюсной машины $x_q = x_d$

$$P = \frac{mEU}{x_d} \sin \Theta \quad (4.5)$$

$P = f(\Theta)$ представляет собой синусоиду. Полуволны $P > 0$ соответствуют генераторному режиму работы и полуволны $P < 0$ - двигательному. При непрерывном изменении Θ синхронная машина попеременно переходит из генераторного режима работы в двигательный и обратно. Такое изменение Θ означает, что ротор машины вращается несинхронно несколько быстрее или несколько медленнее поля реакции якоря.

Изменение угла Θ на величину 2π означает, что ротор машины передвинулся относительно поля статора на два полюса. Режим работы машины при этом не изменяется. Диапазон $-\pi \leq \Theta \leq 0$ соответствует двигательному, а диапазон $0 \leq \Theta \leq \pi$ - генераторному режиму. Так как полупериоды синусоидальной кривой симметричны, то свойства синхронной машины в двигательном и генераторном режимах аналогичны.

При увеличении P от нуля угол Θ будет расти от $\Theta = 0$ и при критическом угле нагрузки $\Theta = 90^\circ$ достигается максимальная мощность $P = P_m$, которую способен развить генератор.

$$P_m = \frac{mEU}{x_d} \quad (4.6)$$

P_m тем больше, чем больше E или ток возбуждения машины, чем больше U и чем меньше x_d . По этой причине с целью уменьшения x_d в синхронных машинах зазор выполняется больше, чем в асинхронных машинах.

В установившемся режиме работы генератора механическая мощность $P_{пд}$, развиваемая первичным двигателем, равна электрической мощности P , отдаваемой генератором в сеть, т.е. $P_{пд} = P$. При этом под $P_{пд}$ следует понимать мощность первичного двигателя за вычетом механических и магнитных потерь в генераторе (при $r_a = 0$ электрические потери в якоре равны нулю). Мощность $P_{пд}$ не зависит от угла Θ . Устойчивой является только работа в точке 1, где $P_{пд} = P$.

Если работа в точке 1 в результате небольшого случайного преходящего возмущения угол Θ увеличится на $\Delta\Theta$ то электрическая мощность генератора превысит мощность первичного двигателя на ΔP . Вследствие этого на валу будет действовать избыточный тормозящий электромагнитный момент

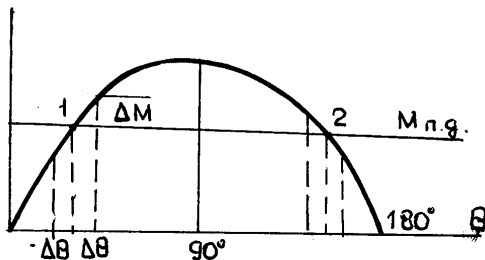


Рисунок V-4.4

$$\Delta M = \frac{\Delta P}{\omega} \quad (4.7)$$

и ротор генератора будет притормаживаться.

Угол Θ будет уменьшаться, и восстановится устойчивый установившийся режим работы в точке 1. Если при работе в точке 1 угол Θ в результате случайного возмущения уменьшится, то

при прекращении действия этого возмущения генератор также вернется в режим работы в точке 1.

Если же при работе в точке 2 угол Θ увеличится на $\Delta\Theta$, то мощность генератора будет на ΔP меньше мощности турбины, ротор будет ускоряться, угол Θ возрастет еще больше и т.д. В результате генератор выйдет из синхронизма, или при благоприятных условиях перейдет в устойчивый режим работы на последующих положительных полуволнах кривой, после «проскальзывания» ротора на четное число полюсных делений. Если же при работе в точке 2 угол Θ уменьшится, то вследствие нарушения баланса мощностей этот угол будет уменьшаться и далее, пока этот баланс не восстановится в точке 1.

Таким образом, работа неявнополюсного генератора устойчива в области $0 < \Theta < 90^0$ и неустойчива, в области $90^0 < \Theta < 180^0$.

Аналогичным образом можно установить, что неявнополюсный синхронный двигатель работает устойчиво в области $0 > \Theta > -90^0$.

4.5 Реактивная мощность

Если $I_f = 0$, то и $E_0 = 0$, так как в нормальных машинах э.д.с. от остаточного магнитного потока пренебрежимо мала. В этом случае

$$P = \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\Theta \quad (4.8)$$

Зависимость $P = f(\Theta)$ представляет собой синусоиду с удвоенной частотой.

Из равенства (4.8) следует, что явнополюсная машина в состоянии развивать мощность при синхронном режиме работы также без возбуждения. Устойчивая работа в режиме генератора происходит при $0 < \Theta < 45^0$, а в режиме двигателя - при $-45^0 < \Theta < 0$. Пределу устойчивой работы соответствует $\Theta_{кр} = \pm 45^0$ вместо $\Theta_{кр} = \pm 90^0$ в предыдущем случае.

У невозбужденной явнополюсной машины электромагнитный момент развивается исключительно вследствие действия поля реакции якоря при наличии неравномерности воздушного зазора и называется поэтому **реактивным**.

Реактивный режим работы может возникнуть, например, в случае, когда, при параллельной работе с сетью явнополюсный генератор по какой-либо причине теряет возбуждение (неисправность возбудителя, ложное срабатывание автомата гашения поля и т.д.) и был при этом, слабо загружен. Последнее обстоятельство существенно потому, что предельная мощность, которую может развить генератор в этом режиме, невелика. Действительно, по формуле (4.8) в относительных единицах, получим

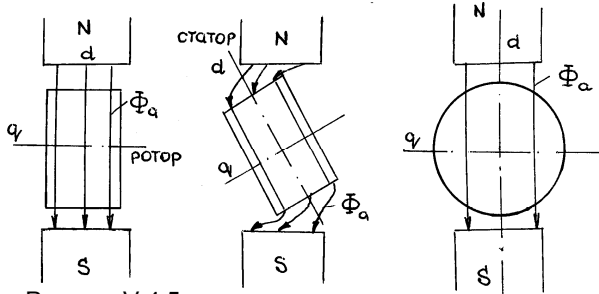


Рисунок V-4.5

был при этом, слабо загружен. Последнее обстоятельство существенно потому, что предельная мощность, которую может развить генератор в этом режиме, невелика. Действительно, по формуле (4.8) в относительных единицах, получим

$$P_* = \frac{P}{S_H} = \frac{P}{mU_H I_H} = \frac{U_*^2}{2} \left(\frac{1}{x_{q*}} - \frac{1}{x_{d*}} \right) \sin 2\Theta \quad (4.9)$$

если $U_* = 1 \cdot x_{d*} = 1,1 \cdot x_{q*} = 0,75$

то $P_* = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{0,75} - \frac{1}{1,1} \right) \sin 2\Theta = 0,212 \dots$

Машина в этом режиме потребляет большой реактивный ток для создания магнитного поля. На холостом ходу ($\Theta = 0$)

$$I = \frac{U}{x_d}$$

и, например, при $U_* = 1$ и $x_{d*} = 1,1$ будет $I_* = 0,91$.

4.6 U - образные характеристики

Изменение тока возбуждения вызывает изменение только реактивных составляющих тока и мощности якоря. Рассмотрим зависимость тока I_a от тока возбуждения

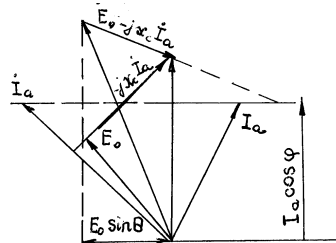


Рисунок V-4.6

I_f при $P = \text{const}$ в случае парал-

лельной работы машины с сетью бесконечной мощности $U = \text{const}$, $g = \text{const}$. Для простоты определим эту зависимость для неявнополюсной машины, так как получаемые при этом результаты характерны также для явнополюсной машины, причем будем рассматривать приведенные к обмотке якоря значения тока возбуждения.

При $P = \text{const}$ активная составляющая тока $I_{aq} = \text{const}$. Поэтому на векторной диаграмме конец вектора I_a скользит по прямой AB . Если положить для простоты $x_{\sigma a} = 0$ то, внутренняя э.д.с. $E_{\delta} = U = \text{const}$ и составляющая тока возбуждения $I'_{f\delta}$, создающая результирующий поток Φ_{δ} , также постоянна. Полный ток возбуждения $I'_f = I'_{f\delta} - I_a$ легко определяется по диаграмме.

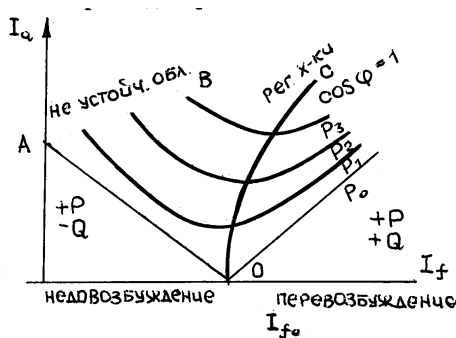


Рисунок V-4.7

Конец вектора I'_f находится в точке O' , а его начало, очевидно, также скользит по прямой AB . Концы векторов I_a и начала векторов I'_f располагаются в точках 1, 2, 3, 4 на прямой AB .

При непрерывном изменении I'_f ток I_a и $\cos \varphi$ также непрерывно изменяются, причем при некотором значении I'_f величина I_a минимальна, а при увеличении I'_f (режим перевозбуждения) и уменьшении I'_f (режим недовозбуждения) против указанного значения I'_f , величина тока I_a возрастает, так как растет его реактивная составляющая. Более точно зависимость $I_a = f(I'_f)$ можно определить путем построения точных векторных диаграмм.

На рис. V-4.7 представлен характер зависимостей $I_a = f(I'_f)$ при разных значениях $P = \text{const}$. Эти зависимости по виду называются U-образными характеристиками. Минимальное значение I_a для каждой кривой определяет активную составляющую тока якоря I_f и величину мощности $P = mUI_f$ для которой построена

данная кривая. Нижняя кривая соответствует $P = 0$, причем I_{f0} - значение тока возбуждения при $E = U$. Правые части кривых соответствуют перевозбужденной машине и отдаче в сеть индуктивного тока и реактивной мощности, а левые части - недовозбужденной машине, отдаче в сеть емкостного тока и потреблению реактивной мощности. Кривая $\varphi = 0$ или $\cos \varphi = 1$ отклоняется при увеличении мощности вправо, так как вследствие падения напряжения $x_{ca} \cdot I_q$, возрастает значение E_δ и необходимый ток возбуждения при $\cos \varphi = 1$. Кривая ОС является регулировочной характеристикой машины при $\cos \varphi = 1$.

Точка А соответствует холостому ходу невозбужденной машины. При этом из сети потребляется намагничивающий ток.

$$I = \frac{U}{x_d}$$

Угол нагрузки Θ возрастает при движении вдоль кривых справа налево, так как при меньших I_f и E угол Θ при $P = \text{const}$ увеличивается. Линия АВ представляет собой границу устойчивости, на которой $\Theta = \Theta_{кр}$. При дальнейшем уменьшении I_f машина выпадает из синхронизма. U-образные характеристики генератора и двигателя практически не отличаются друг от друга.

5. Несимметричные режимы работы синхронных генераторов

На практике встречаются случаи, когда мощные однофазные потребители нарушают симметричную нагрузку фаз синхронных генераторов (тяговые подстанции железных дорог, электрифицируемых на переменном токе и т.д.). Еще более часто, хотя и кратковременно, несимметричная нагрузка фаз генераторов возникает при несимметричных коротких замыканиях в электрических сетях: при однофазном коротком замыкании - между линейными и нулевыми проводами, при двухфазном коротком замыкании - между двумя линейными проводами и при двухфазном коротком замыкании на нейтраль - между двумя линейными и нулевым проводами. Роль нулевого провода в сетях высокого напряжения играет земля так как нулевые точки в таких сетях обычно заземляются.

Общим методом исследования несимметричных режимов является метод симметричных составляющих, при котором несимметричная система токов раскладывается на симметричные составляющие и действие последних учитывается по отдельности.

5.1 Токи и сопротивления прямой последовательности

При симметричной нагрузке синхронного генератора существуют только токи прямой последовательности. Синхронные сопротивления x_d и x_q , являются сопротивлениями синхронной машины для токов прямой последовательности.

Ротор машины вращается синхронно с полем токов прямой последовательности или полем реакции якоря и поэтому это поле не индуцирует в цепях индуктора никаких токов. По этой причине сопротивления x_d и x_q , велики.

Составляющие этого сопротивления являются индуктивное сопротивление рассеяния $x_{\sigma a}$ и индуктивное сопротивление от основной гармоники поля в воздушном зазоре (для синхронной машины x_{ad} и x_{aq}).

5.2 Токи сопротивления обратной последовательности

Если обмотка якоря (статор) синхронной машины питается напряжением обратной последовательности U_2 , возникающие при этом токи обратной последовательности создают магнитное поле обратной последовательности, которое вращается по отношению к статору с синхронной скоростью в обратном направлении, а по отношению к ротору, вращающемуся с синхронной скоростью в прямом направлении, - с удвоенной синхронной скоростью. Поэтому относительно этого поля скольжение ротора $S_2 = 2$ и в обмотках возбуждения, успокоительной и в пассивных частях ротора индуцируются вторичные токи двойной частоты, которые вызывают соответствующие потери и нагрев ротора.

При $Z_{d2} \neq Z_{q2}$ токи статора содержат составляющую основной частоты и токи тройной частоты, влиянием которых можно пренебречь. Ток основной частоты представляет собой ток обратной последовательности I_2 определяется равенством при $S = 2$:

$$\dot{i}_2 = \left(\frac{1}{Z_{d2}} - \frac{1}{Z_{q2}} \right) \frac{\dot{U}_2}{2} = \frac{Z_{d2} + Z_{q2}}{2Z_{d2}Z_{q2}} U_2 \quad (5.1)$$

Сопротивление обратной последовательности синхронной машины Z_2 равно отношению основных гармоник напряжения и тока обратной последовательности:

$$Z_2 = \frac{\dot{U}_2}{\dot{i}_2} \quad (5.2)$$

Согласно равенству (5.1)

$$Z_2 = r_2 + jx_2 = \frac{2Z_{d2}Z_{q2}}{Z_{d2} + Z_{q2}}$$

Обычно r_2 значительно меньше x_2 и $Z_2 \neq x_2$, так как при $S = 2$ активные сопротивления мало влияют на модули или величины сопротивлений Z_{d2} , Z_{q2} . При наличии успокоительных обмоток и контуров

$$Z_{d2} \approx x''_d, \quad Z_{q2} \approx x''_q \quad (5.3)$$

а при отсутствии,

$$Z_{d2} \approx x'_d, \quad Z_{q2} \approx x'_q \quad (5.4)$$

Поэтому в первом случае

$$Z_2 \approx x_2 = \frac{2x''_d x''_q}{x''_d + x''_q} \quad (5.5)$$

а во втором

$$Z_2 \approx x_2 = \frac{2x'_d x'_q}{x'_d + x'_q} \quad (5.6)$$

Сопротивления Z_2 , x_2 и r_2 можно определить по измеренным значениям U_2 , I_2 и потребляемой активной мощностью P_2 если подключить синхронную машину к источнику с симметричной системой напряжений и вращать ротор против поля с синхронной скоростью. Во избежание перегрева ротора необходимо, чтобы $I_2 = (0,2 \div 0,25) \cdot I_H$. Если машина не имеет успокоительных обмоток и контуров, то для получения более правильных результатов надо из осциллограмм выделить основные гармоники тока и напряжения.

5.3 Токи и сопротивления нулевой последовательности

Токи нулевой последовательности обмотки статора I_0 создают в воздушном зазоре только пульсирующие поля гармоник $\nu = 3, 9, 15, \dots$, а основная гармоника поля индуктируют в обмотках возбуждения и успокоительной токи, величины которых относительно невелики.

Сопротивление нулевой последовательности

$$Z_0 = r_0 + jx_0 \quad (5.7)$$

Индуктивное сопротивление нулевой последовательности x_0 ввиду отсутствия поля основной гармоники относительно невелико и определяется полями пазового и лобового рассеяния обмотки статора и указанными выше гармониками поля в зазоре. Активное сопротивление нулевой последовательности r_0 в результате потерь, вызываемых гармониками поля в роторе, несколько больше активного сопротивления обмотки статора r_a , но разность $r_0 - r_a$ невелика и $r_0 \approx r_a$. Вращающий момент, создаваемый токами I_0 , практически равен нулю.

Сопротивления Z_0 , x_0 и r_0 можно определить опытным путем, если при вращении машины с синхронной скоростью питать последовательно включенные фазы обмотки статора током I_0 . Указанные сопротивления при этом определяются точно так же, как и у трансформатора.

6. Переходные процессы синхронных машин

6.1 Общие вопросы

При резких изменениях режима работы синхронной машины (наброс и сброс нагрузки, замыкание и размыкание электрических цепей обмоток, короткие замыкания в этих цепях и т.д.), возникают разнообразные переходные процессы. В современных энергетических системах работают совместно большое количество синхронных машин, причем мощности отдельных машин достигают 1,5 млн.квт. Переходные процессы, возникающие в одной машине, могут оказать большое влияние на работу других машин и всей энергосистемы в целом, поскольку в этих машинах также возникают переходные процессы. Интенсивные переходные процессы нарушают работу энергосистемы в целом и могут вызвать серьезные аварии.

Следует отметить, что переходные процессы синхронных машин протекают весьма быстро, в течение нескольких секунд и даже долей секунды. Поэтому целенаправленные и согласованные действия эксплуатационного персонала энергетических систем в начальный и вместе с тем решающий период возникновения аварии невозможны. В связи с этим необходимо применять многочисленные и разнообразные средства автоматического управления и регулирования, чтобы воздействовать на возникшие переходные процессы в нужных направлениях.

Наиболее часто интенсивные переходные процессы в энергетических системах и синхронных машинах вызываются короткими замыканиями в электрических сетях и линиях электропередачи. Такие замыкания возникают по разным причинам (повреждение и пробой изоляции, атмосферные перенапряжения, замыкания проводов птицами, падение опор линий передачи, обрыв проводов и т.д.).

6.2 Гашение магнитного поля и переходные процессы в цепях индуктора

Способы гашения поля. При внутренних коротких замыканиях в обмотке якоря синхронного генератора или на его выводах, до выключателя, автоматическая релейная защита с помощью выключателя отключает генератор от сети. Но короткое замыкание внутри генератора этим не устраняется, ток возбуждения I_f продолжает индуцировать э.д.с. в обмотке якоря, и в ней продолжают течь большие токи короткого замыкания, которые вызывают сначала расплавление меди обмотки якоря в месте короткого замыкания, а затем также расплавление стали сердечника якоря. Поэтому во избежание больших повреждений генератора необходимо быстро довести ток возбуждения и поток генератора до нуля. Такая операция **называется гашением магнитного поля**.

Гашение поля путем разрыва цепи возбуждения генератора, недопустимо, так как при этом, вследствие чрезвычайно быстрого уменьшения магнитного потока в обмотках генератора индуцируются весьма большие э.д.с., способные вызвать пробой изоляции. 3 особенности это относится к самой обмотке возбуждения и к ее контактному кольцам, так как номинальное напряжение цепи возбуждения относительно мало (500-1000В). Во-вторых, магнитное поле генератора содержит значительную энергию, которая при разрыве цепи возбуждения гасится в дуге вы-

ключателя между контактами, в результате чего этот выключатель может быстро прийти в негодность.

Разрыв цепи возбуждения возбудителя также недопустим в отношении возникающих при этом перенапряжений в обмотке возбуждения возбудителя. Кроме того, он не дает желательных результатов, так как обмотка возбуждения генератора оказывается замкнутой через якорь возбудителя и ввиду большой индуктивности и небольшого сопротивления этой цепи ток I_f будет затухать медленно, с постоянной времени 2-10 сек. При этих условиях размеры повреждения генератора при внутренних коротких замыканиях оказываются большими.

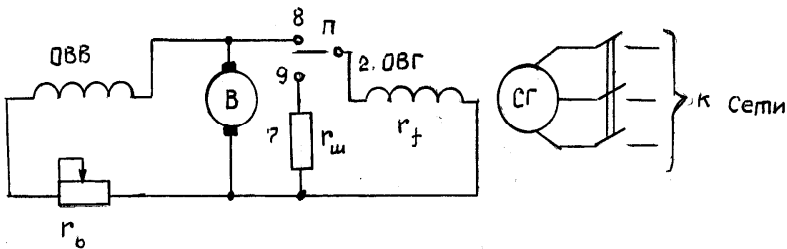


Рисунок V-6.1

Одна из широко применяемых схем гашения поля изображена на рис. V-6.1.

В этой схеме при нормальной работе контакты 8 замкнуты, а контакты 9 разомкнуты. При коротком замыкании релейная защита подает команду на замыкание контактов 9 и отключение контактов 8. Цепь обмотки 2 остается замкнутой через сопротивление 7 гашения поля $r_{ш}$ величина которого в 3-5 раз больше сопротивления r_f самой обмотки 2. При этом ток I_f затухает с определенной скоростью, которая тем больше, чем больше $r_{ш}$. Контакты 8 в данном случае работают в довольно тяжелых условиях, так как на них возникает сильная дуга.

6.3 Теорема о постоянстве потокосцепления

Дифференциальное уравнение электрической цепи, в которой нет источников посторонних э.д.с., имеет вид

$$U = - \frac{d\psi}{dt} - ir$$

$$-\frac{d\psi}{dt} = r_i$$

где ψ - полное потокосцепление этой цепи, обусловленное как собственным током этой цепи, так и потоками взаимной индукции других цепей, индуктивно связанных с нею.

Если $r = 0$, то вместо указанного уравнения имеем

$$\frac{d\psi}{dt} = 0$$

откуда $\psi = \text{const}$

Следовательно, потокосцепление сверхпроводящей электрической цепи остается постоянным.

Если, например, к такой цепи подвести полюс магнита, то в ней будет индуцироваться ток такой малой величины и знака, что создаваемое этим током потокосцепление полностью компенсирует потокосцепление, вызванное приближением полюса магнита.

Перед внезапным коротким замыканием синхронного генератора в его обмотке возбуждения протекает ток I_{f0} и в цепи возбуждения действует посторонняя э.д.с. (э.д.с. якоря возбудителя)

$$e_0 = r_f I_{f0}$$

где r_f - сопротивление всей цепи возбуждения.

Однако, если положить r_f , то также будет $e_0 = 0$ т.е. для поддержания тока I_{f0} наличия э.д.с. возбудителя не потребуется.

6.4 Токи трехфазного короткого замыкания

Для того, чтобы выяснить физическую картину явления при трехфазном коротком замыкании, достаточно взять только одну фазную обмотку и считать, что она состоит из эквивалентной катушки, например, А - X. Предполагается, что до момента короткого замыкания машина работала вхолостую, т.е. $I_a = 0$, и рассматриваются условия внезапного короткого замыкания в два различных момента времени:

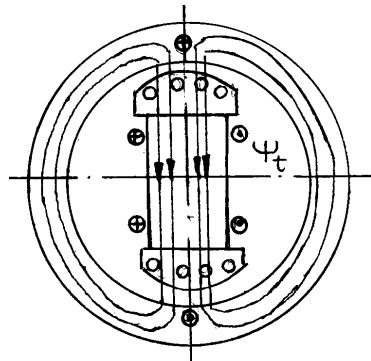


Рисунок V-6.2

1) в момент, когда поток, пронизывающий катушку А – Х, равен нулю $\psi_n = 0$ и, следовательно, наводимая в катушке э.д.с. достигает наибольшего значения, т.е. $e_n = E_{nm}$;

2) в момент, когда поток, пронизывающий катушку А – Х, достигает максимума $\psi_n = \psi_{nm}$ и, следовательно, наводимая в катушке э.д.с. равна нулю, т.е. $e_n = 0$.

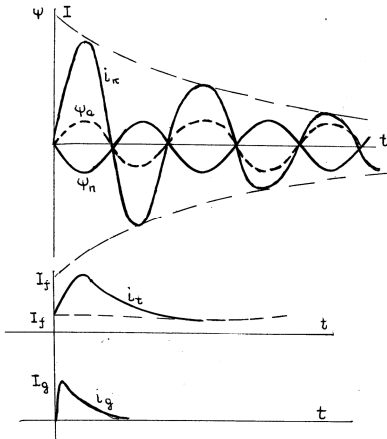


Рисунок V-6.3

А. $\psi = 0$ и $e_n = E_{nm}$. Ось полюсов совпадает с плоскостью катушки А – Х. Это положение полюсов принимается за исходное и от него ведется отсчет углов поворота ротора α . Очевидно, что в начальный момент $t = 0$, угол $\alpha = 0$ и, согласно условию, ток короткого замыкания.

Если бы машина не была замкнута накоротко, то при

повороте от $\alpha = 0$ до $\alpha = \frac{\pi}{2}$ поток ψ_n сцепленный с катушкой, увеличивался бы от $\psi = 0$ до своего наибольшего значения, т.е.

до $\psi_n = \psi_{om}$; затем при повороте ротора от $\alpha = \frac{\pi}{2}$ до $\alpha = \pi$ поток уменьшался бы от ψ_{nm} до $\psi_n = 0$ и т.д. Для простоты предположено, что это изменение потока ψ в контуре катушки А – Х происходит синусоидально (сплошная синусоида на рис. V-6.3)

Катушка А – Х представляет собой сверхпроводящий контур, поток, сцепленный с ней, должен остаться равным нулю и в последующие моменты времени короткого замыкания. Это возможно только при том условии, если в катушке А – Х появится такой по величине и направлению ток I_k при котором $\psi_{ad} + \psi_n = 0$, поток якоря ψ_{ad} , создаваемый током I_k , в любой момент времени должен быть равным по величине потоку ψ_n , но встречно направлен относительно последнего (штриховая синусоида на рис. V-6.3).

Поток ψ_{ad} , создаваемый током I_k можно рассматривать как поток реакции якоря при установившемся режиме работы, в частности при установившемся коротком замыкании.

Обмотка возбуждения и успокоительная обмотка представляют собой сверхпроводящие контуры сцепленные с ними потоки должны остаться без изменения, а это возможно только в том случае, если в обеих обмотках ротора - возбуждения и успокоительной - возникнут такие по величине и направлению токи, которые не дали бы потоку якоря проникнуть в контуры обмоток ротора, оттеснив поток ψ_{ad} на путь рассеяния этих обмоток. Магнитная проводимость такого пути значительно меньше, чем магнитная проводимость нормального пути по стали ротора.

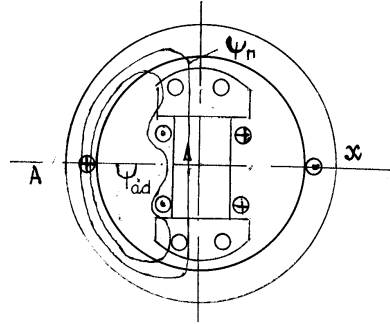


Рисунок V-6.4

Поэтому для создания данного значения потока якоря ψ_{ad} требуется при внезапном коротком замыкании значительно большая намагничивающая сила якоря и, следовательно, значительно больший ток I_k , чем при установившемся коротком замыкании. В якоре получается бросок тока, достигающий своего наибольшего значения через четверть периода после замыкания машины на коротко.

Изменение тока в обмотке возбуждения, создающей основной поток машины Φ_n , может быть определено из следующих соображений. Если бы поток якоря ψ_{ad} с первого же момента времени внезапного короткого замыкания не мог пройти в сердечник полюса, то будучи направлен встречно относительно основного потока, он, несомненно, уменьшил бы его и, следовательно, уменьшил бы число его потокоцеплений с обмоткой возбуждения. Но, это невозможно, поскольку рассматривают обмотку возбуждения как сверхпроводящий контур. Чтобы предупредить это уменьшение, в обмотке возбуждения должен возникнуть ток, имеющий то же направление, что и нормальный ток возбуждения, так как только при этом условии может быть скомпенсировано встречное действие потока якоря и он будет вытеснен на пути рассеяния обмотки возбуждения.

Сказанное можно повторить и в отношении успокоительной обмотки с той, однако, разницей, что до момента внезапного короткого замыкания ток в ней равен нулю, тогда как ток обмотки возбуждения имеет величину I_f .

При идеально сверхпроводящем контуре картина потоков, показанная на рис., продолжала, бы существовать неопределенно долго. В действительности обмотки ротора обладают некоторыми активными сопротивлениями, вследствие чего эта картина постепенно (меняется, переходя в обычную картину установившегося короткого замыкания с гораздо меньшим током I_f (правая часть рис.).

Такой переход от одного режима с большим током к другому режиму с меньшим током называется затуханием процесса.

В теоретической электротехнике доказывается, что затухание процесса зависит от так называемой постоянной времени T данного контура. По величине $T = \frac{L}{r}$, т.е. постоянная времени, выражаемая в секундах, представляет собой отношение индуктивности контура L

к его активному сопротивлению r . При $r = 0$ (сверхпроводник) постоянная $T = \infty$, т.е. процесс затухания продолжается бесконечно долгое время. При $r \neq 0$ процесс затухает тем быстрее, чем больше r .

Постоянная времени успокоительной обмотки обычно значительно меньше, чем постоянная времени обмотки возбуждения, так как L успокоительной обмотки относительно мала, а r - велико. Поэтому в успокоительной обмотке ток затухает очень быстро, а в обмотке возбуждения значительно медленнее. При затухании тока в каждой из этих обмоток устраняется причина,

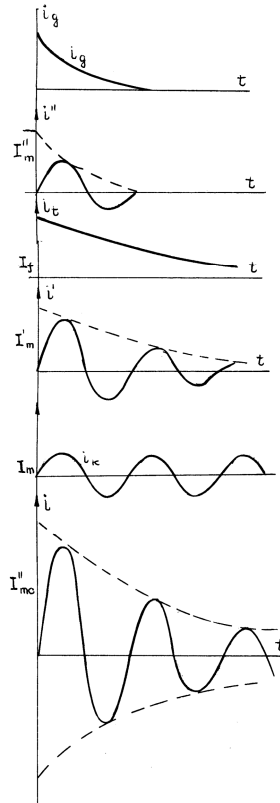


Рисунок V-6.5

которая препятствовала проникновению потока якоря в соответствующий контур.

Из сказанного следует, что поток якоря проникает сначала в контур успокоительной обмотки, а затем - обмотки возбуждения, после чего режим перейдет в режим установившегося короткого замыкания.

Чтобы выяснить характер процесса затухания токов в обмотках ротора и статора, необходимо принять во внимание, что в режиме внезапного короткого замыкания эти обмотки связаны между собой магнитно, наподобие первичной и вторичной обмоток трансформатора, и должны находиться в постоянном взаимодействии между собой, а для этого поля обмоток якоря и статора должны вращаться в одну сторону с одинаковой скоростью.

Поле, создаваемое токами внезапного короткого замыкания в статоре, вращается относительно статора с синхронной скоростью n_0 ; в ту же сторону и с той же скоростью n_0 вращается ротор; поэтому поля, создаваемые токами в обмотках ротора, должны быть неподвижны относительно ротора, так как только в этом случае обеспечивается постоянное электромагнитное взаимодействие между полями статора и ротора. Неподвижные относительно ротора поля могут создаваться только такими токами в обмотках ротора, которые имеют постоянное направление, и притом, как это было показано выше, совпадающее с направлением основного тока возбуждения I_f .

Из сказанного следует, что в рассматриваемых условиях постоянное электромагнитное взаимодействие между полями статора и ротора осуществляется при условии, что токи в обмотке якоря носят периодический характер и имеют частоту f , а токи в обмотках индуктора являются аperiodическими. Составляющая тока в якоре, соответствующая успокоительной обмотке, называется сверхпереходной составляющей тока внезапного короткого замыкания, а составляющая, соответствующая обмотке возбуждения - переходной составляющей тока внезапного короткого замыкания. Каждая из этих составляющих тока, будучи электромагнитной связана с соответствующим током в индукторе, затухает, причем, согласно сказанному выше сначала затухает сверхпереходная составляющая тока, а затем переходная.

По окончании процесса затухания ток внезапного короткого замыкания переходит установившийся ток короткого замыкания I_k . Таким образом, ток внезапного короткого замыкания в статоре

можно рассматривать как сумму трех токов: сверхпереходного, переходного и установившегося. Если вычертить линии, сгибающиеся периодические токи в якоре и продолжить их до пересечения с осью ординат, то получатся начальные, т.с. отнесенные на момент времени $t = 0$, амплитуды сверхпереходной и установившейся составляющих тока в статоре I_m'' , I_m' , I_m .

Суммарный ток внезапного короткого замыкания и соответствующая ему огибающая изображены на рис.6.4. Амплитуда этого тока, отнесенная к начальному моменту времени, составляет:

$$i_{mc}'' = i_m'' + i_m' + i_m$$

Такую же линию можно изобразить и по другую сторону оси абсцисс, в результате чего получается симметричная относительно этой оси фигура, имеющая форму раструба. Поэтому изображенный на рис. ток называется симметричной или периодической составляющей тока внезапного короткого замыкания.

Б. $\psi_n = \psi_{nm}$; $e_n = 0$. Катушка А – X в момент короткого замыкания $t = 0$ пронизывается наибольшим потоком, т.е. $\psi_n = \psi_{nm}$.

При вращении ротора поток, пронизывающий катушку, непрерывно изменяется, а именно: при повороте ротора на угол $\alpha = \frac{\pi}{2}$ поток изменяется от ψ_{nm} до 0, так как в этот момент ось ротора совпадает с плоскостью катушки А – X. При дальнейшем повороте ротора еще на $\frac{\pi}{2}$, т.е. по прошествии времени $t = \frac{T}{2}$, поток от 0 до $-\psi_{nm}$.

Рассуждения, подобные приведенным в рассмотренном выше случае (п.А), показывают, что картина потоков в основном подобна картине потоков случае А. По имеется и существенная разница, определяемая тем, что в данном случае внезапное короткое замыкание происходит в момент, когда пронизывающий катушку А – X поток $\psi_n = \psi_{nm}$. Если по-прежнему считать катушку А – X сверхпроводящим контуром, то согласно принципу постоянства потока, сцепленного с таким контуром, поток должен оставаться постоянным и в последующие моменты времени короткого замыкания $\psi_{nm} = \text{const}$, а для этого по обмотке статора должен течь соответствующий по величине и направлению постоянный во времени ток.

При $r = 0$ этот ток оставался бы постоянным неопределенно долгое время. В действительности он не будет постоянным, а затухнет по закону показательной функции со скоростью, определяемой постоянной времени затухания $T = \frac{L}{r_a}$, обмотки якоря. Этот

ток называют аperiodической составляющей тока внезапного короткого замыкания. Следует заметить, что эта составляющая тока внезапного короткого замыкания синхронного генератора имеет тот же смысл и возникает при тех же условиях, что и аperiodическая составляющая сверхтока в трансформаторе.

Таким образом, в данном случае в статоре, кроме трех составляющих тока внезапного короткого замыкания, указанных раньше, имеется еще четвертая - аperiodическая составляющая этого тока, налагающаяся на три первых и совместно с ними образующая результирующую кривую тока внезапного короткого замыкания.

Полная картина тока внезапного короткого замыкания синхронного генератора в момент, когда $\psi_n = \psi_{nm}$, $e = 0$ представлена на рис. Так как $r_a = 0$, то периодическая составляющая тока I_k отстает от э.д.с. на $\frac{\pi}{2}$ и, стало быть, в начальный момент короткого замыкания достигает наибольшего значения I''_{mc} .

На рис. V-6.6 периодическая составляющая тока I_k изображена пунктирной линией 1, а огибающие кривые - штриховой линией.

Аperiodическая составляющая тока I_k представлена сплошной линией 2; так как, согласно условию, в начальный момент времени ток $I_k = 0$, то начальная амплитуда аperiodической составляющей тока I_{mc} , должна быть равна величине I''_{mc} , но направлена в обратную сторону.

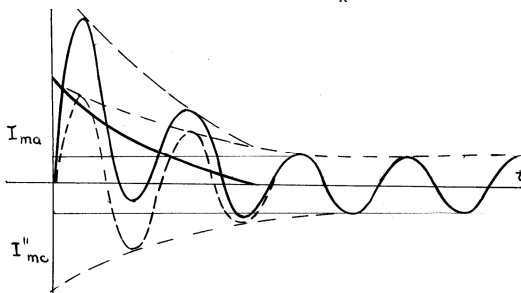


Рисунок V-6.6

В результате сложения линий 1 и 2 линия 3 результирующего тока внезапного короткого замыкания. Штриховая линия 4 представляет собой огибающую амплитуд результирующего тока.

Наличие апериодической составляющей в токе якоря изменяет характер токов, возникающих при внезапном коротком замыкании в обмотках ротора. В самом деле, апериодический ток является током постоянного направления. Поэтому он создает в пространстве неподвижное магнитное поле, в котором вращается ротор с синхронной скоростью n_0 . В этом случае в обмотках ротора наводятся переменные токи основной частоты, налагающиеся на токи, показанные на рис. и взаимодействующие с апериодической составляющей тока в статоре.

Согласно ГОСТ 183-66, синхронные машины должны выдерживать внезапный ток (в ГОСТ - "ударный") короткого замыкания или напряжении холостого хода, равном 105% номинального.

6.5 Схемы замещения с.г. в переходных процессах

На роторе синхронного генератора имеются замкнутая через возбуждатель обмотка возбуждения и короткозамкнутая демпферная. Роторные обмотки индуктивно связаны со статорной. Вследствие этого в момент внезапного короткого замыкания синхронный генератор может рассматриваться как трехобмоточный, первичная обмотка которого является статорной, а две вторичные - роторными. В этом случае синхронный генератор приближенно может быть представлен в продольной оси схемой замещения трехобмоточного трансформатора, в которой учитываются только индуктивные сопротивления взаимоиндукции между обмотками x_{ad} и сопротивления рассеяния обмоток; статора x_σ , возбуждения x_f и продольной x_g . Величины, относящиеся к переходным процессам, на которые оказывает влияние демпферная обмотка, называются сверхпереходными и обозначаются двумя штрихами. Например, эквивалентное сопротивление, соответствующее схеме замещения машины в продольной оси, где учитывается демпферная обмотка, будем называть **сверхпереходным** и обозначать x_d'' . Согласно схеме замещения

$$x_d = x_\sigma + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_f} + \frac{1}{x_g}}$$

В некоторых случаях в явнополюсных синхронных генераторах может отсутствовать демпферная обмотка. Такой генератор в начальный момент следует рассматривать как двухобмоточный трансформатор. Величины относящиеся к пере-

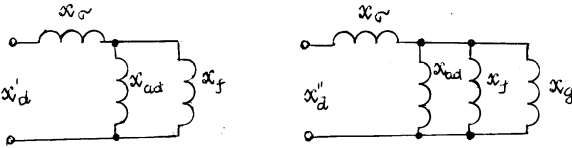


Рисунок V-6.7

ходным процессам, на которые не оказывает влияние демпферная обмотка или другие демпфирующие контуры на роторе но влияет обмотка возбуждения, назовем переходными и обозначим одним штрихом; например эквивалентное сопротивление, соответствующее схеме замещения - переходное и обозначим x'_d . Согласно схеме замещения

$$x'_d = x_\sigma + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_f}}$$

7. Синхронные микромашины

7.1 Назначение и классификация синхронных микромашин

В автоматических устройствах широко применяются синхронные микродвигатели мощностью от долей ватта до нескольких сотен ватт. Характерной особенностью таких двигателей является то, что их скорость вращения n жестко связана с частотой питающей сети f , поэтому они используются в различных устройствах, где требуется поддерживать постоянную скорость вращения (в электрических часовых механизмах, лентопротяжных механизмах самопишущих приборов и киноустановок, в радиоаппаратуре, программных устройствах и пр.), а также в системах синхронной связи, где скорость вращения механизмов управляется изменением частоты питающего напряжения. В ряде случаев синхронные микромашины применяются в качестве генераторов, например для получения переменного тока повышенной частоты (индукторные генераторы) и для измерения скорости вращения (синхронные тахогенераторы).

В зависимости от особенностей электромагнитной системы синхронные микромашины подразделяются на следующие типы:

- синхронные двигатели с постоянными магнитами;
- реактивные двигатели;
- гистерезисные двигатели;
- индукторные машины (в том числе редукторные двигатели);
- шаговые (импульсные) двигатели.

Все эти машины обычно выполняются без обмотки возбуждения на роторе, что значительно повышает их эксплуатационную надежность и упрощает конструкцию.

7.2 Синхронные машины с постоянными магнитами

В синхронных машинах с постоянными магнитами роль обмотки возбуждения выполняет блок постоянных магнитов, изготовляемый из магнитотвердого материала (сплавы типа ални, алнико, магнико, и др., обладающие большой силой коэрцитивной силой). Постоянные магниты в таких машинах располагаются в большинстве случаев на роторе.

Статор имеет обычную конструкцию: в его пазах размещаются одно-, двух- или трехфазная обмотки. Синхронные машины с постоянными магнитами широко используются в качестве микродвигателей, генераторов небольшой мощности и тахогенераторов.

Синхронные микродвигатели.

В синхронных микродвигателях на роторе, кроме блока постоянных магнитов, устанавливается собранный из листовой стали пакет, в пазах которого размещается пусковая короткозамкнутая обмотка типа беличьей клетки. Последняя по окончании процесса пуска выполняет роль демпфера, препятствующего качаниям ротора. Применение такого составного ротора объясняется тем, что магнитотвердые сплавы трудно поддаются механической обработке, вследствие чего выполнение беличьей клетки в роторе,

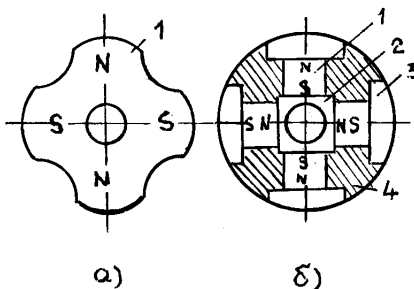


Рисунок V-7.1

изготовленном целиком из подобного сплава, было бы не возможным.

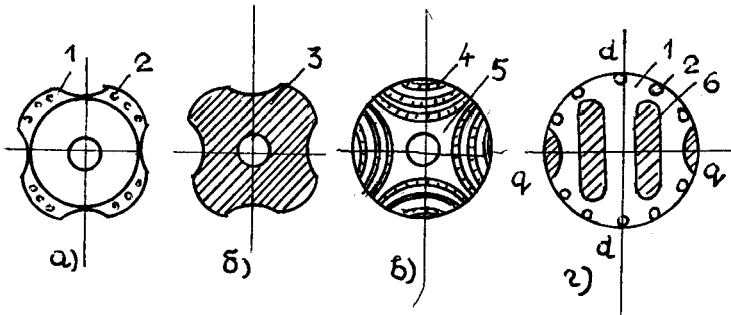


Рисунок V-7.2

Наибольшее применение получили микродвигатели двух конструктивных исполнений: с радиальным и аксиальным расположением блока постоянных магнитов и пакета ротора с короткозамкнутой обмоткой. В первом случае пакет стали ротора выполнен в виде кольца, напресованного на блок постоянных магнитов, в котором имеются прорезы, разделяющие полюса, разной полярности; размеры прорезей выбираются из условий оптимального использования энергии постоянных магнитов. Во втором случае кольцевой пакет ротора насаживается непосредственно на вал ротора, а по краям его устанавливаются один или два блока постоянных магнитов, выполненных в виде дисков.

Синхронные генераторы.

В синхронных генераторах малой мощности с возбуждением от постоянных магнитов ротор может быть выполнен или в виде блока из магнитотвердого материала или с постоянными магнитами, установленными в стальной втулке. Промежутки между магнитами в некоторых случаях заливают алюминием, благодаря чему обеспечивается монолитность конструкции ротора. В генераторах, применяемых в некоторых транспортных установках (авиации, железнодорожный транспорт и автотранспорт), иногда применяют ротор с когтеобразными полюсами).

Синхронный тахогенератор.

Представляет собой одно- или трехфазную синхронную машину с постоянными магнитами на роторе. В такой машине при

вращении ротора в обмотке статора индуцируется э.д.с. действующее значение которой

$$E = 4,44fW_{\text{к.об}} \Phi = 4,44W_{\text{к.об}} \Phi \frac{Pn}{60} = c_n$$

пропорционально скорости вращения n .

В синхронном тахогенераторе зависимость выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ от скорости вращения является нелинейной. Физически это объясняется тем, что при изменении скорости вращения изменяется частота выходной э.д.с., в результате чего сильно изменяются реактивные сопротивления обмотки статора и нагрузки.

7.3 Реактивный двигатель

Реактивным **двигателем** называется синхронный двигатель с явнополюсным ротором без обмотки возбуждения и без постоянных магнитов, у которого магнитный поток создается реактивным током, протекающим по обмотке статора. Вращающий момент в таком двигателе возникает из-за различия в магнитных проводимостях по продольной и поперечной осям. При этом явно выраженные полюса ротора стремятся ориентироваться относительно поля так, чтобы магнитное сопротивление для силовых линий поля было бы минимальным, вследствие чего появляются тангенциальные силы F_t , образующие вращающий момент, и ротор вращается в том же направлении и с той же скоростью n_0 , что и поле статора.

Ротор двигателя может иметь различное конструктивное выполнение. Наиболее распространены роторы со впадинами из сплошного ферромагнитного материала с соответствующими вырезами и секционированный. Ротор со впадинами собирается из стальных листов, имеющих специальный профиль; для пуска в ход двигателя в роторе предусмотрена короткозамкнутая обмотка типа беличьей клетки. Ротор из сплошного ферромагнитного материала применяют в двигателях, предназначенных для пуска в ход без нагрузки. Пусковой обмотки такой двигатель не имеет, но в нем создается небольшой пусковой момент в результате взаимодействия вращающегося статора с вихревыми токами, индуцированными в роторе. Секционированный ротор выполняется из алюминия, пластмассы или другого немагнитного материала, в который закладываются стальные секции (полосы). В роторе со

впадинами отношение $\frac{x_d}{x_q} \approx 2$ и максимальный момент двигателя

небольшой. В секционированном роторе $\frac{x_d}{x_q} \approx 2 \div 3.5$, благодаря

чему максимальный момент возрастает. Однако это достигается существенные усложнением конструкции ротора, вследствие чего стоимость машины увеличивается. Двигатели такой конструкции применяются главным образом в схемах синхронной связи. В последнее время появились реактивные двигатели, у которых разность магнитных сопротивлений по продольной и поперечной осям машины создается не за счет междуполюсных впадин в роторе, а в результате выполнения в роторе овальных пазов. Эти двигатели имеют больший к.п.д. и несколько меньшие габаритные размеры, чем реактивные двигатели других типов.

Электромагнитный момент реактивного синхронного двигателя может быть определен по общей формуле для синхронной машины при условии работы ее с током возбуждения, равным нулю. В этом случае э.д.с. $E = 0$ примет вид

$$M = \frac{P_{эм}}{\omega} = \frac{mU^2}{\omega} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\Theta \quad (7.1)$$

Реактивные двигатели проще по конструкции, надежнее в работе и дешевле по сравнению с синхронными двигателями с обмоткой возбуждения на роторе; для них не требуется иметь источник постоянного тока для питания цепи возбуждения. Основными недостатками реактивного двигателя являются сравнительно небольшой максимальный момент и низкий $\cos \varphi$, не превышающий обычно 0,5. Последнее объясняется тем, что магнитный поток в этом двигателе создается только за счет реактивного тока обмотки якоря, величина которого из-за повышенного сопротивления магнитной цепи машины (наличия впадин на роторе, внутренних овальных пазов или вставок из немагнитного материала) довольно велика. По этим же причинам к.п.д. и габаритные размеры у этих машин больше, чем у одинаковых по мощности и скорости вращения синхронных и асинхронных двигателей. В двигателях мощностью несколько десятков ватт к.п.д. составляет 0,3-0,4, а мощностью до 10 вт - менее 0,2. Другими недостатками этого двигателя являются большая чувствительность к колебаниям питающего напряжения (электромагнитный момент у них пропорционален U^2) и склонность к качаниям ротора при

резких изменениях нагрузочного момента на валу или скорости вращения магнитного поля.

7.4 Гистерезисный двигатель

Гистерезисным двигателем называется синхронный двигатель, у которого вращающий момент создается за счет явления гистерезиса при перемагничивании ферромагнитного материала.

Статор в гистерезисном двигателе выполняется так же, как и в обычной машине переменного тока; обмотка статора может быть трехфазной или двухфазной (с конденсатором в одной из фаз). Ротор двигателя представляет собой стальной цилиндр

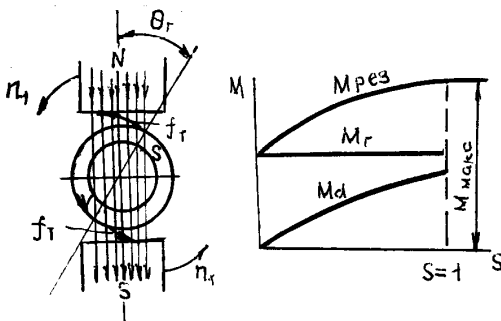


Рисунок V-7.3

из магнитотвердого материала (имеющего широкую петлю гистерезиса) без обмотки. Применение достаточно большой электромагнитный момент, поэтому используют специальные магнитотвердые сплавы, например викаллой. С целью экономии дорогих специальных сплавов роторы гистерезисных двигателей выполняют сборными: в виде массивного или шихтованного (из отдельных изолированных платан) кольца, из указанного сплава, насаженного на стальную или алюминиевую втулку.

В гистерезисном двигателе ротор, вращающийся с синхронной скоростью, представляет собой постоянный магнит. В таком магните из-за явления гистерезиса (молекулярного трения) ось намагничивания отстает от оси вращающегося магнитного поля статора на некоторый угол Θ_r гистерезисного сдвига, вследствие чего возникают тангенциальные составляющие сил взаимодействия между полюсами ротора и потоком статора. Поскольку для данной машины угол Θ_r определяется только свойствами материала ротора, то тангенциальные составляющие и создаваемый ими гистерезисный момент не зависят от скорости вращения. Чем больше ширина петли гистерезиса ферромагнит-

ного материала ротора, тем больше угол Θ_r и тем больше момент M .

Преимущества и недостатки.

Достоинствами гистерезисных двигателей являются: простота конструкции, надежность в работе, малый пусковой ток ($I_n = 1,27 \div 1,5$), плавность входа в синхронизм, бесшумность и сравнительно высокий к.п.д. - до 60%. К недостаткам относятся: повышенная стоимость из-за значительной стоимости магнитотвердых сплавов и трудности их обработки, низкий (0,4-0,5) и склонность к качаниям при резких изменениях нагрузки. Гистерезисные двигатели выпускаются на мощность до 2000 Вт и чистоту $L > 0, 400$ и 500 гц в трехфазном исполнении.

7.5 Индукторные машины

В некоторых устройствах (гироскопические и радиолокационные приводы и т.д.) установки, системы следящего привода и т.д. применяются однофазный ток повышенной частоты - 400-30000 Гц. Синхронные генераторы нормальной конструкции, частота которых $f = \frac{P \cdot n_2}{60}$, не подходят для получения таких частот,

так как увеличение скорости вращения у них ограничено механической прочностью ротора, а значительное увеличение числа полюсов $2p$ невозможно по условиям размещения обмоток.

Поэтому для генерирова-

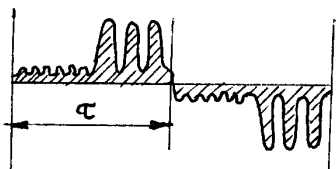


Рисунок V-7.4

ния переменного тока повышенной частоты применяют генераторы особой конструкции, основанные на действии зубцовых гармоник. Эти машины называются **индукторными**.

Индукторные генераторы имеют более низкий к.п.д. (0,4-

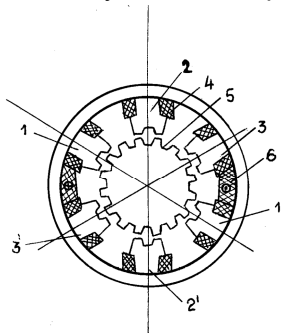


Рисунок V-7.5

0,5), чем обычные синхронные генераторы; это объясняется значительным увеличением добавочных потерь мощности в стали и в обмотке якоря из-за высокой частоты перемагничивания.

7.6 Редукторные (индукторные) двигатели

Трехфазные и двухфазные индукторные машины широко применяются не только в качестве генераторов, но и в качестве двигателей. Синхронная скорость вращения индукторных двигателей

$$n_2 = \frac{60f}{Z_2}$$

в то время как скорость вращения магнитного поля статора

$$n_0 = \frac{60f}{P}$$

Отношение

$$\frac{n_0}{n_2} = \frac{Z_2}{P} = k_{\text{ред}}$$

называется **коэффициентом редукции**; он показывает, во сколько раз скорость вращения ротора меньше скорости вращения магнитного поля, поэтому индукторные двигатели часто называются редукторными. Редукторные двигатели могут выполняться с возбуждением на статоре или роторе, с постоянными магнитами или без возбуждения (реактивные).

В зависимости от расположения обмотки возбуждения или постоянных магнитов различают двигатели с осевым и радиальным возбуждением.

7.7 Шаговые (импульсные) двигатели

Шаговые (импульсные) двигатели представляют собой синхронные микродвигатели, в которых питание обмоток статора осуществляется путем подачи импульсов напряжения от потенциального или электронного коммутатора. Под воздействием каждого такого импульса ротор двигателя совершает определенное угловое перемещение, называемое шагом. Коммутатор преобразует заданную последовательность управляющих импульсов в m -фазную систему однополярных или разнополярных прямоугольных импульсов напряжения.

В качестве шаговых двигателей обычно применяются синхронные микромашины без обмотки возбуждения на роторе: дви-

гатели с постоянными магнитами, реактивные и индукторные двигатели (с подмагничиванием). Имеются и специальные виды импульсных двигателей, сконструированных для выполнения особых технологических операций. Применение шагового двигателя целесообразно для привода механизмов, имеющих старт-стопное движение, или механизмов с непрерывным движением, если управляющий сигнал задан в виде последовательности импульсов или может быть преобразован в эту форму (лентопротяжные устройства для ввода и вывода информации, счетчики, приводы с программным управлением и т.д.).

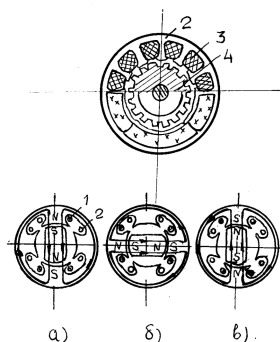
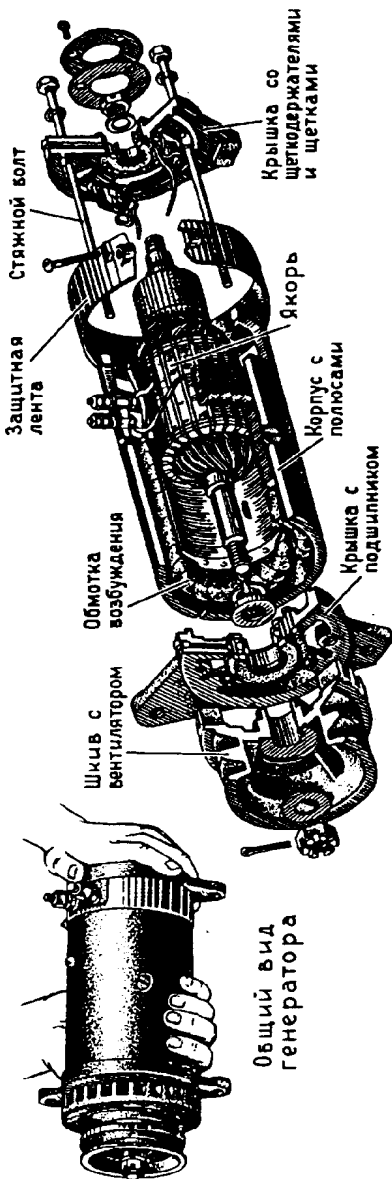
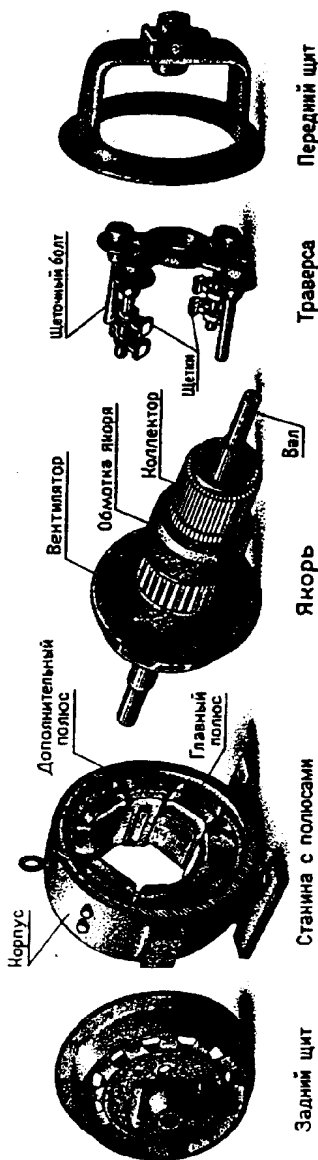


Рисунок V-7.6

Приложение

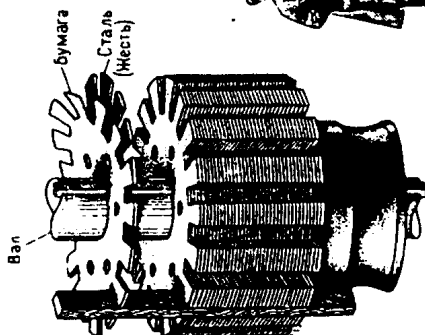
МАШИНА ПОСТОЯННОГО ТОКА



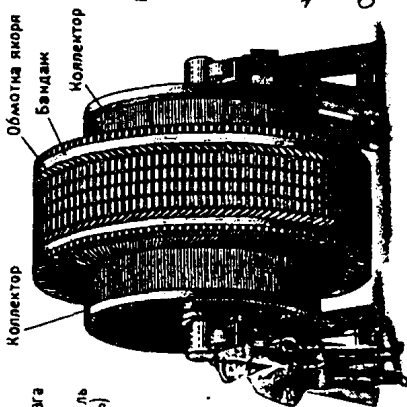
Общий вид генератора

Генератор Г-21 на 12 в, 0,22 кВт, 1450-7000 об/мин

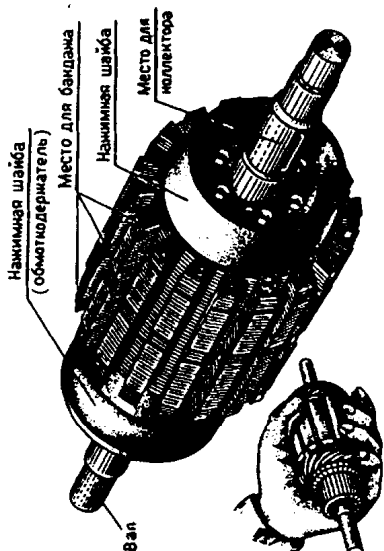
ЯКОРЬ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА



Сборка якоря

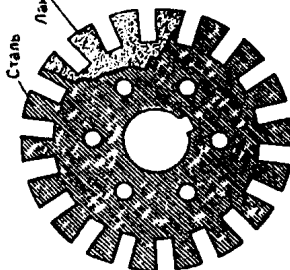


Якорь машины большой мощности

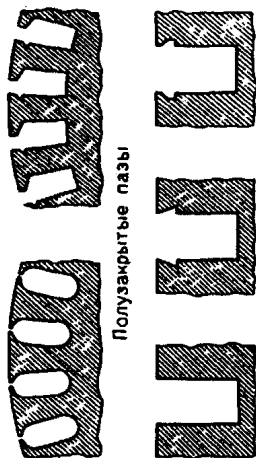
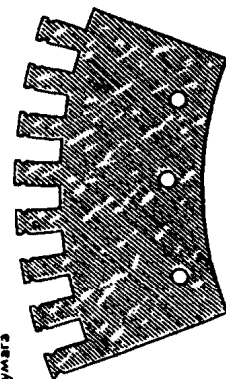


Якорь генератора на 0,2 кВт

Якорь без обмотки

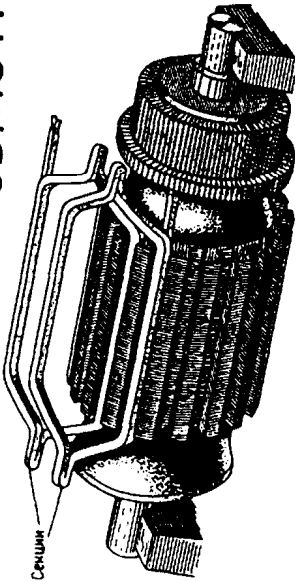


Якорная сталь (жесть) небольшой машины

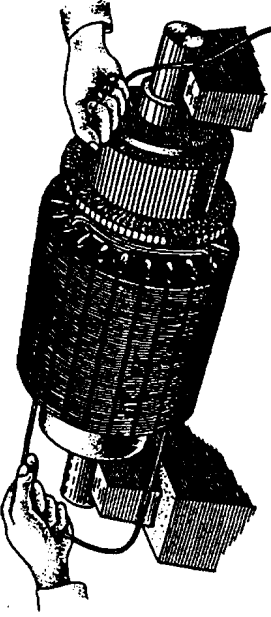


ФОРМА ПАЗОВ

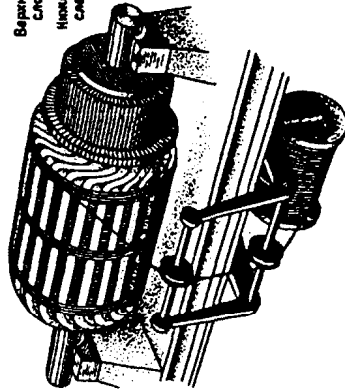
ОБМОТКА ЯКОРА



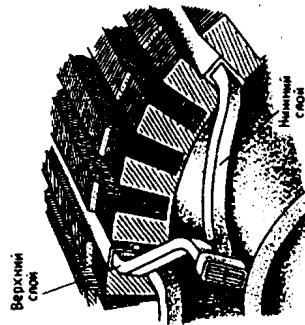
Укладка секций при открытых пазах



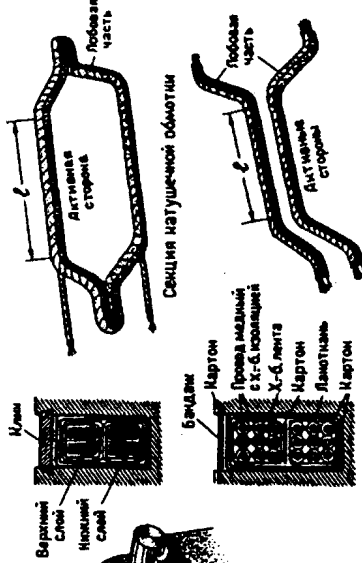
Намотка якоря с полужакрытыми пазами



Бандажировка якоря

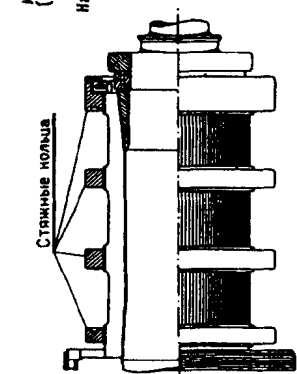


Двухслойная стержневая обмотка

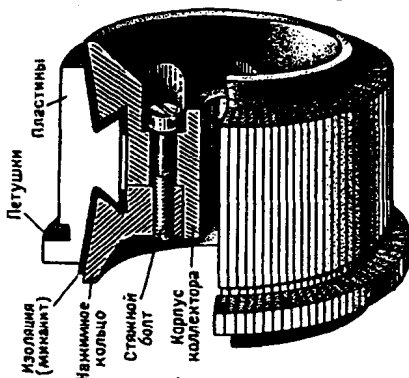


Полусекции стержневой обмотки

ТОКОСЪЕМНОЕ УСТРОЙСТВО



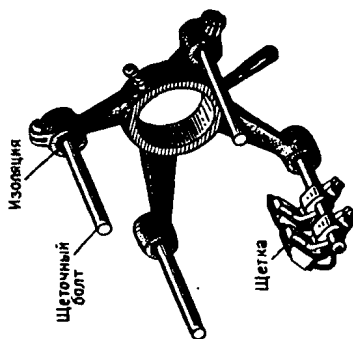
Коллектор быстроходной машины



Коллекторные пластины с капроновыми прокладками

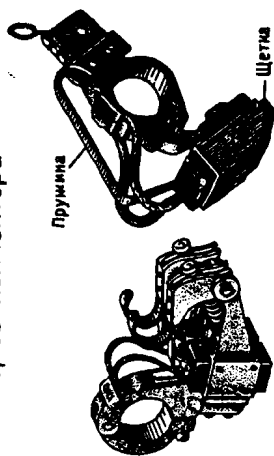


Коллектор тихоходной машины

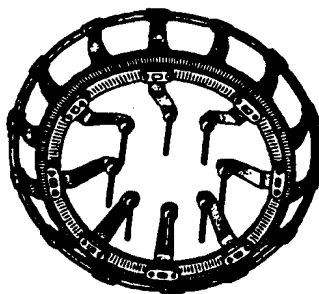


Лучевая траверса

Разрез коллектора

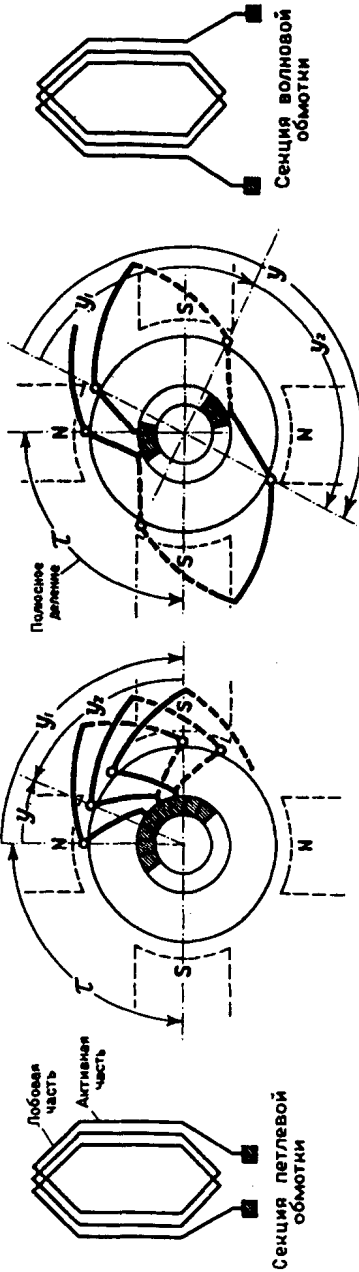


Щеткодержатели со щетками



Кольцевая траверса

ПЕТЛЕВАЯ И ВОЛНОВАЯ ОБМОТКИ (ПРИНЦИП ВЫПОЛНЕНИЯ)



Частичные (y_1, y_2) и результирующий (y) шаги обмотки

$$y_1 \approx \tau$$

Первый шаг обмотки

$$y = y_1 + y_2$$

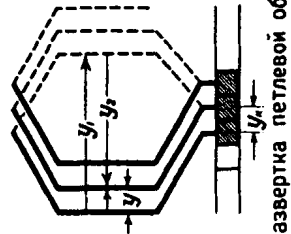
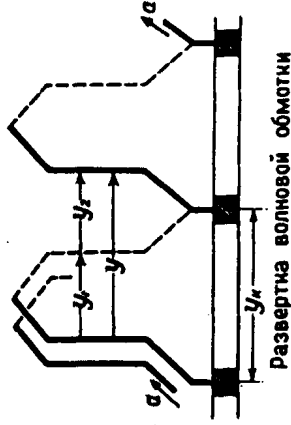
Результирующий шаг волновой обмотки

$$y = y_1 - y_2$$

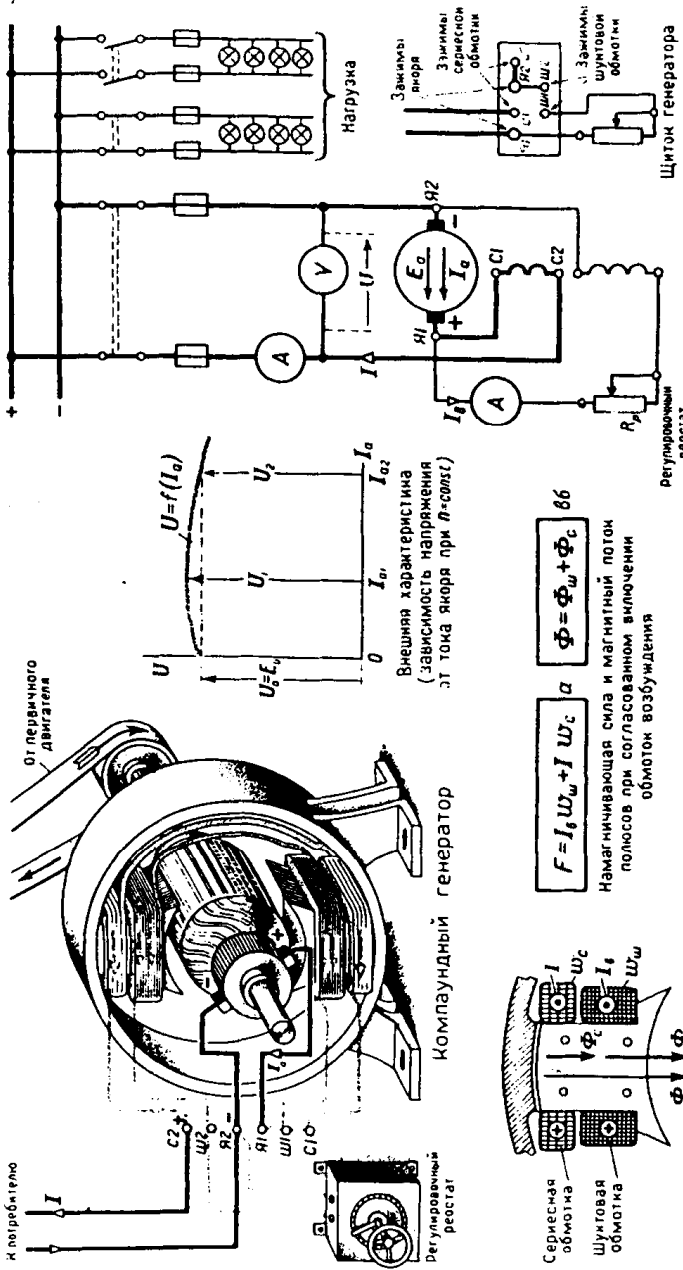
Результирующий шаг петлевой обмотки

$$y_k = \frac{p}{2}$$

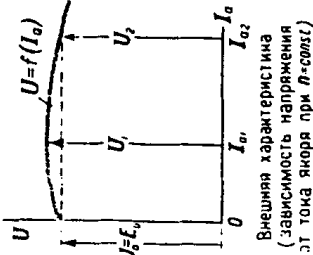
Шаг по коллектору



ГЕНЕРАТОР СО СМЕШАННЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ (КОМПАУНДНЫЙ ГЕНЕРАТОР)



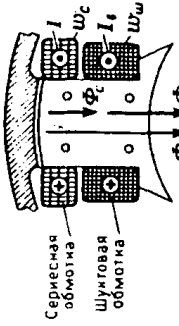
Щиток генератора
Схема компаундного генератора



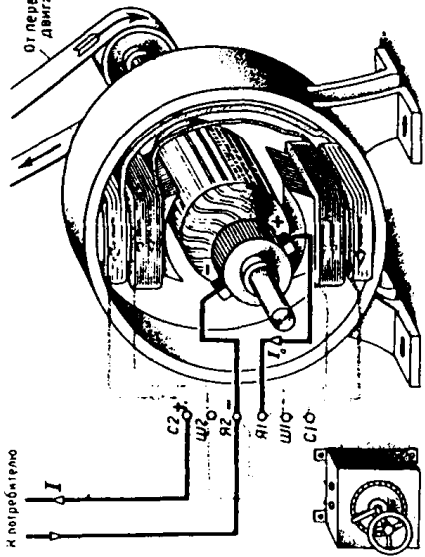
Внешняя характеристика
(зависимость напряжения от тока якоря при $n = const$)

$$F = I_a \omega_w + I \omega_c \quad \Phi = \Phi_w + \Phi_c \quad \delta \delta$$

Намагничивающая сила и магнитный поток полюсов при согласованном включении обмоток возбуждения



Полюс компаундной машины



Компаундный генератор

ДВИГАТЕЛЬ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ (ШУНТОВОЙ ДВИГАТЕЛЬ)

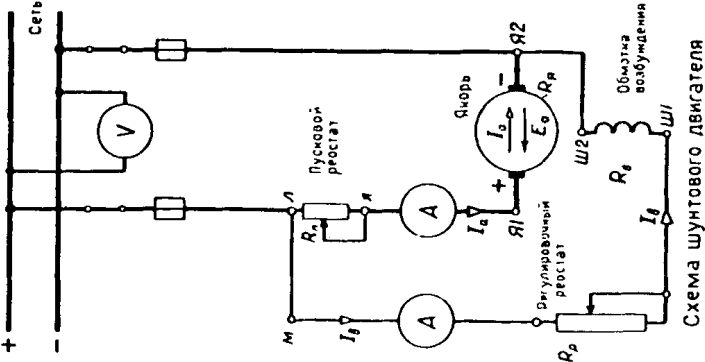
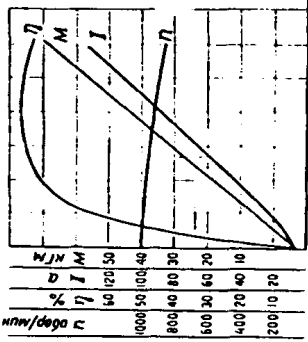
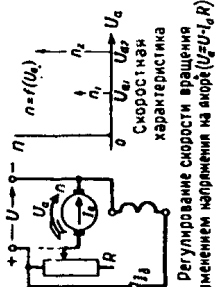
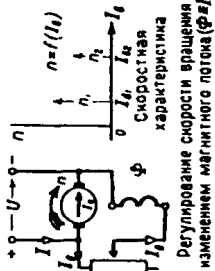
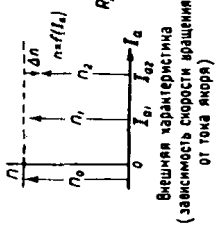


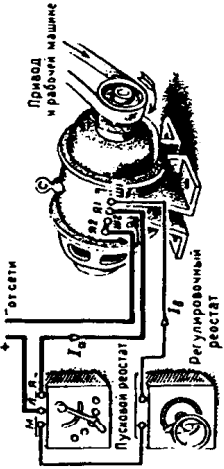
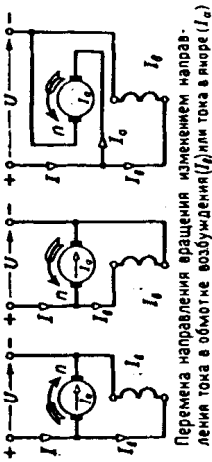
Схема шунтового двигателя



$$\eta = \frac{U - I_a R_a}{C \Phi}$$

$$M = C_2 I_a \Phi$$

Скорость вращения и вращающий момент шунтового двигателя



Шунтовой двигатель

ГЕНЕРАТОР С НЕЗАВИСИМЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

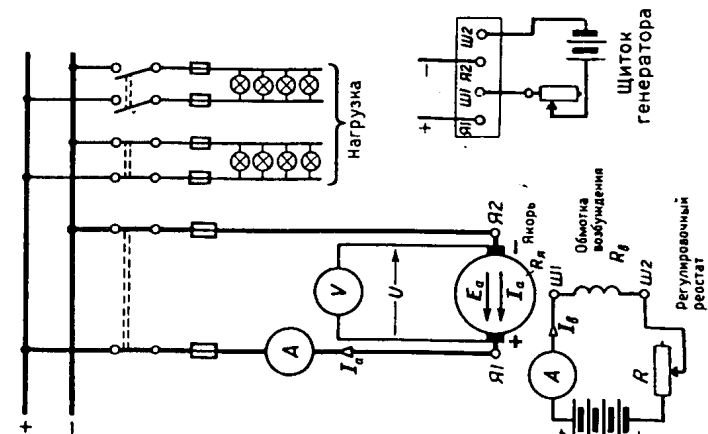
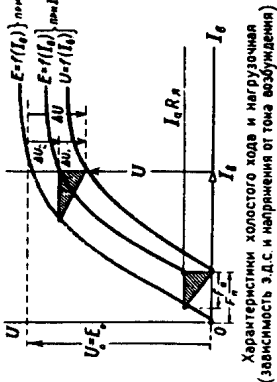
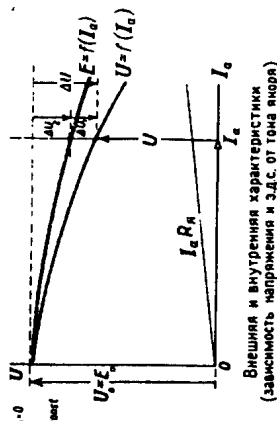


Схема генератора



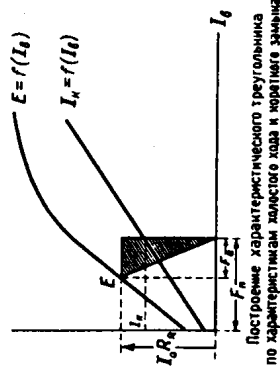
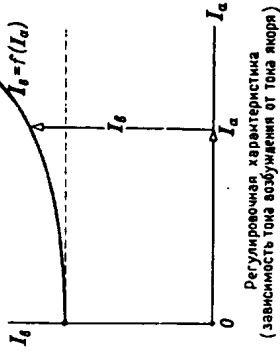
$U_0 = E_0$ β $U = E - I_a R_g$ β

Напряжение генератора при холостом ходе и при нагрузке



$\Delta U = \Delta U + \Delta U_f$ β $\Delta U = \frac{U_g - U}{U_g} \cdot 100$ %

Изменение напряжения генератора, вызываемое падением напряжения в цепи якоря ($\Delta U = I_a R_g$) и реакцией якоря (ΔU_f)



ДВИГАТЕЛЬ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ (СЕРИЕСНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ)

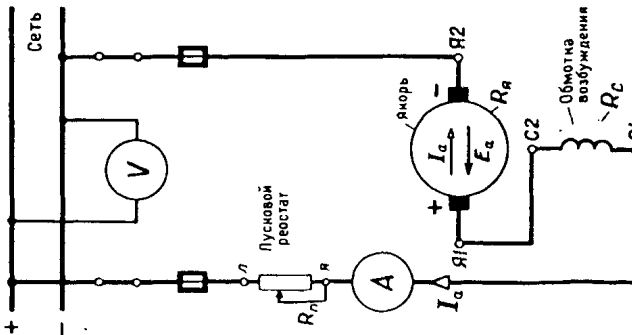
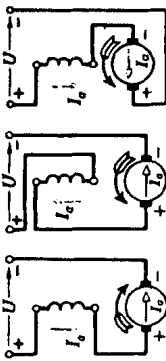
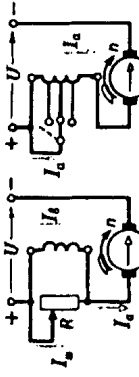


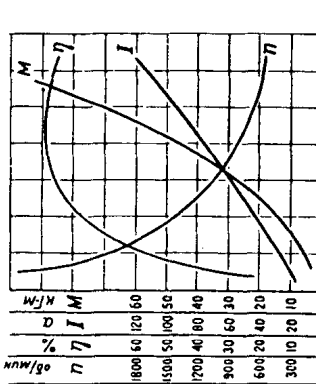
Схема серийного двигателя



Перемена направления вращения



Регулирование скорости вращения изменением числа витков обмотки возбуждения (шунтированием и изменением числа витков обмотки возбуждения)

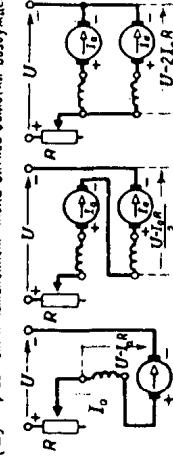


Рабочие кривые серийного двигателя

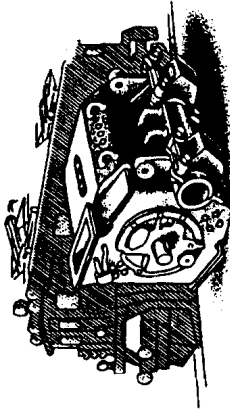
$$\eta = \frac{U - I_a(R_a + R_c)}{C_1 \Phi}$$

$$M = C_2 I_a^2$$

Скорость вращения и вращающий момент серийного двигателя



Регулирование скорости вращения изменением напряжения (введением реостата и комбинированием включения двигателей)



Тяговый серийный двигатель

ДВИГАТЕЛЬ СО СМЕШАНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ (КОМПАУНДНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ)

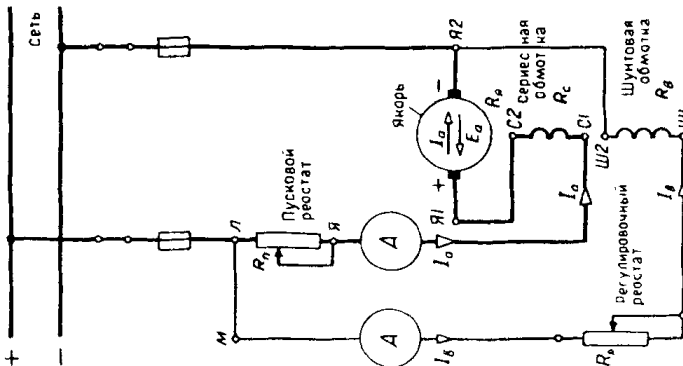
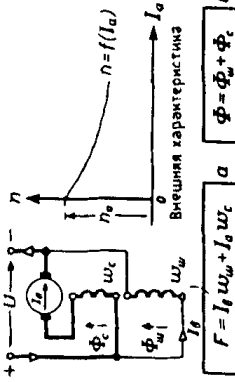


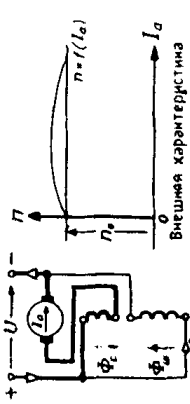
Схема компаундного двигателя



$F = I_a \omega_{\phi} + I_a \omega_{\psi}$ а $\Phi = \Phi_{\phi} + \Phi_{\psi}$ бб

Намагничивающая сила и магнитный поток полюсов

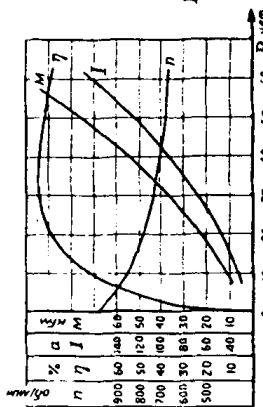
Компаундное включение



$F = I_a \omega_{\psi} - I_a \omega_{\psi_c}$ а $\Phi = \Phi_{\psi} - \Phi_{\psi_c}$ бб

Намагничивающая сила и магнитный поток полюсов

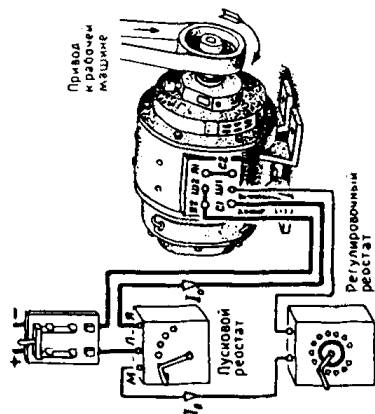
Противокомпаундное включение



Рабочие кривые компаундного двигателя

$n = \frac{U - I_a (R_a + R_c)}{C_e (\Phi_w \pm \Phi_f)}$ аб
 $M = C_m I_a (\Phi_w \pm \Phi_f)$ вб

Скорость вращения и развиваемый момент компаундного двигателя



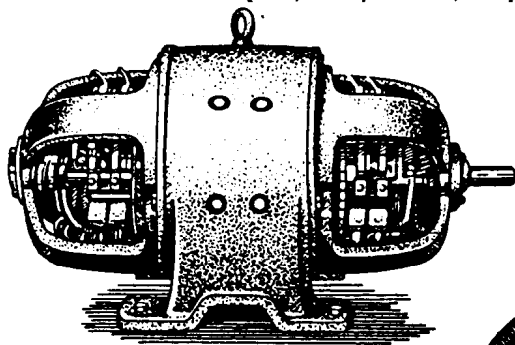
Компаундный двигатель

КОНСТРУКЦИИ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

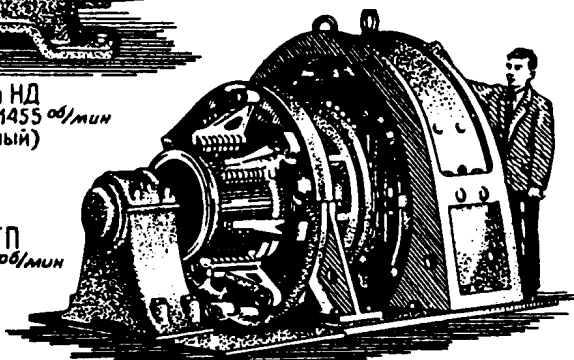
(основные виды исполнения)

МАШИНЫ В ОТКРЫТОМ ИСПОЛНЕНИИ

(якорь открыт с торцов)



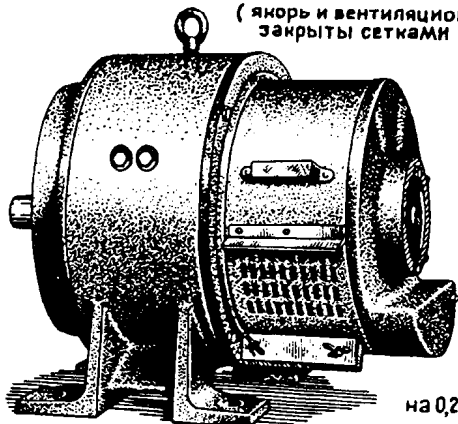
Генератор серии НД
на 3-30 кВт, 6-12 В, 725-1455 об/мин
(двухколлекторный)



Генератор серии ГП
на 1100 кВт, 250 В, 750 об/мин

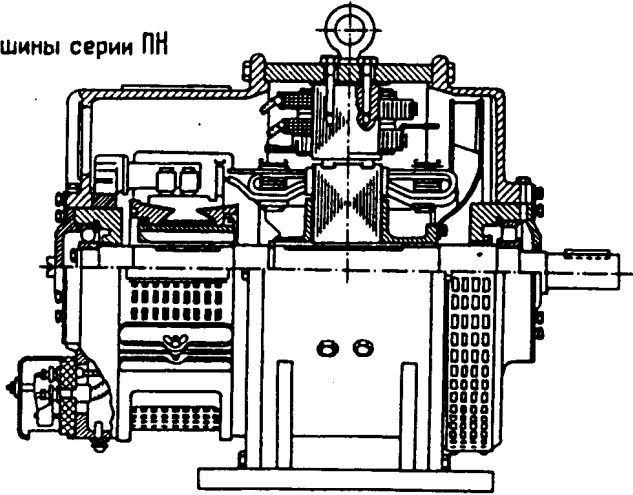
МАШИНЫ В ЗАЩИЩЕННОМ ИСПОЛНЕНИИ

(якорь и вентиляционные отверстия закрыты сетками или жалюзи)

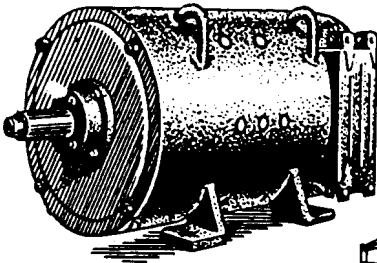


Электродвигатель серии ПН
на 0,25-200 кВт, 110, 120, 440 В, до 2870 об/мин

Разрез машины серии ПН

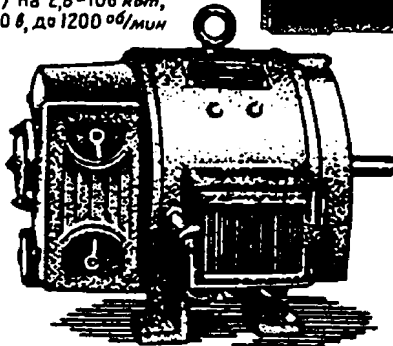
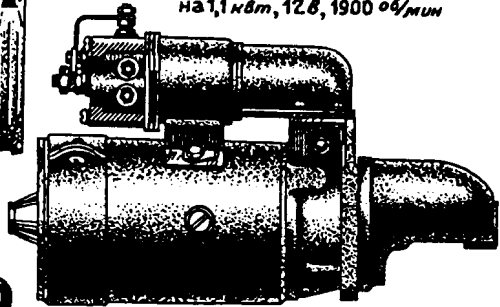


МАШИНЫ В ЗАКРЫТОМ ИСПОЛНЕНИИ
(влаго- и пыленепроницаемые)



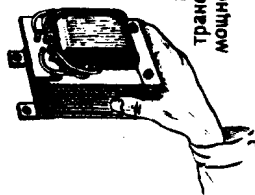
Электродвигатель серии ДП
(крановый) на 2,8-106 кВт,
220-400 в, до 1200 об/мин

Автомобильный стартер СТ-21
на 1,1 кВт, 12,8, 1900 об/мин



Генератор
новой серии П
на 0,3-200 кВт при 1500 об/мин

ТРАНСФОРМАТОРЫ

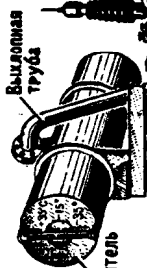


Радио-
трансформатор
мощностью 75 ватт



Проходной
модуль В Н
410 кВ

Проходные
модули С Н
110 кВ

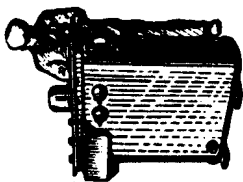


Выхлопная
труба

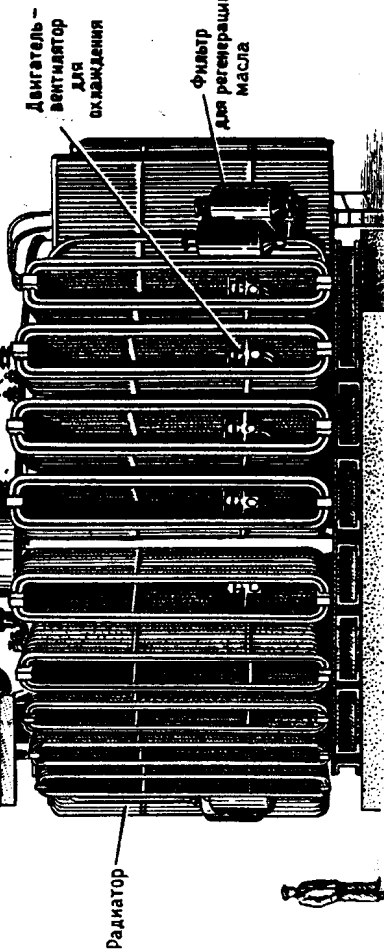
Расширитель

Проходной
модуль
нейтраля В Н

Проходные
модули В Н
110 кВ



Трёхфазный
трансформатор
мощностью 20 кВа



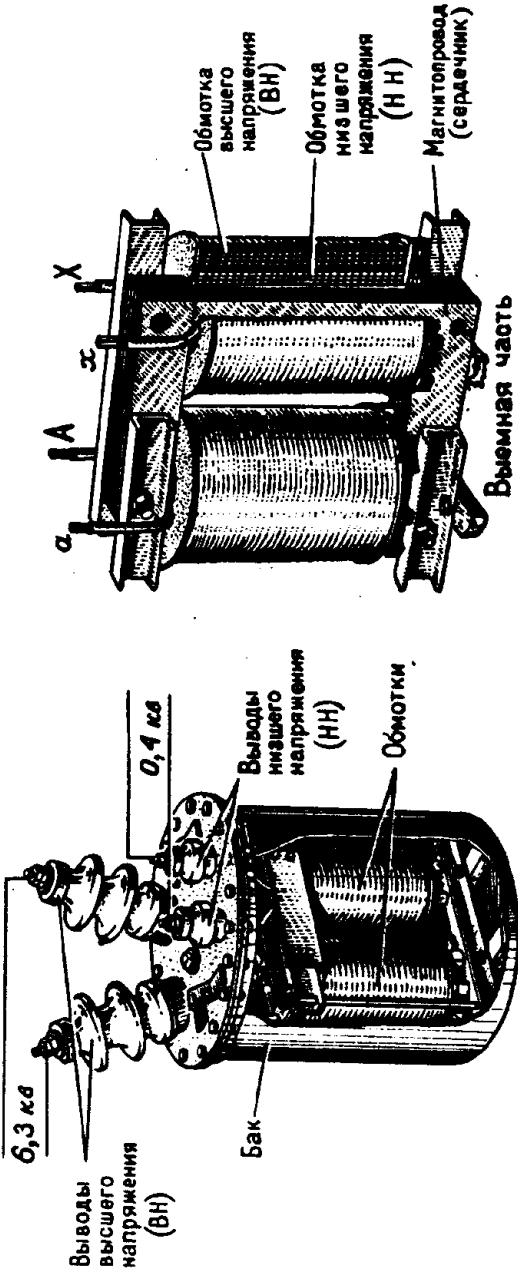
Двигатель -
вентилятор
для
охлаждения

Фильтр
для регенерации
масла

Радиатор

$410 / 110 / \sqrt{3} / 11 \text{ кВ}$.

Однофазный трехмоточный трансформатор мощностью 90000 кВа, напряжением $\sqrt{3} / \sqrt{3} / 11 \text{ кВ}$.
Установлен на подстанции электропередачи Куйбышев - Москва



Однофазный масляный трансформатор мощностью 10 кВА на напряжение 6,3/0,4 кВ.

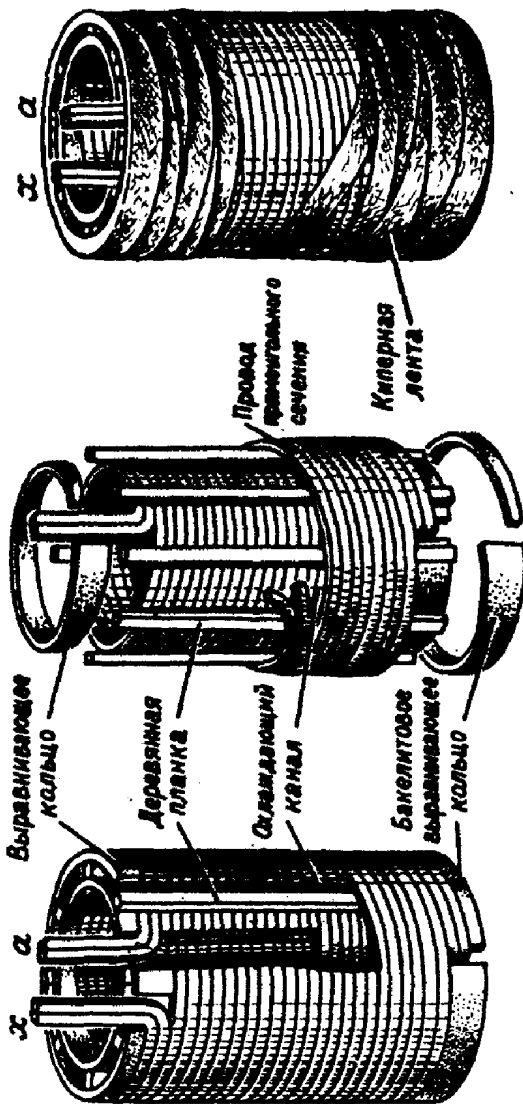
Трансформатор – аппарат, преобразующий переменный ток одного напряжения в переменный ток другого напряжения

Трансформатор изобретен П.Н.Яблочковым в 1876 г.

ОБМОТКИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Двухслойная цилиндрическая обмотка

Применяется преимущественно в качестве обмоток низкого напряжения (НН)
до 525 в и до 800 а

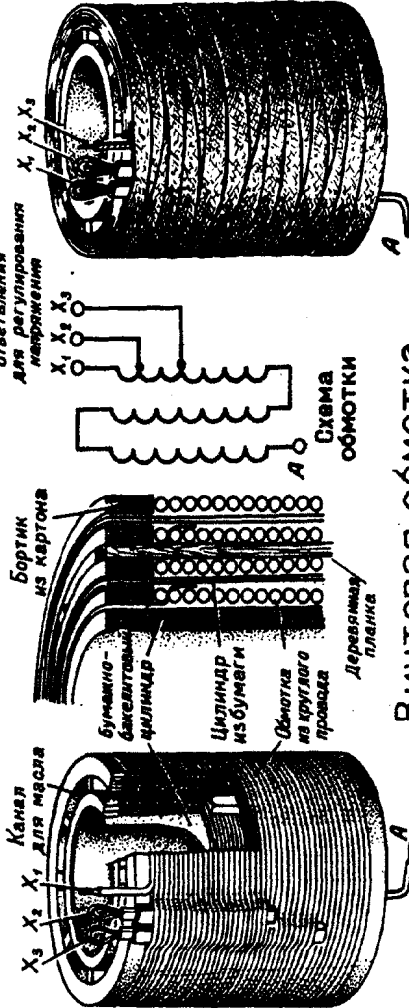


Обмотка выполнена двумя параллельными проводами левой намоткой

На обмотку наложены бандажи из киперной ленты

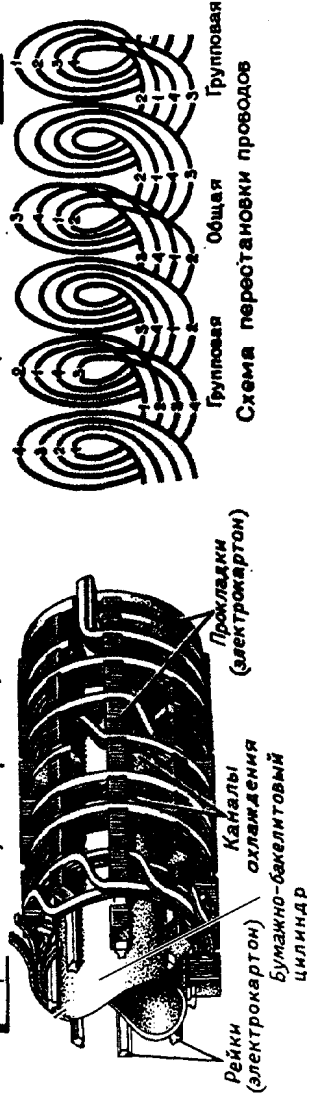
Многослойная цилиндрическая обмотка

Применяется преимущественно в качестве обмоток высшего напряжения (ВН) до 35 кВ



Винтовая обмотка

Применяется, как правило, в качестве обмоток НН при токах более 300 а



ОБМОТКИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

(продолжение)

Непрерывная обмотка

Применяется в качестве обмоток ВН и НН

Катушки непрерывной обмотки наматываются по спирали изолированным проводом прямоугольного сечения

Соединение катушек обмотки осуществляется чередующимися переходами, что достигается намоткой временной катушки с последующим перекалыванием ее витков

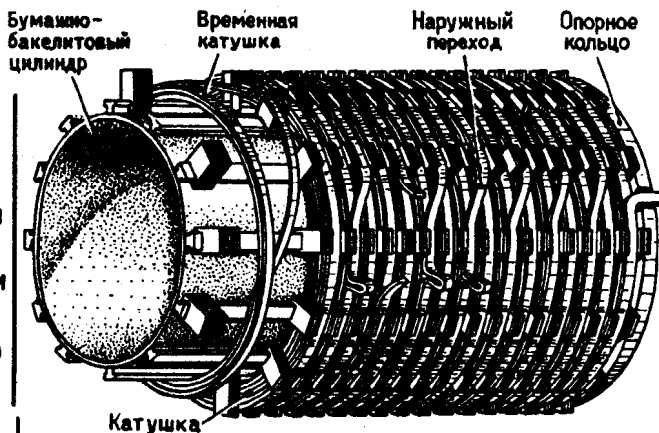
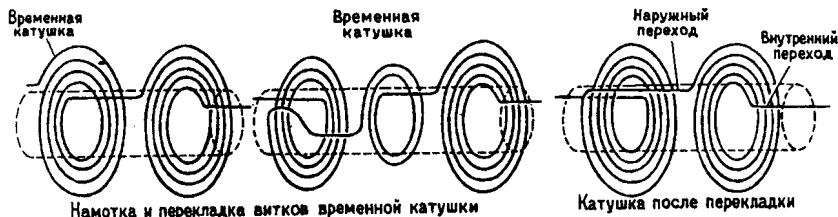
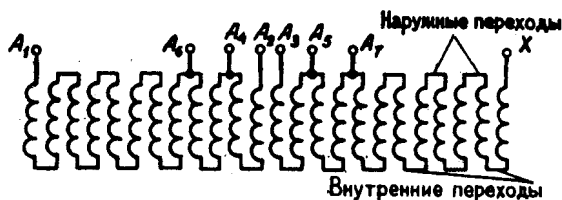
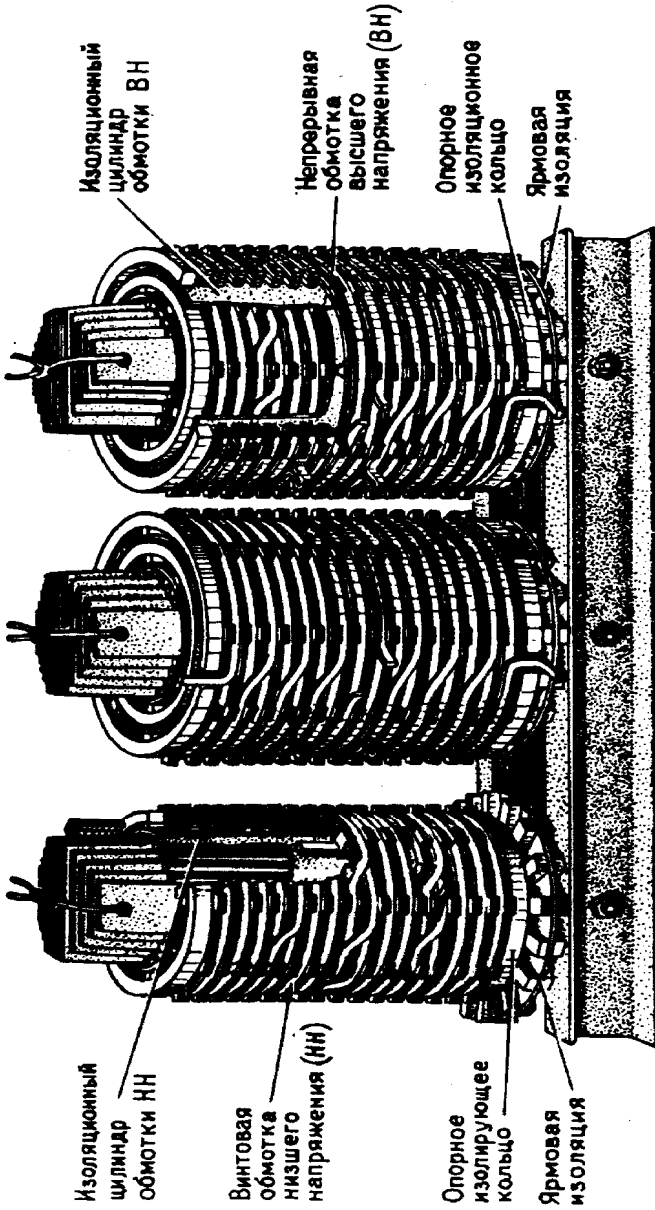


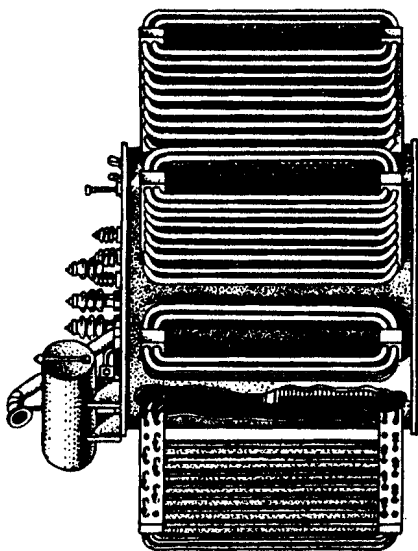
Схема непрерывной обмотки



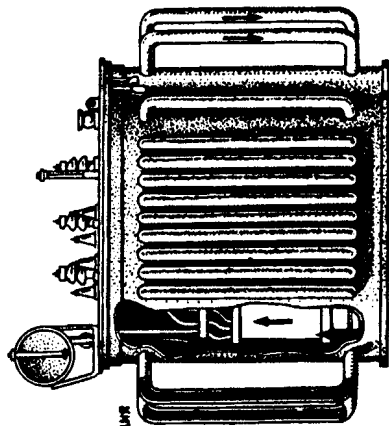
Расположение обмоток на сердечнике трехфазного трансформатора



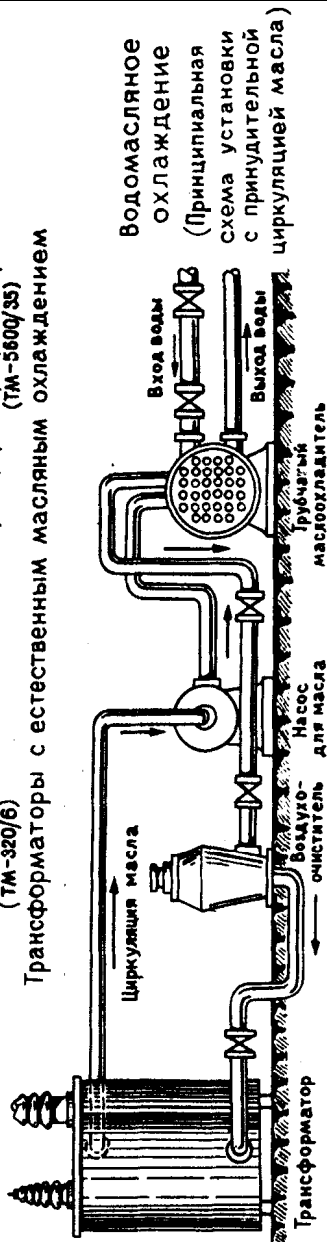
БАК И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

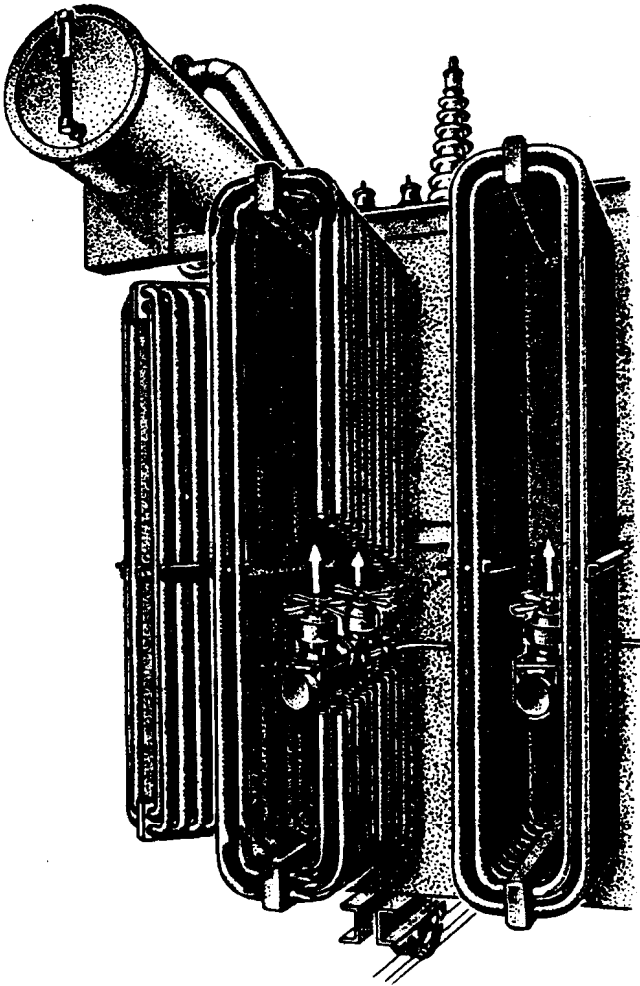


Трансформатор с радиаторным баком (ТМ-5600/33)



Трансформатор с трубчатым баком (ТМ-320/6)

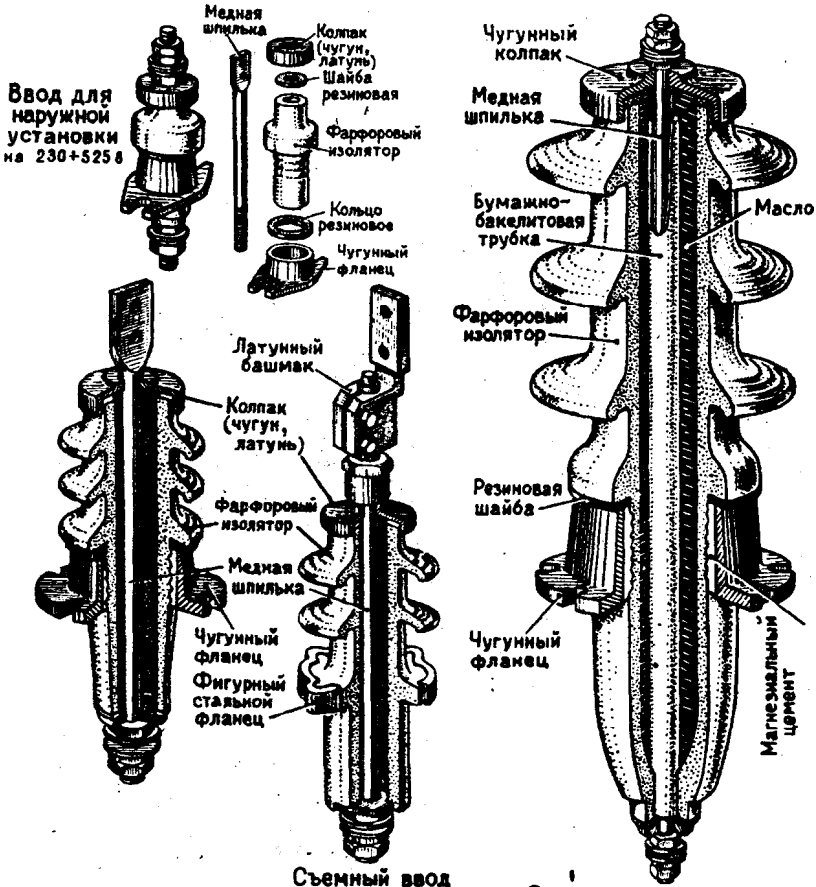




Дополнительное охлаждение
с помощью вентиляторов

С увеличением мощности трансформатора потери растут быстрее его геометрических размеров, что приводит к необходимости увеличения поверхности охлаждения и его форсирования

ВВОДЫ И ЗАЩИТНЫЕ УСТРОЙСТВА ТРАНСФОРМАТОРА



Ввод для наружной установки
на 6+10 кв, 800 а

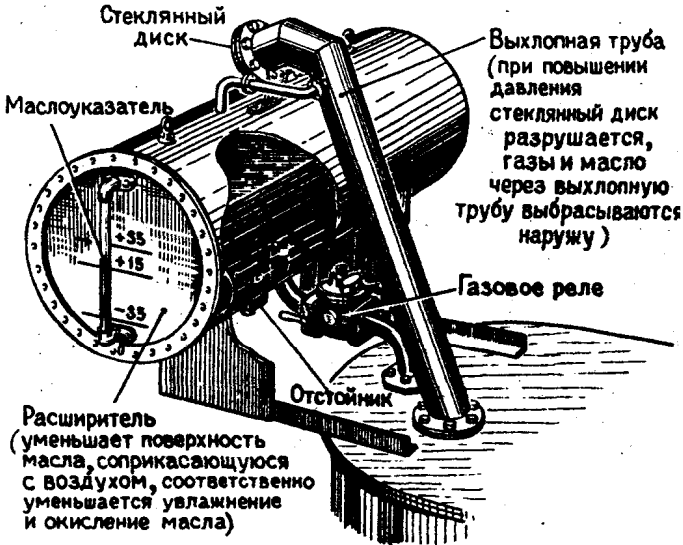
Съемный ввод дает возможность
заменить поврежденный фарфоровый
изолятор, не снимая крышки бака

Ввод, наполненный маслом,
на 35 кв, 400 а

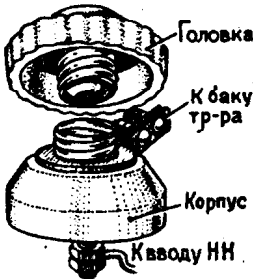
Вводы на напряжение до 35 кв

Концы обмоток трансформатора выводят наружу
с помощью вводов, изолирующих их от заземленного бака

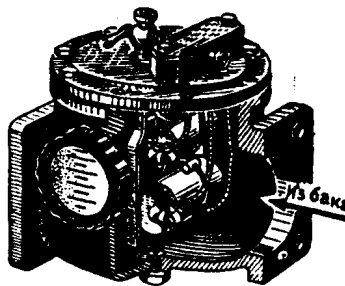
Расширитель и выхлопная труба



Защитные устройства



Пробивной предохранитель
 (при повышении потенциала обмотки НН пробивается и соединяет обмотку с заземленным корпусом бака)



Газовое реле
 (закрывает цепь отключения трансформатора при внутренних повреждениях)

ГРУППЫ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТКОВ ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

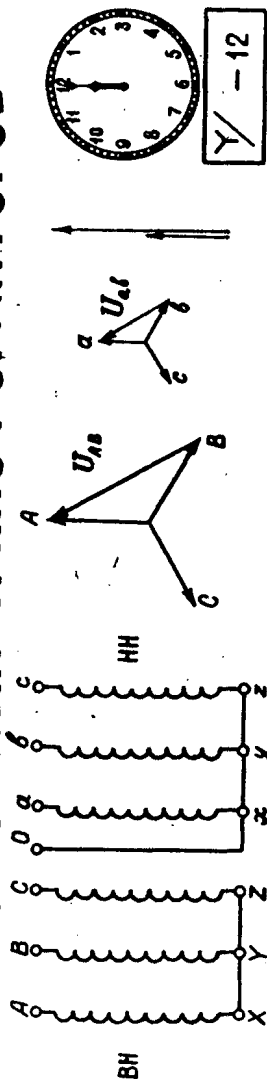
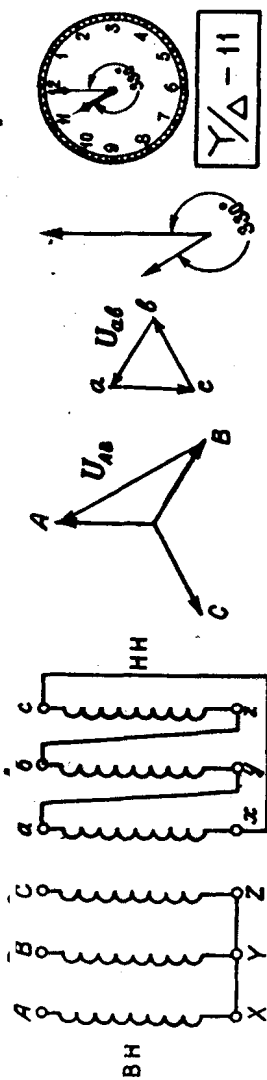
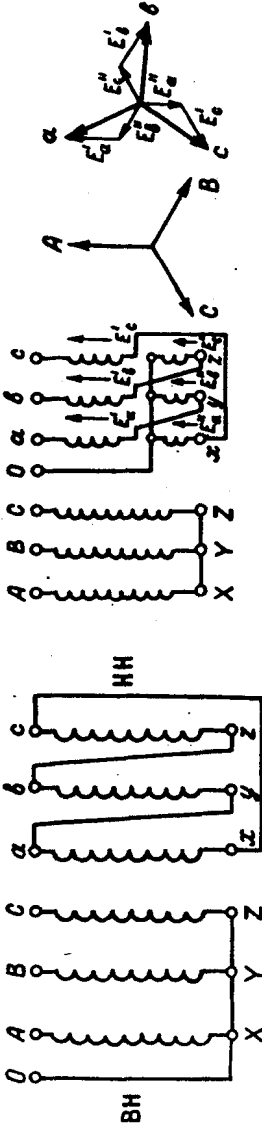


Схема соединения обмоток

Соединение обмоток Y/Y_0-12 применяется в понижающих трансформаторах при напряжении на выходе 230 + 400 В



Соединение обмоток Y/Δ применяется в трансформаторах с напряжением на низкой стороне выше 525 В



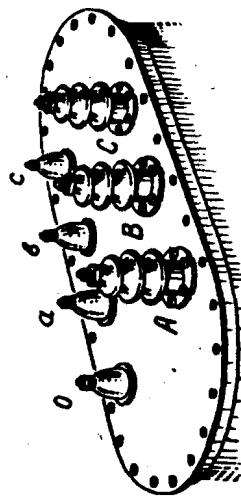
Y/Z_0

Схема соединенный обмоток звезда - зигзаг

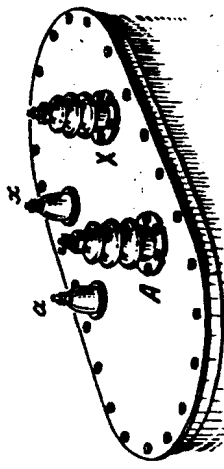
Соединение обмоток по схеме Y/Z_0 применяется в трансформаторах, питающих выпрямительные установки

$Y/\Delta-11$

В схемах соединения обмоток $Y/\Delta-11$ нуль выводится для заземления нейтрали

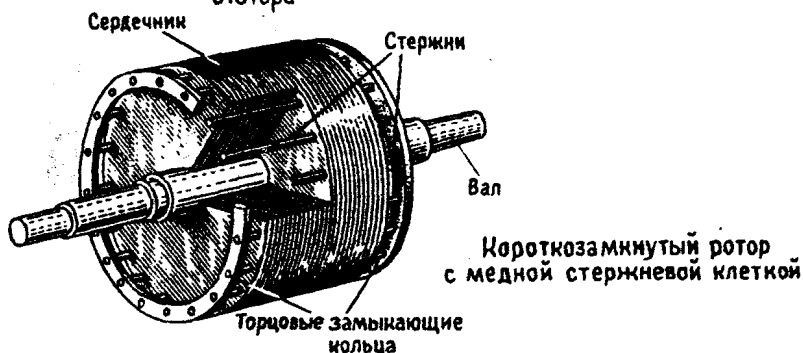
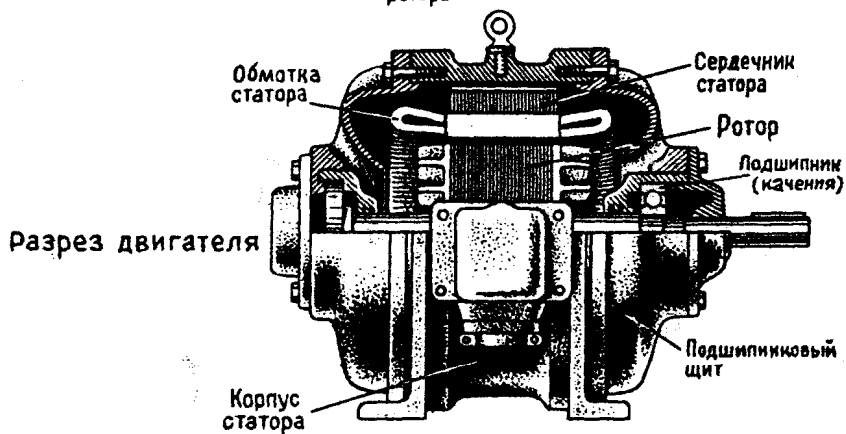
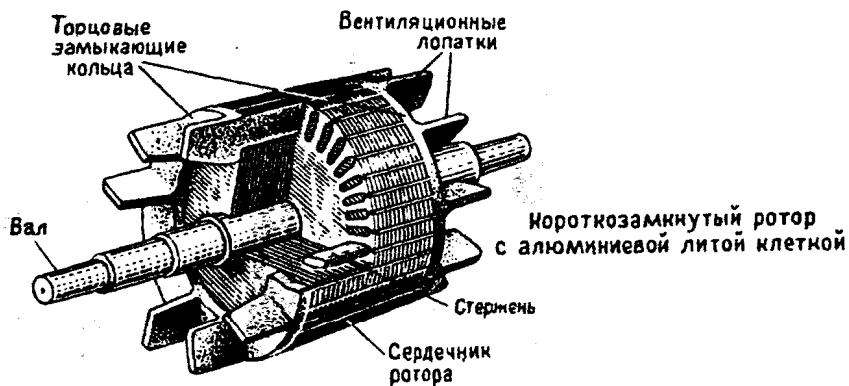


Трехфазный трансформатор
Расположение выводов на крышках трансформаторов

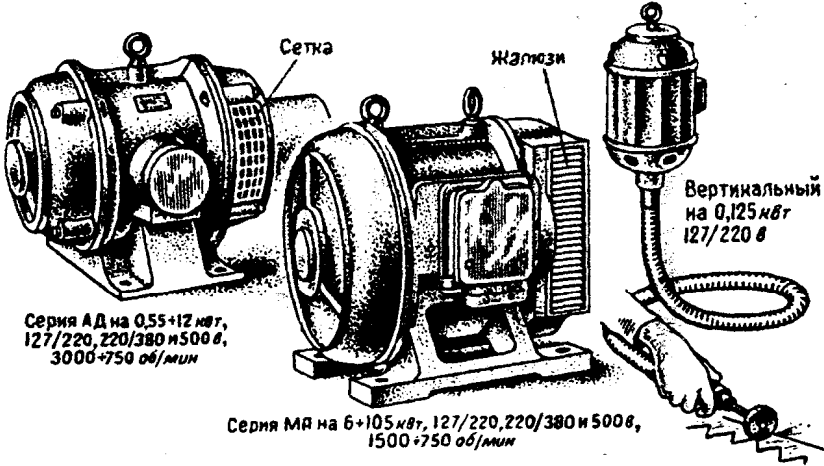


Однофазный трансформатор
Расположение выводов на крышках трансформаторов

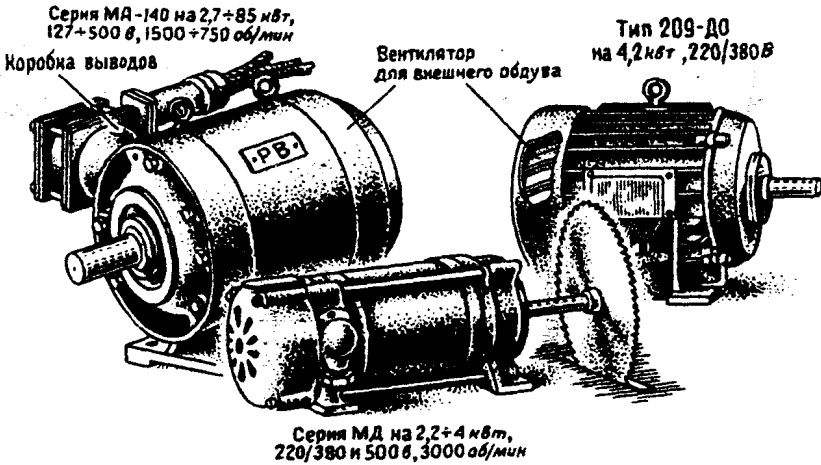
АСИНХРОННЫЙ ТРЕХФАЗНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ



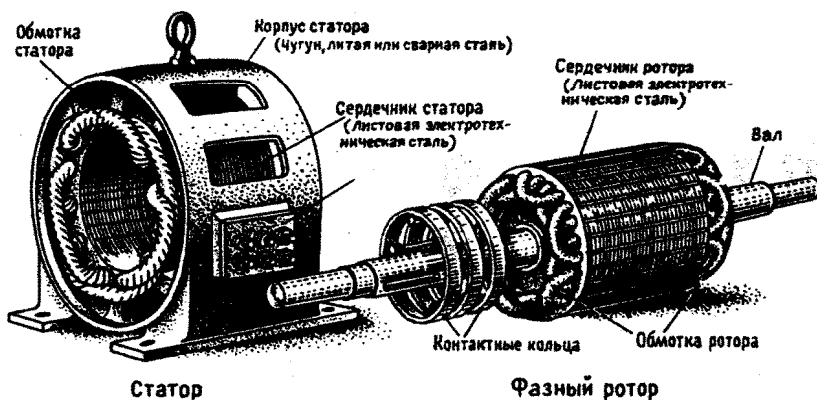
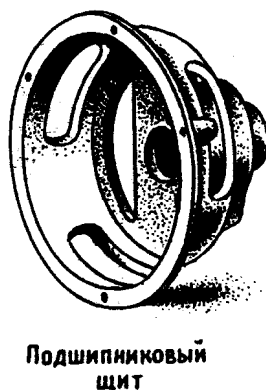
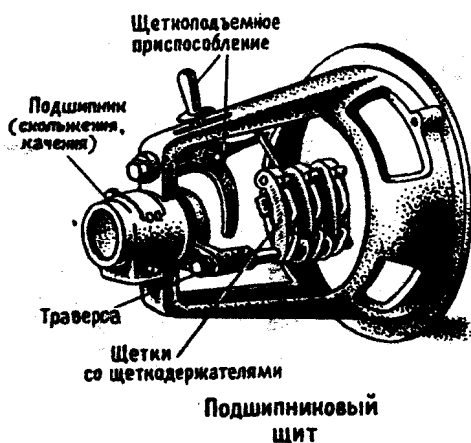
ЗАЩИЩЕННЫЕ ДВИГАТЕЛИ (Вентиляционные отверстия закрыты сетками или жалюзи)



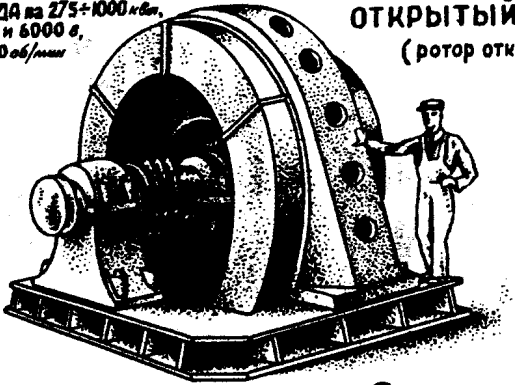
ЗАКРЫТЫЕ ДВИГАТЕЛИ (пыле- и влагонепроницаемые с внешним обдувом)



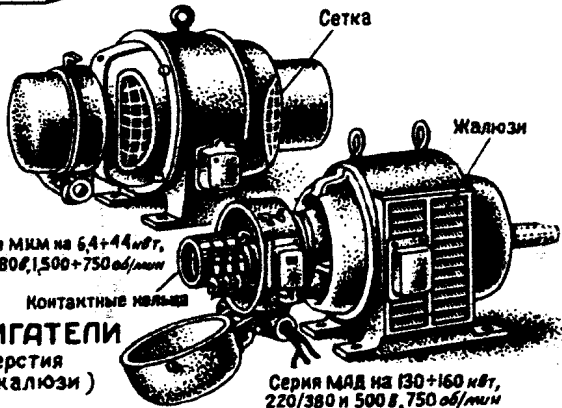
АСИНХРОННЫЙ ТРЕХФАЗНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ



Серия ДА на 275+1000 кВт,
3000 и 6000 в,
500±250 об/мин



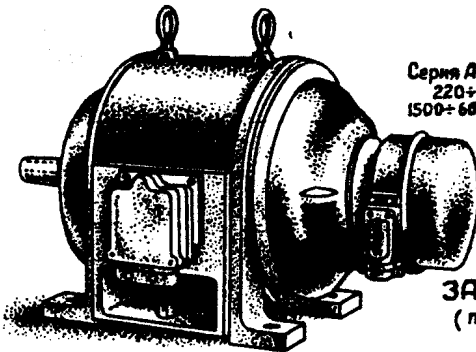
ОТКРЫТЫЙ ДВИГАТЕЛЬ
(ротор открыт с торцов)



Серия МКМ на 6,4+44 кВт,
127±380 в, 1500±750 об/мин

ЗАЩИЩЕННЫЕ ДВИГАТЕЛИ
(вентиляционные отверстия
закрываются сетками или жалюзи)

Серия МАД на 130+160 кВт,
220±380 и 500 в, 750 об/мин



Серия АМ-6 на 45+410 кВт,
220+600 в,
1500±600 об/мин

ЗАКРЫТЫЙ ДВИГАТЕЛЬ
(пыле- и влагопроницаемый
с внешним обдувом)

КРУГОВАЯ ДИАГРАММА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

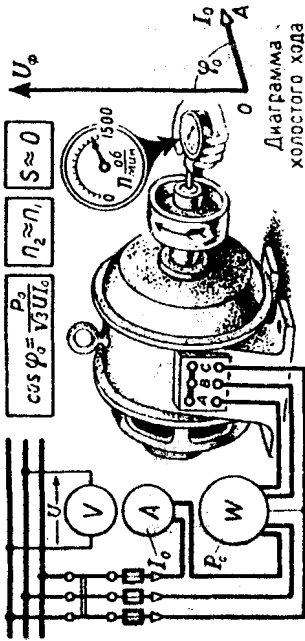


Диаграмма холостого хода

$$I = \alpha \bar{\nu} m_i$$

$$P_2 = \beta \bar{\nu} m_p$$

$$M = \bar{\nu} \bar{\omega} m_m$$

$$P_1 = \alpha \bar{\nu} m_D$$

Ток, мощность и момент на круговой диаграмме

$$m_i = \frac{a}{\text{мм}}$$

$$m_p = m_i U \bar{\nu}$$

$$m_m = \frac{\beta \bar{\nu}}{\text{мм}}$$

$$m_D = 0.974 \frac{I_{н.д.}}{I_0} \frac{\text{кВт}}{\text{мм}}$$

Масштаб тока, мощности и крутящего момента

Холостой ход двигателя

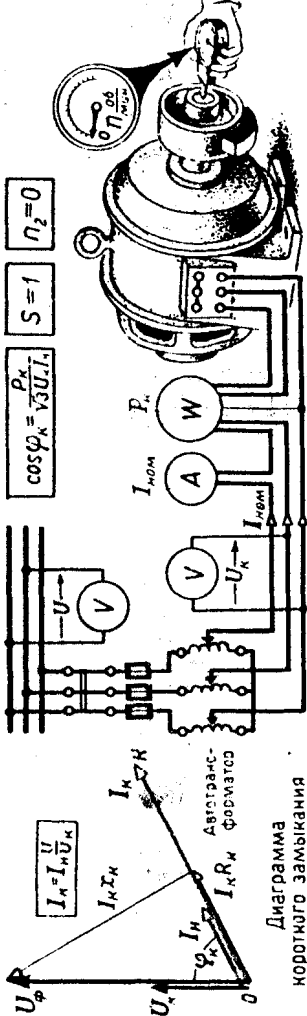


Диаграмма короткого замыкания

Короткое замыкание двигателя осуществляется при пониженном напряжении ($U_k \approx 0.2-0.3U$)

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{\sqrt{3} U_k I_k}$$

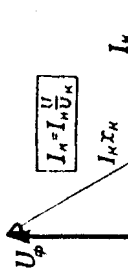
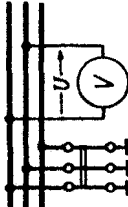
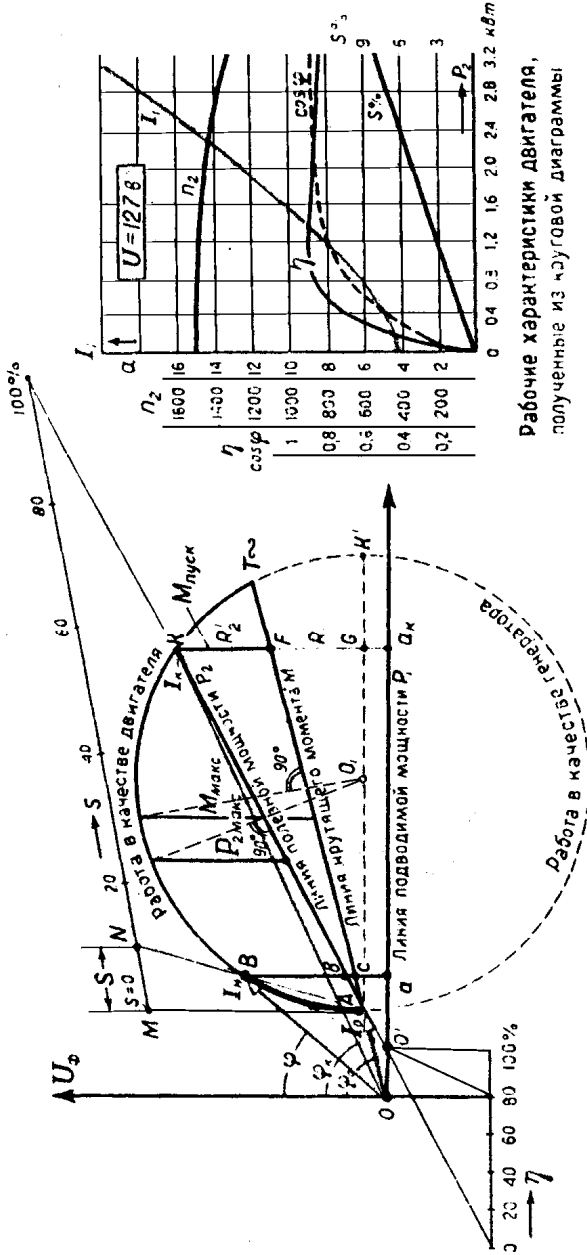


Диаграмма холостого хода



Рабочие характеристики двигателя, полученные из круговой диаграммы

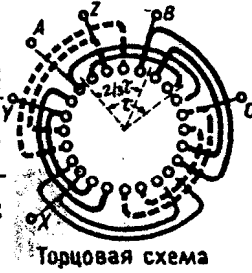
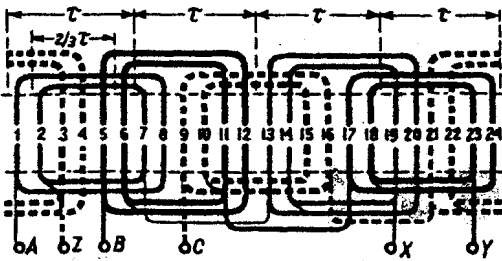
УПРОЩЕННАЯ КРУГОВАЯ ДИАГРАММА

(Построение производится по опытам холостого хода и короткого замыкания)

ОДНОСЛОЙНАЯ ОБМОТКА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

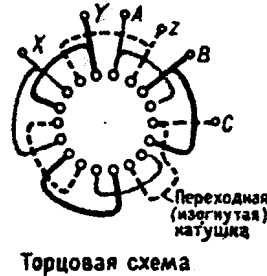
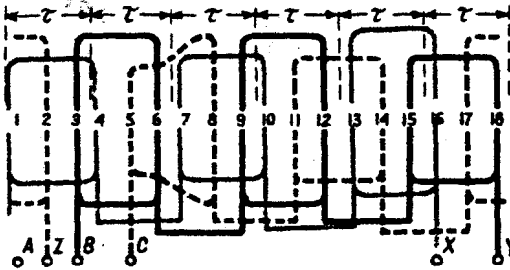
(в пазу размещаются проводники одной активной стороны)

— фаза А А, В, С — начала обмоток
 = фаза В X, Y, Z — концы обмоток
 - - - - фаза С τ — полюсное деление



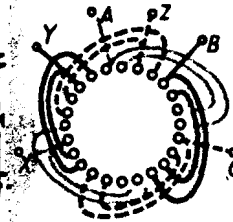
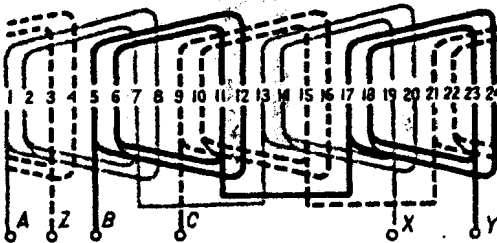
Развернутая схема обмотки

(число фаз $m=3$; число полюсов $2p=4$; число пазов на полюс и фазу $q=2$)



Развернутая схема обмотки

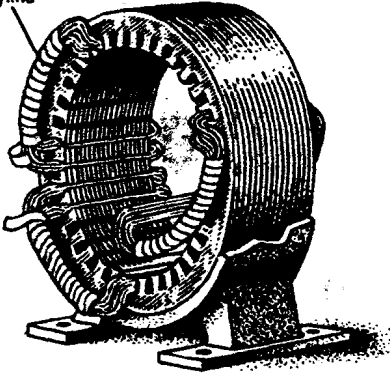
при нечетном числе пар полюсов ($m=3$; $2p=6$; $q=1$)



Развернутая схема равнокатушечной обмотки

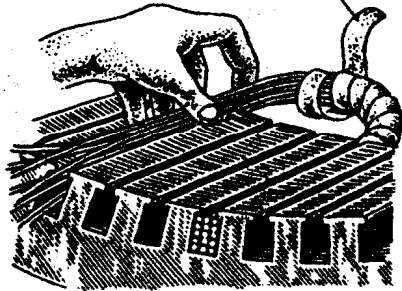
($m=3$; $2p=4$; $q=2$)

Катушечная группа

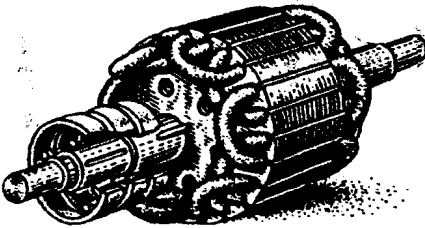


Размещение катушек в пазах статора

Изоляция лобовой части (х/б лента)

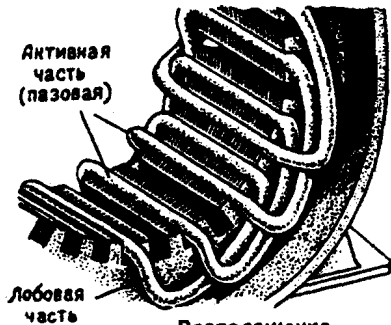


Укладка мягкой катушки однослойной обмотки



Фазный ротор однослойной катушечной обмоткой

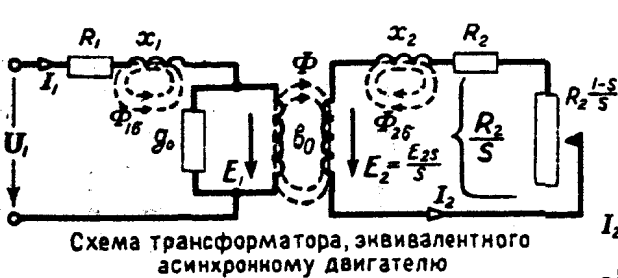
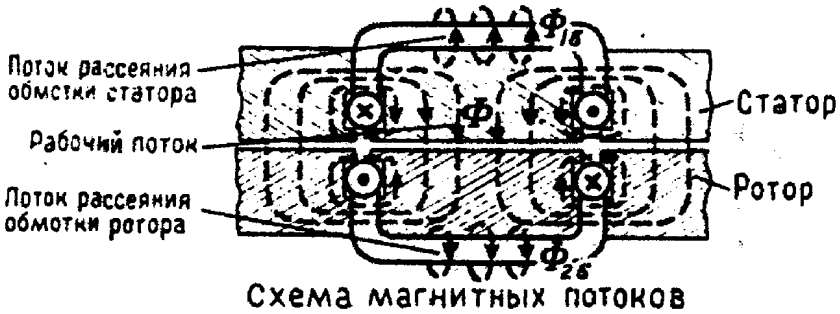
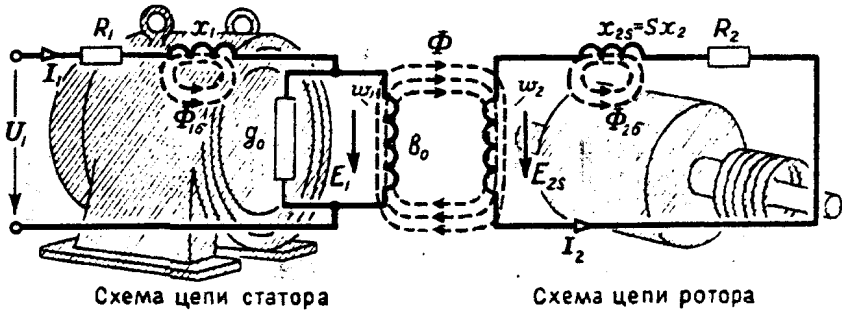
Активная часть (пазовая)



Лобовая часть

Расположение лобовых частей равнокатушечной обмотки

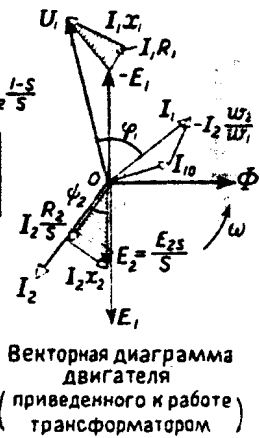
СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

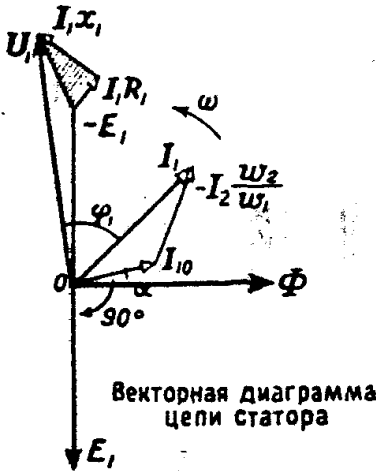


$$E_2 = \frac{E_{2s}}{S} \quad \delta$$

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{S}\right)^2 + x_2^2}} \quad a$$

Э.д.с. и ток неподвижного ротора



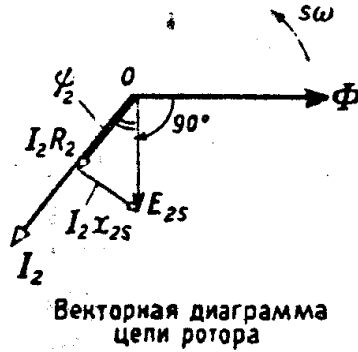


Векторная диаграмма цепи статора

$$E_1 = 4,44 K_{o1} f_1 \omega_1 \Phi \quad \text{в}$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{10} - \dot{I}_2 \frac{\omega_2}{\omega_1} \quad \text{а}$$

Э.д.с. и ток статора

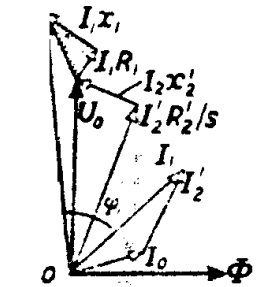


Векторная диаграмма цепи ротора

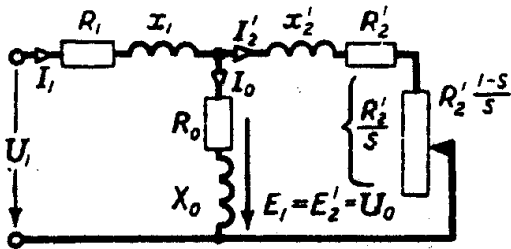
$$E_{2s} = 4,44 K_{o2} f_2 \omega_2 \Phi \quad \text{в}$$

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{\sqrt{R_2^2 + X_{2s}^2}} \quad \text{а}$$

Э.д.с. и ток ротора



Приведенная векторная диаграмма



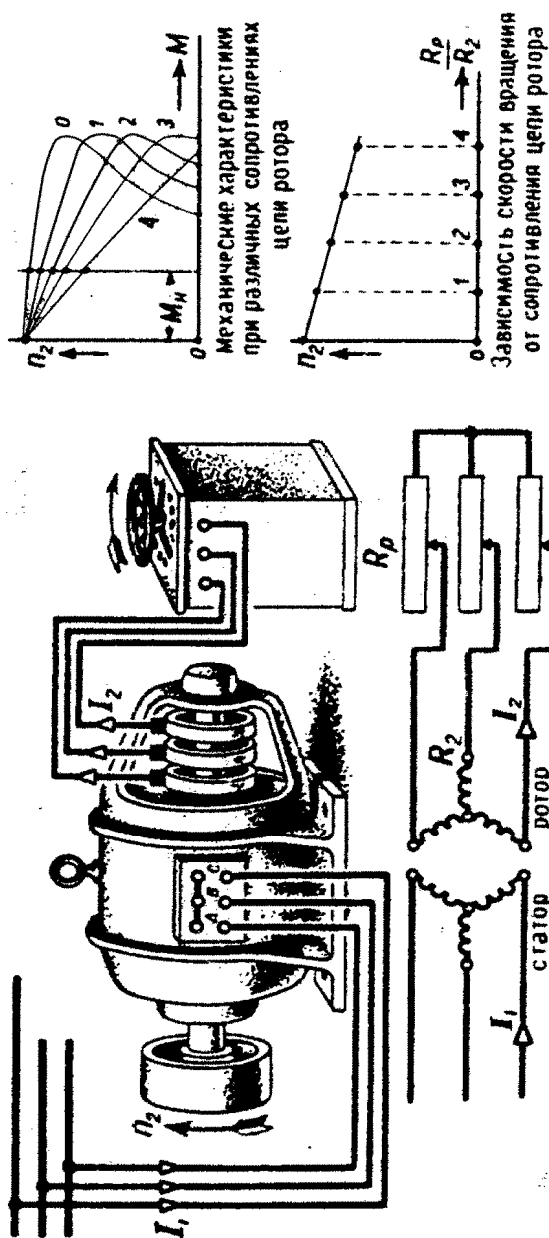
Приведенная Т-образная схема замещения двигателя

$$R_2' = R_2 \frac{m_2}{m_1} \left(\frac{\omega_1 K_{o1}}{\omega_2 K_{o2}} \right)^2 \quad \text{ом}$$

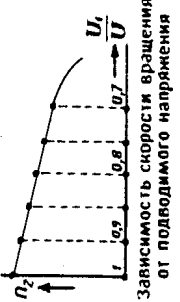
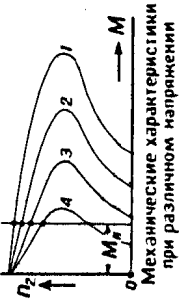
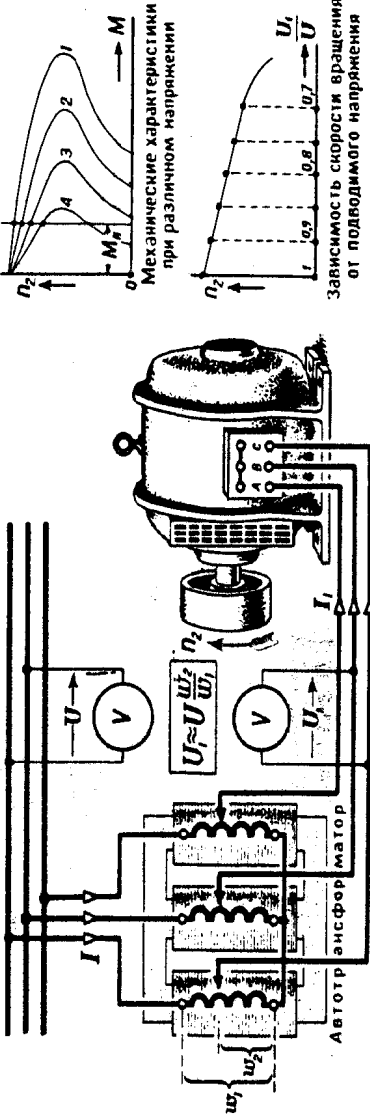
$$X_2' = X_2 \frac{m_2}{m_1} \left(\frac{\omega_1 K_{o1}}{\omega_2 K_{o2}} \right)^2 \quad \text{ом}$$

Сопротивления цепи ротора, приведенные к числу витков статора

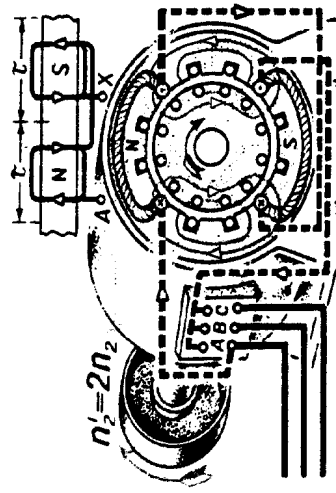
РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ



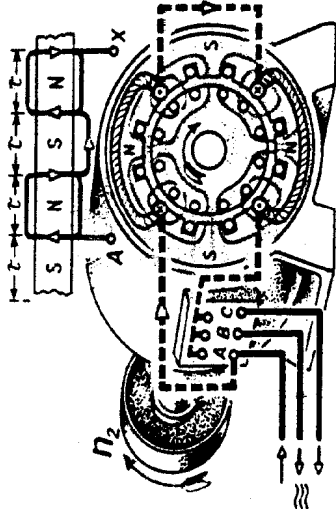
РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ПУТЕМ ИЗМЕНЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ В ЦЕПИ РОТОРА



РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ПУТЕМ ИЗМЕНЕНИЯ ПОВОДИМОГО НАПРЯЖЕНИЯ



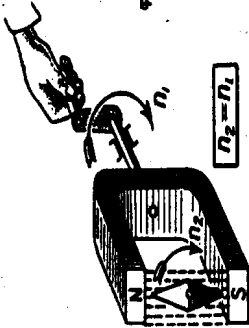
Два полюса ($2p=2$)



Четыре полюса ($2p=4$)

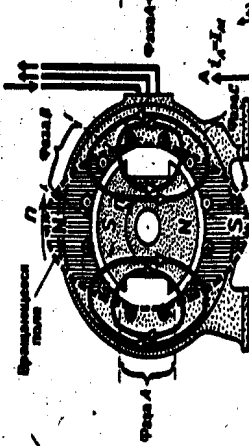
СТУПЕНЧАТОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ПУТЕМ ИЗМЕНЕНИЯ ЧИСЛА ПОЛЮСОВ ДВИГАТЕЛЯ

СИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ



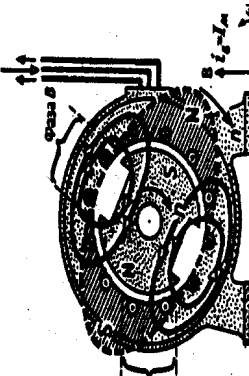
$$n_2 = n_1$$

Синхронное вращение магнитной стрелки, увлекаемой полем вращающегося магнита



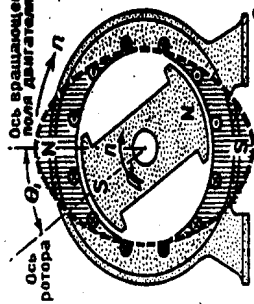
$$t = 0; i_2 = I_2$$

Синхронное вращение ротора, увлекаемого вращающимся полем трехфазного статора

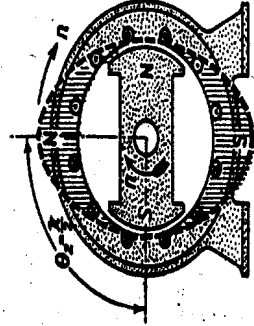
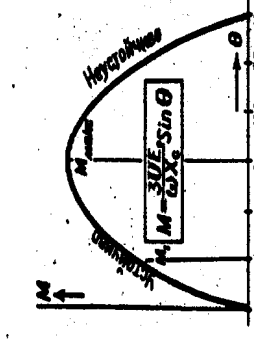


$$t = 1/2 \pi T; i_2 = I_2$$

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

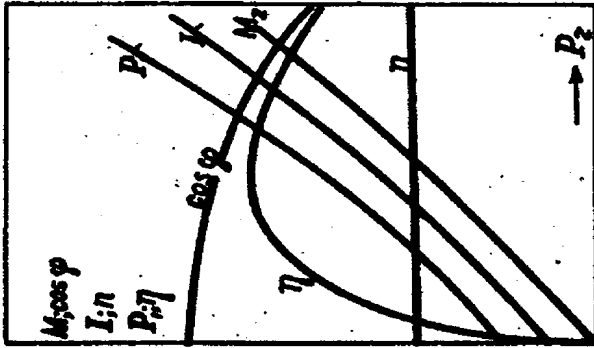


Устойчивая работа ($\theta < \frac{\pi}{2}$)

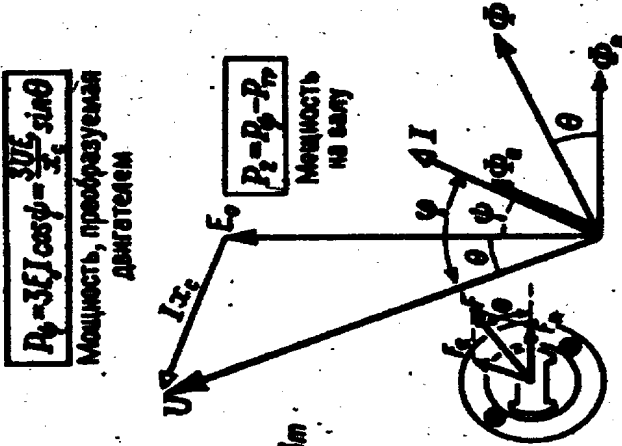


Неустойчивая работа ($\theta > \frac{\pi}{2}$)

ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ ПОЛОЖЕНИЕМ РОТОРА ОТНОСИТЕЛЬНО ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ПОЛЯ И ВРАЩАЮЩИМ МОМЕНТОМ ДВИГАТЕЛЯ



Рабочие характеристики двигателя



Векторная диаграмма двигателя

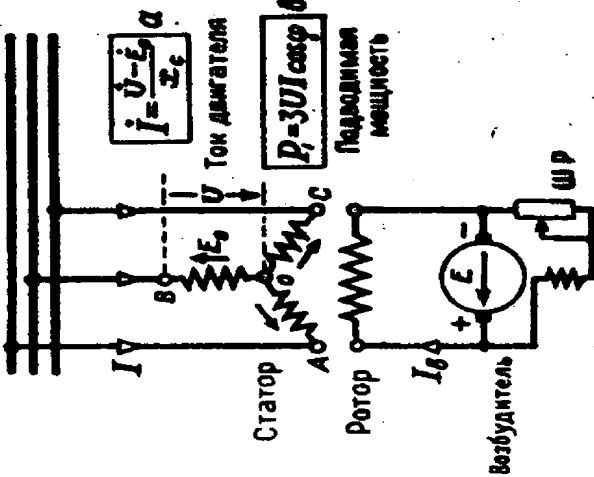
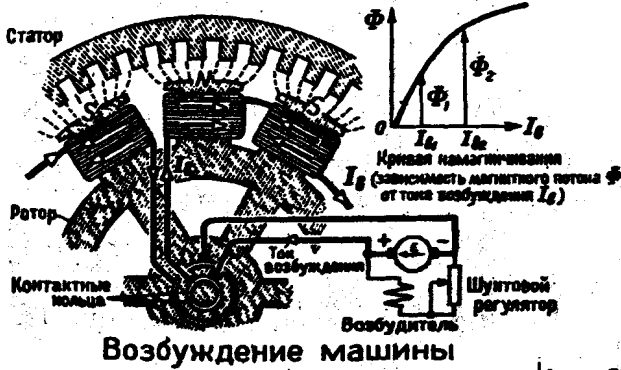
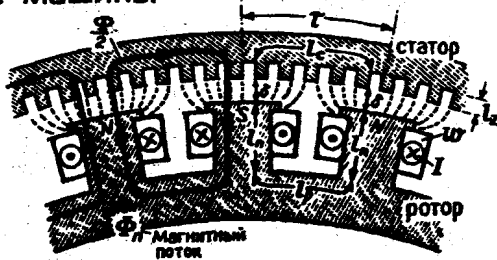


Схема соединения двигателя

МАГНИТНАЯ СИСТЕМА СИНХРОННОЙ МАШИНЫ



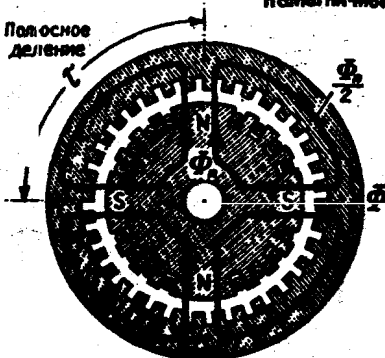
Возбуждение машины



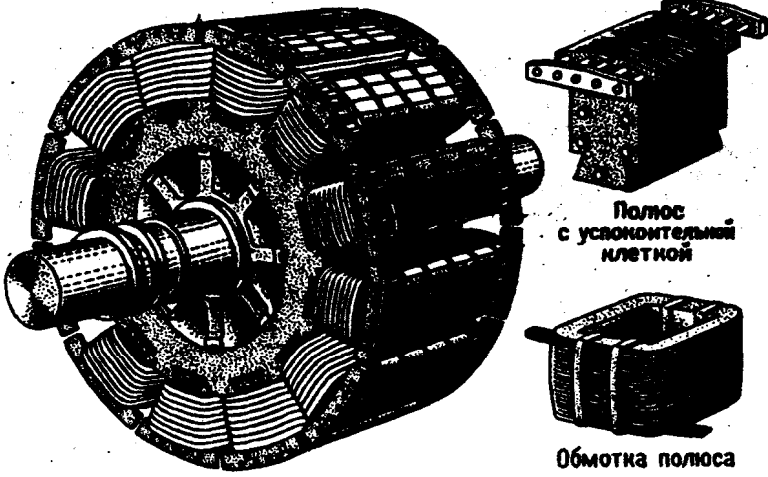
Магнитная цепь машины с явными полюсами

$$F_n = I_f \omega = H_g 2\delta + H_c 2l_c + H_n 2l_n + H_p l_p \quad a$$

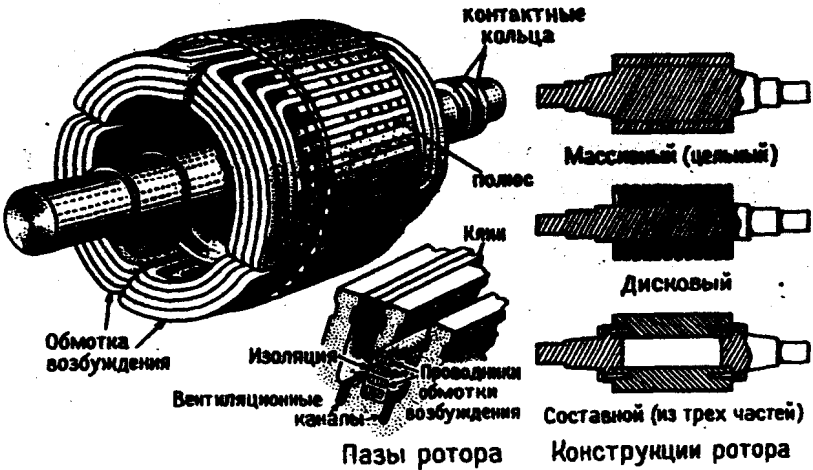
Намагничивающая сила (ампер-витки) пары полюсов
 H - напряженность поля



Магнитная цепь машины с неявными полюсами

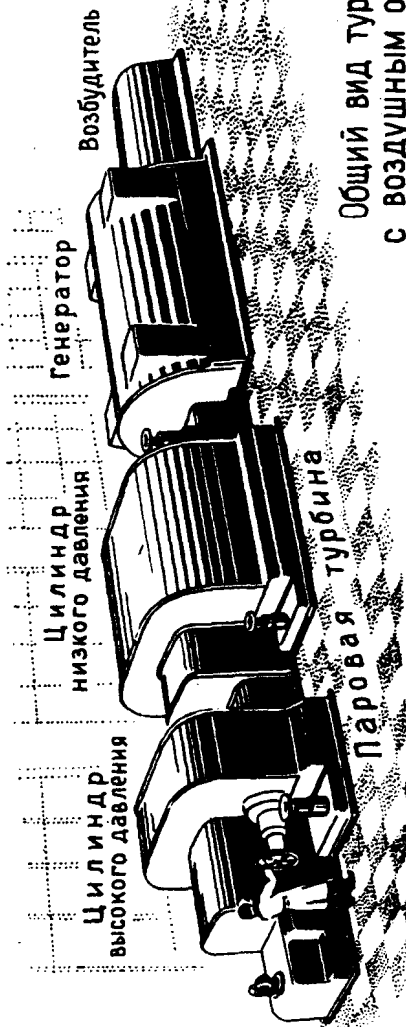


Ротор с явными полюсами

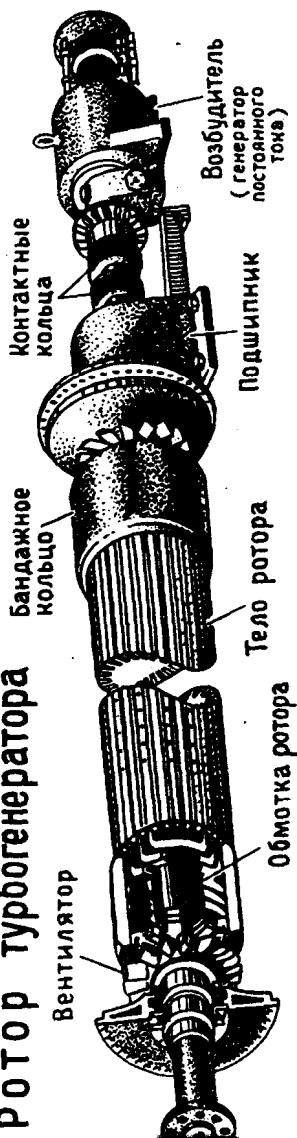


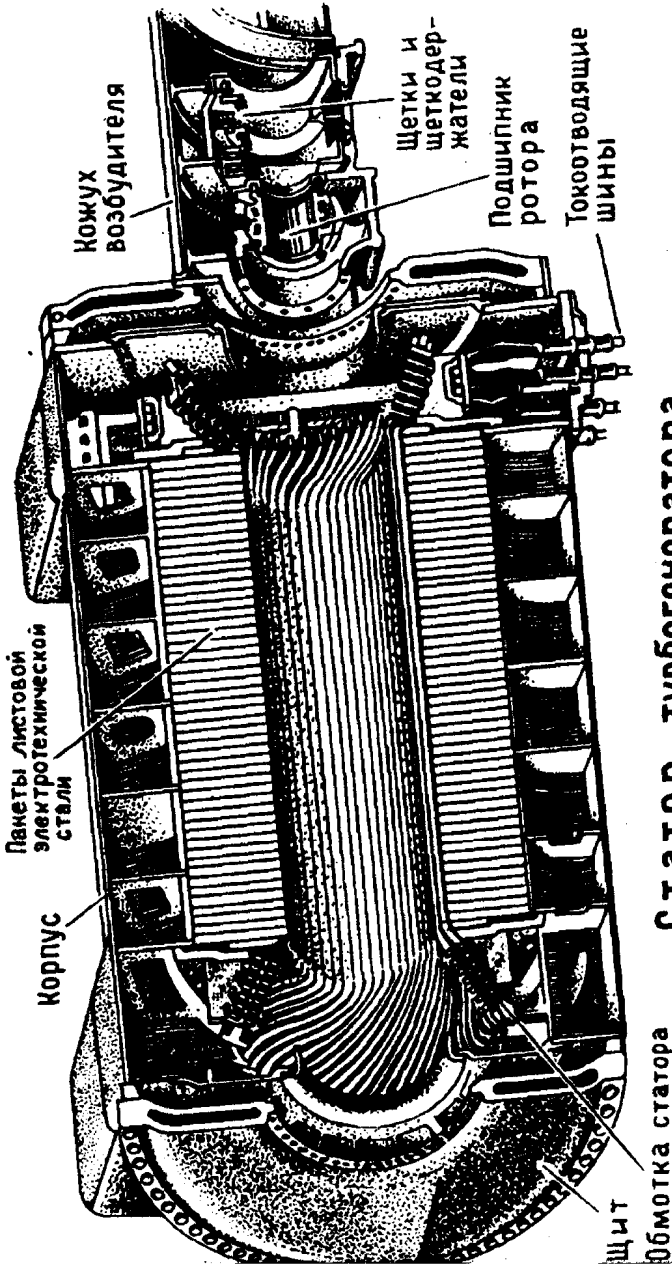
Ротор с неявными полюсами

ТУРБОГЕНЕРАТОР

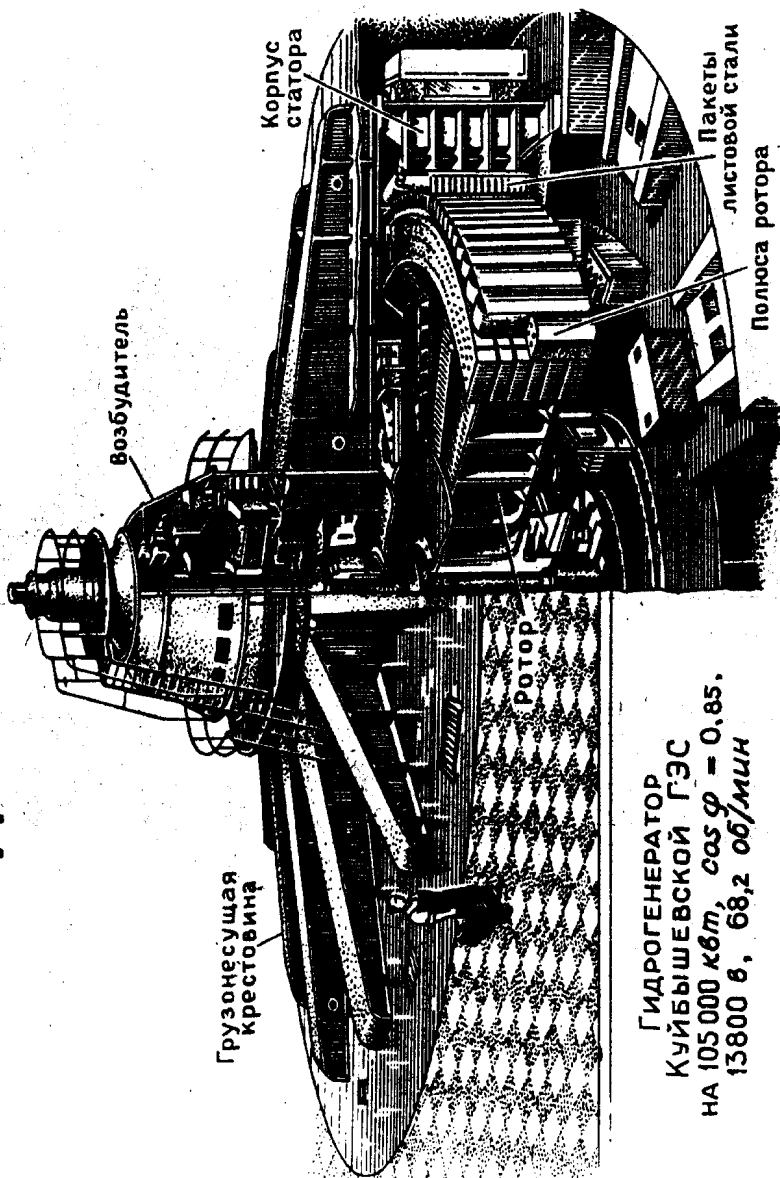


Ротор турбогенератора





ГИДРОГЕНЕРАТОР



ГИДРОГЕНЕРАТОР
 КУЙБЫШЕВСКОЙ ГЭС
 НА 105 000 кВт, $\cos \varphi = 0,85$,
 13800 в, 68,2 об/мин

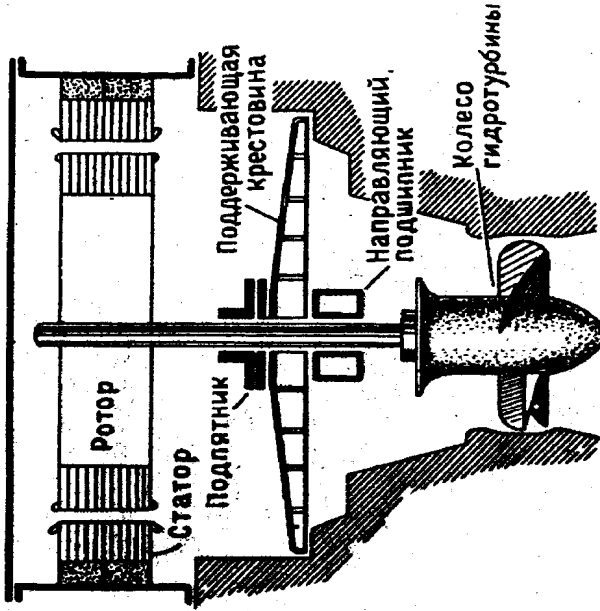


СХЕМА ГИДРОГЕНЕРАТОРА
ЗОНТИЧНОГО ТИПА

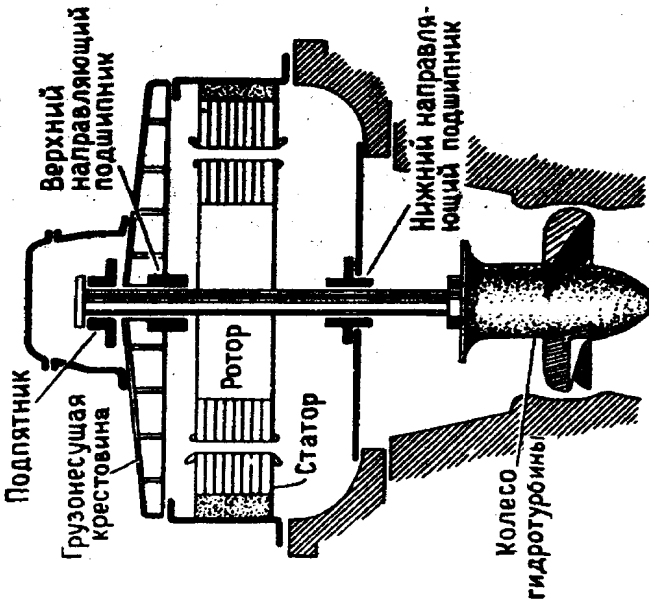


СХЕМА ГИДРОГЕНЕРАТОРА
ПОДВЕСНОГО ТИПА

Литература

1. Костенко М.П. Пиотровский Л.М. Электрические машины. Часть 1,2. Энергия. 1972-1973 г.г.
2. Вольдек А.И. Электрические машины. Энергия. 1974г.
3. Важнов А.И. Электрические машины. Энергия. 1974 г.
4. Петров Г.Н. Электрические машины. Энергия. 1974 г.
5. Брускин Д.Э., Зозорович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины и микромашины. Высшая школа. 1971 г.
6. Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств. Высшая школа. 1976 г.
7. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. Энергия. 1986 г.
8. Притужалов В.Я. Электрические машины. Методическое пособие для самостоятельного изучения курса. ПГТУ. 1998 г.
9. Притужалов В.Я. Методические указания для курсового проектирования машины постоянного тока. ПГТУ. 1996 г.
10. Копылов И.П. Электрические машины. Энергоатомиздат. 1986 г.

Оглавление

Предисловие.....	3
I. Электрические машины постоянного тока.....	4
1. Конструкция машины постоянного тока.....	4
2. Принцип действия машины постоянного тока.....	7
3. Основные уравнения машины постоянного тока.....	8
4. Реакция якоря машины постоянного тока.....	9
5. Коммутация машин постоянного тока.....	10
6. Расчет магнитной цепи машины.....	12
6.1 Магнитные потоки.....	12
6.2 Определение основной н.с.....	13
6.3 Индукция в зазоре.....	15
6.4 Н.с. зубцовой зоны.....	16
6.5 Н.с. спинки якоря.....	17
6.6 Н.с. полюсов ярма.....	18
6.7 Кривая намагничивания машины.....	19
7. Определение мощности машины.....	20
8. Генераторы постоянного тока.....	23
8.1 Генераторы независимого возбуждения.....	23
8.2 Самовозбуждение генераторов.....	27
8.3 Генераторы параллельного, последовательного и смешанного возбуждения.....	28
9. Двигатели постоянного тока.....	32
10. Исполнительные двигатели постоянного тока.....	35
II. Общие вопросы теории машин переменного тока.....	38
1. Конструкция обмоток статора.....	38
1.1 Назначение и классификация обмоток статора.....	38
1.2 Трехфазная двухслойная обмотка статора.....	39
1.3 Способы соединения секционных групп обмоток статора.....	40
1.4 Однослойные обмотки статора.....	41
1.5 Трехфазная обмотка с дробным числом пазов на полюс и фазу.....	43
2. Электродвижущие силы обмоток переменного тока.....	44
2.1 Э.д.с. обмотки от основной гармоники магнитного поля.....	44
2.2 Коэффициент скоса.....	45
2.3 Коэффициент укорочения.....	46
2.4 Коэффициент распределения.....	47
2.5 Э.д.с. от высших гармоник магнитного поля.....	49

2.6	Улучшение формы кривой э.д.с.....	50
3.	Намагничивающие силы обмоток переменного тока	54
3.1	Намагничивающая сила фазы обмотки.....	54
3.2	Намагничивающие силы многофазных обмоток.....	60
III.	Трансформаторы.....	62
1.	Принцип действия и устройство трансформаторов	62
1.1	Основные определения и принцип действия	62
1.2	Классификация трансформаторов	63
1.3	Устройство трансформаторов	64
2.	Основы рабочего процесса трансформатора.....	66
2.1	Уравнение электродвижущих сил.....	66
2.2	Уравнение намагничивающих сил и токов	68
2.3	Приведенный трансформатор	71
2.4	Электрическая схема замещения трансформатора	73
2.5	Векторная диаграмма трансформатора.....	74
3.	Параметры и характеристики трансформаторов	76
3.1	Предварительные замечания	76
3.2	Опыт холостого хода.....	76
3.3	Опыт короткого замыкания	78
3.4	Упрощенная векторная диаграмма трансформатора	81
3.5	Изменение вторичного напряжения	82
3.6	Потери и к.п.д. трансформатора.....	83
4.	Трехфазный трансформатор	86
4.1	Конструкция трехфазного трансформатора.....	86
4.2	Схемы соединения обмоток трехфазных трансформаторов.....	87
4.3	Группы соединения	87
4.4	Явления, возникающие при намагничивании магнитопроводов трансформаторов	89
4.5	Э.д.с. трехфазных обмоток трансформатора	90
4.6	3-я гармоника в трансформаторе при соединении его обмоток по способу $Y/Y - 12$	91
4.7	3-я гармоника в трансформаторе при соединении его обмоток по способу Δ/Y	94
4.8	3-я гармоника в трансформаторе при соединении его обмоток по способу Y/Δ	94
4.9	Соединение $Y/Y - 12$ трехфазного трансформатора с третичной обмоткой	95
5.	Параллельная работа трансформаторов.....	95
5.1	Условие параллельной работы трансформаторов.....	95

5.2	Параллельная работа трансформаторов при неодинаковых коэффициентах трансформации	96
5.3	Параллельная работа трехфазных трансформаторов с различными группами соединения обмоток.....	98
5.4	Параллельная работа трансформаторов с неодинаковыми напряжениями короткого замыкания ...	99
6.	Трех обмоточные трансформаторы.....	102
7.	Автотрансформаторы.....	104
8.	Трансформаторы специального назначения.....	107
8.1	Трансформаторы для преобразования числа фаз переменного тока	107
8.2	Трансформаторы для преобразования частоты	109
8.3	Трансформаторы для питания дуговых электрических печей.....	110
8.4	Трансформаторы для дуговой электросварки	112
8.5	Пик – трансформаторы	113
9.	Регулирование напряжения обмоток трансформатора.....	113
9.1	Регулирование контактное с отключением	113
9.2	Регулирование контактное без отключения	115
9.3	Трансформаторы с плавным регулированием напряжения.....	116
9.4	Бесконтактное регулирование	117
10.	Измерительные трансформаторы	118
10.1	Трансформаторы тока.....	119
10.2	Трансформаторы напряжения	120
11.	Несимметричные режимы работы трехфазных трансформаторов	122
11.1	Метод симметричных составляющих	122
11.2	Несимметричная нагрузка при отсутствии тока нулевой последовательности.....	123
11.3	Несимметричная нагрузка при наличии тока нулевой последовательности	126
11.4	Работа трансформатора при отключении одной фазы	129
12.	Переходные процессы в трансформаторах.....	130
12.1	Общая характеристика переходных процессов	130
12.2	Включение трансформатора.....	130
12.3	Внезапное короткое замыкание трансформатора	134
13.	Перенапряжения в трансформаторе	138
13.1	Общие сведения о перенапряжениях.....	138

13.2	Схема замещения обмоток трансформатора при перенапряжениях	140
13.3	Начальное распределение напряжения.....	141
13.4	Защита трансформаторов от перенапряжений.....	142
IV.	Асинхронные машины	144
1.	Принцип действия и конструкция трехфазного асинхронного двигателя.....	144
1.1	Принцип действия трехфазного асинхронного двигателя.....	144
1.2	Устройство асинхронных двигателей.....	146
2.	Рабочий процесс асинхронной машины	147
2.1	Э.д.с., наводимые в обмотках асинхронного двигателя.....	147
2.2	Уравнения намагничивающих сил и токов асинхронного двигателя.....	149
2.3	Приведение параметров обмотки ротора к обмотке статора	151
2.4	Векторная диаграмма асинхронного двигателя.....	152
2.5	Схема замещения асинхронного двигателя.....	152
3.	Электромагнитный момент и рабочие характеристики асинхронного двигателя.....	154
3.1	Потери и к.п.д. асинхронного двигателя.....	154
3.2	Электромагнитный момент асинхронного двигателя... ..	156
3.3	Влияние напряжения сети и активного сопротивления обмотки ротора на механическую характеристику асинхронного двигателя.....	159
3.4	Рабочие характеристики асинхронного двигателя.....	160
3.5	Генераторный и тормозной режим асинхронной машины.....	161
3.6	Паразитные моменты в асинхронном двигателе	163
4.	Круговая диаграмма асинхронного двигателя.....	165
4.1	Обоснование круговой диаграммы.....	165
4.2	Построение упрощенной круговой диаграммы	167
4.3	Применение упрощенной круговой диаграммы для определения параметров асинхронного двигателя.....	169
5.	Асинхронные микромашины	172
5.1	Принцип действия однофазного асинхронного двигателя.....	172
5.2	Пуск однофазного асинхронного двигателя.....	174
5.3	Асинхронные конденсаторные двигатели	175

5.4	Работа трехфазного асинхронного двигателя от однофазной сети.....	176
5.5	Однофазный двигатель с экранированными полюсами.....	177
5.6	Асинхронный исполнительный двигатель.....	178
5.7	Способы управления исполнительными двигателями.....	179
5.8	Асинхронный тахогенератор.....	181
5.9	Поворотные трансформаторы.....	183
5.10	Сельсины.....	187
6.	Специализированные асинхронные машины.....	190
6.1	Индукционный регулятор и фазорегулятор.....	190
6.2	Асинхронный преобразователь частоты.....	191
V.	Синхронные машины.....	193
1.	Принцип действия и конструкция синхронных генераторов.....	193
1.1	Принцип действия синхронного генератора.....	193
1.2	Возбуждение синхронных машин.....	194
1.3	Типы синхронных машин и их конструкция.....	194
2.	Реакция якоря и характеристики синхронного генератора.....	196
2.1	Магнитное поле синхронной машины.....	196
2.2	Реакция якоря синхронной машины.....	197
2.3	Индуктивные сопротивления реакции якоря.....	199
2.4	Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря.....	200
2.5	Векторные диаграммы.....	202
3.	Характеристики синхронных машин.....	204
3.1	Характеристика холостого хода.....	205
3.2	Характеристика короткого замыкания (х.к.з.).....	206
3.3	Опытное определение x_d	206
3.4	Отношение короткого замыкания (о.к.з.).....	207
3.5	Внешняя характеристика.....	208
3.6	Номинальное изменение напряжения синхронного генератора.....	209
3.7	Регулировочная характеристика (р.х.).....	209
3.8	Нагрузочная характеристика (н.х.).....	210
3.9	Реактивный треугольник, или треугольник Потье.....	211
3.10	Индуктивное сопротивление Потье.....	212
3.11	Диаграмма Потье.....	213
4.	Параллельная работа синхронных машин.....	215

4.1	Включение синхронных генераторов на параллельную работу	215
4.2	Синхронные режимы параллельной работы синхронных машин	217
4.3	Угловые характеристики синхронных машин	219
4.4	Статическая устойчивость	220
4.5	Реактивная мощность	222
4.6	U - образные характеристики	223
5.	Несимметричные режимы работы синхронных генераторов	225
5.1	Токи и сопротивления прямой последовательности	226
5.2	Токи сопротивления обратной последовательности	226
5.3	Токи и сопротивления нулевой последовательности	228
6.	Переходные процессы синхронных машин	228
6.1	Общие вопросы	228
6.2	Гашение магнитного поля и переходные процессы в цепях индуктора	229
6.3	Теорема о постоянстве потокосцепления	230
6.4	Токи трехфазного короткого замыкания	231
6.5	Схемы замещения с.г. в переходных процессах	238
7.	Синхронные микромашины	239
7.1	Назначение и классификация синхронных микромашин	239
7.2	Синхронные машины с постоянными магнитами	240
7.3	Реактивный двигатель	242
7.4	Гистерезисный двигатель	244
7.5	Индукторные машины	245
7.6	Редукторные (индукторные) двигатели	246
7.7	Шаговые (импульсные) двигатели	246
Приложение		248
Литература		294
Оглавление		295