КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

ВВЕДЕНИЕ

Электротехника в широком понимании – это наука, изучающая способы использования электрических и магнитных явлений для практических целей. Электротехника охватывает большой комплекс вопросов и разделена на ряд областей.

Одной из важнейших областей электротехники является электроэнергетика, которая рассматривает вопросы производства электрической энергии (из других видов энергии), передачи энергии на дальние расстояния, распределение ее между потребителями и преобразование электрической энергии в другие виды энергии – механическую, тепловую, химическую и т. д.

На основе электрификации все шире внедряется комплексная механизация и автоматизация производственных процессов. Интенсивно развивается электротехнология – электротермические и электролитические способы получения и обработки металлов. Электроэнергия используется для электросварки, закалки стали токами высокой частоты, сушки древесины и т. д.

Обширное применение электротехники во всех отраслях народного хозяйства настоятельно требует знания молодыми работниками основных вопросов данной науки.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савилов, Г. В. Электротехника и электроника: электронный учебник / Г. В. Савилов.– Электрон. текстовые дан. – М.: КНОРУС, 2010.

2. Касаткин, А. С. Электротехника: учебник / А. С. Касаткин, М. В. Немцов.– 9-е изд., испр. – М.: Академия, 2005. – 553 с.

3. Электротехника и электроника. Теория электрических цепей: курс лекций / К. Л. Пузевич. – Горки: БГСХА, 2020. – 86 с.

4. Электротехника и электроника. Трансформаторы и электрические машины: курс лекций / К. Л. Пузевич. – Горки: БГСХА, 2022. – 126 с.

5. Рекус, Г. Г. Сборник задач по электротехнике и основам электроники: учеб. пособие для неэлектротех. спец. вузов / Г. Г. Рекус, А. И. Белоусов; ред. Л. В. Честная. – М.: Высш. шк., 1991. – 416 с.

6. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник / Л. А. Бессонов.– 9-е изд., перераб. и доп.– М.: Высш. шк., 1996. – 638 с.

7. Китунович, Ф. Г. Электротехника / Ф. Г. Китунович. – Минск: Выш. шк., 1991.– 430 с.

ЧАСТЬ I ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Лекция 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1.1. Область применения энергии постоянного тока

Несмотря на широкое распространение переменного тока, остаются отрасли науки и техники, где до сих пор применяется энергия постоянного тока:

1. Питание тяговых электродвигателей (трамвай, троллейбус, метро, подъемники). Электродвигатели постоянного тока обладают хорошими возможностями для плавного регулирования частоты вращения ротора в широком диапазоне. Это свойство необходимо для транспортных средств, особенно для городских маршрутов.
2. Технологические процессы, возможные только на постоянном токе (электролиз).
3. Зарядка аккумуляторных батарей.
4. Питание ламп освещения в шахтах, летательных аппаратах.

1.2. Электрическая схема

В простейшем случае электрическая цепь состоит из трех основных элементов (рис. 1.1):

источника электрической энергии (И),
приемника (потребителя) *электрической энергии* (П),
соединительных проводов.

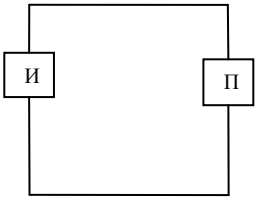


Рис. 1.1. Основные элементы электрической цепи

В общем случае электрическая цепь может иметь несколько источников и приемников, соединенных между собой различным образом.

Реальная электрическая цепь кроме перечисленных элементов содержит дополнительные элементы (рис. 1.2):

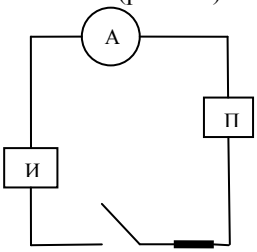


Рис. 1.2. Структурная схема
реальной электрической цепи

выключающие устройства (выключатели и рубильники);
контрольно-измерительные приборы (А);
приборы защиты (плавкие предохранители).

При расчете электрические цепи заменяются схемами замещения или просто электрическими схемами. Реальные элементы изображаются на них условными обозначениями. Линии, которыми они соединены, изображают провода с бесконечно малым сопротивлением.

1.3. Источники электрической энергии

Источник преобразует энергию неэлектрическую в электрическую. В зависимости от вида превращаемой энергии различают следующие типы источников:

1. Гальванические элементы и аккумуляторы (рис. 1.3, *а*). Получение электрической энергии путем преобразования химической энергии.

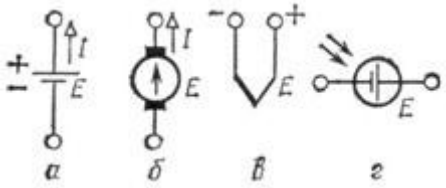


Рис. 1.3. Обозначения источников электрической энергии
постоянного тока на схемах

2. Термоэлементы (рис. 1.3, *в*). Преобразование тепловой энергии в электрическую. К данному типу источников относятся термопары, термоэлектрогенераторы.

3. Фотоэлементы (рис. 1.3, *г*). Этот источник преобразует энергию лучистую (световую) в электрическую. Это фотодиоды, солнечные батареи.

4. Генераторы (рис. 1.3, *б*) – источник, преобразующий механическую энергию в электрическую.

В промышленности основным источником электрической энергии является генератор.

Любой источник электрической энергии характеризуется электродвижущей силой (ЭДС). Электродвижущая сила – сила, перемещающая заряды, – создается в источнике силами неэлектрического происхождения, сторонними силами, т. е. силами, подведенными к источнику извне. Например, у генератора – это механическая сила, у фотоэлемента – свет, у термоэлемента – тепло.

Возбуждаемая электродвижущая сила разделяет заряды в источнике на положительные и отрицательные и сообщает им потенциальную энергию W. ЭДС численно равна энергии, приходящейся на единицу заряда:

$$E = \frac{W}{q}. \qquad (1.1)$$

Энергия W измеряется в джоулях (1 джоуль = 1 ньютон × метр), а заряд q – в кулонах. Единица ЭДС = 1 джоуль/1 кулон получила название вольт (В).

Один зажим источника обозначается знаком «+», другой – знаком «–». Положительное направление ЭДС – от минуса к плюсу (рис. 1.4).

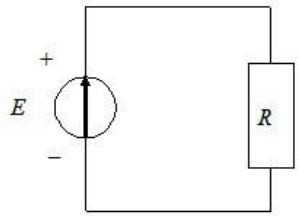


Рис. 1.4. Направление ЭДС в электрической цепи

1.4. Электрический ток

В замкнутой цепи, содержащей ЭДС, возникает направленное движение зарядов – электрический ток, т. е. ЭДС заставляет заряды двигаться через приемник электрической энергии R с некоторой силой.

Силой тока I называется количество электричества q, проходящее через поперечное сечение проводника в единицу времени t:

$$I = \frac{q}{t}. \qquad (1.2)$$

Единица силы тока 1 ампер (А) – 1 кулон за 1 секунду. Она является основной электрической единицей в Международной системе единиц измерения (СИ).

За условно положительное направление тока принято считать направление движения положительных зарядов – от плюса источника к минусу. На схеме (рис. 1.5) оно совпадает с положительным направлением ЭДС и указывается стрелкой.

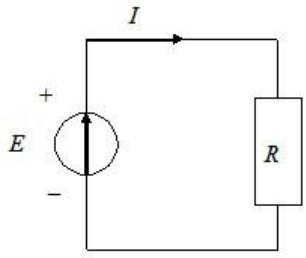


Рис. 1.5. Направление тока в электрической цепи

Ток, сила и направление которого во времени не изменяются, называется **постоянным.**

1.5. Закон Ома. Напряжение

Таким образом, мы установили, что направленное движение зарядов – электрический ток – возникает из-за воздействия ЭДС. Поэтому

между значением ЭДС E и значением силы тока I должна существовать связь.

Немецкий физик Георг Симон Ом в 1827 г. установил экспериментально зависимость между током и ЭДС, известную под названием **закона Ома**: *ток в замкнутой цепи прямо пропорционален электродвижущей силе и обратно пропорционален сопротивлению всей цепи*.

$$I = \frac{E}{R + R_0}, \tag{1.3}$$

где R – сопротивление приемника, Ом;

R_0 – внутреннее сопротивление источника (сопротивление электролита между пластинами, сопротивление обмоток генератора), Ом.

Ту же формулу можно записать в виде:

$$E = IR + IR_0. \tag{1.4}$$

Величина IR называется падением напряжения или просто напряжением U.

Под **напряжением** на некотором участке электрической цепи понимают разность потенциалов между крайними точками этого участка. **Потенциал** φ электрического поля в точке равен потенциальной энергии, которой обладает единица положительного заряда, помещенного в данную точку поля. Так, если потенциал точки a (рис. 1.6) равен φ_a, потенциал точки b равен φ_b, то разность потенциалов между точками a и b, или напряжение, равняется:

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b. \tag{1.5}$$

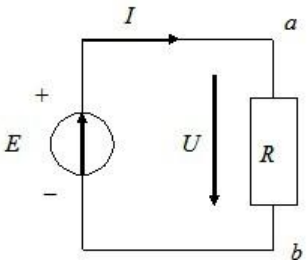


Рис. 1.6. Направление падения напряжения в электрической цепи

Положительные заряды перемещаются от точки с более высоким потенциалом к точке с более низким потенциалом, ток направлен от точки *a* к точке *b*. Положительное направление падения напряжения совпадает с положительным направлением тока и на схеме (рис. 1.6) оно указано стрелкой.

С учетом сказанного запишем следующее:

$$E = U + IR_0. \tag{1.6}$$

где U – напряжение приемника, В;

IR_0 – падение напряжения на внутреннем сопротивлении источника, В.

Чаще источник электрической энергии характеризуется не ЭДС, а напряжением на зажимах источника. Напряжение меньше ЭДС на величину падения напряжения на внутреннем сопротивлении источника:

$$U = E - IR_0. \tag{1.7}$$

Только при разомкнутой цепи (холостой ход), когда $I = 0$ ($IR_0 = 0$), напряжение источника равно его ЭДС: $U = E$. При подключенном потребителе всегда $U < E$; это очень важный вывод и его следует запомнить.

1.6. Работа и мощность электрического тока

Работа и энергия – понятия равноценные. Энергия – способность тела совершать работу. Например, поднятый на высоту какой-либо груз обладает некоторым запасом энергии и при падении производит работу. Энергия тела тем больше, чем большую работу может произвести это тело при своем движении. Энергия не исчезает, а переходит из одной формы в другую. Измерить энергию можно только измерив работу, которую совершает тело, расходуя эту энергию.

В источнике электрической энергии заряд в 1 кулон обладает потенциальной энергией, равной ЭДС, – E. Потенциальная энергия q зарядов электричества равна:

$$W = Eq. \tag{1.8}$$

Чтобы превратить эту потенциальную энергию в работу, нужно замкнуть цепь. Аналогично потенциальная энергия поднятого над землей груза превратится в работу, если груз получит возможность падать

вниз.

В замкнутой цепи появится ток. За время t при силе тока I переместится количество зарядов

$$q = It. \tag{1.9}$$

Работа, произведенная источником электрической энергии, будет равна потенциальной энергии зарядов:

$$A = W = Eq = EIt. \tag{1.10}$$

Однако не вся эта энергия является полезной, т. е. не вся работа, произведенная источником энергии, сообщается приемнику энергии, так как часть ее расходуется на преодоление внутреннего сопротивления источника и проводов. Таким образом, полезная энергия – энергия, полученная потребителем, – будет равна:

$$W = UIt. \tag{1.11}$$

Размерность энергии $[W] = [UIt] = \text{В}\cdot\text{А}\cdot\text{с} = \text{Дж}$.

Джоуль (Дж) – работа, которую совершает постоянная сила, равная 1 Н, на пути 1 м, пройденном телом под действием этой силы по направлению, совпадающему с направлением силы.

Понятие «мощность электрического тока» характеризует скорость преобразования электрической энергии в другой вид энергии:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{EIt}{t} = EI; \tag{1.12}$$

или

$$P = UI\ . \tag{1.13}$$

Единица мощности – ватт (Вт). 1 ватт – мощность, при которой за 1 секунду совершается работа в 1 джоуль.

Практическая единица мощности – 1 киловатт, сокращенно – кВт.

1.7. Тепловое действие тока

При прохождении электрического тока через металлический проводник электроны сталкиваются с молекулами. При этом расходуется энергия, которая превращается в тепло. Любое движение, при котором преодолевается сопротивление, требует затраты определенной энергии. Так, например, для перемещения какого-либо тела преодолевается сопротивление трения и работа, затраченная на это, превращается в

тепло.

Электрическое сопротивление проводника играет ту же роль, что и сопротивление трения. Таким образом, для проведения тока через проводник источник тока затрачивает некоторую энергию, которая превращается в тепло. Количество выделенного тепла за время t определяется законом Джоуля – Ленца:

$$Q = RI^2t. \tag{1.14}$$

Так как $I = U / R$ и $R = U / I$, то закон теплового действия тока может быть выражен как

$$Q = UIt. \tag{1.15}$$

В системе СИ тепло измеряется в джоулях (Дж).

На нагревании проводников электрическим током основано устройство электрического освещения, электронагревательных приборов, электрических печей, измерительной и медицинской аппаратуры различных типов и т. д.

Электрическое нагревание проводников не всегда оказывает полезное влияние. В проводах линий электропередач вследствие сильного нагрева их при больших токах может создаваться опасность возникновения пожаров. Во избежание чрезмерного нагрева проводов и потребителей электрической энергии для электрической аппаратуры установлены нормы максимальных значений сил токов, пропускаемых по данному проводу.

1.8. Сопротивление проводника. Проводимость

Направленному движению электрических зарядов в любом проводнике препятствуют его молекулы и атомы. Поэтому как внешняя цепь, так и сам источник энергии оказывают препятствие прохождению тока. Величина, характеризующая противодействие электрической цепи прохождению электрического тока, называется **электрическим сопротивлением**.

Сопротивление проводника подсчитывается по формуле:

$$R = \rho\frac{l}{S}, \tag{1.16}$$

где ρ – удельное сопротивление материалов, Ом мм^2/м;

l – длина проводника, м;

S – площадь поперечного сечения, мм^2.

Сопротивление – это свойство проводника. Иногда термин «сопротивление» употребляется также для обозначения устройств, предназначенных для регулирования в цепи тока (реостаты) и напряжения (потенциометры). Чтобы разделить эти два понятия, в радиотехнике элемент цепи, создающий сопротивление, называют «резистор».

Сопротивление проводника зависит от температуры:

$$R_\Theta = R_0\left[1+\alpha\left(\Theta-\Theta_0\right)\right], \tag{1.17}$$

где R_Θ – сопротивление проводника при температуре Θ, Ом;

R_0 – сопротивление проводника при температуре Θ_0, Ом;

α – температурный коэффициент сопротивления, 1/°С.

Приведенное соотношение справедливо при не очень высоких температурах (ниже 100–150 °С).

Коэффициенты ρ и α получены экспериментально для всех материалов и приведены в справочниках.

Свойство материалов изменять свое электрическое сопротивление при нагреве или охлаждении используется для измерения температур.

Способность проводника пропускать электрический ток характеризуется **проводимостью**, которая представляет собой величину, обратную сопротивлению:

$$\mathrm{g} = \frac{1}{\rho},\ \frac{1}{\text{Ом}} = \text{сименс} = \text{См}.$$

1 См – электрическая проводимость участка цепи с сопротивлением 1 Ом.

Аналогично удельная проводимость

$$\gamma = \frac{1}{\rho}. \tag{1.18}$$

1.9. Цепи неразветвленные и разветвленные. Законы Кирхгофа

Схема неразветвленной цепи представлена на рис. 1.6. На всех участках такой цепи ток один и тот же.

Разветвленная цепь содержит участки (ветви) с различными токами. Место соединения трех и более проводов называют узлом. Ветвь –

это участок цепи, заключенный между двумя узлами. При обходе по ветвям цепи можно получить контур (ячейку) – замкнутое очертание, образующее неразветвленную цепь.

В 1847 г. немецкий физик Кирхгоф экспериментально установил следующие зависимости (законы) между токами и напряжениями.

Первый закон Кирхгофа (закон для токов). Он применим к любому узлу электрической цепи.

Сумма токов, приходящих к узлу, равна сумме токов, уходящих от узла, или алгебраическая сумма токов в узле равна нулю:

$$\sum I = 0. \tag{1.19}$$

Если рассмотреть электрическую схему (рис. 1.7), то на основании первого закона Кирхгофа можно записать, что:

$$I = I_1 + I_2 + I_3. \tag{1.20}$$

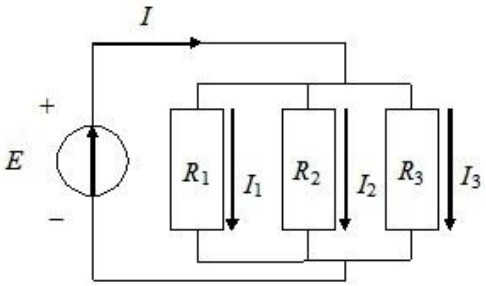


Рис. 1.7. Разветвленная электрическая цепь

Второй закон Кирхгофа (закон для напряжений). Он применим к любому контуру электрической цепи.

В контуре алгебраическая сумма электродвижущих сил равна алгебраической сумме падений напряжений:

$$\sum E = \sum IR. \tag{1.21}$$

Если рассмотреть электрическую схему (рис. 1.8), то на основании второго закона Кирхгофа можно записать, что:

$$E = U_1 + U_2 + U_3 + U_0, \tag{1.22}$$

где $U_0 = IR_0$ – падение напряжения на внутреннем сопротивлении источника, В.

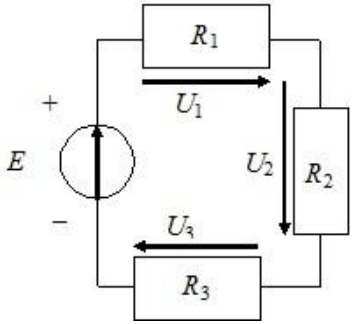


Рис. 1.8. Неразветвленная электрическая цепь

1.10. Цепи линейные и нелинейные

Ток в приемнике, согласно закону Ома, зависит от приложенного напряжения: $I = U / R$. Зависимость тока от напряжения называется вольтамперной характеристикой приемника. Для приемников, у которых сопротивление не изменяется (R = const), вольтамперная характеристика описывается уравнением прямой ($y = ax$), а на графике изображается прямой линией (рис. 1.9). Приемники, имеющие линейную вольтамперную характеристику, называются **линейными.**

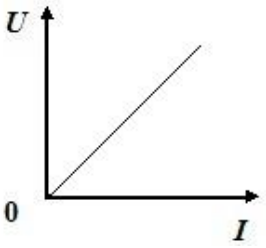


Рис. 1.9. Вольтамперная характеристика
линейного элемента

Электрическая цепь, содержащая только линейные приемники, называется линейной.

Встречаются приемники, у которых сопротивление при изменении тока и напряжения не остается постоянным; вольтамперная характеристика такого приемника изображается некоторой кривой. Для примера на рис. 1.10 приведена вольтамперная характеристика диода – прибора для выпрямления тока. Приемники с нелинейной вольтамперной характеристикой называются нелинейными.

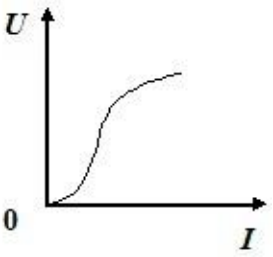


Рис. 1.10. Вольтамперная характеристика
нелинейного элемента

К нелинейным приемникам относятся: полупроводниковые диоды, стабилитроны, электронные лампы и многие другие приборы. У них сопротивление уменьшается с увеличением силы тока. Тогда как у нагревательных приборов с увеличением силы тока сопротивление возрастает. Их вольтамперные характеристики приведены в электротехнических справочниках.

Электрическая цепь, содержащая хотя бы один нелинейный элемент, называется **нелинейной.**

Так как сопротивление проводника зависит от температуры, а последняя – от силы тока, то все реальные приемники в той или иной степени нелинейны.

Но в большом числе случаев изменением сопротивлений можно пренебречь и считать цепи линейными, т. е. состоящими из идеальных линейных приемников. Поэтому в дальнейшем мы будем изучать методы расчетов линейных цепей.

Вольтамперные характеристики источников электрической энергии, которые часто называют **внешними характеристиками**, также могут быть линейными и нелинейными. Внешняя характеристика линейного источника приведена на рис. 1.11.

Для построения внешней характеристики источника постоянного

тока по оси ординат в декартовой системе координат в масштабе нужно отложить напряжение U, а по оси абсцисс в соответствующем масштабе – силу тока I.

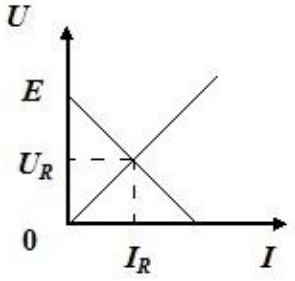


Рис. 1.11. Внешняя характеристика
линейного источника

Для этой цели мысленно проводят два опыта с простейшей цепью постоянного тока. Если сопротивление нагрузки $R_н = \infty$, то напряжение на клеммах источника равно ЭДС E, а сила тока $I_н = 0$; если сопротивление нагрузки $R_н = 0$, то напряжение на клеммах источника равно нулю, а ток короткого замыкания $I_{н.к}$ вычисляется по формуле

$$I_{н.к} = \frac{E}{R_0 + (R = 0)} = \frac{E}{R_0}. \qquad (1.23)$$

Таким образом получают крайние точки внешней характеристики источника постоянного тока: на оси ординат ($U = E$, $I = 0$) и на оси абсцисс ($U = 0$, $I = I_{н.к}$). Прямая, соединяющая эти точки, представляет собой искомую внешнюю характеристику источника постоянного тока, удовлетворяющую любому режиму его работы: от холостого хода до короткого замыкания.

На основании внешней характеристики можно определить возможность работы приемников электрической энергии с этим источником. Для этого совмещаем вольтамперную характеристику приемника электрической энергии с внешней характеристикой источника. Координаты точки пересечения этих характеристик дадут значения рабочей силы тока I_R и напряжения U_R на приемнике (рис. 1.11). Фактически на графике мы сразу видим, какое падение напряжения происходит на участке цепи с подключенным сопротивлением, и если оно большое, то может произойти ситуация, когда второй подключенный приемник

работать с данным источником не будет, так как оставшегося ему напряжения не хватает для полноценной работы.

1.11. Режимы работы источников и приемников электрической энергии

Номинальный режим – режим работы, на который рассчитан источник (или приемник) электрической энергии. Он определяется номинальным напряжением $U_н$, номинальным током $I_н$, номинальной мощностью $P_н$.

Номинальное напряжение по техническим и экономическим соображениям устанавливается Государственным стандартом. Для большинства генераторов постоянного тока приняты номинальные напряжения 115, 230 и 460 В; для приемников – 110, 220, 440 В. Номинальное напряжение $U_н$ – основной параметр всякой электрической установки. По нему рассчитывается изоляция всех элементов цепи.

Номинальный ток $I_н$ – предельный ток, при котором источник (приемник) может длительно работать, не перегреваясь сверх допустимой температуры. Ток, больший номинального, преждевременно выводит генератор или электроприемник из строя.

Эти два параметра – номинальный ток $I_н$ и номинальное напряжение $U_н$ – определяют номинальную мощность, т. е. наибольшую полезную мощность генератора, двигателя, ламп и нагревательных устройств:

$$P_н = U_н I_н. \tag{1.24}$$

Режим холостого хода. Цепь источника разомкнута, $I_н = 0$. Падение напряжения на внутреннем сопротивлении $IR_0 = 0$. Напряжение генератора равно его ЭДС.

Режим короткого замыкания. Он возникает при повреждении изоляции токоведущих частей или при случайном соединении зажимов источника. Сопротивление внешней цепи R практически станет равным нулю. В цепи установится ток короткого замыкания:

$$I_{н.к} = \frac{E}{R_0 + (R = 0)} = \frac{E}{R_0}. \tag{1.25}$$

Так как R_0 очень мало, то $I_{н.к} > I_{ном}$. Это аварийный режим, т. е. режим, опасный для цепи. Он должен немедленно устраняться защитными устройствами, например, плавкими предохранителями. Иначе ток

короткого замыкания приведет в негодность и сам источник, и включенные в цепь приборы.

Согласованный режим. Он создается искусственно в схемах радиоэлектроники и автоматики, где нужно передать от источника к приемнику наибольшую мощность. Это условие выполняется, если сопротивление приемника подобрать равным внутреннему сопротивлению источника:

$$I_{\text{с.р}} = \frac{E}{R_0 + \left(R = R_0\right)} = \frac{E}{2R_0}. \qquad (1.26)$$

Таким образом получается, что $I_{\text{н. к}} = 2I_{\text{с. р}}$, т. е. сила тока при согласованном режиме в два раза меньше, чем при токе короткого замыкания.

Этот режим применяется в усилителях.

1.12. Расчет проводов

Под расчетом проводов обычно понимают выбор их сечения для заданных условий. Завышенное сечение вызывает перерасход металла, заниженное – перегрев проводов, изоляции, большие потери напряжения и мощности.

Чтобы чрезмерный нагрев провода не разрушил его изоляцию и не ослабил механические свойства, температура провода не должна превышать предельно допустимую температуру. Величина этой температуры нормируется ГОСТ. Например, провод с резиновой или полихлорвиниловой изоляцией не должен нагреваться выше 55 °С, с бумажной изоляцией – не выше 80 °С, голые провода – не выше 70 °С.

Существует две методики расчета сечения провода: выбор проводов по нагреву и расчет на потерю напряжения.

Выбор проводов по нагреву. Величину допускаемого тока в проводе не рассчитывают, а определяют экспериментально и нормируют. Таблицы длительно допустимых токов на провода и кабели приведены во всех электротехнических справочниках. Весь расчет сводится к определению рабочего тока $I_{\text{раб}}$ для заданного потребителя. Потом по таблице справочника подбирается сечение провода, для которого допустимый ток равен или больше рабочего

$$I_{\text{доп}} \geq I_{\text{раб}}. \qquad 1.27)$$

Расчет на потерю напряжения. Приемник рассчитан на номинальное напряжение $U_н$. Обычно он удален от генератора на расстояние l, и часть напряжения генератора теряется в линии. Поэтому напряжение генератора $U_г$ поддерживают выше номинального напряжения приемника на 5 %. Так, если $U_н = 220$ В, то $U_г = 230$ В; $U_н = 110$ В, то $U_г = 115$ В.

Любой приемник энергии очень чувствителен к изменениям напряжения, т. е. отклонениям его от номинального значения. Так, например, яркость лампы накаливания примерно пропорциональна четвертой степени напряжения, т. е. при понижении напряжения на 5 % световой поток лампы накаливания уменьшается на 18,5 %, а при повышении напряжения на 5 % сверх номинального – сокращает срок службы ее вдвое.

Сечение провода надо подобрать так, чтобы потеря напряжения в линии не превышала допустимого значения

$$\Delta U = U_г - U_н.$$

В этом случае на приемнике будет номинальное напряжение.

Потеря напряжения в линии при силе тока I равна падению напряжения на сопротивлении проводов:

$$\Delta U = IR,$$

где сопротивление двух проводов линии, согласно формуле 1.16

$$R = \rho \frac{2l}{s}.$$

Отсюда для заданных значений длины линии l, тока в линии I, допустимого падения напряжения ΔU и известном материале провода (ρ) найдем сечение провода

$$s = \frac{2\rho l I}{\Delta U}$$

и округлим его до ближайшего стандартного.

Из двух сечений провода, найденных при расчете по нагреву и по потере напряжения, выбирают наибольшее.

Для защиты аппаратов, машин и приборов от чрезмерно больших токов устанавливают предохранительные устройства (предохранители, реле, автоматы), которые автоматически прерывают цепь тока, как только его величина превысит норму.

1.13. Расчет линейных цепей с одним источником питания

Суть расчета – найти один из трех параметров: либо ток I, либо напряжение U (ЭДС E), либо сопротивление R при двух заданных параметрах. Будем различать задачи, когда к источнику подключен один приемник или несколько, соединенных между собой последовательно, параллельно или смешанно.

Цепь с одним приемником (простая неразветвленная цепь) (см. рис. 1.4). Задана ЭДС источника E, его внутреннее сопротивление R_0, мощность приемника $P_н$ при номинальном напряжении $U_н$. Определить ток источника.

Мощность

$$P = UI,$$

а сила тока

$$I = \frac{U}{R}.$$

Тогда

$$P = \frac{U^2}{R}.$$

Определив отсюда сопротивление приемника, по закону Ома определяют силу тока в цепи:

$$I = \frac{E}{R_0 + R} = \frac{E}{R_0 + \frac{U^2}{P}}.$$

Цепь с последовательно соединенными приемниками (рис. 1.12, *а*).

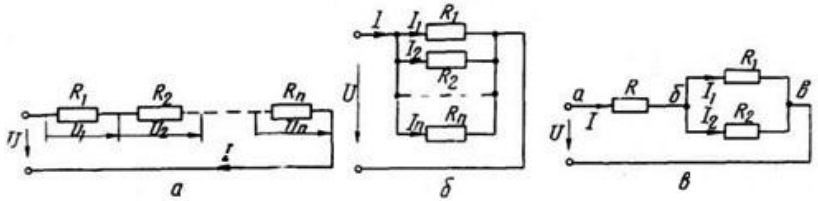


Рис. 1.12. Соединение приемников:
а – последовательное; *б* – параллельное; *в* – смешанное

Общее напряжение U равно сумме напряжений на отдельных участках (сопротивлениях):

$$U = U_1 + U_2 + U_3.$$

Применив для каждого участка закон Ома

$$I = \frac{U}{R} \rightarrow U = IR,$$

запишем это уравнение в виде:

$$U = IR_1 + IR_2 + IR_3 = I(R_1 + R_2 + R_3) = IR_{\text{экв}},$$

где $R_{\text{экв}}$ – общее (эквивалентное) сопротивление цепи, Ом.

Закон Ома для электрической цепи с последовательным соединением приемников примет следующий вид:

$$I = \frac{U}{R_{\text{экв}}}. \qquad (1.28)$$

Если соединены последовательно n приемников, то их эквивалентное сопротивление равно сумме отдельных сопротивлений:

$$R_{\text{экв}} = \sum_{i=1}^{n} R_i. \qquad (1.29)$$

Цепь с параллельным соединением приемников (рис. 1.12, *б*).

Все сопротивления присоединены к двум клеммам (узлам) и находятся под одним напряжением. По первому закону Кирхгофа

$$I = I_1 + I_2 + I_3.$$

Применяя для каждой ветви закон Ома, запишем:

$$I = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} = U\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}\right) = Ug_{\text{экв}},$$

где $g_{\text{экв}}$ – эквивалентная проводимость цепи, См.

Если соединены параллельно n приемников, то их эквивалентная

проводимость равна сумме проводимостей ветвей

$$g_{\text{экв}} = \sum_{i=1}^{n} g_i . \qquad (1.30)$$

Частные случаи:

1) разветвление, состоящее из двух приемников.

$$g_{\text{экв}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} .$$

Отсюда

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

Если $R_1 = R_2$, то

$$R_{\text{экв}} = \frac{R}{2} .$$

2) разветвление из n одинаковых приемников ($R_1 = R_2 = \ldots = R$).

$$g_{\text{экв}} = \frac{1}{R_{\text{экв}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots + \frac{1}{R_n} = \frac{n}{R} .$$

Отсюда

$$R_{\text{экв}} = \frac{R}{n} .$$

Параллельное соединение – основная схема в электротехнике. По этой схеме нормально работают приемники любой мощности, рассчитанные на одно и то же напряжение. Включение либо отключение одного приемника не отражается на работе остальных приемников.

Смешанное соединение (рис. 1.12, *в*). Часть приемников соединена последовательно, часть – параллельно. Эквивалентное сопротивление такой цепи равно сумме сопротивлений последовательно включенных участков:

$$R_{\text{экв}} = R_{\text{аб}} + R_{\text{бв}} = R_3 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} .$$

Напряжения и токи отдельных ветвей определяются по формулам

для последовательного и параллельного соединения.

Лекция 2. МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

2.1. Магниты и их свойства

Магнетизм – это особое проявление движения электрических зарядов внутри атомов и молекул, которое проявляется в том, что некоторые тела способны притягивать к себе и удерживать частицы железа, никеля и других металлов. Эти тела называются магнитными.

Стрелка компаса, являющаяся магнитом, устанавливается в магнитном поле Земли так, что один конец ее указывает направление на север и называется северным полюсом (*N*), а противоположный конец – южным полюсом (*S*).

В зависимости от назначения магнитам придают различную форму: прямоугольную, ромбическую, круглую и т. д. Магнит любой формы имеет два полюса – северный и южный.

Если намагниченный стержень погрузить в железные опилки и затем вынуть, то наибольшее количество опилок окажется притянутым к концам магнита, а в средней части, называемой нейтральной линией, опилок не будет.

Если намагниченный стержень разделить на две части, то образуются два магнита с двумя разноименными полюсами на концах. При дальнейшем дроблении на части намагниченного стержня будут получаться отдельные магниты с северным и южным полюсами на концах. Таким образом, получить магнит с каким-либо одним полюсом (*N* или *S*) невозможно.

Если недалеко от северного *N* (или южного *S*) полюса какого-либо магнита поместить стальной брусок, он приобретает свойство притягивать железные предметы, причем ближайший к полюсу *N* магнита конец бруска будет южным полюсом *S*, а противоположный – северным *N*.

При расположении двух магнитов на некотором расстоянии один от другого между их полюсами возникает сила взаимодействия, направленная так, что одноименные полюсы взаимно отталкиваются, а разноименные притягиваются.

Вокруг всякого намагниченного тела возникает магнитное поле, являющееся материальной средой, в которой обнаруживается действие магнитных сил.

На рисунках магнитное поле изображается в виде магнитных линий, направленных от северного полюса к южному (рис. 2.1).

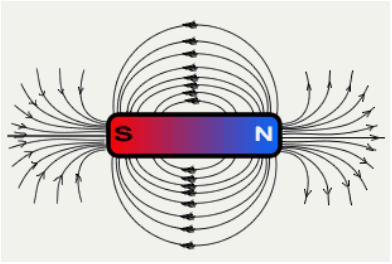


Рис. 2.1. Магнитное поле

Любая магнитная линия не имеет ни конца, ни начала и представляет собой замкнутую кривую, так как северный и южный полюсы магнита неотделимы один от другого. При внесении в магнитное поле какого-либо тела оно пронизывается магнитными линиями, которые определенным образом воздействуют на поле. При этом различные материалы по-разному воздействуют на магнитное поле.

В намагниченных телах магнитное поле создается при движении электронов, вращающихся вокруг ядра атома и вокруг собственной оси. Орбиты и оси вращения электронов в атомах могут находиться в различных положениях один относительно другого, так что в различных положениях находятся магнитные поля, возбуждаемые движущимися электронами.

В зависимости от взаимного расположения магнитных полей они могут складываться или вычитаться. В первом случае атом будет обладать магнитным полем или магнитным моментом, а во втором – не будет.

Материалы, атомы которых не имеют магнитного момента и намагнитить которые невозможно, называются **диамагнитными.** К ним относятся абсолютное большинство веществ, встречающихся в природе, и некоторые металлы (медь, свинец, цинк, серебро и другие).

Материалы, атомы которых обладают некоторым магнитным моментом и могут намагничиваться, называются **парамагнитными**. К ним относятся алюминий, олово, марганец и др. Исключение составляют ферромагнитные материалы, атомы которых обладают большим магнитным моментом и которые легко поддаются намагничиванию. К таким материалам относятся железо, сталь, чугун, никель, кобальт, га-

долиний и их сплавы.

2.2. Магнитное поле электрического тока

Вокруг проводника с током образуется магнитное поле, так что свободно вращающаяся магнитная стрелка, помещенная вблизи проводника, будет стремиться занять положение, перпендикулярное плоскости, проходящей вдоль него. В этом легко убедиться, проделав следующий опыт.

В отверстие горизонтально положенного листа картона вставляют прямолинейный проводник и пропускают через него ток (рис. 2.2). Насыпают на картон железные опилки и убеждаются в том, что они располагаются концентрическими окружностями, имеющими общий центр в точке пересечения проводником картонного листа.

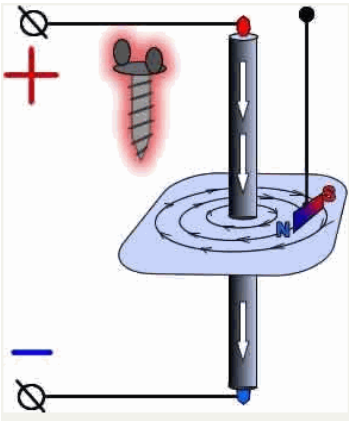


Рис. 2.2. Магнитное поле прямого проводника с током

Магнитная стрелка, подвешенная на нити вблизи этого проводника, займет положение, указанное на рисунке. При изменении направления тока в проводнике магнитная стрелка повернется на угол 180°, оставаясь в положении, перпендикулярном плоскости, проходящей вдоль проводника.

В зависимости от направления тока в проводнике направление магнитных линий образуемого им магнитного поля определяется правилом буравчика, которое формулируется следующим образом:

Если поступательное движение буравчика совпадает с направлением тока в проводнике, то вращательное движение его рукоятки указывает направление магнитных линий поля, образующегося вокруг этого проводника.

Если по проволоке, согнутой в виде кольца, пропустить ток, то под действием его также возникнет магнитное поле. Проволока, согнутая спирально и состоящая из нескольких витков, расположенных так, что оси их совпадают, называется соленоидом (рис. 2.3).

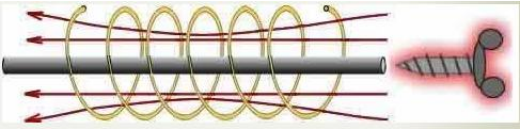


Рис. 2.3. Магнитное поле соленоида

При прохождении тока через обмотку соленоида или один виток проволоки возбуждается магнитное поле. Направление этого поля также определяется правилом буравчика. Если расположить ось буравчика перпендикулярно плоскости кольцевого проводника или вдоль оси соленоида и вращать его рукоятку по направлению тока, то поступательное движение этого буравчика укажет направление магнитных линий поля кольца или соленоида.

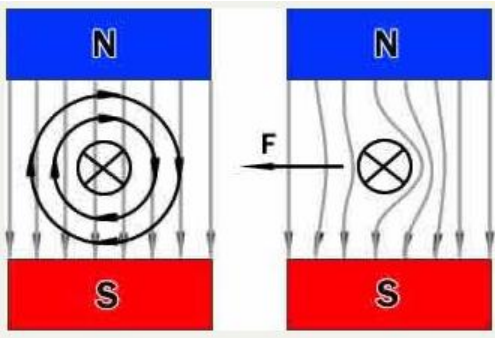
Магнитное поле, возбужденное током обмотки соленоида, подобно магнитному полю постоянного магнита, т. е. конец соленоида, из которого выходят магнитные линии, является его северным полюсом, а противоположный конец – южным.

Направление магнитного поля зависит от направления тока и при изменении направления тока в прямолинейном проводнике или в катушке изменится также направление магнитных линий поля, возбуждаемого этим током.

В однородном магнитном поле во всех точках поле имеет одинаковое направление и одинаковую интенсивность. В противном случае поле называется неоднородным. Графически однородное магнитное поле изображают параллельными линиями с одинаковой плотностью, например, в воздушном зазоре между двумя разноименными параллельно расположенными полюсами магнита.

2.3. Проводник с током в магнитном поле. Магнитная индукция

Если проводник, по которому проходит электрический ток, внести в магнитное поле, то в результате взаимодействия магнитного поля и проводника с током проводник будет перемещаться в ту или иную сторону. Направление перемещения проводника зависит от направления тока в нем и от направления магнитных линий поля (рис. 2.4).



а *б*

Рис. 2.4. Движение проводника с током в магнитном поле:
а – магнитное поле полюсов и тока проводника; *б* – результирующее магнитное поле

Допустим, что в магнитном поле магнита *NS* находится проводник, расположенный перпендикулярно плоскости рисунка; по проводнику протекает ток в направлении от нас за плоскость рисунка. Ток, идущий от плоскости рисунка к наблюдателю, обозначается условно точкой, а ток, направляющийся за плоскость рисунка от наблюдателя,– крестом.

Под действием тока вокруг проводника образуется свое магнитное поле. Применяя правило буравчика, легко убедиться, что в рассматриваемом нами случае направление магнитных линий этого поля совпадает с направлением движения часовой стрелки.

При взаимодействии магнитного поля магнита и поля, созданного током, образуется результирующее магнитное поле, изображенное на рис. 2.4, *б*. Густота магнитных линий результирующего поля с обеих сторон проводника различна. Справа от проводника магнитные поля, имея одинаковое направление, складываются, а слева, будучи направленными встречно, частично взаимно уничтожаются.

Следовательно, на проводник будет действовать сила, большая справа и меньшая слева. Под действием большей силы проводник будет перемещаться по направлению силы *F*. Перемена направления тока

в проводнике изменит направление магнитных линий вокруг него, вследствие чего изменится и направление перемещения проводника.

Для определения направления движения проводника в магнитном поле можно пользоваться правилом левой руки, которое формулируется следующим образом (рис. 2.5):

Рис. 2.5. Правило левой руки

Если расположить левую руку так, чтобы магнитные линии пронизывали ладонь, а вытянутые четыре пальца указывали направление тока в проводнике, то отогнутый большой палец укажет направление движения проводника.

Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле, зависит как от тока в проводнике, так и от интенсивности магнитного поля. Основной величиной, характеризующей интенсивность магнитного поля, является магнитная индукция *B*. Единицей измерения магнитной индукции является тесла (Тл = Вс/м^2).

О магнитной индукции можно судить по силе действия магнитного поля на проводник с током, помещенный в это поле. Если на проводник длиной 1 м и с током 1 А, расположенный перпендикулярно магнитным линиям в равномерном магнитном поле, действует сила в 1 Н (ньютон), то магнитная индукция такого поля равна 1 Тл (тесла).

Магнитная индукция является векторной величиной, ее направление совпадает с направлением магнитных линий, причем в каждой точке поля вектор магнитной индукции направлен по касательной к магнитной линии.

Сила *F*, действующая на проводник с током в магнитном поле, пропорциональна магнитной индукции *B*, току в проводнике *I* и длине

проводника l, т. е.

$$F = BIl. \quad (2.1)$$

Эта формула верна лишь в том случае, когда проводник с током расположен перпендикулярно магнитным линиям равномерного магнитного поля. Если проводник с током находится в магнитном поле под каким-либо углом α по отношению к магнитным линиям, то сила равна:

$$F = BIl \sin \alpha. \quad (2.2)$$

Если проводник расположить вдоль магнитных линий, то сила F станет равной нулю, так как $\alpha = 0$.

2.4. Электромагниты

Свойство электрического тока создавать магнитное поле широко используется на практике.

Железный или стальной стержень, помещенный внутрь соленоида, при пропускании тока по соленоиду приобретает магнитные свойства. Стержень магнитотвердой стали вследствие большой величины коэрцитивной силы, свойственной этому материалу, в значительной мере сохраняет магнитные свойства после исчезновения тока.

Полярность электромагнита можно определить по правилу буравчика, или так: *северный полюс электромагнита находится с той его стороны, где ток для наблюдателя, смотрящего на конец электромагнита, идет против часовой стрелки, а южный – где направление тока совпадает с направлением движения часовой стрелки.*

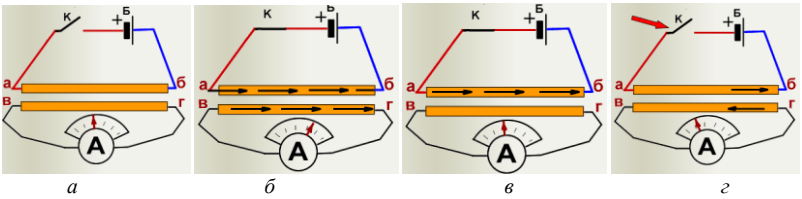
В устройствах электроники и связи часто применяют поляризованные электромагниты, у которых либо сердечник, либо якорь, либо оба вместе представляют собой магниты.

Неполяризованный электромагнит притягивает свой якорь независимо от направления посылаемого в его обмотку тока. Работа же поляризованного электромагнита зависит от направления тока в его обмотке. Так, например, в прямом поляризованном электромагните ток одного направления усиливает магнитное поле его сердечника, а другого – ослабляет.

Электромагниты нашли широкое применение в подъемных и тормозных устройствах, для закрепления в станках стальных обрабатываемых деталей, в электроавтоматах, реле и других устройствах.

2.5. Электромагнитная индукция

Представим себе два параллельных проводника *аб* и *вг* , расположенных на близком расстоянии один от другого (рис. 2.6, *а*). Проводник *аб* подключен к зажимам батареи *Б*; цепь включается ключом *К*, при замыкании которого по проводнику проходит ток в направлении от *а* к *б*. К концам же проводника *вг* присоединен чувствительный амперметр *А*, по отклонению стрелки которого судят о наличии тока в этом проводнике.



а *б* *в* *г*

Рис. 2.6. Электромагнитная индукция в параллельном проводнике

Если в собранной таким образом схеме замкнуть ключ *К*, то в момент замыкания цепи стрелка амперметра отклонится (рис. 2.6, *б*), свидетельствуя о наличии тока в проводнике *вг*; по прошествии же небольшого промежутка времени (долей секунды) стрелка амперметра придет в исходное (нулевое) положение (рис. 2.6, *в*).

Размыкание ключа *К* опять вызовет кратковременное отклонение стрелки амперметра, но уже в другую сторону, что будет указывать на возникновение тока противоположного направления (рис. 2.6, *г*).

Подобное отклонение стрелки амперметра *А* можно наблюдать и в том случае, если, замкнув ключ *К*, приближать проводник *аб* к проводнику *вг* или удалять от него.

Приближение проводника *аб* к *вг* вызовет отклонение стрелки амперметра в ту же сторону, что и при замыкании ключа *К*, удаление проводника *аб* от проводника *вг* повлечет за собой отклонение стрелки амперметра, аналогичное отклонению при размыкании ключа *К*.

При неподвижных проводниках и замкнутом ключе *К* ток в проводнике *вг* можно вызвать изменением величины тока в проводнике *аб*.

Аналогичные явления происходят и в том случае, если проводник, питаемый током, заменить магнитом или электромагнитом.

Если внутрь обмотки быстро ввести постоянный магнит (или элек-

тромагнит), то в момент его введения стрелка амперметра *А* отклонится; при выведении магнита будет также наблюдаться отклонение стрелки амперметра, но в другую сторону. Электрические токи, возникающие при подобных обстоятельствах, называются **индукционными**, а причина, вызывающая появление индукционных токов, **электродвижущей силой индукции**.

Эта ЭДС возникает в проводниках под действием изменяющихся магнитных полей, в которых находятся эти проводники. Направление ЭДС индукции в проводнике, перемещающемся в магнитном поле, может быть определено по правилу правой руки.

Лекция 3. ОДНОФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

3.1. Понятие о переменном токе

Электрическая энергия производится, распределяется и потребляется главным образом в виде энергии переменного тока. Это объясняется тем, что переменный ток высокого напряжения легко трансформировать (преобразовывать) в переменный ток низкого напряжения и обратно.

Переменный ток – ток определенной формы, периодически изменяющийся во времени. Из всех возможных форм периодических токов наибольшее распространение получили **синусоидальные токи**.

Если кривая изменения периодического тока описывается синусоидой или косинусоидой (рис. 3.1), то такой ток называют синусоидальным током. Синусоидальные токи позволяют наиболее экономично осуществлять производство, передачу и распределение электрической энергии. При этом форма кривых напряжений и токов всех участков цепи остается синусоидальной.

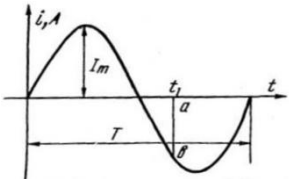


Рис. 3.1. График изменения синусоидального тока во времени

К основным понятиям синусоидальной функции относятся:

Период *T* – интервал времени, в течение которого функция проходит полный цикл своего изменения (измеряется в секундах, рис. 3.1).

Частота *f* – величина, обратная периоду. Численно равна числу периодов в одну секунду. Единица измерения – герц (Гц).

Мгновенные значения – значения изменяющихся во времени тока, напряжения, ЭДС, мощности в любой момент времени. Так, для момента времени t_1 (рис. 3.1) мгновенное значение тока равно отрезку *ab*. Очевидно, что на протяжении одного периода можно взять бесчисленное множество мгновенных значений. Мгновенные значения будем обозначать строчными буквами: *i*, *u*, *e*, *p*.

Основная особенность мгновенного значения в том, что на протяжении бесконечно малого промежутка времени Δt его можно считать величиной постоянной. Тогда к мгновенным значениям можно применять основные соотношения между электрическими величинами, установленными для цепей постоянного тока:

$$u = Ri;$$
$$\Sigma i = 0;$$
$$\Sigma e = \Sigma u;$$
$$p = ui = Ri^2.$$

Амплитудное значение (**амплитуда**) – наибольшее (максимальное) мгновенное значение синусоидального тока (рис. 3.1), напряжения, ЭДС, мощности. Обозначается оно прописной буквой с индексом *m* (max): I_m, U_m, E_m, P_m.

3.2. Область применения синусоидальных токов различных частот

Производство и передача электрической энергии осуществляются с помощью трехфазного синусоидального тока с частотой 50 Гц (длительность периода 0,02 с).

Различные области техники используют диапазон частот в зависимости от технических потребностей. В авиации, например, успешно применяется синусоидальный ток с частотой 400 Гц, так как при такой частоте снижаются вес и габариты авиационного электрооборудования. В электротермических установках используют диапазон частот от 500 Гц до 50 МГц. Для нужд электрифицированного транспорта при-

меняют пониженную частоту 25 и 16,67 Гц.

Частоты можно разделить на 3 группы (рис. 3.2).

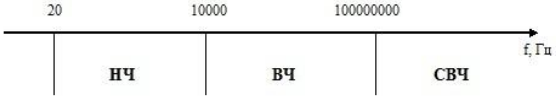


Рис. 3.2. Диапазоны частот

Обычно частоты от 20 Гц до 10 кГц называют низкими (НЧ). Частоты от 10 кГц до 100 МГц называют высокими (ВЧ). Частоты от 100 МГц и выше называют сверхвысокими (СВЧ).

С увеличением частоты возрастает сопротивление проводника из-за явления, называемого **поверхностным эффектом.**

Если по проводу протекает постоянный ток, то плотность тока (А/см^2) по всей площади будет одинакова. Если пустить переменный ток, то из-за переменного магнитного потока возникают ЭДС, препятствующие основному напряжению. В результате этого ток в сечении провода распределяется не с одинаковой плотностью, а с увеличивающейся плотностью от оси к поверхности провода. Таким образом явление поверхностного эффекта как бы уменьшает полезное сечение провода и, следовательно, увеличивает сопротивление *R*.

При частоте тока 50 Гц и небольшом поперечном сечении проводника поверхностный эффект незначительно увеличивает сопротивление, поэтому сопротивление проводника в цепи переменного и постоянного токов примерно одинаково.

Радиотехника использует весь диапазон НЧ, ВЧ и СВЧ.

3.3. Получение синусоидальных ЭДС и тока

В равномерное магнитное поле поместим рамку, состоящую из одного витка (рис. 3.3).

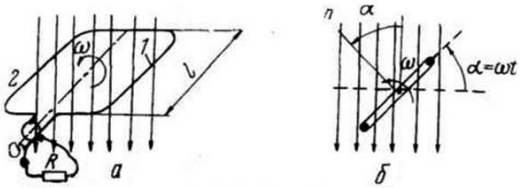


Рис. 3.3. Виток в однородном магнитном поле

Рамка вращается с постоянной угловой скоростью ω = const. В соответствии с законом электромагнитной индукции в ней будет наводиться ЭДС, определяемая по формуле:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}. \tag{3.1}$$

Магнитный поток Ф, пронизывающий рамку, зависит от положения рамки в магнитном поле, т. е. от угла α:

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos\alpha = \Phi_m \cdot \cos\alpha, \tag{3.2}$$

где S – площадь рамки;

α – угол между направлением поля и нормалью к площади рамки;

$\Phi_m = B \cdot S$ – амплитудное (максимальное) значение магнитного потока.

Угол α при вращении рамки изменяется: $\alpha = \omega \cdot t$. Значит, изменяется во времени и магнитный поток Ф, пронизывающий рамку:

$$\Phi = \Phi_m \cdot \cos\omega t. \tag{3.3}$$

ЭДС в рамке:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(\Phi_m \cos\omega t) = \omega\Phi_m \sin\omega t. \tag{3.4}$$

Обозначив амплитуду $\omega\Phi_m = E_m$, запишем:

$$e = E_m \sin\omega t. \tag{3.5}$$

ЭДС витка, вращающегося в магнитном поле, изменяется во времени по синусоидальному закону. Если замкнуть цепь витка на внешнее сопротивление R, то в цепи возникнет синусоидальный ток, величина которого определится по формуле

$$i = I_m \sin\omega t. \tag{3.6}$$

3.4. Изображение синусоидальной величины вектором

Синусоидальную функцию времени можно выразить:

а) графиком (рис. 3.1);

б) уравнением $i = I_m \cdot \sin\omega t$;

в) вращающимся вектором, называемым радиус-вектором.

Последняя форма выражения синусоидальной функции наиболее наглядна и проста. Допустим, что вектор OA соответствует в принятом масштабе максимальному значению E_m синусоидальной функции $e = E_m \cdot \sin \omega t$ (рис. 3.4).

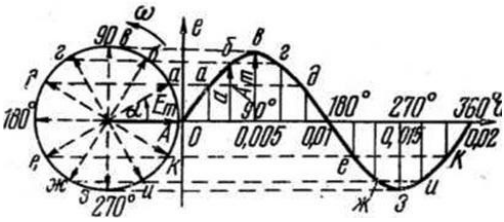


Рис. 3.4. Получение синусоиды с помощью радиус-вектора

Он закреплен в точке O и вращается **против** часовой стрелки с угловой скоростью ω; угол $\alpha = \omega t$ непрерывно изменяется. Проекция вращающегося вектора OA на вертикальную ось в любой момент времени равна произведению длины вектора на $\sin \alpha$**,** т. е. она изменяется по закону синуса:

$$a = OA \sin \alpha = OA \sin \omega t = E_m \sin \omega t. \qquad (3.7)$$

На горизонтальной оси отложим отрезки времени t или соответствующие этому времени фазные углы, которые проходит вектор при вращении. Откладывая вертикальные отрезки – проекции вращающегося вектора и соединяя их концы плавной кривой, получим синусоиду $-e(t) = E_m \sin \omega t$**.**

Итак, любую синусоидальную функцию времени – напряжение $u(t)$**,** ток $i(t)$, ЭДС $e(t)$ – можно представить вектором. Длина его равна амплитуде синусоиды. Надо помнить, что это вращающийся радиус-вектор. Он не имеет фиксированного направления и этим отличается от векторов механических величин – скорости, силы и др.

3.5. Фазовый угол и угловая частота тока

Угол $\alpha = \omega t$, определяющий мгновенное значение синусоидальной функции (ЭДС, тока, напряжения), получил название **фазового угла.** Фазовый угол синусоиды за время одного периода T может принимать

любые значения от 0 до 2π рад.

Ток – величина, переменная во времени: $i = f(t)$. Но поскольку синусоидальная функция – это функция угла α, мы должны время выразить через угол α и говорить не об изменении времени, а об изменении угла

$$\alpha = \omega t, \tag{3.8}$$

где ω – **скорость изменения фазового угла**.

Итак, изменение тока во времени определяется скоростью изменения угла при вращении вектора или скоростью вращения рамки (см. рис. 3.3) в магнитном поле. Эту скорость можно определить, измерив время, за которое рамка повернулась на угол α:

$$\omega = \frac{\alpha}{t}, \tag{3.9}$$

т. е. так же, как определяем, к примеру, скорость движущегося тела:

$$v = \frac{S}{t}, \tag{3.10}$$

где S – расстояние, которое прошло тело за время t.

За время T, равное одному периоду изменения тока, рамка повернулась на угол α = 360°, т. е. 2π рад:

$$\omega = \frac{\alpha}{t} = \frac{2\pi}{t}.$$

Здесь $1/T$ (частота) и тогда

$$\omega = 2\pi f. \tag{3.11}$$

Величина $\omega = 2\pi f$ получила название **угловой частоты тока**. Для промышленной частоты тока $f = 50$ Гц угловая частота тока

$$\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 = 314 \text{ рад/с}.$$

3.6. Начальный фазовый угол и фазовые соотношения

Уравнение $i = I_m \cdot \sin \omega t$ справедливо в частном случае, когда начало отсчета t_o совпадает с нулевым значением функции. Но в общем случае на оси времени можно выбрать любой момент отсчета

(рис. 3.5). Из графика видно, что в этот момент времени мгновенное значение тока

$$i = I_m \sin \varphi t, \tag{3.12}$$

где φ – угол, соответствующий положению вектора в момент времени, принятый за начало отсчета.

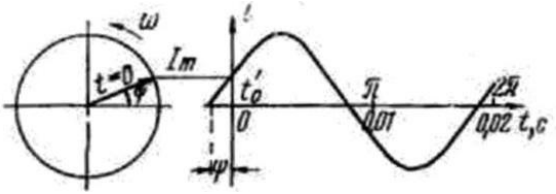


Рис. 3.5. Синусоида с учетом начального фазового угла

В общем виде, для любого момента времени, синусоидальная величина выражается уравнением:

$$i = I_m \sin (\omega t + \varphi). \tag{3.13}$$

Угол φ, определяющий значение ЭДС или тока в начальный момент времени ($t = 0$), получил название **начального фазового угла.**

Две рамки одинакового размера, укрепленные на оси (рис. 3.6, *а*), вращаются в магнитном поле с одинаковой угловой скоростью ω. В рамках индуктируются ЭДС:

$$e = E_m \sin (\omega t + \alpha_1);$$
$$e = E_m \sin (\omega t + \alpha_2).$$

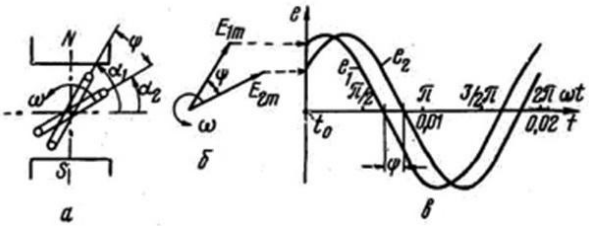


Рис. 3.6. Сдвиг по фазе

Угол $\varphi = \alpha_1 - \alpha_2$ получил название **сдвига по фазе**, или угла сдвига

фаз. Говорят, что ЭДС e_2 отстает по фазе от ЭДС e_1 на угол φ, или ЭДС e_1 опережает ЭДС e_2 на угол φ (рис. 3.6, *б*). Опережение или отставание функции удобнее всего проследить на векторной диаграмме (рис. 3.6, *в*). Здесь вектор E_{1m} при своем вращении приходит раньше на вертикальную ось, чем отстающий вектор E_{2m}.

Если две синусоидальные функции проходят через нулевые и максимальные значения одновременно, то говорят, что они **совпадают по фазе** (φ = 0). Векторы, их выражающие, совпадают по направлению. На рис. 3.7 представлены векторы и ЭДС двух рамок различного размера, которые не имеют угла сдвига между собой.

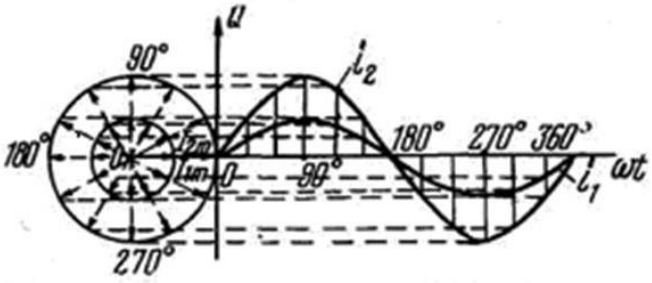


Рис. 3.7. Совпадение по фазе

3.7. Классификация электрических цепей переменного тока

Электрической цепью называется совокупность устройств и объектов, образующих путь для электрического тока, электромагнитные процессы в которых могут быть описаны с помощью понятий об ЭДС, токе, напряжении. Электрические цепи переменного тока по количеству фаз разделяются на однофазные и многофазные.

Из многообразных электрических цепей широкое практическое применение имеют трехфазные электрические цепи. По типу элементов, включенных в цепь, электрические цепи разделяются на линейные и нелинейные. Электрическая цепь, электрическое сопротивление, индуктивность и электрическая емкость участков которой не зависят от значений и направлений токов и напряжений в цепи, называется **линейной**. Сопротивление линейных элементов **не зависит** также от температуры.

Вольтамперная характеристика линейного элемента изображается

прямой линией. Строго говоря, **реальные** электрические и радиотехнические цепи **не подчиняются линейному закону**. С изменением тока в индуктивной катушке с железным сердечником индуктивность L не остается постоянной, не остается постоянной и емкость C конденсатора с различными диэлектриками при изменении напряжения. Сопротивления всех приемников в той или иной мере зависят от температуры. Металлические проводники при нагревании увеличивают сопротивления, электролиты – уменьшают, сопротивление полупроводников и диэлектриков также изменяется при нагревании. Но учитывая, что в электрических цепях ряд приемников нагревается незначительно, изменением сопротивления этих приемников можно пренебречь и электрическую цепь считать линейной. В линейных цепях индуктивность L и емкость C цепи не зависят от значения и направления тока и напряжения.

Электрическая цепь, электрическое сопротивление, индуктивность или емкость хотя бы одного из участков которой зависят от значений или от направлений токов и напряжений в этом участке цепи, называется **нелинейной электрической цепью.**

Нелинейные электрические цепи имеют нелинейные элементы. Вольтамперная характеристика нелинейного элемента изображается кривой линией. Примером нелинейных элементов являются вентили, электронные лампы, термосопротивления, лампы накаливания.

В дальнейшем будем изучать линейные электрические цепи. Электрические цепи бывают с последовательным соединением приемников (неразветвленные электрические цепи), с параллельным соединением приемников (разветвленные электрические цепи) и со смешанным соединением приемников.

3.8. Цепь переменного тока с активным сопротивлением

Величина электрического тока зависит от ЭДС источника переменного тока, а также от величины и характера сопротивления цепи. Предположим, что в электрическую цепь включены источник переменного тока и резистор (рис. 3.8, *а*).

Резистор является линейным элементом цепи и обладает активным сопротивлением. Активное сопротивление имеют также реостаты и электронагревательные приборы (лампы накаливания, электропечи, электроплиты и др.). На активном сопротивлении электрическая энергия превращается в другие виды энергии. Кроме того, в силу поверх-

ностного эффекта оно обладает большим сопротивлением переменному току, чем постоянному. Поэтому в цепи постоянного тока в отличие от сопротивления переменному току его называют омическим сопротивлением.

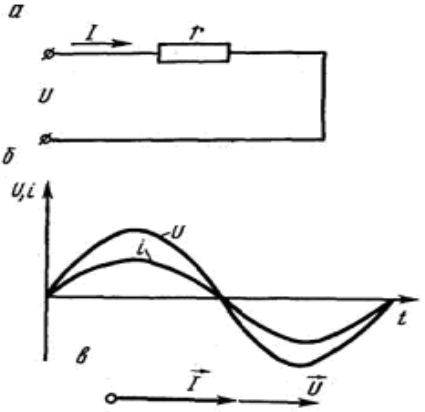


Рис. 3.8. Цепь переменного тока с активным сопротивлением:
а – схема; *б* – графики; *в* – векторная диаграмма тока и напряжения

Пусть напряжение в цепи меняется по синусоидальному закону:

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

Величина мгновенного тока в цепи определяется по закону Ома:

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

где

$$I_m = \frac{U_m}{R} \text{ или } I = \frac{U}{R}.$$

Следовательно, закон Ома для действующих значений примет такой же вид, как и для постоянного тока. Таким образом, ток в цепи с активным сопротивлением также изменяется по синусоидальному закону и совпадает по фазе с напряжением. Графически это можно представить в виде двух синусоид (рис. 3.8, *б*) или векторной диаграммы с помощью двух совпадающих по направлению векторов (рис. 3.8, *в*).

Совокупность векторов, изображающих действующие или амплитудные значения синусоидальных электрических величин одинаковой частоты, называется **векторной диаграммой**. При построении векторных диаграмм один из векторов обычно совмещают с осью *x*, а другие размещают по одну или другую сторону ее согласно сдвигу фаз.

Чаще всего при построении векторных диаграмм пользуются действующими значениями электрических величин, с которыми больше приходится иметь дело при расчете электрических цепей. Мгновенные значения не определяют значения тока за некоторый промежуток времени. Поэтому для суждения о величине переменного тока его приравнивают к величине такого эквивалентного постоянного тока, который, протекая по такому же сопротивлению, что и переменный ток, производит одинаковое с ним тепловое действие, т. е. за один и тот же промежуток времени выделяет одинаковое количество тепла. Такая величина переменного тока называется **действующей.**

Очевидно, что действующее значение тока меньше амплитудного:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,707 I_m. \qquad (3.14)$$

Подобное соотношение справедливо и для определения действующих значений других синусоидальных величин (ЭДС, напряжения и др.).

Электроизмерительные приборы дают показания действующих значений. Таким образом, если, например, вольтметр показывает напряжение 110 В, то максимальное значение этого напряжения равно U_m = 110 / 0,707 = 155,54 В.

3.9. Цепь переменного тока с активным и индуктивным сопротивлением

Трансформаторы, электродвигатели, дроссели кроме активного сопротивления обладают также и индуктивным сопротивлением.

Активное сопротивление любой катушки определяется лишь сопротивлением обмоточного материала, поэтому его значение незначительно. В связи с этим при подключении катушки в сеть постоянного напряжения ток в цепи достиг бы очень большой величины. При переменном напряжении ток в катушке будет иметь меньшую величину. Это объясняется появлением ЭДС самоиндукции.

ЭДС самоиндукции противодействует подведенному напряжению. Это ведет к уменьшению тока в цепи, следовательно, ЭДС самоиндук-

ции обусловливает дополнительное сопротивление. В этом можно убедиться на опыте, если собрать электрическую цепь из последовательно соединенных лампового реостата и катушки трансформатора с железным сердечником и включить в розетку сети переменного тока. При замыкании сердечника лампы гаснут, и наоборот, при размыкании сердечника накал ламп увеличивается. Это объясняется тем, что при замыкании сердечника увеличивается индуктивность катушки, а значит, увеличивается и ее индуктивное сопротивление.

Соберем цепь из последовательно соединенных резистора и катушки индуктивности (рис. 3.9, *а*). При прохождении по катушке переменного тока в ней возбуждается ЭДС самоиндукции:

$$e_L = -L\frac{di}{dt}, \tag{3.15}$$

где L – индуктивность катушки, Гн;

di/dt – производная тока по времени, характеризующая скорость изменения тока.

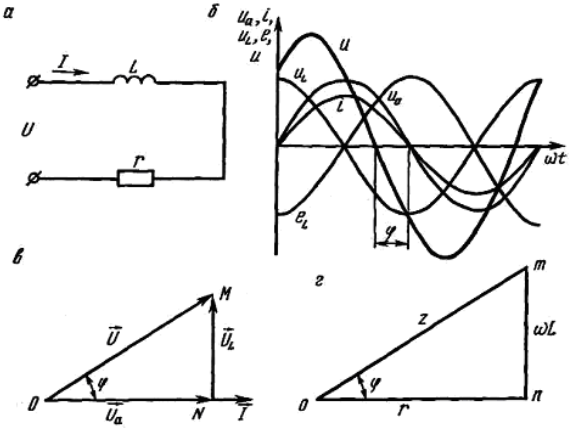


Рис. 3.9. Цепь переменного тока с активным и индуктивным сопротивлением:
а – схема; *б* – графики; *в* – векторная диаграмма тока и напряжения;
г – треугольник сопротивлений

Следовательно, на величину тока в цепи влияет не только мгновенное подведенное напряжение, но и ЭДС самоиндукции.

Мгновенное значение тока определится по закону Ома:

$$i = \frac{u + e_L}{R} = \frac{u - L\dfrac{di}{dt}}{R}. \qquad (3.16)$$

Отсюда

$$u = iR + L\frac{di}{dt}. \qquad (3.17)$$

Пусть ток в цепи изменяется по синусоидальному закону:

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

Тогда

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

Выразим функцию косинуса через синус:

$$u = I_m R \sin \omega t + I_m L\omega \sin (\omega t + 90^\circ).$$

Таким образом, мгновенное значение напряжения состоит из двух слагаемых. Первое представляет собой падение напряжения на активном сопротивлении цепи и называется активной составляющей напряжения:

$$U_R = IR \sin \omega t$$

и второе – падение напряжения на индуктивном сопротивлении и называется индуктивной составляющей напряжения:

$$U_L = IX_L \sin \omega t,$$

где X_L – индуктивное сопротивление, Ом.

$$X_L = \omega L = 2\pi f L. \qquad (3.18)$$

Так как природа индуктивного сопротивления отличается от активного, его принято считать **реактивным сопротивлением.**

Активная составляющая напряжения совпадает по фазе с током, а индуктивная – опережает его на 90º (рис. 3.9, *в*). Отставание тока по фазе на 90º от напряжения на индуктивном сопротивлении объясняется тем, что в индуктивном сопротивлении возникает ЭДС самоиндукции e_L, величина которой пропорциональна скорости изменения тока. Следовательно, в момент прохождения тока через нуль *di/dt* принимает

максимальное значение, а когда ток принимает максимальное значение, ЭДС самоиндукции равна нулю. Таким образом, ток опережает ЭДС самоиндукции по фазе на 90º. А так как, по правилу Ленца, ЭДС самоиндукции имеет противоположное направление напряжению U_L, то по отношению к нему ток отстает по фазе на 90º (рис. 3.9, *б*).

3.10. Цепь переменного тока с емкостным сопротивлением

Емкостное сопротивление в цепи создает элемент под названием конденсатор.

Составив электрическую цепь из конденсатора и амперметра и подключив ее к источнику постоянного тока, убеждаемся в отсутствии тока в цепи. Следовательно, для постоянного тока при установившемся режиме конденсатор создает разрыв цепи. Подключив данную цепь к источнику переменного тока (рис. 3.10, *а*), замечаем отклонение стрелки амперметра, т. е. наличие в цепи переменного тока.

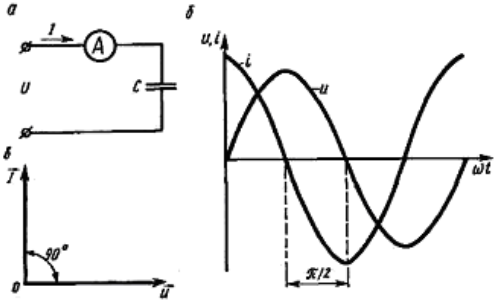


Рис. 3.10. Цепь переменного тока с емкостным сопротивлением:
а – схема; *б* – графики; *в* – векторная диаграмма тока и напряжения

Конденсатором называется система двух проводников, разделенных диэлектриком. Проводники называются **обкладками конденсатора.**

При прохождении постоянного тока через конденсатор происходит его заряд (рис. 3.11, *а*) до напряжения между обкладками U, равного ЭДС источника E. Если заряженный конденсатор замкнуть на какое-либо сопротивление R (рис. 3.11, *б*), то под действием напряжения на конденсаторе будет протекать ток разряда.

Если рассматривать процессы, происходящие в цепи, содержащей конденсатор и источник переменного тока, то нетрудно заметить, что

эти процессы сводятся к периодическому заряду и разряду конденсатора. Поэтому создается впечатление, что переменный ток проходит через конденсатор.

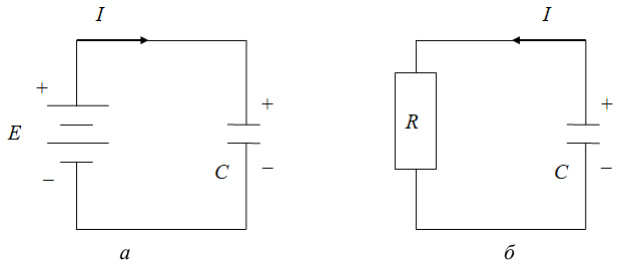


Рис. 3.11. Заряд (*а*) и разряд (*б*) конденсатора

Ток в конденсаторе в отличие от тока проводимости, т. е. направленного движения свободных зарядов в подводящих проводах, называется **током смещения**. Это теоретическая величина, введенная Максвеллом, характеризует изменяющееся со временем электрическое поле. Током она называется из-за одинаковых единиц измерения с плотностью тока. В действительности «ток смещения» – это условный термин: из всех физических свойств, присущих действительному току, он способен только создавать магнитное поле.

Величина этого тока будет определяться скоростью изменения величины заряда на обкладках конденсатора, т. е.

$$i = \frac{dq}{dt}. \qquad (3.19)$$

Но так как количество зарядов в конденсаторе зависит от его емкости C, Ф (фарада)

$$q = Cu,$$

то получим

$$i = C\frac{du}{dt}. \qquad (3.20)$$

Пусть напряжение в цепи меняется по синусоидальному закону:

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

Определим значение мгновенного тока:

$$i = C\frac{du}{dt} = U_m C\omega \cos \omega t = U_m C\omega \sin\left(\omega t + 90°\right)\cdot$$

Таким образом, в цепи переменного тока при емкостной нагрузке ток опережает напряжение по фазе на 90°. Графики тока и напряжения и векторная диаграмма приведены на рис. 3.10, *б*, *в*.

Сдвиг фаз между током и напряжением при емкостной нагрузке можно наблюдать на опыте, если в цепь переменного тока, состоящую из реостата и батареи конденсаторов, подключить осциллограф с коммутатором. На экране наблюдаются две синусоиды. Синусоида тока будет смещена влево относительно синусоиды напряжения на 90°. Это объясняется тем, что в момент максимума напряжения на обкладках конденсатора скорость изменения поляризации диэлектрика минимальна (образование диполей и их ориентация к этому моменту завершаются). Наибольшая скорость поляризации диэлектрика, а следовательно, и величина тока смещения достигаются в момент, когда напряжение на обкладках конденсатора меняет свое направление, т. е. переходит через нуль.

Амплитудное значение тока

$$I_m = U_m C\omega,$$

а действующее

$$I = UC\omega,$$

откуда

$$I = \frac{U}{\frac{1}{C\omega}} = \frac{U}{X_C},$$

где X_C – емкостное сопротивление, Ом.

$$X_C = \frac{1}{C\omega} = \frac{1}{2\pi fC}. \qquad (3.21)$$

Емкостное сопротивление, так же как и индуктивное, с физической точки зрения не похоже на активное сопротивление. Величина емкостного сопротивления определяется «упругостью» поляризации диэлектрика конденсатора. Чем больше «упругость» поляризации диэлектри-

ка, тем меньше смещение его связанных зарядов и меньше ток смещения. Величина емкостного сопротивления обратно пропорциональна частоте тока и емкости конденсатора.

Емкостное сопротивление наряду с индуктивным также является реактивным.

3.11. Электрическая цепь переменного тока с последовательным соединением сопротивлений

В практике часто приходится иметь дело с электрической цепью, обладающей активным, индуктивным и емкостным сопротивлениями (рис. 3.12, *а*).

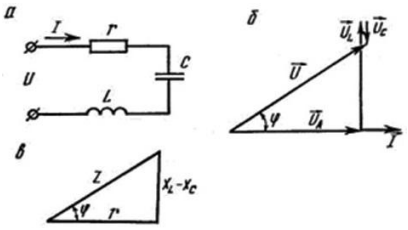


Рис. 3.12. Цепь переменного тока с активным, индуктивным и емкостным сопротивлениями:
а – схема; *б* – векторная диаграмма тока и напряжений;
в – треугольник сопротивлений

При последовательном соединении сопротивлений по ним будет протекать одинаковый ток. Напряжение, подведенное к цепи, равно геометрической сумме напряжений отдельных участков цепи:

$$\overrightarrow{U} = \overrightarrow{U_R} + \overrightarrow{U_L} + \overrightarrow{U_C}.$$

Вектор падения напряжения на индуктивном сопротивлении $\bar{U}_L$ и вектор падения напряжения на емкостном $\bar{U}_C$ сдвинуты по фазе между собой на 180°, так как на индуктивном сопротивлении напряжение опережает ток по фазе на 90°, а на емкостном сопротивлении напряжение отстает по фазе на 90° (рис. 3.12, *б*). Пусть U_L больше по абсолютному значению, чем U_C. Тогда из треугольника напряжений имеем:

$$U^2 = U_R^2 + \left(U_L + U_C\right)^2;$$

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} = \sqrt{I^2 R^2 + I^2 \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}. \qquad (3.22)$$

Выразим из получившегося выражения силу тока и получим закон Ома для цепи переменного тока:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{U}{Z}, \qquad (3.23)$$

где Z – полное сопротивление электрической цепи, Ом.

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}. \qquad (3.24)$$

Поделив стороны треугольника напряжения на величину тока, получим подобный треугольник сопротивлений (рис. 3.12, *в*).

Полное сопротивление Z можно определить из треугольника сопротивлений. Для случая, когда в цепи емкостное сопротивление больше индуктивного, угол сдвига фаз между током и общим напряжением в цепи φ будет отрицательным. Угол сдвига фаз между током и напряжением определяется по формулам

$$\cos\varphi = \frac{R}{Z};\ \sin\varphi = \frac{X_L - X_C}{Z};\ \tan\varphi = \frac{X_L - X_C}{R}.$$

Пусть в электрическую цепь включено несколько активных, индуктивных и емкостных сопротивлений (рис. 3.13, *а*). Из курса физики известно, что при последовательном соединении сопротивлений общее сопротивление цепи равно сумме сопротивлений ее участков.

В цепи переменного тока отдельно складываются активные, индуктивные и емкостные сопротивления, а полное сопротивление цели равно:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}. \qquad (3.25)$$

Сумма сопротивлений всех последовательно соединенных участков цепи называется **эквивалентным сопротивлением**.

Ток является общим для всех участков цепи и определяется по закону Ома:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(X_L - X_C\right)^2}}. \qquad (3.26)$$

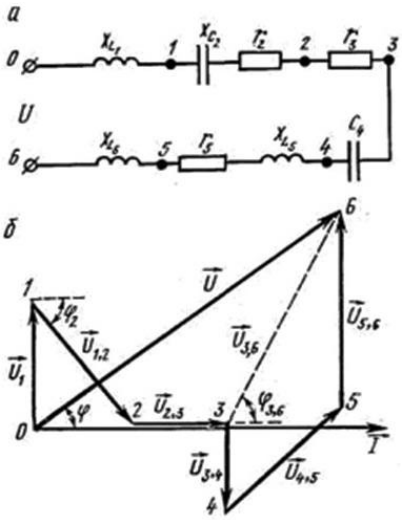


Рис. 3.13. Последовательное соединение приемников электрической энергии:
а – схема; *б* – топографическая диаграмма

Для расчета цепей с последовательным соединением активных, индуктивных и емкостных сопротивлений применяется метод топографических диаграмм. **Топографической диаграммой** называется векторная диаграмма напряжений, расположенных в очередной последовательности элементов цепи. Каждой точке схемы электрической цепи соответствует точка на топографической диаграмме. При построении топографических диаграмм за исходный вектор берется вектор действующего значения тока, так как он для всех участков цепи является одинаковым. Векторы падения напряжения на отдельных участках цепи размещаются в очередной последовательности элементов цепи с соответствующим сдвигом фаз.

Для цепи, показанной на рис. 3.13, *а*, топографическая диаграмма изображена на рис. 3.13, *б*. Начало вектора напряжения первого участка цепи совмещают с началом вектора тока и размещают на диаграмме вертикально вверх, так как на индуктивном сопротивлении напряже-

ние опережает ток на 90°. Начало вектора напряжения второго участка цепи совмещают с концом вектора напряжения первого участка и размещают под соответствующим углом сдвига фаз ($-\varphi_2$), так как на этом участке включен конденсатор с активным сопротивлением. Начало вектора напряжения третьего участка цепи совмещают с концом вектора напряжения второго участка цепи и размещают параллельно вектору тока, так как на активном сопротивлении напряжение совпадает по фазе с током ($\varphi_3 = 0$), и т. д. Все векторы напряжения берутся в масштабе соответственно их числовым значениям. Напряжением всей цепи является вектор, замыкающий начало вектора первого участка цепи с концом вектора напряжения последнего участка цепи. Величина вектора напряжения всей цепи определяется по масштабу, а угол φ измеряется.

Ценность топографических диаграмм состоит в наглядном представлении напряжений и сдвига фаз между током и напряжением на отдельных участках цепи. Например, напряжение на участке 3–6 определяется вектором $U_{3,6}$, а сдвиг фаз между током и напряжением – углом $\varphi_{3,6}$.

Рассмотрим частный случай последовательного включения активного, индуктивного и емкостного сопротивлений, когда разность реактивных сопротивлений $X_L - X_C = 0$, т. е. $X_L = X_C$. Этот случай получил название **резонанса напряжений**.

При резонансе напряжений ток в цепи определяется одним лишь активным сопротивлением и достигает наибольшей величины. Угол сдвига фаз между напряжением и током становится равным нулю, так как $\cos \varphi = 1$. Индуктивное U_L и емкостное U_C напряжения могут значительно превышать общее напряжение U, приложенное к цепи, так как $U = U_R$. Это может привести к перенапряжению и пробою изоляции, если сопротивление катушки или конденсатора изменится в процессе работы.

Резонанс напряжений используется в радиотехнике при настройке радиоприемников на частоту передающей станции.

3.12. Электрическая цепь переменного тока с параллельным соединением сопротивлений

В цепи переменного тока с параллельным включением потребителей (рис. 3.14, *а*) напряжение является одинаковым для всех потребителей, а ток в каждой ветви определяется соотношением:

$$I_1 = \frac{U}{Z_1};\ I_2 = \frac{U}{Z_2}\cdot$$

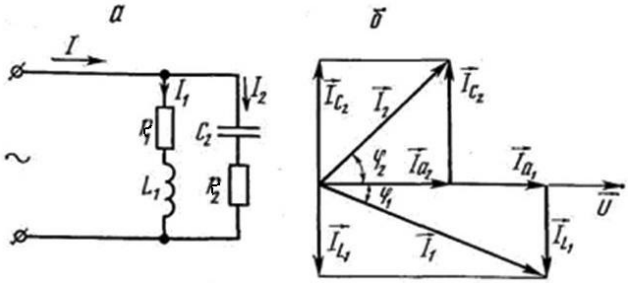


Рис. 3.14. Цепь переменного тока с параллельным соединением сопротивлений:
а – схема; *б* – векторная диаграмма

Ток в неразветвленной части цепи представляет геометрическую сумму токов в отдельных ветвях:

$$\bar{I} = \bar{I}_1 + \bar{I}_2.$$

Сдвиг фаз между напряжением и током в ветвях можно определить по формулам

$$\cos\varphi_1 = \frac{R_1}{Z_1};\ \cos\varphi_2 = \frac{R_2}{Z_2}\cdot$$

При построении векторной диаграммы для разветвленной цепи исходным вектором принимается вектор напряжения, а вектор тока в неразветвленной части цепи равен геометрической сумме векторов токов ветвей. Так как в нашем примере цепь состоит из двух ветвей, то построение векторной диаграммы осуществляется с помощью **метода параллелограмма**. Суть этого метода заключается в построении двух недостающих сторон до получения параллелограмма, а вектор общей силы тока является диагональю получившегося параллелограмма.

Рассмотрим **аналитический метод** расчета разветвленных цепей синусоидального тока. Этот метод заключается в следующем: вектор тока каждой ветви проецируется на направление вектора напряжения и на направление, перпендикулярное к нему (рис. 3.14, *б*). Получили треугольники токов, из которых находим активную и реактивную составляющие тока каждой ветви:

$$I_{a1} = I_1 \cos\varphi_1;\ \ I_{p1} = I_1 \sin\varphi_1;\ \ I_{a2} = I_2 \cos\varphi_2;\ \ I_{p2} = I_2 \sin\varphi_2.$$

Активный ток неразветвленной части цепи равен арифметической сумме активных токов ветвей, а реактивный – алгебраической сумме реактивных токов ветвей.

Следовательно,

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}\,. \tag{3.27}$$

В неразветвленной части цепи ток является одинаковым для всех участков, а напряжение распределяется пропорционально сопротивлениям участков цепи и равно геометрической сумме напряжений на участках цепи. В разветвленной цепи напряжение одинаково для всех параллельных ветвей, а ток цепи распределяется в ветвях обратно пропорционально сопротивлениям ветвей и равен геометрической сумме токов ветвей.

Для расчета разветвленных электрических цепей применяется **метод проводимостей**. Полной проводимостью принято называть величину, обратную полному сопротивлению:

$$y = \frac{1}{Z}, \tag{3.28}$$

где y – полная проводимость, См.

Полный ток, активная и реактивная составляющие его запишутся в таком виде:

$$I = \frac{U}{Z} = Uy;\ \ I_a = I\cos\varphi = Uy\cos\varphi;\ \ I_p = I\sin\varphi = Uy\sin\varphi.$$

По аналогии с понятием активного и реактивного сопротивления активной проводимостью будем считать $y\cos\varphi$ и обозначим ее g, а реактивной проводимостью – $y\sin\varphi$ и обозначим ее b, т. е.

$$g = y\cos\varphi;\ b = y\sin\varphi,$$

где

$$b = b_L - b_C.$$

Тогда уравнения токов примут вид:

$$I = Uy;\ I_a = Ug;\ I_p = Ub.$$

Из последних расчетов видно, что, поделив стороны треугольника токов на напряжение, получим подобный треугольник проводимостей. Из треугольника проводимостей имеем

$$y = \sqrt{g^2 + \left(b_L - b_C\right)^2}. \qquad (3.29)$$

Сумма проводимостей всех ветвей, соединенных параллельно, называется **эквивалентной проводимостью.**

Активная проводимость участка цепи с параллельным соединением потребителей равна сумме активных проводимостей ветвей, а реактивная проводимость – алгебраической сумме реактивных проводимостей. Проводимость индуктивности положительна, а проводимость емкости отрицательна.

При расчете электрических цепей приходится проводимости выражать через сопротивления, и наоборот. Для этого используются следующие зависимости:

$$R = \frac{g}{y^2};\ \ X = \frac{b}{y^2}.$$

Для определения тока в неразветвленной части цепи можно не находить геометрической суммы токов, а определить сначала полную проводимость цепи и полученный результат умножить на напряжение.

Сдвиг фаз между током и напряжением в неразветвленной части цепи может быть определен по одной из следующих формул:

$$\cos\varphi = \frac{g}{y};\ \ \sin\varphi = \frac{b_L - b_C}{y};\ \ \tan\varphi = \frac{b_L - b_C}{g}.$$

Наличие конденсатора в одной из двух параллельных ветвей снижает ток в неразветвленной части электрической цепи. Если подобрать емкость конденсатора или индуктивность катушки таким образом, чтобы их проводимости были равны, ток в неразветвленной части цепи достигнет минимальной величины, а угол сдвига фаз $\varphi = 0^{\circ}$. Такой случай получил название **резонанса токов.**

Так как при резонансе токов в неразветвленной части цепи ток имеет минимальную величину, то потери в соединительных проводах и в обмотках источника электрической энергии минимальны. Подключение конденсатора параллельно цепи, обладающей активным и индуктивным

сопротивлениями, повышает коэффициент мощности cos φ.

3.13. Электрическая цепь переменного тока со смешанным соединением сопротивлений

Электрическая цепь, содержащая в себе элементы последовательного и параллельного соединения и поэтому не отнесенная к тому или иному способу соединения, называется цепью со смешанным соединением. Для того чтобы рассчитать такую цепь, ее необходимо преобразовать либо в цепь с параллельным соединением, либо в цепь с последовательным соединением и использовать формулы для соответствующего типа соединения.

При смешанном соединении потребителей приведенной электрической цепи (рис. 3.15) сначала определяют проводимости участков цепи *AB* и *BC*, а потом находят сопротивления этих участков. Дальше рассматривается эквивалентная цепь с последовательным соединением сопротивлений участков и параллельного сопротивления X_5.

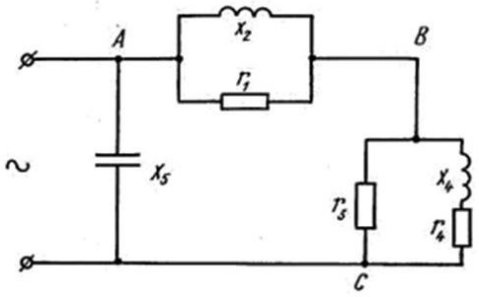


Рис. 3.15. Схема электрической цепи со смешанным соединением сопротивлений

Лекция 4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

4.1. Общие сведения об электроизмерительных приборах

При эксплуатации электросиловой аппаратуры измеряют ток, напряжение, сопротивление, мощность, частоту и расход электрической энергии. Для этой цели применяют различные электроизмерительные

приборы.

Измерение – это определение физической величины опытным путем с помощью измерительных приборов.

Все приборы делятся на две большие группы: аналоговые и цифровые. Цифровые приборы, по сравнению с аналоговыми, наряду с основными преимуществами (возможность автоматизации процесса измерения, высокое быстродействие) имеют сложное устройство и, как следствие, относительно невысокую надежность и сравнительно высокую стоимость. Рассмотрим подробнее конструкции аналоговых приборов.

В большинстве электроизмерительных приборов имеется подвижная и неподвижная части. Подвижная часть, включающая в себя катушку или стальной якорь, механически объединена со стрелочным указателем и возвратными пружинами из фосфористой бронзы (рис. 4.1).

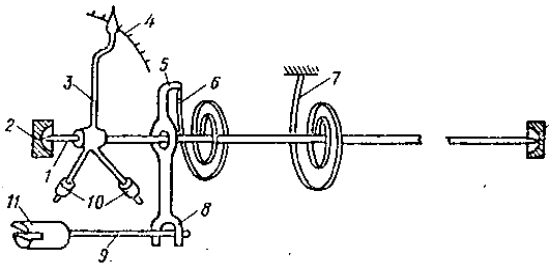


Рис. 4.1. Общие детали подвижной части в опорах:
1 – ось; *2* – подпятники; *3* – стрелка; *4* – шкала; *5* – поводок корректора;
6, *7* – пружинки; *8* – вилка; *9* – ось корректора; *10* – грузики; *11* – винт

Принцип действия измерительных приборов независимо от их назначения сводится к следующему: электрический ток, проходя через прибор, вызывает появление вращающего момента, под воздействием которого преодолевается противодействие спиральных пружин и подвижная часть поворачивается на определенный угол. При этом стрелка, переместившись по шкале, укажет измеряемую величину. Когда прибор отключается, вращающий момент исчезает и подвижная часть вследствие упругости пружин возвращается в исходное положение.

При изменении температуры окружающей среды упругость возвратных пружин меняется, что приводит к некоторому повороту подвижной части. Однако перед началом измерений стрелка прибора

должна располагаться против исходного (нулевого) деления шкалы. Такую установку стрелки производят с помощью **корректора**.

Ось корректора расположена эксцентрично. Поэтому поворот винта *корректора* перемещает вилку, что вызывает изменение угла закручивания возвратной пружины и перемещение стрелки по шкале. Грузики служат для уравновешивания подвижной части, т. е. для устранения влияния моментов сил тяжести на ее положение.

По условиям эксплуатации подвижная система прибора должна быстро успокаиваться, что обеспечивается применением воздушного, магнитоиндукционного или жидкостного успокоителя (рис. 4.2).

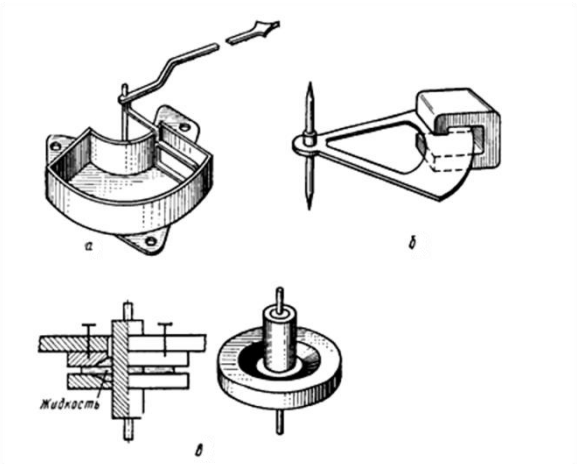


Рис. 4.2. Успокоители подвижной части электроизмерительных приборов:
а – воздушный, *б* – магнитоиндукционный, *в* – жидкостный

В воздушном успокоителе используется торможение подвижной системы вследствие сжатия или разрежения воздуха в камере успокоителя, в магнитоиндукционном – применен принцип магнитного торможения (под действием вихревых токов), в жидкостном успокоителе используется энергия жидкости. Выбор способа успокаивания подвижной части зависит от принципа действия прибора. Например, если принцип действия основан на магнитном взаимодействии, то магнитоиндукционный успокоитель не применяется и т. д.

Для уменьшения трения и повышения точности ось подвижной системы в некоторых приборах крепят на кернах в подпятниках из

камней высокой твердости (рубина, сапфира, агата) (рис. 4.3).

Для определения числового значения измеряемой величины приборы имеют отсчетные приспособления, состоящие из шкалы и указателя.

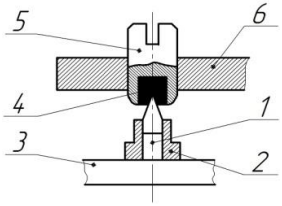


Рис. 4.3. Устройство опоры:
1 – керн; *2* – букса; *3* – подвижная часть;
4 – камень; *5* – винт; *6* – неподвижная часть

Отсчетное устройство измерительного прибора – часть прибора, предназначенная для отсчитывания его показаний. Отсчетное устройство аналогового прибора обычно состоит из *шкалы* и указателя, причем подвижным может быть либо указатель, либо шкала. По типу указателя отсчетные устройства подразделяются на стрелочные и световые.

В стрелочных отсчетных устройствах (рис. 4.4) стрелка своим концом перемещается относительно отметок шкалы. Конец стрелки может быть копьевидным или выполненным в виде ножа, а также натянутой нити. В последних двух случаях шкалы снабжаются зеркалом для устранения погрешности отсчета, вызванной *параллаксом* (параллакс – видимое смещение предмета из-за перемены места наблюдения).

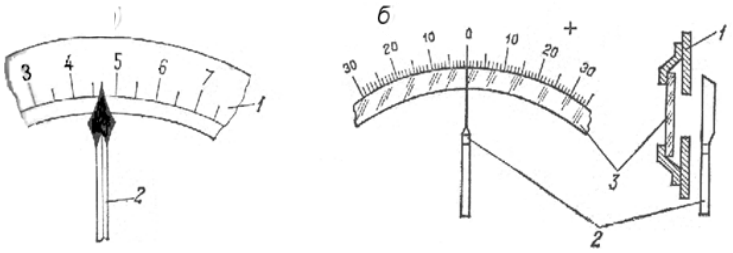


Рис. 4.4. Стрелочные отсчетные устройства:
а – с копьевидной стрелкой, *б* – с ножевидной стрелкой;
1 – шкала; *2* – стрелка; *3* – зеркало

В качестве зеркала используется пластинка посеребренного стекла,

устанавливаемая непосредственно под шкалу. Для точного определения показаний электроизмерительного прибора глаз наблюдателя должен находиться в таком положении, при котором стрелка полностью закрывает собой свое изображение в зеркале.

В световых отсчетных устройствах (рис. 4.5) роль стрелки выполняет световой луч, отраженный от зеркальца, скрепленного с подвижной частью прибора. От ее положения зависит положение светового изображения на шкале, по которому отсчитывают показания. Световое отсчетное устройство позволяет устранить погрешность от параллакса и повысить чувствительность прибора.

Рис. 4.5. Световое отсчетное устройство

4.2. Погрешность электроизмерительных приборов

В связи с тем, что абсолютно точных приборов нет, показания приборов несколько отличаются от действительного значения измеряемой величины. Разность между показанием прибора и действительным значением измеряемой величины называется **абсолютной погрешностью.**

Так, например, если напряжение источника 100 В, а вольтметр со шкалой 150 В, включенный в данную цепь, показывает 103 В, то абсолютная погрешность составит

$$\Delta A = A_{\text{изм}} - A = 103 - 100 = 3 \text{ В}.$$

Отношение абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой величины называется **относительной погрешностью** прибора:

$$\gamma_{от} = \frac{\Delta A}{A} \cdot 100\,\%. \qquad (4.1)$$

Если абсолютная погрешность 3 В, а измеряемая величина 50 В и 100 В, то относительная погрешность составит: для первого измерения

$$\gamma_{от1} = \frac{3}{50} \cdot 100 = 6\,\%,$$

а для второго измерения

$$\gamma_{от2} = \frac{3}{100} \cdot 100 = 3\,\%.$$

Отсюда следует, что относительная погрешность в начале шкалы прибора больше, чем в конце. Это обстоятельство необходимо учитывать при выборе предела измерений в универсальных измерительных приборах. Наименьшая погрешность в измерениях будет при использовании последней трети шкалы прибора.

Таким образом, точность измерительных приборов оценивать по их относительной погрешности неудобно, так как абсолютная погрешность у них примерно одинакова вдоль всей шкалы и, следовательно, с уменьшением измеряемой величины быстро растет относительная погрешность. Для оценки точности измерительных приборов служит их **приведенная погрешность**, равная отношению абсолютной погрешности показания ΔA к значению, соответствующему наибольшему (номинальному) показанию прибора $A_н$, выраженному в процентах, т. е.

$$\gamma_{пр} = \frac{\Delta A}{A_н} \cdot 100\,\%. \qquad (4.2)$$

В нашем случае абсолютная погрешность – 3 В, наибольшее показание прибора – 150 В и приведенная погрешность

$$\gamma_{пр} = \frac{3}{150} \cdot 100 = 2\,\%.$$

Приведенная погрешность при нормальных эксплуатационных условиях (температура +20 °С, правильная установка, отсутствие внешних магнитных полей и больших ферромагнитных масс) называется **основной погрешностью прибора**. По степени точности измеритель-

ные приборы делятся на 8 классов (ГОСТ 1845-59): 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5 и 4. Цифры указывают основную погрешность в %.

4.3. Классификация электроизмерительных приборов

Измерительные приборы различают:
– по назначению;
– по роду измеряемого тока;
– по классу точности;
– по принципу действия;
– по форме корпуса;
– по положению при измерениях;
– по характеру применения.

По назначению приборы подразделяются на амперметры, вольтметры, омметры, ваттметры, счетчики, частотомеры и др.

По роду измеряемого тока. Измерительные приборы можно применять в цепях переменного или постоянного тока. Однако существуют приборы, предназначенные для включения в цепь и переменного и постоянного токов.

По классу точности. Приборы классов точности считаются:

0,05 и 0,1 – контрольными; 0,2; 0,5 и 1 – лабораторными; 1,5 и 2,5 – техническими; 4 – учебными.

Контрольные приборы имеют зеркальную шкалу и ножевидную стрелку. У лабораторных приборов есть ножевидная стрелка, но может не быть зеркальной шкалы. Технические и учебные приборы имеют копьевидную стрелку без зеркальной шкалы.

По принципу действия электроизмерительные приборы относят к следующим наиболее распространенным системам: электромагнитной, магнитоэлектрической, электродинамической, индукционной, электростатической, термоэлектрической, вибрационной.

Принадлежность к каждой из систем указывается на шкале прибора специальным значком (табл. 4.1).

Таблица 4.1. **Условные обозначения систем приборов**

Тип системы прибора	Условное обозначение принципа действия прибора
1	2
Магнитоэлектрическая с подвижной рамкой	

Магнитоэлектрическая с подвижным магнитом	
Электромагнитная	
Электродинамическая	

Окончание табл. 4.1

1	2
Ферродинамическая	
Индукционная	
Электростатическая	
Вибрационная (язычковая)	
Термоэлектрическая	

По форме корпуса приборы бывают: круглые, квадратные, прямоугольные, секторообразные.

По положению при измерениях: вертикальные (⊥), горизонтальные (П), устанавливаемые под некоторым углом (<).

По характеру применения: стационарные (жестко укрепленные на месте установки); переносные.

Промышленность выпускает электроизмерительные приборы *трех эксплуатационных групп*: А, Б и В, характеризующих допустимую температуру окружающей среды, при которой можно эксплуатировать данный прибор. Приборы различных групп могут эксплуатироваться при следующих температурах окружающей среды:

группа А 0 – (+35) °С;

группа Б (–30) – (+40) °С;

группа B_1 (–40) – (+50) °С;

группа B_2 (–50) – (+60) °С.

Принадлежность прибора к эксплуатационным группам Б и В указывается на шкале. Приборы эксплуатационной группы А обычно обозначений на шкале не имеют.

На шкале измерительных приборов условными значками и цифрами указываются следующие данные:

– наименование прибора;

– род тока, для которого предназначен прибор;

– если прибор переменного тока, указывается диапазон частот, при которых можно эксплуатировать прибор;

– система прибора;

– испытательное напряжение изоляции;
– положение при измерениях;
– класс точности;
– марка прибора;
– год выпуска;
– заводской номер прибора;
– принадлежность к эксплуатационной группе.

При эксплуатации приборов необходимо соблюдать следующие основные правила:

1. Перед включением прибора стрелку с помощью корректора надо установить на нулевое деление шкалы.

2. Прибор включать только в цепь того рода тока, для которого он предназначен.

3. При измерениях корпус прибора должен занимать положение, соответствующее его нормальной установке.

4.4. Приборы электромагнитной системы

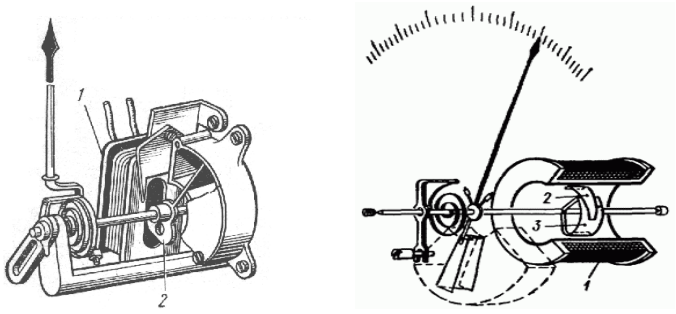
Электромагнитные измерительные приборы применяют для измерения *тока или напряжения в цепях переменного или постоянного тока*. Промышленность выпускает приборы данного типа в трех вариантах: с плоской и круглой катушкой, а также с магнитопроводом. Принцип действия приборов электромагнитной системы основан на взаимодействии магнитного поля катушки, создаваемого измеряемым током, со стальным сердечником, помещенным в это поле.

Механизм с плоской катушкой (рис. 4.6, *а*) представляет собой катушку, намотанную на каркас, имеющий щелевидное отверстие. Подвижная часть прибора содержит ось со стрелкой, несимметрично укрепленный сердечник и возвратную пружину. Для быстрого успокоения стрелки относительно положения равновесия служит успокоитель с воздушным торможением.

При включении прибора в сеть по катушке проходит ток и возникающее магнитное поле втягивает сердечник внутрь катушки. Сердечник укреплен на оси несимметрично, поэтому подвижная часть прибора поворачивается на некоторый угол. Подвижная часть будет поворачиваться до тех пор, пока вращающий момент, созданный током, не будет уравновешен противодействующим моментом спиральной пружины.

В механизме с круглой катушкой (рис. 4.6, *б*) внутри ее помещены два сердечника: подвижный, жестко укрепленный на оси прибора вме-

сте со стрелкой, и неподвижный. Когда по катушке протекает ток, возбуждающий магнитное поле, концы сердечников намагничиваются с одинаковой полярностью и отталкивание их одноименных полюсов создает вращающий момент. Подвижный сердечник, отталкиваясь от неподвижного, поворачивает ось со стрелкой на некоторый угол. Для ослабления влияния внешних магнитных полей на катушку надет ферромагнитный экран. Прибор снабжен магнитным успокоителем.



а *б*

Рис. 4.6. Электромагнитный измерительный механизм:
а – с плоской катушкой: *1* – катушка; *2* – лепесток;
б – с круглой катушкой: *1* – катушка; *2, 3* – ферромагнитные элементы

Механизмы с круглой катушкой по сравнению с механизмами с плоской катушкой имеют некоторые преимущества в технологии изготовления и, кроме того, позволяют получить более равномерную шкалу. Однако они имеют и недостатки, главный из которых заключается в том, что в таких механизмах хуже используется внутренний объем, что вызывает увеличение собственного потребления прибора для данного значения вращающего момента.

Электромагнитный измерительный механизм с замкнутым магнитопроводом (рис. 4.7) состоит из катушки, помещенной на магнитопровод с полюсными наконечниками. При наличии тока в обмотке катушки подвижный сердечник стремится повернуться по часовой стрелке вокруг оси, втягиваясь в рабочее пространство между полюсными накладками левого полюса. Обычно в измерительных механизмах с замкнутым магнитопроводом применяют жидкостное успокоение.

Достоинствами измерительного механизма с замкнутым магнито-

проводом являются: повышение чувствительности, уменьшение погрешности от влияния внешних магнитных полей, возможность относительно просто менять характеры шкалы путем изменения положения левого полюсного наконечника относительно правого.

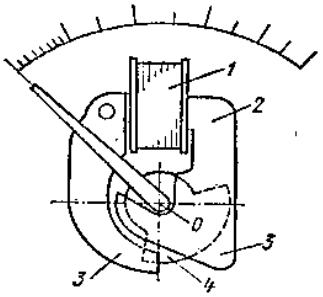


Рис. 4.7. Электромагнитный измерительный механизм
с замкнутым магнитопроводом:
1 – катушка; *2* – магнитопровод; *3* – полюсные наконечники;
4 – подвижный сердечник

Угол поворота подвижной части зависит от силы, с которой сердечник втягивается внутрь катушки (механизмы с плоской катушкой и замкнутым магнитопроводом) или с которой происходит отталкивание одноименно заряженных сердечников (механизм с круглой катушкой). Эта сила пропорциональна току и величине магнитной индукции B поля катушки:

$$F = kBI, \tag{4.3}$$

где k – коэффициент пропорциональности.

Так как при отсутствии насыщения магнитная индукция пропорциональна току, то угол поворота подвижной системы будет пропорционален квадрату тока. В этом случае шкала прибора должна быть квадратичной. Однако наличие в приборе ферромагнитного сердечника усложняет приводимую зависимость, вследствие чего шкала электромагнитных измерительных приборов неравномерна. Достоинством равномерной шкалы является постоянство масштаба вдоль всей шкалы, что обеспечивает простоту отсчета измеряемой величины в любой части шкалы.

Придавая сердечнику специальную форму и изменяя его расположение относительно катушки, можно добиться некоторого уменьше-

ния неравномерности шкалы в большей ее части, кроме начальных делений, которые остаются очень сильно сжатыми.

В электромагнитных вольтметрах катушки выполняют из большого числа витков (2000–10000) провода диаметром 0,08–0,1 мм. Катушки амперметров содержат небольшое число витков толстого медного провода круглого или ленточного сечения. Внешние магнитные поля оказывают значительное влияние на работу электромагнитного прибора, но благодаря ферромагнитному кожуху это влияние значительно ослабляется.

В электромагнитном приборе количество стали относительно мало, и большая часть пути магнитного потока проходит в воздухе. Поэтому измерительный механизм электромагнитной системы обладает малой чувствительностью, следовательно, затруднительно изготовить амперметр на малый ток (менее 0,5 А) или вольтметр на малое напряжение (менее 10 В).

Способность прибора работать в цепях переменного и постоянного тока объясняется тем, что изменение направления тока в катушке приводит к перемагничиванию сердечников, вследствие чего направление вращающего момента не меняется. При переменном токе прибор показывает действующие значения тока или напряжения. Мощность, потребляемая электромагнитными приборами от сети, колеблется от 2 до 8 Вт.

К *достоинствам электромагнитных приборов* следует отнести их простоту, дешевизну, надежность в эксплуатации, способность выдерживать кратковременные перегрузки, а также пригодность для измерений в цепях переменного и постоянного тока.

Недостатками приборов электромагнитной системы являются их сравнительно малая точность (класс точности 1; 1,5; 2,5), неравномерность шкалы, довольно большая потребляемая мощность, зависимость показаний от частоты тока и влияния внешних магнитных полей.

Чувствительность повышают путем применения растяжек и светового отсчета, а погрешности снижаются благодаря использованию специальных магнитных материалов для сердечников и эффективных способов защиты от влияния внешних магнитных полей.

4.5. Приборы магнитоэлектрической системы

Приборы магнитоэлектрической системы применяют для измерения *тока или напряжения в цепях постоянного тока*. Действие прибо-

ров магнитоэлектрической системы основано на взаимодействии магнитного поля постоянного магнита и магнитного поля проводника с током, выполненного в виде катушки.

Неподвижная часть прибора (рис. 4.8) состоит из постоянного магнита и стального цилиндра. Между полюсами магнита и стальным цилиндром имеется кольцевой воздушный зазор, в котором создается сильное и практически однородное магнитное поле. Подвижная часть прибора представляет собой катушку, выполненную тонким проводом на легкой алюминиевой рамке, свободно вращающейся (на двух полуосях) в кольцевом воздушном зазоре. К передней полуоси крепится стрелка с противовесами, предназначенными для уравновешивания подвижной системы прибора. Противодействующий момент создается с помощью двух спиральных пружин, через которые на рамку подводится электрический ток.

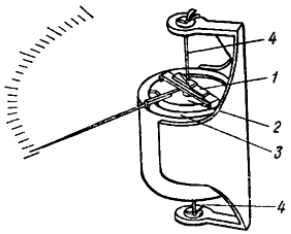


Рис. 4.8. Измерительный механизм магнитоэлектрической системы с внутрирамочным магнитом:
1 – подвижная катушка (рамка); *2* – внутрирамочный магнит; *3* – магнитомягкий магнитопровод; *4* – ленточные растяжки

При включении прибора по катушке проходит ток и возникает механическая сила, которая в соответствии с правилом левой руки поворачивает рамку на некоторый угол.

Величина этой силы зависит от магнитной индукции B, силы тока в катушке I, числа витков w и активной длины проводника l:

$$F = 2BIlw. \qquad (4.4)$$

Так как магнитная индукция, активная длина и число витков (в каждом конкретном типе прибора) постоянны, угол поворота рамки будет определяться только силой тока, проходящего по катушке прибора, и противодействующим моментом возвратных пружин. Вследствие этого приборы магнитоэлектрической системы имеют равномерную

шкалу.

При повороте рамки в магнитном поле в ее витках индуктируется ЭДС, направление которой определяется правилом Ленца. Возникший под действием ЭДС ток вызывает появление противодействующей силы, способствующей быстрому успокоению подвижной системы прибора. Это устраняет необходимость применения успокоителя.

Приборы магнитоэлектрической системы полярны (т. е. имеют положительный и отрицательный зажимы), а в цепи переменного тока не дают показаний. При прохождении по катушке переменного тока вращающий момент с частотой тока меняет свое направление. Из-за инерции подвижная система не будет успевать колебаться с частотой тока, поэтому останется неподвижной.

Достоинства магнитоэлектрических приборов: высокая точность показаний, чувствительность, равномерная шкала, малое потребление энергии (10^{-4}–10^{-6} Вт), быстрое успокоение подвижной системы и малая чувствительность к внешним магнитным полям. Широко применяются в качестве вольтметров, миллиамперметров, микроамперметров, а также в универсальных измерительных приборах (авометрах).

К *недостаткам приборов магнитоэлектрической системы* относятся: сравнительно высокая стоимость, чувствительность к перегрузкам и пригодность для измерений только в цепях постоянного тока. Последний недостаток может быть устранен путем включения прибора через выпрямительное устройство, но в этом случае прибор будет относиться уже к **выпрямительной** системе.

4.6. Приборы электродинамической системы

Приборы электродинамической системы применяют для измерения *напряжения, тока или мощности в цепях переменного и постоянного тока*. Действие электродинамических приборов основано на взаимодействии магнитных полей неподвижной и подвижной катушек с токами.

Прибор (рис. 4.9) имеет неподвижную катушку, которая содержит небольшое число витков толстой проволоки, и подвижную катушку с большим числом витков тонкой проволоки, размещенную внутри неподвижной. На оси подвижной катушки укреплены стрелка и пружины, предназначенные для подведения тока и создания противодействующего момента. Нижний конец стрелки оканчивается поршнем воздушного успокоителя. В связи с чувствительностью прибора к внеш-

ним магнитным полям применение магнитного успокоителя в данной системе недопустимо.

При включении прибора в цепь по катушкам проходит ток и возникающие магнитные поля вызывают появление электродинамической силы, которая стремится повернуть подвижную систему так, чтобы магнитные поля обеих катушек совпадали по направлению. Если допустить, что по катушкам прибора проходят одинаковые токи, то сила взаимодействия катушек (и вращающий момент) будет пропорциональна квадрату силы тока:

$$F = kI^2. \qquad (4.5)$$

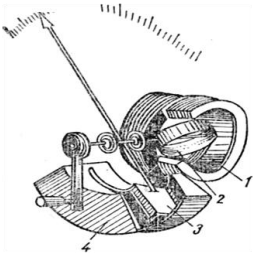


Рис. 4.9. Электродинамический измерительный механизм:
1 – неподвижная катушка; *2* – подвижная катушка;
3 – поршень; *4* – воздушный успокоитель

Поэтому электродинамические амперметры имеют неравномерную шкалу.

При включении прибора в сеть переменного тока направление вращающего момента не изменится, так как направление тока изменяется одновременно в обеих катушках. В цепях переменного тока приборы данной системы показывают действующие значения измеряемой величины.

В случае использования прибора для измерения напряжения подвижную и неподвижную катушки соединяют последовательно. Такое же соединение применяют при измерении небольших токов (до 0,5 А). При измерении токов большей величины катушки прибора соединяют параллельно.

Когда измеряют мощность, неподвижную катушку включают последовательно, а подвижную – параллельно. В последнем случае через неподвижную катушку будет проходить ток нагрузки, а через подвиж-

ную – ток, пропорциональный напряжению на нагрузке, что вызовет возникновение вращающего момента, пропорционального мощности, потребляемой нагрузкой ($P = UI$). По этой причине электродинамические ваттметры имеют равномерную шкалу.

Достоинства электродинамических приборов – пригодность для измерения в цепях переменного и постоянного тока, возможность использования для измерения напряжения, силы тока или мощности, высокая точность, равномерность шкалы (у ваттметров).

Недостатки – сравнительно большое потребление мощности (при измерении токов и напряжений), чувствительность к внешним магнитным полям и перегрузкам, сложная конструкция и высокая стоимость, чувствительность к механическим воздействиям – ударам, тряске и вибрации.

Следует отметить, что чем меньше потребление мощности электродинамического прибора, тем слабее собственные магнитные поля и сильнее влияние внешних полей. Для уменьшения их влияния применяют стальной сердечник. Электродинамические приборы со стальным сердечником называются ферродинамическими.

Однако с применением стали уменьшается точность прибора вследствие влияния гистерезиса и вихревых токов. Поэтому приборы ферродинамической системы для точных измерений не пригодны. Они используются в основном в качестве регистрирующих приборов и щитовых ваттметров.

4.7. Приборы индукционной системы

Индукционные приборы в настоящее время служат *для измерения расхода электрической энергии в цепях переменного тока*. Действие индукционного счетчика основано на взаимодействии вихревых токов с вращающимся магнитным полем.

Основными деталями индукционного счетчика (рис. 4.10) являются два электромагнита, подвижный алюминиевый диск, редуктор, счетный механизм и тормозной магнит.

Один электромагнит имеет небольшое число витков толстого провода и включается с нагрузкой последовательно (токовая обмотка), а второй – состоит из большого числа витков тонкого провода и включается параллельно (обмотка напряжения). Токовая обмотка намотана на подковообразный сердечник, причем навивка идет встречно друг другу. Это обеспечивает создание между полюсами электромагнитов вра-

щающегося магнитного поля, в котором размещен свободно вращающийся алюминиевый диск.

Вращающееся магнитное поле, пересекая край алюминиевого диска, индуктирует в нем вихревые токи. В результате взаимодействия магнитных полей вихревых токов с вращающимся магнитным полем возникает механическая сила, которая приводит диск во вращение.

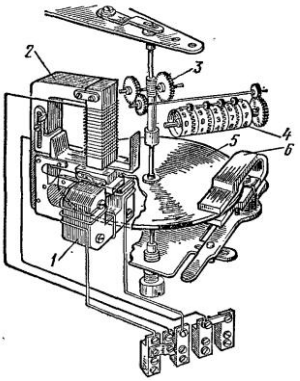


Рис. 4.10. Счетчик электрической энергии:
1 и *2* – электромагниты; *3* – редуктор;
4 – счетный механизм; *5* – диск; *6* – тормозной магнит

Сила взаимодействия между вихревыми токами и вращающимся магнитным полем пропорциональна произведению мгновенных значений тока и напряжения, т. е. мощности токоприемников:

$$M_{вр} = kUI = M_{вр} = kP, \qquad (4.6)$$

где k – постоянный коэффициент.

Чтобы скорость вращения диска была пропорциональна мощности токоприемников, применен тормозной магнит.

В диске при вращении его между полюсами тормозного магнита индуктируются вихревые токи, которые, взаимодействуя с магнитным полем магнита, создают противодействующий момент, пропорциональный частоте вращения диска. Чем быстрее вращается диск, тем больше сила его торможения. Частота вращения диска становится постоянной, когда вращающий момент уравновешивается тормозящим моментом.

Счетный механизм прибора измеряет число оборотов диска, т. е. величину, пропорциональную энергии, расходуемой на работу токоприемника.

Вращение диска счетчика без подключения нагрузки называется *самоходом*. Самоход может быть вызван увеличением напряжения сети, стальным компенсационным винтом постоянного магнита или вибрацией щита, на котором укреплен счетчик. Устранение самохода заключается в регулировке расстояния между пластинкой, закрепленной на полюсе обмотки напряжения, и пластинкой, закрепленной на оси алюминиевого диска. Так как электромагнит напряжения постоянно находится в работе, полюсная пластинка намагничивается и притягивает к себе пластинку на оси, в результате чего создается тормозное усилие, и диск прекращает вращаться.

Постоянная счетчика – энергия, измеряемая счетчиком за время одного оборота диска, Вт/об.

4.8. Приборы вибрационной системы

Приборы вибрационной системы предназначены *для измерения частоты переменного тока*. Действие вибрационных приборов основано на использовании явлений электромагнетизма и механического резонанса.

Каждая механическая система, способная совершать колебательные движения, обладает определенной частотой собственных колебаний, которая обусловливается массой в упругостью системы. При резонансе, т. е. при совпадении частот собственных колебаний системы и колебаний внешнего источника, амплитуда колебаний данной механической системы резко увеличивается. Это свойство используется в измерительных приборах вибрационной системы.

Вибрационный частотомер (рис. 4.11) состоит из электромагнита, стального якоря, укрепленного на бруске, и нескольких вибраторов с различной длиной или массой. Концы вибраторов отогнуты под прямым углом, окрашены белой краской и размещены в горизонтальной щели на шкале частотомера. Брусок крепится к пластинчатым прижимам, что обеспечивает некоторую подвижность механической системы.

Если по обмотке электромагнита пропустить переменный ток, то якорь будет сильнее притягиваться к полюсам в те моменты, когда ток имеет наибольшее значение, т. е. два раза за период. Колебания якоря передаются вибраторам. С наибольшей амплитудой будет колебаться

вибратор, собственная частота колебаний которого совпадает с частотой колебаний якоря. Цифра на шкале, стоящая против вибратора, колеблющегося с наибольшей амплитудой, укажет частоту тока в сети.

Большинство частотомеров вибрационной системы предназначены для измерения частот 45–55 Гц. Однако встречаются частотомеры, рассчитанные для измерения более высоких частот (до 1550–1650 Гц).

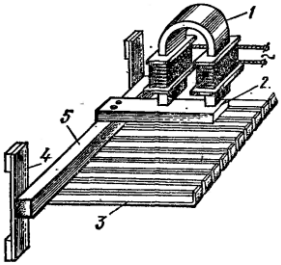


Рис. 4.11. Устройство частотомера вибрационной системы:
1 – электромагнит; *2* – якорь; *3* – вибраторы;
4 – пластинчатые прижимы; *5* – брусок

Достоинство приборов вибрационной системы – независимость показаний от напряжения сети.

Недостатки – зависимость показаний от механических вибраций, невозможность измерения высоких частот и прерывность шкалы, вследствие чего затрудняются измерения на промежуточных частотах, когда одновременно колеблется несколько вибраторов.

4.9. Приборы электростатической системы

Приборы электростатической системы предназначаются *для измерения напряжения в цепях постоянного и переменного тока*. В приборах этой системы вращающий момент возникает в результате взаимодействия двух систем заряженных проводников, одна из которых является подвижной. Отклонение подвижной части связано с изменением емкости, которое, в свою очередь, связано с изменением активной площади пластин.

Неподвижная часть измерительного механизма (рис. 4.12) состоит из одной или нескольких камер, что напрямую связано с чувствительностью прибора. Каждая камера представляет собой две металлические пластины с воздушным зазором между ними. В эти зазоры сво-

бодно входят тонкие алюминиевые пластины подвижной части.

Если к подвижным и неподвижным пластинам подвести измеряемое напряжение, то они окажутся заряженными противоположными по знаку зарядами, в результате чего под действием электростатических сил притяжения подвижные пластины будут стремиться войти внутрь камер. Поворот подвижных пластин, жестко укрепленных на оси, вызовет закручивание упругих элементов, создающих противодействующий момент. При равенстве вращающего и противодействующего моментов подвижная часть остановится, и по положению указателя на шкале можно будет определить измеряемое напряжение. При изменении полярности напряжения направление отклонения подвижной части не изменяется. Для успокоения подвижной части применяется магнитоиндукционный механизм.

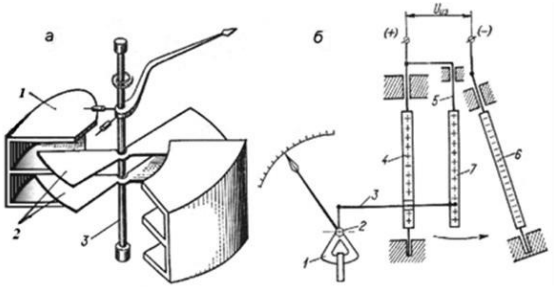


Рис. 4.12. Электростатический измерительный механизм:
а – с изменяющейся активной площадью электродов: *1* – неподвижные пластины; *2* – подвижные пластины; *3* – ось; *б* – с изменением расстояния между электродами: *1* – магнитоиндукционный успокоитель; *2* – ось; *3* – тяга; *4, 6* – неподвижная пластина; *5* – металлическая ленточка; *7* – подвижная пластина

Для того чтобы шкала прибора была равномерной, выбирают соответствующим образом форму подвижных и неподвижных пластин, т. е. задаются определенным законом изменения емкости с изменением угла поворота.

Достоинства приборов электростатической системы – независимость показаний от частоты, температуры и посторонних магнитных полей. При применении в цепях постоянного тока энергопотребление равно нулю.

Недостатки – зависимость показаний от действия электрических полей.

4.10. Измерение силы тока и напряжения

Для измерения силы тока и напряжения используют измерительные приборы различных систем – амперметры и вольтметры, условное обозначение и схемы включения которых показаны на рис. 4.13.

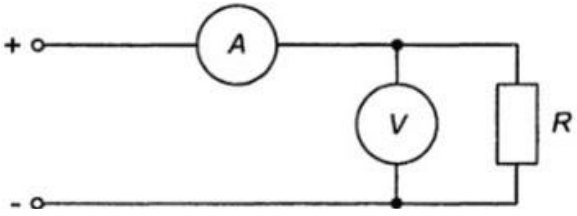


Рис. 4.13. Схема включения амперметра и вольтметра

Для измерения малых значений тока применяют гальванометры, микроамперметры, миллиамперметры, а для измерения очень низких напряжений – милливольтметры, микровольтметры.

Включение амперметра последовательно с нагрузкой не должно влиять на измеряемый ток в цепи, поэтому сопротивление его должно быть малым по сравнению с сопротивлением приемника энергии. При малом сопротивлении амперметра $R_а$ мала мощность, потребляемая им:

$$P_а = I_а^2 R_а. \qquad (4.7)$$

Включение вольтметра не должно влиять на измеряемое напряжение, поэтому сопротивление вольтметра должно быть бóльшим по сравнению с сопротивлением приемника, параллельно которому он включен. При большом сопротивлении вольтметра $R_в$ мал ток $I_в$ в нем и мала мощность потребляемая им:

$$P_в = I_в^2 R_в. \qquad (4.8)$$

Для измерения токов и напряжений, превышающих верхний предел измерения прибора, применяют при постоянном токе *шунты и добавочные сопротивления*, а при переменном токе – *измерительные трансформаторы тока и напряжения*.

Если амперметром, рассчитанным на измерение сравнительно небольшой силы тока, требуется измерить значительно большую вели-

чину, то параллельно амперметру подключают шунт $R_ш$. В действительности шунт включают последовательно с нагрузкой, а амперметр подключают к шунту (рис. 4.14).

Шунт представляет собой толстую константановую или манганиновую пластину. Применение в качестве шунтов (и добавочных резисторов) манганина и константана объясняется тем, что сопротивление этих металлов в незначительной степени зависит от температуры. Если сопротивление шунта в 9 раз меньше сопротивления обмотки амперметра, то 0,9 тока пройдет через шунт и только 0,1 – через прибор. При этом пределы измерений прибора расширяются в 10 раз. Сопротивление шунта определяют по формуле

$$R_ш = \frac{R_а}{n-1}, \qquad (4.9)$$

где $R_ш$ – сопротивление шунта;

$R_а$ – сопротивление обмотки амперметра;

n – число, показывающее, во сколько раз расширяются пределы измерения прибора.

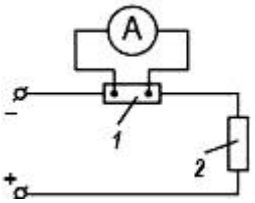


Рис. 4.14. Схема включения амперметра с шунтом:
1 – шунт; *2* – нагрузка

После подключения шунта на шкале прибора следует поставить множитель (в данном случае ×10). При включении амперметра с шунтом фактический ток в цепи определяется произведением показаний прибора на множитель.

Шунт должен иметь четыре контакта: к двум из них подключают прибор, а к двум другим – соединительные провода электрической цепи. Такое подсоединение исключает зависимость показаний прибора от переходных сопротивлений контактов.

Выбор сопротивления шунта зависит от внутреннего сопротивления прибора. Так, например, при расширении пределов измерений щитовых приборов, рассчитанных на десятки и сотни ампер, сопротивление шун-

тов может составлять тысячные или даже миллионные доли Ома.

В тех случаях, когда вольтметром, рассчитанным на измерение небольших напряжений, требуется измерить большую величину, последовательно с вольтметром включают добавочный резистор $R_д$ (рис. 4.15).

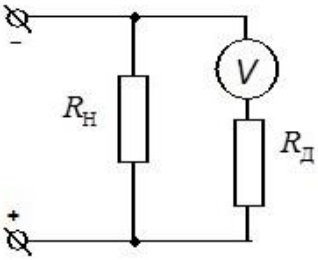


Рис. 4.15. Схема включения вольтметра
с добавочным сопротивлением

Если добавочное сопротивление $R_д$ будет в 9 раз больше сопротивления обмотки вольтметра, то 0,9 общего напряжения будет приходиться на добавочное сопротивление $R_д$ и только 0,1 – на сопротивление обмотки вольтметра $R_в$. При этом пределы измерений прибора расширятся в 10 раз.

Расчет сопротивления добавочного резистора производят по формуле

$$R_д = \frac{R_в}{n-1}, \qquad (4.10)$$

где $R_д$ – сопротивление добавочного резистора;

$R_в$ – сопротивление обмотки вольтметра;

n – число, показывающее, во сколько раз расширяются пределы измерений прибора.

Очевидно, что после включения добавочного резистора необходимо изготовить новую шкалу или на имеющейся шкале поставить соответствующий множитель. Так как сопротивление добавочных резисторов в щитовых приборах может достигать нескольких тысяч Ом, их выполняют в виде катушек из тонкого провода с большим удельным сопротивлением.

Шунты и добавочные резисторы можно монтировать как внутри прибора, так и подключать к его зажимам на время измерений. В последнем случае на шкале прибора указывают: «С отдельным шунтом»

или «С отдельным добавочным резистором».

4.11. Измерение мощности и энергии

Для измерения мощности в цепи постоянного тока не требуется специального прибора, так как мощность $P = UI$ легко может быть подсчитана по показаниям вольтметра и амперметра.

В цепи переменного тока мощность зависит не только от напряжения и тока, но и от сдвига фаз между ними:

$$P = UI\cos\varphi.$$

Поэтому произведение напряжения и тока не определяет мощности, так как для ее измерения необходим ваттметр электродинамической или ферродинамической системы. В электродинамическом ваттметре неподвижная катушка включается последовательно с нагрузкой $R_н$, а подвижная снабжается добавочным сопротивлением $R_д$ и включается параллельно нагрузке (рис. 4.16).

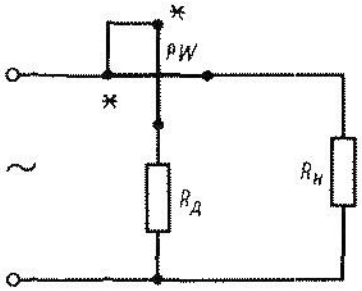


Рис. 4.16. Схема включения ваттметра

Таким образом, мгновенное значение тока неподвижной катушки равно току нагрузки, а ток подвижной катушки пропорционален напряжению на зажимах приемника и должен совпадать с напряжением по фазе. Чтобы ток совпадал по фазе с напряжением, добавочное активное сопротивление $R_д$ должно быть много больше индуктивного сопротивления самой обмотки, что дает возможность считать сопротивление цепи напряжения безреактивным.

Вращающий момент у электродинамического ваттметра пропорционален произведению напряжения и тока. При включении ваттметра

в цепь переменного тока на вращающий момент не влияет одновременное изменение направления тока в обеих катушках, но если поменять местами зажимы одной из двух катушек ваттметра, то это изменит фазу тока в этой катушке на 180° и направление вращающего момента. Для предупреждения возможности неправильного включения ваттметра относительные «начала» двух катушек ваттметра (генераторные зажимы), присоединенные к одному и тому же полюсу источника, отмечаются у зажимов звездочкой (*); концы этих катушек присоединяются к разным полюсам нагрузки.

Электродинамические ваттметры используются как в цепях переменного, так и постоянного тока.

Ферродинамические ваттметры обладают меньшей точностью и в цепях постоянного тока непригодны из-за влияния гистерезиса.

Для измерения расхода электрической энергии переменного тока применяют счетчики индукционной системы. Схема включения в сеть подобна схеме включения ваттметра, т. е. одна обмотка счетчика включается последовательно с нагрузкой, а вторая – параллельно ей (рис. 4.17). В отличие от ваттметров в цепи параллельной обмотки никаких добавочных сопротивлений нет, так как для создания вращающего магнитного поля токи в двух катушках должны быть сдвинуты фазе на угол, близкий к 90^{o}.

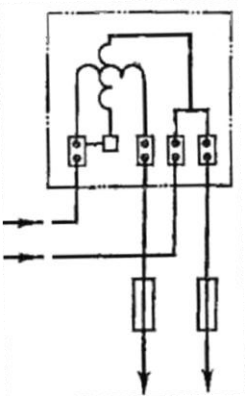


Рис. 4.17. Схема включения счетчика

На таблице счетчика указано напряжение, ток, частота, на которые он рассчитан, в каких единицах измеряют энергию, какому количеству

оборотов диска соответствует расход энергии в 1 кВт·ч.

4.12. Измерение сопротивлений

Для измерения сопротивления может быть использован метод амперметра и вольтметра. Используя показания приборов, включенных с измеряемым резистором, имеем:

$$R_x = \frac{U}{I}.$$

Для большей точности при измерении малых сопротивлений приборы следует включать так, чтобы сопротивление амперметра не влияло на показания вольтметра (рис. 4.18, *а*), а при измерении больших сопротивлений – так, чтобы сопротивление вольтметра не влияло на показания амперметра (рис. 4.18, *б*). Для ограничения силы тока включается добавочное сопротивление $R_д$.

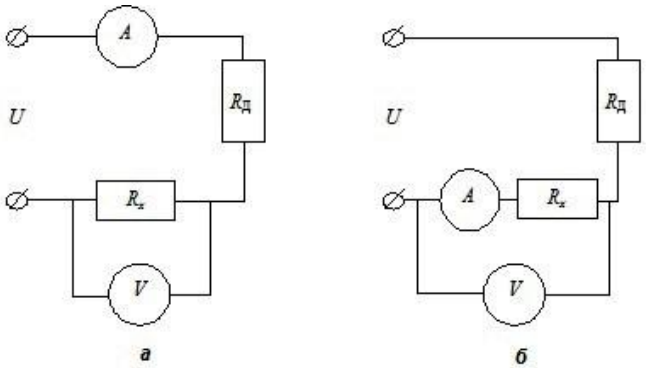


Рис. 4.18. Схема включения амперметра и вольтметра при измерении сопротивлений: *а* – малой величины; *б* – большой величины

Для непосредственного измерения сопротивлений служат приборы омметры и мегомметры, которые могут включаться в схему последовательно или параллельно.

Более точным методом измерения сопротивления и других электрических величин (индуктивностей, емкостей) является мостовая схема. Мост для измерения сопротивления состоит из трех плеч с регулируемыми сопротивлениями, которые вместе с четвертым измеряе-

мым сопротивлением образуют замкнутый контур. При измерении малых сопротивлений большую погрешность вносят сопротивления контактов и соединительных проводов. В таких случаях используют более сложные схемы (двойные мосты).

4.13. Измерение неэлектрических величин

Широко применяется измерение неэлектрических величин электрическими методами, так как с их помощью получают измерение дистанционное, непрерывное, высокой точности и чувствительности.

Для проведения измерений неэлектрическую величину необходимо преобразовать в зависящую от нее электрическую величину, определяемую показаниями электроизмерительного прибора. Такое преобразование выполняется первичным измерительным преобразователем (датчиком). Датчики бывают:

– параметрические – преобразовывают неэлектрическую величину в один из параметров электрической цепи (сопротивление, индуктивность, емкость);

– генераторные – преобразовывают неэлектрическую величину в ЭДС.

Устройства для измерения неэлектрических величин принципиально должны содержать преобразователь, соединительные провода и электроизмерительный прибор, шкала которого проградуирована в значениях измеряемой величины. В действительности эти устройства значительно сложнее, так как они содержат еще источники питания, стабилизаторы, выпрямители, усилители и т. д.

Лекция 5. ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

5.1. Коэффициент мощности, его значение и способы улучшения

Полная мощность, потребляемая из сети, состоит из активной P и реактивной Q составляющих:

$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}. \qquad (5.1)$$

Если построить треугольник мощностей (рис. 5.1), то он окажется прямоугольным с катетами активной P (Вт) и реактивной Q (вар) мощностей и гипотенузой полной S (ВА) мощности.

Объяснение понятия реактивной мощности основывается на том, что в системе переменного тока в случае, когда напряжение и ток возрастают и уменьшаются одновременно, передается только активная мощность, а когда между током и напряжением есть сдвиг во времени (сдвиг по фазе), передается как активная, так и реактивная мощность. Однако при расчете среднего за период значения присутствует только среднее значение активной мощности, которое приводит к «чистой» передаче энергии из одной точки в другую, тогда как среднее значение реактивной мощности равно нулю, независимо от структуры и режима работы системы.

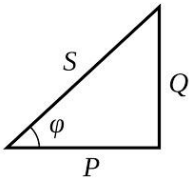


Рис. 5.1. Треугольник мощностей

В случае реактивной мощности количество энергии, протекающее в одном направлении, равно количеству энергии, протекающему в противоположном направлении (иначе говоря, реактивные элементы сети – конденсаторы, индуктивности и др. – обмениваются реактивной энергией). Это означает, что реактивная мощность не производится и не потребляется.

В математическом смысле «полная» энергия не имеет значения для потребителя энергии; следовательно, он должен заботиться об эффективности ее преобразования и сохранения. Точно так же, несмотря на то, что мы можем доказать математически, что потери реактивной мощности не являются реальными потерями и реактивная энергия вообще не тратится, у нас есть целый ряд причин для компенсации реактивной мощности. Это проще объяснить на основе физических аналогий.

Предположим, нам надо заполнить водой резервуар, выливая по одному ведру зараз. Единственный способ сделать это – подняться по лестнице с ведром воды и вылить ведро в емкость. Вылив ведро, мы должны спуститься по лестнице за следующим ведром. За этот цикл (подъем по лестнице и спуск) мы проделали определенную работу, причем энергия, затраченная на подъем, больше энергии, требуемой

для спуска.

Если бы мы поднялись по лестнице с пустым ведром и с ним же спустились, то мы не совершили бы никакой работы. Но энергия для подъема и спуска осталась бы такой же. И хотя мы не совершали никакой полезной работы, мы затратили некоторое количество энергии.

Таким образом, энергия, необходимая на подъем и спуск по лестнице с пустыми руками, требует реактивной мощности, но не полезной. А энергия, затраченная на подъем с ведром воды и спуск с пустым ведром, требует как активной мощности, так и реактивной.

Отношение активной мощности к полной называют коэффициентом мощности cos φ, значение которого определяется по формуле

$$\cos\varphi = \frac{P}{S}. \tag{5.2}$$

Коэффициент cos φ показывает, какая часть полной мощности расходуется на полезную работу. Отсюда активная мощность:

$$P = S\cos\varphi = UI\cos\varphi, \tag{5.3}$$

где U – напряжение, В;

I – сила тока, А;

cos φ – коэффициент мощности.

Выразим из этого выражения силу тока

$$I = \frac{P}{U\cos\varphi}. \tag{5.4}$$

Как показывает последнее выражение, при одной и той же развиваемой мощности, сила тока, поступающая из сети, зависит от значения cos φ. Низкий cos φ приводит к увеличению силы тока, сечения проводов, потерь в них мощности, к недоиспользованию мощности генераторов станций и трансформаторов подстанций.

Согласно «Правилам устройства электроустановок» (ПУЭ) cos φ не должен быть ниже 0,92–0,97. В зависимости от коэффициента мощности разработана шкала скидок и надбавок на пользование электроэнергией.

Коэффициент мощности повышают *естественным* (без применения специальных устройств) и *искусственным* (с применением различных компенсирующих устройств) способами.

Основным источником реактивной мощности на сельскохозяйст-

венных предприятиях является асинхронный электродвигатель. Для естественного способа повышения cos φ асинхронного двигателя характерны следующие мероприятия:

1) правильный подбор электродвигателя к рабочим машинам;

2) полная его загрузка (не ниже 75 % номинальной мощности);

3) ограничение работы электродвигателя на холостом ходу;

4) обеспечение номинального напряжения на его зажимах;

5) высококачественный ремонт;

6) соединение обмоток электродвигателя в звезду при нагрузке менее 50 % номинальной мощности, если он нормально работает при соединении обмоток в треугольник.

Искусственный способ повышения cos φ более эффективен. Прибегая к этому способу, в сеть включают перевозбужденные синхронные электродвигатели (синхронные компенсаторы) или специальные конденсаторы (последние имеют малые потери мощности, бесшумны в работе, надежны, просты и удобны в эксплуатации).

5.2. Получение трехфазного переменного тока

Трехфазной цепью переменного тока называется совокупность трех однофазных цепей, имеющих ЭДС одинаковой частоты, сдвинутые по фазе. Однофазные цепи, входящие в состав трехфазной цепи, называются *фазами трехфазной цепи*. Совокупность ЭДС, напряжений и токов трехфазной цепи называется *трехфазной системой*. При сдвиге фаз между ЭДС, напряжениями и токами на 120° и равенстве их амплитудных значений трехфазная система называется *симметричной*.

Источниками тока трехфазной системы являются трехфазные генераторы (рис. 5.2).

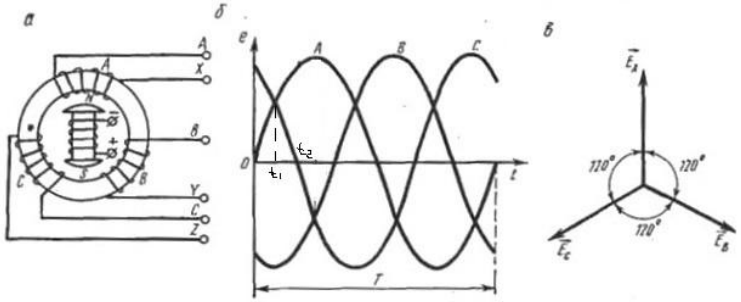


Рис. 5.2. Трехфазный генератор:
а – схема; *б* – график ЭДС; *в* – векторная диаграмма ЭДС

Простейший трехфазный генератор (рис. 5.2, *а*) имеет в статоре три одинаковые и сдвинутые друг относительно друга в пространстве на 120° обмотки, которые называются фазными обмотками генератора. Каждая обмотка изображена состоящей из одного витка, находящегося в двух пазах статора. В действительности обмотки имеют большое число витков. Одни выводы фазных обмоток называются началами фаз генератора и обозначаются буквами *A, B, C*, другие – концами фаз генератора и обозначаются буквами *X, Y, Z*.

Аналогично и фазы трехфазного генератора называются фазами *A, B, C*.

Индуктор трехфазного генератора представляет собой электромагнит постоянного тока. При вращении индуктора против часовой стрелки с угловой скоростью ω в фазных обмотках статора будут возбуждаться ЭДС индукции e_A, e_B и e_C со сдвигом фаз на 120°, т. е.:

$$e_A = E_m \sin \omega t,\ \ e_C = E_m \sin\left(\omega t + 120°\right),\ \ e_B = E_m \sin\left(\omega t + 240°\right).$$

Мгновенные значения ЭДС трехфазного генератора графически выразятся в виде трех синусоид, сдвинутых друг относительно друга по фазе на 120° (рис. 5.2, *б*).

Алгебраическая сумма мгновенных значений ЭДС трех фаз генератора в любой момент времени равна нулю (рис. 5.2, *в*).

5.3. Вращающееся магнитное поле

Любая система с числом фаз две и более самопроизвольно создает вращающееся магнитное поле. Как ранее было отмечено, наибольшее распространение получил трехфазный переменный ток, поэтому рассмотрим вращающееся магнитное поле трехфазной обмотки машины переменного тока.

На рис. 5.3, *а* показана простейшая трехфазная обмотка, включенная в сеть трехфазного тока, состоящая из трех однофазных обмоток, сдвинутых на угол 120º. По обмоткам проходят синусоидальные токи с одинаковыми амплитудами и одинаковой частотой (так как система является симметричной). Токи, проходящие в обмотках, возбуждают переменные магнитные потоки, которые пронизывают обмотки в на-

правлении, перпендикулярном их плоскостям.

Условимся считать положительными направления токов в катушках от начала к концу обмотки каждой фазы. Положительным направлениям токов соответствуют положительные направления магнитных полей. Направление магнитного поля, созданного трехфазной обмоткой, для различных моментов времени определим следующим образом (рис. 5.3, *б*).

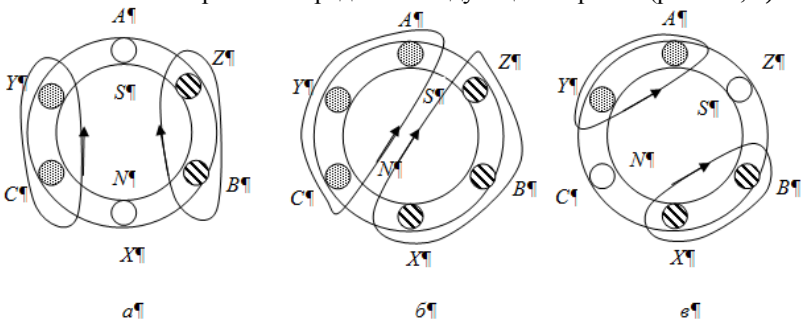


Рис. 5.3. Магнитное поле трехфазной обмотки в различные моменты времени:
а – $t = 0$; *б* – $t = t_1$; *в* – $t = t_2$

В момент времени $t = 0$ ток в обмотке AX равен нулю, в обмотке BY – отрицателен, в обмотке CZ – положителен. Следовательно, в этот момент тока в проводниках A и X нет, в проводниках C и Z он имеет положительное направление, в проводниках B и Y – отрицательное направление (рис. 5.3, *а*).

Таким образом, в выбранный нами момент $t = 0$ в проводниках C и Y ток направлен на зрителя, а в проводниках B и Z – от зрителя. При таком направлении тока согласно правилу буравчика созданное магнитное поле направлено снизу вверх, т. е. в нижней части внутренней окружности статора находится северный полюс N, а в верхней – южный S.

В момент времени $t = t_1$ в фазах A и C ток положителен, в фазе B – отрицателен. Следовательно, в проводниках A, C и Y токи направлены на зрителя, а в проводниках B, X и Z – от зрителя (рис. 5.3, *б*) и магнитное поле повернуто на некоторый угол по часовой стрелке относительно своего начального направления.

В момент времени $t = t_2$ в фазе A ток положителен, в фазе B – отрицателен, а в фазе C – отсутствует. Следовательно, в проводниках A и Y токи направлены на зрителя, а в проводниках B и X – от зрителя (рис. 5.3, *в*) и магнитное поле повернуто еще на больший угол относи-

тельно начального направления.

Таким образом, во времени происходит непрерывное и равномерное изменение направления магнитного поля, созданного трехфазной обмоткой, т. е. магнитное поле вращается с постоянной скоростью. В нашем случае вращение магнитного поля происходит по часовой стрелке.

Если изменить чередование фаз трехфазной обмотки, т. е. изменить подключение к сети любых двух из трех обмоток, то изменится и направление вращения магнитного поля. На рис. 5.4 показана трехфазная обмотка, у которой изменено подключение обмоток *B* и *C* к сети. Если рассмотреть магнитные поля для ранее выбранных моментов времени $t = 0$, $t = t_1$ и $t = t_2$, то видно, что магнитное поле вращается теперь против часовой стрелки.

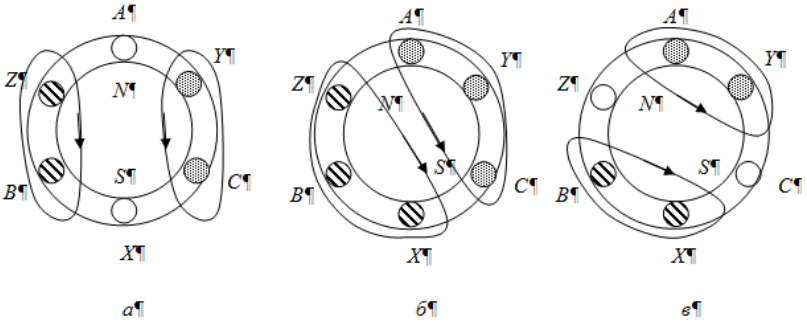


Рис. 5.4. Магнитное поле трехфазной обмотки в различные моменты времени после изменения чередования фаз:
а – $t = 0$; *б* – $t = t_1$; *в* – $t = t_2$

В момент времени $t = 0$ результирующее магнитное поле было направлено по вертикальной оси (рис. 5.4, *а*). За время, равное одному периоду изменения тока в обмотках, магнитный поток повернется на один полный оборот в пространстве и будет вновь направлен по вертикальной оси так же, как и в момент $t = 0$.

Если частота тока f, т. е. ток претерпевает f изменений в одну секунду, то магнитный поток трехфазной обмотки совершит f оборотов в секунду или $60f$ оборотов в минуту, т. е.

$$n = 60f,$$

где n – частота вращения магнитного поля в минуту.

Мы рассмотрели простейший случай, когда обмотка имеет одну пару полюсов. Если обмотку статора выполнить так, что провода каждой фазы будут состоять из 2, 3, 4 и т. д. одинаковых групп, симметрично расположенных по окружности статора, то число пар полюсов будет соответственно 2, 3, 4 и т. д.

В многополюсных обмотках магнитное поле за один период изменения тока поворачивается на угол, соответствующий расстоянию между двумя одноименными полюсами. Таким образом, если обмотка имеет 2, 3, 4 и т. д. пары полюсов, то магнитное поле за один период изменения тока поворачивается на ½, ⅓, ¼ и т. д. часть окружности статора. Обозначив буквой p число пар полюсов, найдем путь, пройденный магнитным полем за один период изменения тока. Этот путь равен $1/p$ части окружности статора. Следовательно, частота вращения магнитного поля в минуту обратно пропорциональна числу пар полюсов, т. е.

$$n = \frac{60\,f}{p}. \qquad (5.5)$$

5.4. Способы соединения фаз источников и приемников электрической энергии

Существует 2 способа соединения фаз источников и приемников электрической энергии: по схеме «звезда» и по схеме «треугольник».

Рассмотрим способ соединения фаз источников и приемников электрической энергии по схеме «звезда».

Каждая фаза генератора содержит источник электроэнергии и может быть самостоятельно подключена на нагрузку (рис. 5.5).

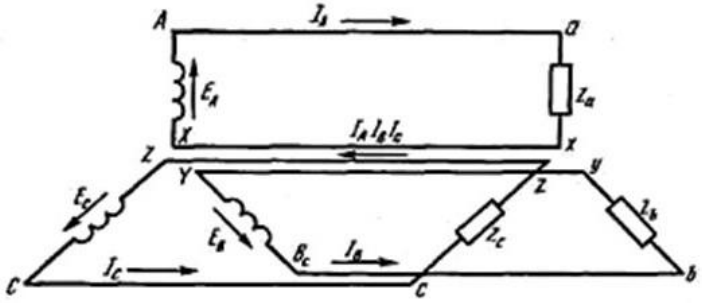


Рис. 5.5. Схема подключения нагрузки к трехфазному генератору

Шестипроводную трехфазную систему можно заменить четырехпроводной, если концы фаз генератора и фазных нагрузок соединить в отдельные узлы (0, 0') (рис. 5.6). Такое соединение называется соединением звездой и обозначается значком *Y*.

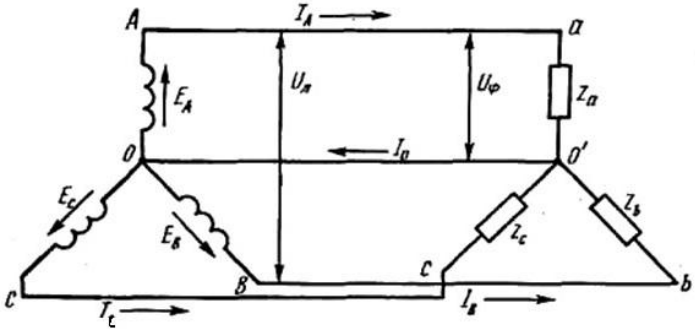


Рис. 5.6. Схема соединения обмоток генератора и фазных нагрузок звездой

Провода, соединяющие начала фаз генератора с приемниками энергии, называются линейными. **Ток**, проходящий по линейному проводу, называется **линейным**, а по фазной нагрузке – **фазным**. При соединении звездой линейный ток равен фазному, так как линейный и фазный провода соединяются последовательно:

$$I_л = I_ф. \tag{5.6}$$

Разность потенциалов между началом и концом фаз генератора, фазных нагрузок, между линейным и нулевым проводами называется **фазным напряжением**. Разность потенциалов между началами фаз генератора, фазных нагрузок и линейными проводами называется **линейным напряжением**. При соединении симметричной нагрузки звездой линейное напряжение больше напряжения на фазе нагрузки в $\sqrt{3}$ раз:

$$U_л = \sqrt{3}U_ф. \tag{5.7}$$

Провод, соединяющий между собой концы фазных нагрузок и концы фаз генератора называется **нейтральным** (нулевым). Ток нулевого

провода равен геометрической сумме токов трех фаз:

$$\overline{I_N} = \overline{I_A} + \overline{I_B} + \overline{I_C} .$$

В трехфазной симметричной системе при равномерной нагрузке ток нулевого провода равен нулю, поэтому надобность в нем отпадает. При неравномерной нагрузке ток I_N не равен нулю, поэтому он обязателен в четырехпроводной системе, хотя его и выполняют обычно с меньшим, чем линейные провода, поперечным сечением. В случае отсутствия нулевого провода или его обрыва при неравномерной нагрузке, возникает резкое изменение напряжения на фазах приемника, получившее название **напряжения смещения нейтрали** (рис. 5.7).

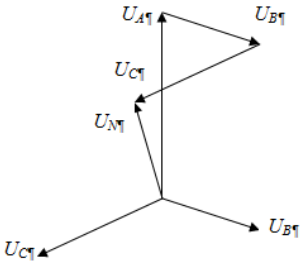


Рис. 5.7. Напряжение нейтрального провода (в четырехпроводной системе) или напряжение смещения нейтрали (в трехпроводной системе)

В четырехпроводной системе напряжение нулевого провода уравновешивает напряжение всех трех фаз, в результате чего суммарное напряжение всей цепи равно нулю. В трехпроводной системе на величину напряжения смещения нейтрали произойдет перераспределение значения напряжений всех фаз в зависимости от сопротивления фазных нагрузок. Таким образом, отключение нулевого провода при неравномерной нагрузке недопустимо.

При наличии нейтрального провода каждая фаза трехфазной цепи независима от других фаз. Фазные напряжения всех трех фаз одинаковы несмотря на разную нагрузку. Изменение фазной нагрузки вызывает изменение силы тока в этой фазе, которая влияет на силу тока только в нулевом проводе и не влияет на силу тока в других фазах.

К достоинствам способа соединения по схеме «звезда» следует отнести наличие нейтрального провода, который позволяет включать в сеть несимметричную нагрузку, а также получить 2 разных напряже-

ния в одной сети.

Недостатки: линейные и фазные провода должны быть одного сечения, при обрыве фазы ее приемники перестают работать.

Рассмотрим способ соединения фаз источников и приемников электрической энергии по схеме «треугольник».

Соединение, при котором конец первой фазы соединяем с началом второй фазы, конец второй – с началом третьей, конец третьей – с началом первой фазы, называется соединением по схеме «треугольник» и обозначается буквой Δ. В нагрузках, не имеющих электромагнитной взаимосвязи, начала и концы определяют произвольно. При соединении нагрузок треугольником фазные нагрузки подключаются под линейные напряжения, т. е. находятся между линейными проводами (рис. 5.8).

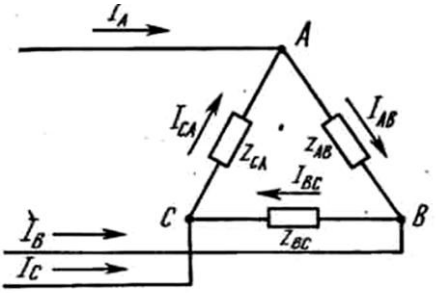


Рис. 5.8. Схема соединения нагрузки трехфазной цепи треугольником

При подключении нагрузки треугольником нет различия между линейным и фазным напряжением:

$$U_{л} = U_{ф}. \tag{5.8}$$

При соединении симметричной нагрузки треугольником линейный ток больше фазного в $\sqrt{3}$ раз:

$$I_{л} = \sqrt{3} I_{ф}. \tag{5.9}$$

При соединении треугольником фазные приемники ведут себя независимо друг от друга, так как каждый из них подключен к двум линейным проводам. Фазный ток при данном напряжении зависит только от величины и характера фазной нагрузки.

К *достоинствам способа соединения по схеме «треугольник»* можно отнести разное сечение линейных и фазных проводов, при обрыве

одной из фаз потребители продолжат работу, так как подключены к двум линейным проводам, но напряжение на них будет иметь меньшую величину.

Недостатки: невозможность включения несимметричной нагрузки, одно значение напряжения в сети.

Трехфазные двигатели и трансформаторы могут соединяться как звездой, так и треугольником. Двоякий способ подключения двигателей трехфазного тока позволяет широко их использовать. Если их фазные обмотки рассчитаны на напряжение 220 В, то в сеть с линейным напряжением 380 В они включаются звездой, а в сеть с линейным напряжением 220 В – треугольником, и в паспорте двигателя указывается Y/Δ – 380/220. Обмотки генератора треугольником соединяются редко, так как при малейшей несимметричности системы или несинусоидальном изменении фазных ЭДС в обмотках генератора, соединенных треугольником, будет циркулировать внутрифазный ток.

Лекция 6. ТРАНСФОРМАТОРЫ

6.1. Общие сведения о трансформаторах

Трансформатором называется статический электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования напряжения в сетях переменного тока.

Трансформаторы получили очень широкое практическое применение при передаче электрической энергии на большие расстояния, для распределения энергии между ее приемниками и в различных выпрямительных, сигнальных, усилительных и других устройствах.

При передаче электрической энергии от электростанций к ее потребителям большое значение имеет величина тока, проходящего по проводам. В зависимости от силы тока выбирают сечение проводов линии передачи энергии и, следовательно, определяют стоимость проводов, а также потери энергии в них.

Если при одной и той же передаваемой мощности увеличить напряжение, то ток в той же мере уменьшится, а это позволит применять провода с меньшим поперечным сечением для устройства линии передачи электрической энергии и уменьшит расход цветных металлов, а также потери мощности в линии.

При неизменной передаваемой мощности поперечное сечение провода и потери мощности в линии обратно пропорциональны напряже-

нию.

Электрическая энергия вырабатывается на электростанциях синхронными генераторами при напряжении 11–18 кВ (в некоторых случаях при 30–35 кВ). Хотя это напряжение очень велико для непосредственного его использования потребителями, оно недостаточно для экономичной передачи электроэнергии на большие расстояния. Для увеличения напряжения применяют *повышающие трансформаторы*.

Приемники электрической энергии (лампы накаливания, электродвигатели и т. д.) из соображений безопасности для лиц, пользующихся этими приемниками, рассчитываются на более низкое напряжение (110–380 В). Кроме того, высокое напряжение требует усиленной изоляции токопроводящих частей, что делает конструкцию аппаратов и приборов очень сложной. Поэтому высокое напряжение, при котором передается энергия, не может непосредственно использоваться для питания приемников, вследствие чего к потребителям энергия подводится через *понижающие трансформаторы*.

Таким образом, электрическая энергия при передаче от места ее производства к месту потребления трансформируется несколько раз (3–4 раза). Кроме того, понижающие трансформаторы в распределительных сетях включаются неодновременно и не всегда на полную мощность, вследствие чего мощности установленных трансформаторов значительно больше (в 7–8 раз) мощностей генераторов, вырабатывающих электроэнергию на электростанциях.

Трансформатор имеет две изолированные обмотки, помещенные на стальном магнитопроводе (рис. 6.1). Обмотка, включенная в сеть источника электрической энергии, называется *первичной*; обмотка, от которой энергия подается к приемнику, – *вторичной*.

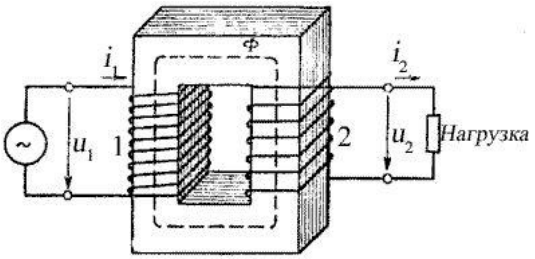


Рис. 6.1. Схема трансформатора:
1 – первичная обмотка; *2* – вторичная обмотка

Обычно напряжения первичной и вторичной обмоток неодинаковы. Если вторичное напряжение больше первичного, то трансформатор называется *повышающим*, если же вторичное напряжение меньше первичного, то *понижающим*. Любой трансформатор может быть использован и как повышающий, и как понижающий.

6.2. Принцип действия и устройство трансформатора

Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции. Если первичную обмотку трансформатора включить в сеть источника переменного тока, то по ней будет проходить переменный ток, который возбудит в сердечнике трансформатора переменный магнитный поток. Магнитный поток, пронизывая витки вторичной обмотки трансформатора, индуктирует в этой обмотке ЭДС. Под действием этой ЭДС по вторичной обмотке и через приемник энергии будет протекать ток. Таким образом, электрическая энергия, трансформируясь, передается из первичной цепи во вторичную, но при другом напряжении, на которое рассчитан приемник энергии, включенный во вторичную цепь.

Для улучшения магнитной связи между первичной и вторичной обмотками их помещают на стальном магнитопроводе.

В зависимости от конфигурации магнитной системы, трансформаторы подразделяют на стержневые (рис. 6.2, *а*), броневые (рис. 6.2, *б*) и тороидальные (рис. 6.2, *в*).

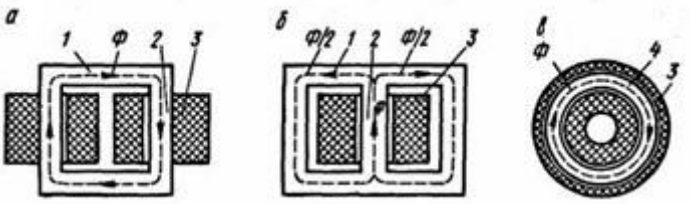


Рис. 6.2. Конструкции однофазных трансформаторов:
а – стержневой; *б* – броневой; *в* – тороидальный

Стержнем *2* называют часть магнитопровода, на которой размещают обмотки. Часть магнитопровода, на которой обмотки отсутствуют, называют ярмом *1*. Трансформаторы большой и средней мощности

обычно выполняют стержневыми. Они имеют лучшие условия охлаждения и меньшую массу, чем броневые.

Для уменьшения потерь от вихревых токов магнитопроводы трансформаторов собирают из тонких пластин (толщиной 0,5 и 0,35 мм) трансформаторной стали, покрытых изоляцией (жаростойким лаком).

Материалом магнитопровода является трансформаторная сталь Э-42, Э-43, Э-43А, Э-320, Э-330, Э-ЗЗОА и др.

Трансформаторы малой мощности и микротрансформаторы часто выполняют броневыми, так как они имеют более низкую стоимость по сравнению со стержневыми трансформаторами из-за меньшего числа катушек и упрощения сборки и изготовления. Применяют также и маломощные трансформаторы стержневого типа с одной или двумя катушками *3*. Преимущество тороидальных трансформаторов – отсутствие в магнитной системе воздушных зазоров, что значительно уменьшает магнитное сопротивление магнитопровода. В трансформаторах малой мощности магнитопровод собирают из штамповых пластин П-, Ш- и О- образной формы (рис. 6.3, *а*, *б*, *в*).

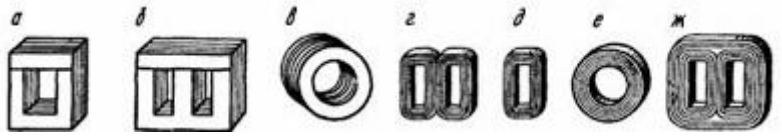


Рис. 6.3. Магнитопроводы трансформаторов:
а – пластинчатый стержневой; *б* – пластинчатый броневой;
в – пластинчатый кольцевой; *г* – ленточный броневой; *д* – ленточный стержневой;
е – ленточный кольцевой; *ж* – магнитопровод трехфазного трансформатора

Трансформаторы большой мощности в настоящее время изготовляют исключительно стержневыми, а трансформаторы малой мощности часто делают броневыми.

Широкое применение получили магнитопроводы, навитые из узкой ленты электротехнической стали или из специальных железоникелевых сплавов типа пермаллой. Их можно использовать для стержневых, броневых, тороидальных и трехфазных трансформаторов (рис. 6.3, *г*, *д*, *е*, *ж*).

Холоднокатаная сталь имеет высокую магнитную проницаемость (больше чем горячекатаная) в направлении, совпадающем с направлением проката, тогда как перпендикулярно прокату магнитная проницаемость относительно низкая. Поэтому магнитопроводы из холодно-

катаной стали делают так, чтобы магнитные линии замыкались по направлению проката стали. Магнитопроводы трансформаторов малой мощности изготовляют из ленты холоднокатаной стали.

В трансформаторах больших мощностей магнитопроводы собирают из полос стали. Холоднокатаную сталь разрезают так, чтобы направление магнитных линий в собранном магнитопроводе совпадало с направлением прокатки стали. У горячекатаной стали (Э-42, Э-43 и др.) магнитная проницаемость одинакова во всех направлениях.

Монолитность конструкции ленточного магнитопровода обеспечивается путем применения клеющих лаков и эмалей.

Для трансформаторов, работающих при частоте 400 и 500 Гц, магнитопроводы выполняют из специальных сортов электротехнической стали с малыми удельными потерями при повышенной частоте, а также из железоникелевых сплавов типа пермаллой, которые имеют большие начальную и максимальную магнитные проницаемости и позволяют получить магнитные поля с большой индукцией при сравнительно слабой напряженности. Толщина листов составляет 0,2; 0,15; 0,1 и 0,08 мм. При частотах более 10–20 кГц магнитопроводы прессуют из порошковых материалов (магнитодиэлектриков и ферритов).

В современных трансформаторах (рис. 6.4) первичную *1* и вторичную *3, 4, 5* обмотки стремятся расположить для лучшей магнитной связи как можно ближе одну к другой. При этом на каждом стержне магнитопровода *2* размещают обе обмотки либо концентрически – одну поверх другой (рис. 6.4, *а*), либо в виде нескольких дисковых катушек, чередующихся по высоте стержня (рис. 6.4, *б*). В первом случае обмотки называют *концентрическими*, во втором – *чередующимися*. В силовых трансформаторах обычно применяют концентрические обмотки, причем ближе к стержням располагают обмотку НН, требующую меньшую изоляцию относительно остова трансформатора, а снаружи – обмотку ВН.

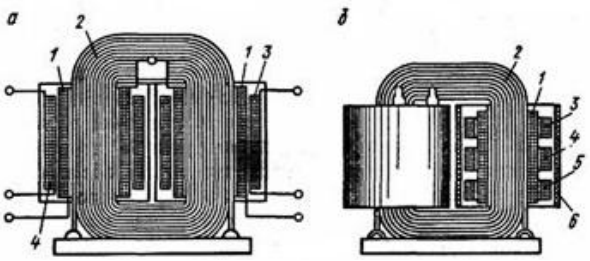


Рис. 6.4. Расположение обмоток на магнитопроводе:
а – концентрическое; *б* – чередующееся

В трансформаторах малой мощности и микротрансформаторах используют однослойные и многослойные обмотки из круглого провода с эмалевой или хлопчатобумажной изоляцией, которые наматывают на гильзу или каркас из электрокартона; между слоями проводов прокладывают изоляцию из кабельной бумаги или ткани.

В микротрансформаторах обмотки часто выполняют из алюминиевой фольги толщиной 30–20 мкм. Изоляцией здесь служит окисная пленка фольги, которая обладает достаточной теплоемкостью, теплопроводностью и может выдерживать рабочее напряжение до 100 В.

При цилиндрических обмотках поперечному сечению магнитопровода желательно придать круглую форму, так как в этом случае в площади, охватываемой обмотками, не остается промежутков, не заполненных сталью. Чем меньше незаполненных промежутков, тем меньше длина витков обмоток и, следовательно, масса обмоточного провода при заданной площади поперечного сечения магнитопровода. Однако магнитопроводы круглого поперечного сечения не делают. Для изготовления магнитопровода круглого сечения надо было бы собрать его из большого числа стальных листов различной ширины. Поэтому у трансформаторов большой мощности магнитопровод имеет ступенчатое поперечное сечение с числом ступеней не более 9–10. Число ступеней сечения сердечника определяется числом углов в одной четверти круга.

Для лучшего охлаждения в магнитопроводах и в обмотках мощных трансформаторов устраивают охлаждающие каналы в плоскостях, параллельных и перпендикулярных плоскости стальных листов.

В трансформаторах малой мощности поперечное сечение магнитопровода имеет прямоугольную форму и обмоткам придают форму прямоугольных катушек. При малых токах радиальные механические усилия, возникающие при работе трансформатора и действующие на обмотки, будут малы, так что изготовление обмоток упрощается.

В паспорте трансформатора указывают его номинальную мощность S, номинальные напряжения U_1 и U_2 и токи I_1 и I_2 первичной и вторичной обмоток при полной (номинальной) нагрузке.

Номинальной мощностью трансформаторов называется полная мощность, отдаваемая его вторичной обмоткой при полной (номинальной) нагрузке. Номинальная мощность выражается в единицах полной

мощности, т. е. в вольт-амперах (ВА) или киловольт-амперах (кВА). В ваттах и киловаттах измеряют активную мощность трансформатора, т. е. ту мощность, которая может быть преобразована из электрической в механическую, тепловую, химическую, световую и т. д.

Сечения проводов обмоток и всех частей машины или любого электрического аппарата определяются не активной составляющей тока или активной мощностью, а полным током, проходящим по проводнику, и, следовательно, полной мощностью.

Трансформаторы малой мощности имеют большую удельную поверхность охлаждения, и естественное воздушное охлаждение является для них вполне достаточным.

Трансформаторы большой мощности устраивают с масляным охлаждением, для чего помещают их в металлические баки, наполненные минеральным маслом. Наиболее широко распространено естественное охлаждение стенок бака трансформатора.

Для увеличения охлаждающей поверхности в стенки баков вваривают стальные трубы или радиаторы.

Масло в баке трансформатора в процессе эксплуатации соприкасается с окружающим воздухом и подвергается окислению, увлажнению и загрязнению, вследствие чего уменьшается его электрическая прочность.

Для обеспечения нормальной эксплуатации трансформатора необходимо контролировать температуру масла, заменять его новым, производить периодическую сушку и очистку.

6.3. Работа трансформатора под нагрузкой

При холостом ходе трансформатора (нагрузки нет) вторичная обмотка его разомкнута и ток в этой обмотке не проходит. В первичной обмотке при этом проходит ток холостого хода I_0, который намного меньше тока этой обмотки при номинальной нагрузке трансформатора. Намагничивающая сила холостого хода $I_0\omega_1$ возбуждает переменный магнитный поток, который замыкается по магнитопроводу и индуктирует в первичной и вторичной обмотках ЭДС, зависящие от числа витков этих обмоток ω_1 и ω_2, амплитуды магнитного потока Φ_m (Вб) и частоты его изменения f. Действующие значения ЭДС первичной E_1 и вторичной E_2 обмоток:

$$E_1 = 4{,}44\omega_1 f\Phi_m,$$
$$E_2 = 4{,}44\omega_2 f\Phi_m.$$

Так как при холостом ходе во вторичной обмотке тока нет, напряжение на зажимах этой обмотки равно ЭДС, т. е. $U_2 = E_2$. В первичной обмотке проходит небольшой ток холостого хода, и напряжение этой обмотки незначительно отличается от ЭДС, т. е. $U_1 \approx E_1$. Отношение напряжений на зажимах первичной и вторичной обмоток трансформатора при холостом ходе (без нагрузки) называется *коэффициентом трансформации* и обозначается буквой *k*. т. е.

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{4,44\omega_1 f \Phi_m}{4,44\omega_2 f \Phi_m} = \frac{\omega_1}{\omega_2}. \qquad (6.1)$$

Таким образом, если в трансформаторе первичная и вторичная обмотки имеют различное число витков, то при включении первичной обмотки в сеть переменного тока с напряжением U_1 на зажимах вторичной обмотки возникает напряжение U_2, не равное напряжению U_1.

Если вторичную обмотку трансформатора замкнуть на какой-либо приемник энергии (рис. 6.5, *а*), то во вторичной цепи будет проходить ток I_2, а в первичной обмотке – ток I_1. Магнитодвижущие силы первичной и вторичной обмоток $I_1\omega_1$ и $I_2\omega_2$ совместно возбудят в магнитопроводе результирующий магнитный поток. Пренебрегая падением напряжения в сопротивлении первичной обмотки трансформатора и потоком рассеяния, можно допустить при любой его нагрузке приближенное равенство абсолютных величин приложенного напряжения и уравновешивающей это напряжение ЭДС первичной обмотки, т. е. $U_1 = E_1$. Поэтому при неизменном по величине приложенном напряжении U_1 будет приблизительно неизменной ЭДС E_1, индуктированная в первичной обмотке при любой нагрузке трансформатора. Так как ЭДС E_1 зависит от магнитного потока, то и магнитный поток в магнитопроводе трансформатора при любом изменении нагрузки будет приблизительно неизменным и равным магнитному потоку при холостом ходе Φ_m.

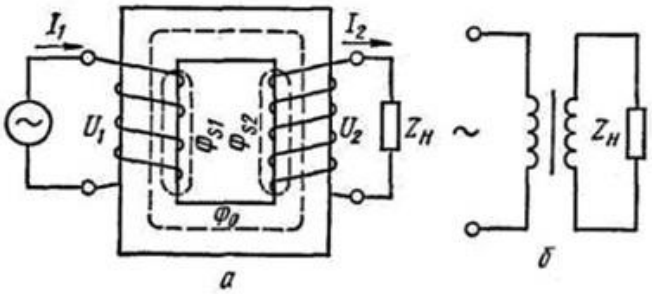


Рис. 6.5. Схема работы трансформатора (*а*) и его условное обозначение (*б*)

Следовательно, геометрическая сумма МДС первичной и вторичной обмоток трансформатора при нагрузке равна МДС холостого хода, т. е.

$$I_1\omega_1 + I_2\omega_2 = I_0\omega_1.$$

Откуда

$$I_1\omega_1 = I_0\omega_1 - I_2\omega_2.$$

Таким образом, при нагрузке трансформатора ток первичной обмотки возбуждает магнитный поток в магнитопроводе с неизменной амплитудой (составляющая I_0) и уравновешивает размагничивающее действие тока вторичной обмотки (составляющая $-I_2$).

Ток I_2, проходящий по вторичной обмотке при нагрузке трансформатора, создает свой магнитный поток, который согласно закону Ленца направлен встречно магнитному потоку в сердечнике и стремится его уменьшить; это бы вызвало уменьшение ЭДС E_1 и увеличение тока I_1. Чтобы результирующий магнитный поток в сердечнике остался неизменным, встречный магнитный поток вторичной обмотки должен быть уравновешен магнитным потоком первичной обмотки.

Следовательно, при увеличении тока вторичной обмотки I_2 возрастает размагничивающий магнитный поток этой обмотки и одновременно увеличиваются как ток первичной обмотки I_1, так и магнитный поток, создаваемый этим током. Так как магнитный поток первичной обмотки уравновешивает размагничивающий поток вторичной обмотки, то результирующий магнитный поток в сердечнике оказывается неизменным.

В понижающем трансформаторе напряжение первичной обмотки U_1 больше напряжения вторичной обмотки U_2 в k раз и ток вторичной обмотки I_2 больше тока первичной обмотки I_1 также в k раз. В повышающем трансформаторе имеет место обратное соотношение между

напряжениями его обмоток и токами в них.

Если, например, включить на полную нагрузку трансформатор, напряжения первичной и вторичной обмоток которого равны U_1 = 220 В, U_2 = 24 В, то при номинальном токе первичной обмотки I_1 = 3 А, ток во вторичной обмотке $I_2 = 3 \cdot 220/24 = 27{,}5$ А.

Таким образом, в обмотке с более высоким напряжением ток меньше, чем в обмотке с более низким напряжением. Обмотка с более высоким напряжением имеет большее число витков и наматывается из провода с меньшим поперечным сечением, чем обмотка с более низким напряжением.

При работе трансформатора под нагрузкой в первичной и во вторичной его обмотках проходят токи, создающие потоки рассеяния Φ_{S1} и Φ_{S2}. Эти магнитные потоки сцеплены только с витками той обмотки, током которой они создаются, и всегда много меньше основного магнитного потока Φ_m, замыкающегося по магнитопроводу трансформатора (по стали), так как потоки рассеяния частично проходят в немагнитной среде. Потоки рассеяния индуктируют в обмотках ЭДС рассеяния, которые в небольшой степени изменяют напряжение вторичной обмотки трансформатора при изменении его нагрузки. Условное обозначение трансформатора показано на рис. 6.5, *б*.

Чтобы не устанавливать отдельный трансформатор на каждое рабочее напряжение, целесообразно на одном трансформаторе иметь несколько вторичных обмоток с различным числом витков. Такие трансформаторы, называемые многообмоточными, широко применяют в радиоприемниках, телевизорах, усилителях и другой аппаратуре, требующей для питания несколько переменных напряжений различной величины. Соотношения числа витков обмоток определяются их напряжениями, т. е. $\omega_2/\omega_1 = U_2/U_1$ и $\omega_3/\omega_1 = U_3/U_1$.

Ток в первичной обмотке равен суммарному току всех приведенных вторичных обмоток: $I_1 = I_2U_2/U_1 + I_3U_3/U_1 + \ldots$

Изменение тока в любой вторичной обмотке вызывает соответствующее изменение тока первичной обмотки. При этом несколько изменяются напряжения всех вторичных обмоток трансформатора, т. е. напряжение любой вторичной обмотки зависит от тока как в этой обмотке, так и в любой другой вторичной обмотке трансформатора.

6.4. Трехфазные трансформаторы

Все полученное выше для однофазных трансформаторов можно

распространить на каждую фазу трехфазного трансформатора в случае симметричной нагрузки. Рассмотрим особенности устройства и работы трехфазных трансформаторов, которые изготавливают преимущественно стержневыми.

Для трансформирования трехфазной системы токов можно воспользоваться трансформаторной группой – тремя однофазными трансформаторами (рис. 6.6, *а*), работающими как один агрегат. Но можно объединить три однофазных трансформатора в один трехфазный аппарат и при этом получить экономию материалов. Покажем наглядно, что обусловливает экономию материала при построении трехфазного трансформатора.

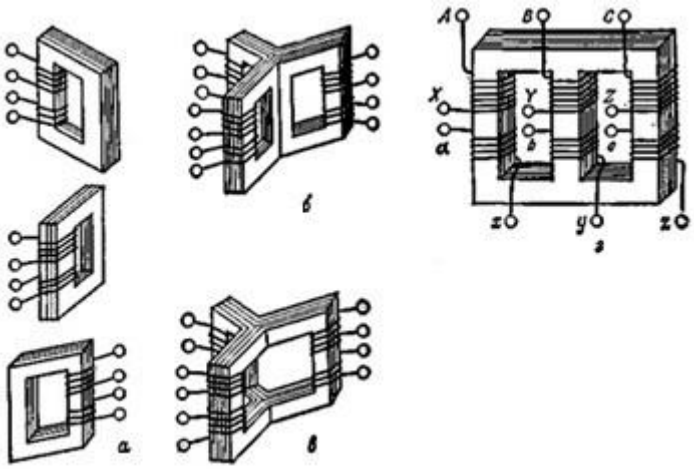


Рис. 6.6. Схема построения трехфазного трансформатора:
а – три однофазных трансформатора; *б* – три однофазных трансформатора объединены в один магнитопровод; *в* – три однофазных трансформатора с общим магнитопроводом без нейтрального стержня; *г* – трехфазный стержневой трансформатор

Составим магнитопровод трехфазного трансформатора, оставив без изменения те части магнитопроводов трех однофазных трансформаторов, на которых расположены обмотки, и соединив свободные части вместе (рис. 6.6, *б*). Такое построение магнитной системы можно сопоставить с соединением трех электрических цепей по схеме «звезда». Но для трехфазной системы при симметричной нагрузке нейтральный провод не нужен, так как тока в нейтральном проводе нет; отказав-

шись от нейтрального провода, получим экономию меди. Нейтральному проводу в магнитной системе трехфазного трансформатора соответствует средний общий стержень. При симметричной трехфазной системе этот стержень не нужен и может быть удален (рис. 6.6, *в*), так как сумма мгновенных значений трех магнитных потоков в любой момент времени равна нулю.

Симметричный магнитопровод (рис. 6.6, *в*) неудобен для изготовления и обычно заменяется несимметричным магнитопроводом (рис. 6.6, *г*), который можно считать выпрямленным вариантом симметричного магнитопровода. Симметричная трехфазная система первичных токов трансформатора возбуждает и в таком несимметричном магнитопроводе симметричную систему магнитных потоков. Но вследствие неравенства магнитных сопротивлений различных стержней магнитопровода значения намагничивающих токов отдельных фаз не одинаковые. Однако эта несимметрия намагничивающих токов существенного значения не имеет.

На каждом стержне трехфазного трансформатора размещаются обмотки высшего и низшего напряжения одной фазы. Стержни соединяются между собой ярмом сверху и снизу. Конструктивно обмотки трехфазных трансформаторов выполняются так же, как и однофазных.

Трансформаторная группа из трех однофазных трансформаторов дороже, чем трехфазный трансформатор той же мощности; она занимает больше места, и ее КПД несколько ниже. Но при такой группе в качестве резерва на случай аварии или при ремонте достаточно иметь один однофазный трансформатор, так как маловероятно одновременное повреждение всех трех однофазных трансформаторов, а профилактически ремонтировать их можно поочередно. Для трехфазного трансформатора в качестве резерва необходим тоже трехфазный трансформатор. Таким образом, трехфазная группа при прочих равных условиях обеспечивает большую надежность во время эксплуатации. Наконец, перевозка и установка трех однофазных трансформаторов большой мощности значительно проще перевозки и установки трехфазного трансформатора значительно большей мощности.

Практически большинство трансформаторов малой и средней мощности выполняются трехфазными, а в случае больших мощностей вопрос решается с учетом всех конкретных условий. Согласно ГОСТ трехфазные трансформаторы изготовляются мощностью до 60 000 кВА, но, начиная с мощности 1 800 кВА, допускается применение трехфазных групп.

Выводы обмоток трехфазного трансформатора размечаются в порядке чередования фаз: на стороне высшего напряжения выводы *A*, *B*, *C* – начала обмоток, *X*, *Y*, *Z* – их концы; на стороне низшего напряжения – соответственно *a*, *b*, *c* и *x*, *y*, *z* (рис. 6.6, *г*).

Обмотки трехфазного трансформатора соединяются по схеме «звезда» или «треугольник». Эти два соединения условно обозначаются символами Y и Δ. При соединении обмоток звездой концы (или начала) трех фаз соединяются между собой, образуя нейтральную (или нулевую) точку, а свободные зажимы начал (или концов) трех фаз подключаются к трем проводам сети источника (или приемника) электрической энергии переменного тока. При соединении обмоток треугольником начало первой фазы соединяется с концом второй, начало второй фазы – с концом третьей, начало третьей фазы – с концом первой. Точки соединения начала одной фазы с концом другой подключаются к проводам трехфазной сети переменного тока.

Соединение обеих обмоток трехфазного трансформатора по схеме «звезда» наиболее простое и дешевое. В этом случае каждая из обмоток и ее изоляция при глухом заземлении нейтральной точки должны быть рассчитаны на фазное напряжение и линейный ток. Так как число витков обмотки трансформатора прямо пропорционально напряжению, то при соединении по схеме «звезда» для каждой из обмоток необходимо меньшее число витков, но большее сечение проводов с изоляцией, рассчитанной лишь на фазное напряжение. Соединение обеих обмоток по схеме «звезда» широко применяется для трансформаторов небольшой и средней мощности (примерно до 1 800 кВА). Это соединение наиболее желательно при высоких напряжениях, так как при такой схеме изоляция обмоток рассчитывается лишь на фазное напряжение. Чем выше напряжение и меньше ток, тем относительно дороже соединение по схеме «треугольник».

Соединение обмоток по схеме «треугольник» конструктивно оправдано при больших токах. По этой причине соединение Y/Δ можно считать наиболее распространенным для трансформаторов большой мощности в тех случаях, когда на стороне низшего напряжения не нужен нейтральный провод.

При построении векторной диаграммы напряжений заметно, что вектора первичных и вторичных напряжений сдвинуты относительно друг друга. Для условного обозначения сдвига фазы вторичного напряжения по отношению к первичному принято деление трансформаторов по группам соединений. При определении группы соединений

трансформатора первичным напряжением считается его высшее напряжение, а вторичным – низшее.

Основанием для деления трансформаторов по группам соединений служит значение угла сдвига фаз между линейными высшим и низшим напряжениями. У двух трансформаторов с одинаковой группой соединений этот сдвиг фаз должен быть одинаков.

Обозначение групп соединений основано на сопоставлении относительного положения векторов высшего и низшего линейных напряжений на комплексной плоскости с положением минутной и часовой стрелок. Для сопоставления минутная стрелка считается установленной на цифре 12, и с ней совмещается вектор линейного высшего напряжения, а часовая стрелка совмещается с вектором линейного низшего напряжения. Угол 30°, равный центральному углу между двумя соседними цифрами часового циферблата, служит единицей при отсчете угла сдвига фаз. Отсчет угла производится от минутной к часовой стрелке по направлению их вращения. Группе соединений дается название по положению часовой стрелки (рис. 6.7).

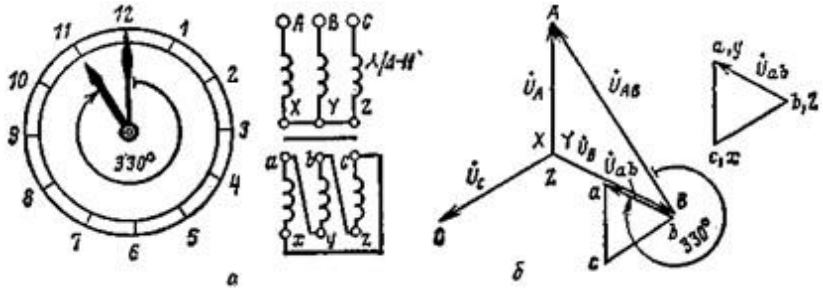


Рис. 6.7. Определение группы соединения обмоток трехфазного трансформатора:
а – схема соединения обмоток трансформатора; *б* – векторная диаграмма напряжений

Группы трехфазных трансформаторов зависят от схем соединения обмоток, обозначения зажимов фаз обмоток высшего и низшего напряжения и направления намоток. Если направление намоток витков обмоток высшего и низшего напряжения одинаково, то ЭДС, индуктируемые в фазах обмоток высшего и низшего напряжения, совпадают по фазе; если же обмотки имеют встречное направление намотки, то ЭДС фаз высшего и низшего напряжения находятся в противофазе.

В случае однофазного трансформатора вектор низшего напряжения может составлять с вектором высшего напряжения приближенно угол

или 0°, или 180°. В первом случае это соответствует положению обеих стрелок на цифре 12, поэтому такое соединение именуется группой 0. Во втором случае часовая стрелка должна быть поставлена на 6, т. е. это будет группа 6. В последнем случае первичная и вторичная обмотки намотаны противоположно относительно направления магнитного потока. Согласно ГОСТ для однофазных трансформаторов установлена одна стандартная группа соединений – 0.

У трехфазных трансформаторов возможны все 12 различных групп соединений, но желательно иметь минимальное их число. Поэтому для трехфазных трансформаторов выбраны только две стандартные группы: 11 и 0. Группе 11 соответствуют два вида соединения обмоток: звезда/треугольник (Y/Δ-11) и звезда с выведенной нейтральной точкой/треугольник ($Y_н$/Δ-11). Группе 0 соответствует один способ соединения обмоток (звезда/звезда с выведенной нейтральной точкой ($Y/Y_н$-0). В числителе обозначения всегда указывается, как соединены обмотки высшего напряжения.

Группа $Y/Y_н$-0 применяется для трансформаторов с высшим напряжением до 35 кВ включительно при низшем напряжении 230 В и мощности до 560 кВА или при том же пределе высшего напряжения, низшем напряжении 400 В и мощности до 1 800 кВА. Оба вида соединения по группе 11 применяются для более мощных трансформаторов и более высоких напряжений.

В качестве примера (рис. 6.7, *б*) показано, как при соединении Y/Δ вектор низшего (в данном случае вторичного) линейного напряжения U_{ab} образует с вектором высшего (первичного) линейного напряжения U_{AB} угол 330°, который равен углу между стрелками в 11 часов; следовательно, это соединение относится к группе 11.

В зарубежной практике трансформаторостроения применяются и другие, не стандартизованные у нас, группы соединений.

Для увеличения мощности трансформаторной подстанции и упрощения резерва используется параллельное включение трансформаторов, одним из непременных условий которого является принадлежность их к одинаковым группам.

6.5. Опыты холостого хода и короткого замыкания

Для испытания трансформатора служат опыты холостого хода и короткого замыкания.

При опыте холостого хода трансформатора (рис. 6.8, *а*) его вторич-

ная обмотка разомкнута и тока в этой обмотке нет ($I_2 = 0$). Если первичную обмотку трансформатора включить в сеть источника электрической энергии переменного тока, то в этой обмотке будет проходить ток холостого хода I_0. В трансформаторах больших мощностей ток холостого хода может достигать значений порядка 5–10 % от номинального тока. В трансформаторах малых мощностей этот ток достигает значения 25–30 % от номинального тока.

Ток холостого хода I_0 создает магнитный поток в магнитопроводе трансформатора. Для возбуждения магнитного потока трансформатор потребляет реактивную мощность из сети. Что же касается активной мощности, потребляемой трансформатором при холостом ходе, то она расходуется на покрытие потерь мощности в магнитопроводе, обусловленных гистерезисом и вихревыми токами.

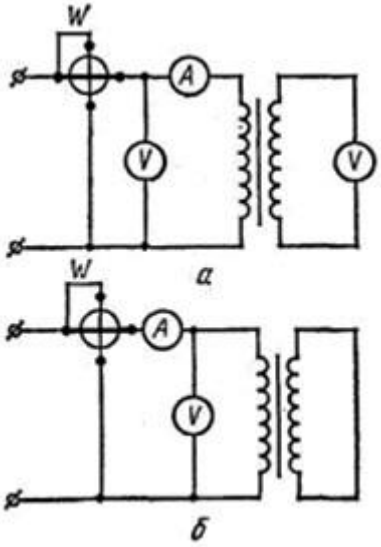


Рис. 6.8. Схемы опытов холостого хода (*а*)
и короткого замыкания (*б*) трансформатора

Так как реактивная мощность при холостом ходе трансформатора значительно больше активной мощности, то коэффициент мощности cos φ его весьма мал и обычно равен 0,2–0,3.

По данным опыта холостого хода трансформатора определяется ток холостого хода I_0, потери в стали сердечника $P_{ст}$ и коэффициент

трансформации k. Ток холостого хода I_0 измеряет амперметр, включенный в цепь первичной обмотки трансформатора. При испытании трехфазного трансформатора определяется фазный ток холостого хода. О потерях в стали сердечника $P_{ст}$ судят по показаниям ваттметра, включенного в цепь первичной обмотки трансформатора. Коэффициент трансформации трансформатора k равен отношению показаний вольтметров, включенных в цепь первичной и вторичной обмоток.

При коротком замыкании вторичной обмотки сопротивление трансформатора очень мало и ток короткого замыкания во много раз больше номинального. Такой большой ток вызывает сильный нагрев обмоток трансформатора и приводит к выходу его из строя. Поэтому трансформаторы снабжаются защитой, отключающей его при коротких замыканиях.

При опыте короткого замыкания (рис. 6.8, *б*) вторичная обмотка трансформатора замкнута накоротко, т. е. напряжение на зажимах вторичной обмотки равно нулю. Первичная обмотка включается в сеть с таким пониженным напряжением, при котором токи в обмотках равны номинальным. Такое пониженное напряжение называется напряжением короткого замыкания и выражается в процентах от номинального значения $u_к$%.

По данным опыта короткого замыкания определяется напряжение короткого замыкания $u_к$%, его активная $u_а$% и реактивная $u_р$% составляющие, потери на нагревание обмоток трансформатора $P_{обм}$ при номинальной нагрузке и активное, реактивное и полное сопротивления трансформатора при коротком замыкании $R_к$, $X_к$ и $Z_к$. Потери в обмотках измеряются ваттметром.

Активное, реактивное и полное сопротивления короткого замыкания трансформатора определяются следующими выражениями:

$$Z_к = \frac{U_к}{I};\ R_к = \frac{P_к}{I^2};\ X_к = \sqrt{Z_к^2 - R_к^2}, \qquad (6.2)$$

где $U_к$, I и $P_к$ – напряжение, ток и мощность, указываемые измерительными приборами, включенными в цепь первичной обмотки трансформатора.

При испытании трехфазного трансформатора следует в приведенных выше выражениях подставить фазные значения напряжения, тока и мощности.

Напряжение короткого замыкания и его активная и реактивная составляющие равны:

$$u_{\text{а}}\% = \frac{I_{\text{н}} R_{\text{к}}}{U_{\text{н}}} \cdot 100;\ u_{\text{р}}\% = \frac{I_{\text{н}} X_{\text{к}}}{U_{\text{н}}} \cdot 100;\ u_{\text{к}}\% = \frac{I_{\text{н}} Z_{\text{к}}}{U_{\text{н}}} \cdot 100, \qquad (6.3)$$

где $U_{\text{н}}$ и $I_{\text{н}}$ – номинальные напряжение и ток первичной обмотки трансформатора.

6.6. КПД трансформатора

Коэффициентом полезного действия (КПД) или отдачей трансформатора называется отношение полезной мощности трансформатора P_2 к мощности, потребляемой им из сети источника электрической энергии P_1, т. е.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}. \qquad (6.4)$$

Потребляемая мощность P_1 будет всегда больше полезной мощности P_2, так как при работе трансформатора происходит потеря преобразуемой им энергии. Потери в трансформаторе складываются из потерь в стали магнитопровода $P_{\text{ст}}$ и потерь в обмотках $P_{\text{обм}}$.

Таким образом, потребляемую трансформатором мощность можно определить следующим выражением:

$$P_1 = P_2 + P_{\text{ст}} + P_{\text{обм}}. \qquad (6.5)$$

Полезную мощность для однофазного и трехфазного трансформаторов находят следующим образом:

$$P_2 = U_2 I_2 \cos\varphi_2;\ P_2 = \sqrt{3} U_2 I_2 \cos\varphi_2. \qquad (6.6)$$

Следовательно, КПД можно определить для однофазного и трехфазного трансформатора для любой нагрузки P_2 следующими выражениями:

$$\eta = \frac{U_2 I_2 \cos\varphi_2}{U_2 I_2 \cos\varphi_2 + P_{\text{ст}} + P_{\text{обм}}} \ \text{ и } \ \eta = \frac{\sqrt{3} U_2 I_2 \cos\varphi_2}{\sqrt{3} U_2 I_2 \cos\varphi_2 + P_{\text{ст}} + P_{\text{обм}}}. \qquad (6.7)$$

Наибольший КПД трансформатора будет при нагрузке, для которой потери в стали равны потерям в обмотках. У современных трансформаторов КПД очень высок и достигает при полной нагрузке 95–99,5 %. Задаются полезной мощностью P_2, например 0, 25, 50, 75, 100, 125 %

от номинальной мощности, и для каждой из выбранных мощностей определяют потери в трансформаторе.

Потери в стали магнитопровода $P_{ст}$ зависят от марки стали, из которой выполнен сердечник, частоты тока сети и магнитной индукции в сердечнике. Так как частота тока сети и магнитная индукция остаются неизменными при работе трансформатора, то и потери в стали не зависят от нагрузки и остаются постоянными.

Потери в обмотках $P_{обм}$ расходуются на нагревание проводников этих обмоток проходящими по ним токами и пропорциональны току во второй степени. Таким образом, при нагрузке 0,5 от номинальной токи в обмотках будут вдвое, а потери в обмотках в четыре раза меньшими, чем при номинальной нагрузке. Задаваясь значениями cos φ_2, определяют КПД при любой нагрузке трансформатора.

6.7. Автотрансформаторы

В конструктивном отношении автотрансформатор подобен трансформатору: на стальном магнитопроводе помещены две обмотки, выполненные из проводников различного поперечного сечения. Конец одной обмотки электрически соединяется с началом другой так, что две последовательно соединенные обмотки образуют общую обмотку высшего напряжения. Обмоткой низшего напряжения, являющейся частью обмотки высшего напряжения, служит одна из двух обмоток автотрансформатора. Таким образом, между обмотками высшего и низшего напряжений автотрансформатора имеется не только магнитная, но и электрическая связь.

Принципиальная схема понижающего автотрансформатора показана на рис. 6.9. Первичное напряжение подведено к зажимам $A - x$ первичной обмотки с числом витков ω_1. Вторичной обмоткой является часть первичной $a - x$ с числом витков ω_2.

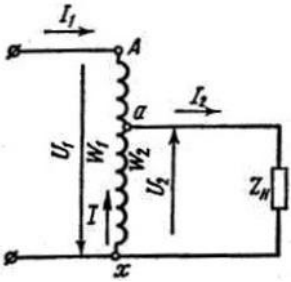


Рис. 6.9. Схема понижающего автотрансформатора

Основные соотношения трансформатора (действующие значения ЭДС, коэффициент трансформации) остаются без изменения в автотрансформаторах.

В общей части обмотки $a - x$, принадлежащей сети высшего и низшего напряжения, проходят токи I_1 и I_2, направленные встречно.

Если пренебречь током холостого хода, величина которого очень мала, то можно считать, что токи I_1 и I_2 сдвинуты по фазе на 180° и ток I в части обмотки $a - x$ равен арифметической разности токов вторичной и первичной цепей, т. е.

$$I = I_2 - I_1\left(1 - \frac{1}{k}\right). \tag{6.8}$$

В повышающем автотрансформаторе ток I совпадает по направлению с током I_1, в понижающем – направлен встречно току I_1.

Преимуществом автотрансформатора перед трансформатором той же полезной мощности является меньший расход активных материалов (обмоточного провода и стали), меньшие потери энергии, более высокий КПД, меньшее изменение напряжения при изменении нагрузки.

Масса провода обмоток автотрансформатора меньше массы провода обмоток трансформатора при одинаковых плотностях тока. Это объясняется тем, что у трансформатора на магнитопроводе имеются две обмотки – первичная с числом витков ω_1, поперечное сечение провода которой рассчитано на ток I_1, и вторичная с числом витков ω_2, поперечное сечение провода которой рассчитано на ток I_2. У автотрансформатора также две обмотки, но одна из них (часть $A - a$) имеет число витков $(\omega_1 - \omega_2)$ из провода, поперечное сечение которого рас-

считано на ток I_1, а другая (часть $a - x$) с числом витков ω_2 из провода, поперечное сечение которого рассчитано на ток I, представляющий из себя разность токов $I_2 - I_1$.

Поперечное сечение и масса стали магнитопровода автотрансформатора также меньше сечения и массы стали магнитопровода трансформатора. Это объясняется тем, что в трансформаторе энергия из первичной сети во вторичную передается магнитным путем в результате электромагнитной связи между обмотками. В автотрансформаторе энергия из первичной сети во вторичную частично передается путем электрического соединения первичной и вторичной сети, т. е. электрическим путем. Так как в процессе передачи этой энергии магнитный поток не участвует, у автотрансформатора электромагнитная мощность меньше, чем у трансформатора.

Полезная мощность автотрансформатора при активной нагрузке равна:

$$P_2 = U_2 I_2.$$

Имея в виду, что

$$I_2 = I_1 + I,$$

получим

$$P_2 = U_2 I_1 + U_2 I = P_э + P_м, \qquad (6.9)$$

где $P_э$ – мощность, передаваемая за счет электрической связи между обмотками;

$P_м$ – электромагнитная мощность автотрансформатора, определяющая необходимый магнитный поток, поперечное сечение и массу стали магнитопровода.

Электромагнитная мощность является расчетной или габаритной мощностью автотрансформатора. Она всегда меньше, чем P_2, поэтому автотрансформатор является более дешевым, чем трансформатор на ту же мощность. Отношение электромагнитной мощности $P_м$ к полезной мощности P_2 называется ***коэффициентом выгодности автотрансформатора***:

$$k_{выг} = \frac{P_м}{P_2} = \frac{U_{ВН} - U_{НН}}{U_{ВН}} = 1 - \frac{1}{k}, \qquad (6.10)$$

где $U_{ВН}$ – значение высшего напряжения;

$U_{НН}$ – значение низшего напряжения;

k – коэффициент трансформации автотрансформатора.

Из приведенной формулы следует, что ощутимый в смысле эконо-

мии материалов эффект от применения автотрансформатора вместо трансформатора получается при значениях коэффициента трансформации, близких к единице. При больших значениях k применение автотрансформаторов становится недопустимым. Это происходит потому, что первичная и вторичная цепи электрически соединены между собой, вследствие чего уровень изоляции сети низшего напряжения (не имеющей заземленной нулевой точки) и всех присоединенных к ней электрических приборов, машин и аппаратов должен быть таким же, как и для сети высшего напряжения, что совершенно нецелесообразно. Кроме того, по условиям безопасности электрических установок недопустима связь низковольтных сетей, доступных для прикосновения человека, с сетями, находящимися под высоким напряжением.

Исходя из приведенных соображений, автотрансформаторы применяются главным образом в тех случаях, когда требуется изменить напряжение в небольших пределах и когда можно ограничиться одним и тем же классом напряжения в первичной и вторичной цепях. Поэтому автотрансформаторы применяют при небольших значениях коэффициента трансформации (k = 1–2).

Наряду с преимуществами автотрансформаторов перед трансформаторами они имеют существенные недостатки: малое сопротивление короткого замыкания, что обусловливает большую кратность тока короткого замыкания; возможность попадания высшего напряжения в сеть низшего напряжения из-за электрической связи между этими сетями. Наличие электрической связи между сетью источника и приемника энергии делает невозможным применять автотрансформатор в том случае, когда приемник энергии имеет заземленный полюс (в выпрямительных устройствах).

В трехфазных сетях используют трехфазные автотрансформаторы, обмотки которых обычно соединяются звездой.

6.8. Измерительные трансформаторы

Измерительные трансформаторы делятся на трансформаторы напряжения и трансформаторы тока. Их применяют в целях переменного тока для расширения пределов измерения измерительных приборов и для изоляции этих приборов от токопроводящих частей, находящихся под высоким напряжением.

Трансформаторы напряжения конструктивно представляют собой обычные трансформаторы малой мощности. Первичная обмотка

такого трансформатора включается в два линейных провода сети, напряжение которой измеряется или контролируется (рис. 6.10); во вторичную обмотку включают вольтметр или параллельную обмотку ваттметра, счетчика или другого измерительного прибора. Коэффициент трансформации трансформатора напряжения выбирают таким, чтобы при номинальном первичном напряжении напряжение вторичной обмотки составляло 100 В.

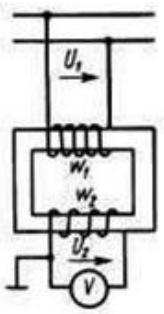


Рис. 6.10. Измерительный
трансформатор напряжения

Режим работы трансформатора напряжения подобен режиму холостого хода обычного трансформатора, так как сопротивление вольтметра или параллельной обмотки ваттметра, счетчика и т. п. велико и током во вторичной обмотке можно пренебречь.

Включение во вторичную обмотку большого числа измерительных приборов нежелательно. Если параллельно вольтметру, включенному во вторичную обмотку трансформатора, подсоединить еще один вольтметр или параллельную обмотку ваттметра, счетчика и т. п., то ток во вторичной обмотке трансформатора увеличится, что вызовет падение напряжения на зажимах вторичной обмотки, и точность показания приборов понизится.

Трансформаторы тока служат для преобразования переменного тока большой величины в ток малой величины и изготовляются таким образом, чтобы при номинальном токе первичной цепи во вторичной обмотке ток составлял 5 А.

Первичная обмотка трансформатора тока включается в разрез линейного провода (последовательно с нагрузкой), ток в котором измеряется (рис. 6.11); вторичная обмотка замкнута на амперметр или на последовательную обмотку ваттметра, счетчика и т. п., т. е. соединена

с измерительным прибором, имеющим малое сопротивление.

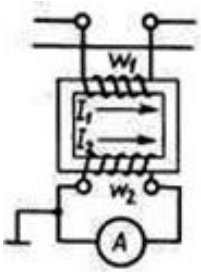


Рис. 6.11. Измерительный трансформатор тока

Режим работы трансформатора тока существенно отличен от режима работы обычного трансформатора. В обычном трансформаторе при изменении нагрузки магнитный поток в сердечнике остается практически неизменным, если постоянно приложенное напряжение.

Если в обычном трансформаторе уменьшить нагрузку, т. е. силу тока во вторичной обмотке, то и в первичной обмотке сила тока понизится, и если вторичную обмотку разомкнуть, то сила тока в первичной обмотке уменьшится до тока холостого хода I_0.

При работе трансформатора тока его вторичная обмотка замкнута на измерительный прибор с малым сопротивлением и режим работы трансформатора близок к короткому замыканию. Поэтому магнитный поток в магнитопроводе трансформатора мал.

Если разомкнуть вторичную обмотку трансформатора тока, то тока в этой обмотке не будет, тогда как в первичной обмотке ток остается неизменным.

Таким образом, при разомкнутой вторичной обмотке трансформатора тока магнитный поток в магнитопроводе, возбужденный током первичной обмотки и не встречающий размагничивающего действия тока вторичной обмотки, окажется очень большим и, следовательно, ЭДС вторичной обмотки, имеющей большое число витков, достигает величины, опасной для целостности изоляции этой обмотки и для обслуживающего персонала. Поэтому при выключении измерительных приборов из вторичной обмотки трансформатора тока эту обмотку необходимо замкнуть накоротко.

Включение большого числа измерительных приборов во вторич-

ную обмотку трансформатора тока снижает точность измерения.

Конструкции трансформаторов тока в зависимости от назначения чрезвычайно разнообразны и делятся на стационарные и переносные.

При работе измерительных трансформаторов напряжения и тока возможен пробой изоляции их первичных обмоток и, как следствие пробоя, электрическое соединение первичной обмотки с сердечником или со вторичной обмоткой.

Для безопасности обслуживания сердечники и вторичные обмотки измерительных трансформаторов заземляются. Условные обозначения измерительных трансформаторов показаны на рис. 6.12.

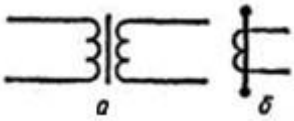


Рис. 6.12. Схемы измерительных трансформаторов:
а – напряжения; *б* – тока

6.9. Специальные трансформаторы

Помимо рассмотренных видов трансформаторов существуют и другие, из которых можно выделить импульсные, сварочные, согласующие, вращающиеся, пик-трансформаторы и трансфлюксоры.

Импульсный трансформатор (ИТ) – это трансформатор, предназначенный для преобразования импульсных сигналов с длительностью импульса до десятков микросекунд с минимальным искажением формы импульса. Основное применение заключается в передаче прямоугольного электрического импульса (максимально крутой фронт и срез, относительно постоянная амплитуда). Он служит для трансформации кратковременных видеоимпульсов напряжения, обычно периодически повторяющихся с высокой скважностью (отношение периода повторения к длительности импульса). В большинстве случаев основное требование, предъявляемое к ИТ, заключается в неискаженной передаче формы трансформируемых импульсов напряжения; при воздействии на вход ИТ напряжения той или иной формы на выходе желательно получить импульс напряжения той же самой формы, но, быть может, иной амплитуды или другой полярности.

Сварочный трансформатор – трансформатор, предназначенный для различных видов сварки. Он преобразует напряжение сети (220 или 380 В) в низкое напряжение, а ток, соответственно, из низко-

го в высокий, до тысяч ампер. Сварочный ток регулируется благодаря изменению величины либо индуктивного сопротивления, либо вторичного напряжения холостого хода трансформатора, что осуществляется посредством секционирования числа витков первичной или вторичной обмотки. Это обеспечивает ступенчатое регулирование тока.

Согласующий трансформатор – трансформатор, применяемый для согласования сопротивления различных частей (каскадов) электронных схем при минимальном искажении формы сигнала. Одновременно согласующий трансформатор обеспечивает создание гальванической развязки между участками схем.

Пик-трансформатор – трансформатор, преобразующий напряжение синусоидальной формы в импульсное напряжение с изменяющейся через каждые полпериода полярностью.

Сдвоенный дроссель (встречный индуктивный фильтр) – конструктивно является трансформатором с двумя одинаковыми обмотками. Благодаря взаимной индукции катушек он при тех же размерах более эффективен, чем обычный дроссель. Сдвоенные дроссели получили широкое распространение в качестве входных фильтров блоков питания; в дифференциальных сигнальных фильтрах цифровых линий, а также в звуковой технике.

Трансфлюксор – разновидность трансформатора, предложенная в 1955 г. для хранения информации. Основное отличие от обычного трансформатора – большая величина остаточной намагниченности магнитопровода. Иными словами, трансфлюксоры могут выполнять роль элементов памяти. Помимо этого трансфлюксоры часто снабжались дополнительными обмотками, обеспечивающими начальное намагничивание и задающими режимы их работы. Эта особенность позволяла (в сочетании с другими элементами) строить на трансфлюксорах схемы управляемых генераторов, элементов сравнения и искусственных нейронов.

Вращающийся трансформатор – трансформатор, применяемый для передачи сигнала на вращающиеся объекты, например на барабан блока магнитных головок в видеомагнитофонах. Состоит из двух половин магнитопровода, каждая со своей обмоткой, одна из которой вращается относительно другой с минимальным зазором. Позволяет реализовать большие скорости вращения, при которых контактный способ съема сигнала невозможен.

Такое же название носит электрическая микромашина переменного тока, предназначенная для преобразования угла поворота в электриче-

ское напряжение.

Лекция 7. АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

7.1. Общие сведения об электрических машинах

Электрические машины широко применяют на электрических станциях, в промышленности, на транспорте, в авиации, в системах автоматического регулирования и управления, в быту.

Электрические машины преобразуют механическую энергию в электрическую и наоборот. Машина, преобразующая механическую энергию в электрическую, называется ***генератором***. Преобразование электрической энергии в механическую осуществляется ***двигателями.***

Любая электрическая машина может быть использована как в качестве генератора, так и в качестве двигателя. Это свойство электрической машины изменять направление преобразуемой ею энергии называется *обратимостью машины.* Электрическая машина может быть также использована для преобразования электрической энергии одного рода тока (частоты, числа фаз переменного тока, напряжения постоянного тока) в энергию другого рода тока. Такие электрические машины называются *преобразователями***.** В зависимости от рода тока электроустановки, в которой должна работать электрическая машина, они делятся на машины постоянного и машины переменного тока.

Машины переменного тока могут быть как однофазными, так и многофазными. Наиболее широкое применение нашли трехфазные синхронные и асинхронные машины, а также коллекторные машины переменного тока, которые допускают экономичное регулирование частоты вращения в широких пределах.

Принцип действия электрических машин основан на использовании законов электромагнитной индукции и электромагнитных сил. Если в магнитном поле полюсов постоянных магнитов или электромагнитов (рис. 7.1) поместить проводник и под действием какой-либо силы F_1 перемещать его перпендикулярно магнитным линиям, то в нем возникает ЭДС:

$$E = Blv, \tag{7.1}$$

где B – магнитная индукция в месте, где находится проводник;

l – активная длина проводника (та часть, которая находится в магнитном поле);

v – скорость перемещения проводника в магнитном поле.

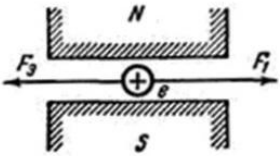


Рис. 7.1. Схема, поясняющая принцип действия электрической машины

Направление ЭДС (на рисунке от зрителя за плоскость чертежа), индуктируемой в проводнике, определяется согласно правилу правой руки.

Если этот проводник замкнуть на какой-либо приемник энергии, то в замкнутой цепи под действием ЭДС будет протекать ток, совпадающий по направлению с ЭДС в проводнике. В результате взаимодействия тока в проводнике с магнитным полем полюсов создается электромагнитная сила $F_Э$, направление которой определяется по правилу левой руки; эта сила будет направлена навстречу силе, перемещающей проводник в магнитном поле. При равенстве сил $F_1 = F_Э$ проводник будет перемещаться с постоянной скоростью.

Следовательно, в такой простейшей электрической машине механическая энергия, затрачиваемая на перемещение проводника, преобразуется в энергию электрическую, отдаваемую сопротивлению внешнего приемника энергии, т. е. машина работает генератором. Та же простейшая электрическая машина может работать двигателем. Если от постороннего источника электрической энергии через проводник пропустить ток, то в результате взаимодействия тока в проводнике с магнитным полем полюсов создается электромагнитная сила $F_Э$, под действием которой проводник начнет перемещаться в магнитном поле, преодолевая силу торможения какого-либо механического приемника энергии. Таким образом, рассмотренная машина так же, как и любая электрическая машина, обратима, т. е. может работать как генератором, так и двигателем.

Для увеличения ЭДС и электромеханических сил электрические машины имеют обмотки, состоящие из большого числа проводов, которые соединяются между собой так, чтобы ЭДС в них были одинаково направлены и складывались.

ЭДС в проводнике будет индуктирована также и в том случае, ко-

гда проводник неподвижен, а перемещается магнитное поле полюсов.

7.2. Принцип действия асинхронного двигателя

Наибольшее распространение среди электрических двигателей получил трехфазный асинхронный двигатель, впервые сконструированный известным русским электриком М. О. Доливо-Добровольским.

Асинхронный двигатель отличается простотой конструкции и несложностью обслуживания. Как и любая машина переменного тока, асинхронный двигатель состоит из двух основных частей: статора и ротора. *Статором* называется неподвижная часть машины, *ротором* – ее вращающаяся часть. Асинхронная машина обладает свойством обратимости, т. е. может быть использована как в режиме генератора, так и в режиме двигателя. Асинхронный генератор потребляет реактивный ток и требует наличия в сети генераторов реактивной мощности (синхронных машин, синхронных компенсаторов, батарей статических конденсаторов), поэтому асинхронные генераторы практически не применяются, тогда как асинхронные двигатели получили очень широкое распространение.

Многофазная обмотка переменного тока создает вращающееся магнитное поле, частота вращения которого в минуту

$$n = \frac{60 f}{p}.$$

Если ротор вращается с частотой, равной частоте вращения магнитного поля ($n_2 = n_1$), то такая частота называется *синхронной*.

Если ротор вращается с частотой, не равной частоте вращения магнитного поля, то такая частота называется *асинхронной*.

В асинхронном двигателе рабочий процесс может протекать только при асинхронной частоте, т. е. при частоте вращения ротора, не равной частоте вращения магнитного поля.

Частота вращения ротора может очень мало отличаться от частоты вращения поля, но при работе двигателя она будет всегда меньше ($n_2 < n_1$).

Работа асинхронного двигателя основана на явлении, названном «диск Араго – Ленца» (рис. 7.2).

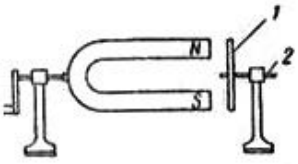


Рис. 7.2. Схема, поясняющая принцип действия асинхронного двигателя: *1* – диск; *2* – ось

Это явление заключается в следующем: если перед полюсами постоянного магнита поместить медный диск *1*, свободно сидящий на оси *2*, и начать вращать магнит вокруг его оси при помощи рукоятки, то медный диск будет вращаться в том же направлении. Это объясняется тем, что при вращении магнита его магнитное поле пронизывает диск и индуктирует в нем вихревые токи. В результате взаимодействия вихревых токов с магнитным полем магнита возникает сила, приводящая диск во вращение. На основании закона Ленца направление всякого индуктированного тока таково, что он противодействует причине, его вызвавшей. Поэтому вихревые токи в теле диска стремятся задержать вращение магнита, но, не имея возможности сделать это, приводят диск во вращение так, что он следует за магнитом. При этом частота вращения диска всегда меньше, чем частота вращения магнита. Если бы эти частоты почему-либо стали одинаковыми, то магнитное поле не перемещалось бы относительно диска и, следовательно, в нем не возникали бы вихревые токи, т. е. не было бы силы, под действием которой диск вращается.

В асинхронных двигателях постоянный магнит заменен вращающимся магнитным полем, создаваемым трехфазной обмоткой статора при включении ее в сеть переменного тока.

Вращающееся магнитное поле статора пересекает проводники обмотки ротора и индуктирует в них ЭДС. Если обмотка ротора замкнута на какое-либо сопротивление или накоротко, то по ней под действием индуктируемой ЭДС проходит ток. В результате взаимодействия тока в обмотке ротора с вращающимся магнитным полем обмотки статора создается вращающий момент, под действием которого ротор начинает вращаться по направлению вращения магнитного поля.

Если предположить, что в какой-то момент времени частота вращения ротора оказалась равной частоте вращения поля статора, то проводники обмотки ротора не будут пересекать магнитное поле статора и тока в роторе не будет. В этом случае вращающий момент ста-

нет равным нулю, и частота вращения ротора уменьшится по сравнению с частотой вращения поля статора, пока не возникнет вращающий момент, уравновешивающий тормозной момент, который складывается из момента нагрузки на валу и момента сил трения в машине.

Для изменения направления вращения ротора, т. е. для реверсирования двигателя, необходимо изменить направление вращения магнитного поля, созданного обмоткой статора. Это достигается изменением чередования фаз обмоток статора, для чего следует поменять местами по отношению к зажимам сети любые два из трех проводов, соединяющих обмотку статора с сетью. Реверсивные двигатели снабжаются переключателями, при помощи которых можно изменять чередование фаз обмоток статора, а следовательно, и направление вращения ротора.

Вне зависимости от направления вращения ротора его частота n, как уже указывалось, всегда меньше частоты вращения магнитного поля статора.

7.3. Устройство асинхронного двигателя

Сердечник *2* статора (рис. 7.3) набирается из стальных пластин толщиной 0,35 или 0,5 мм. Пластины штампуют с впадинами (пазами), изолируют лаком или окалиной для уменьшения потерь на вихревые токи, собирают в отдельные пакеты и крепят в станине *1* двигателя. К станине прикрепляют также боковые щиты с помещенными на них подшипниками, на которые опирается вал ротора. Станину устанавливают на фундаменте. В продольные пазы статора укладывают проводники его обмотки *3*, которые соединяют между собой так, что образуется трехфазная система.

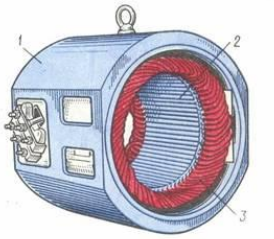


Рис. 7.3. Статор асинхронного двигателя:
1 – станина; *2* – сердечник; *3* – обмотка

Основное назначение обмотки статора – создание вращающегося

магнитного поля.

Трехфазная обмотка статора электродвигателя соединяется по схеме «звезда» или «треугольник» в зависимости от напряжения питания сети. Концы трехфазной обмотки могут быть соединены внутри электродвигателя (из двигателя выходит три провода), выведены наружу (выходит шесть проводов), выведены в распределительную коробку (в коробку выходит шесть проводов, из коробки – три).

В распределительной коробке, смонтированной на щитке машины, имеется шесть зажимов, к которым присоединяются начала и концы обмоток каждой фазы (рис. 7.4, *а*).

Для подключения обмоток статора к трехфазной сети они могут быть соединены звездой или треугольником, что дает возможность включать двигатель в сеть с двумя различными линейными напряжениями. Например, двигатель может работать от сети с напряжением 220 и 127 В. На щитке машины указаны оба напряжения сети, на которые рассчитан двигатель, т. е. 220/127 В или 380/220 В.

Для более низких напряжений, указанных на щитке, обмотка статора соединяется треугольником, для более высоких – звездой.

При соединении обмотки статора треугольником (рис. 7.4, *в*) верхние зажимы объединяют перемычками с нижними, а каждую пару соединенных вместе зажимов подключают к линейным проводам трехфазной сети. Для включения звездой (рис. 7.4, *б*) три нижних зажима на щитке соединяют перемычками в общую точку, а верхние подключают к линейным проводам трехфазной сети.

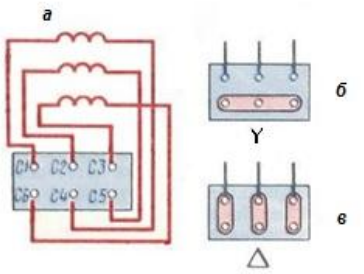


Рис. 7.4. Соединение обмоток статора:
а – выводы начал и концов фаз в распределительной коробке;
б – соединение способом «звезда»;
в – соединение способом «треугольник»

Сердечник ротора также набирают из стальных пластин толщиной

0,5 мм, изолированных лаком или окалиной для уменьшения потерь на вихревые токи. Пластины штампуют с впадинами и собирают в пакеты, которые крепят на валу машины. Из пакетов образуется цилиндр с продольными пазами, в которых укладывают проводники обмотки ротора. В зависимости от типа обмотки асинхронные машины могут быть с фазным и короткозамкнутым роторами (рис. 7.5).

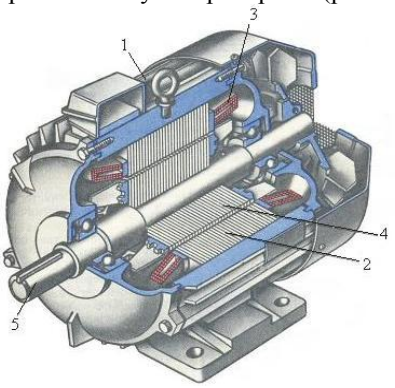


Рис. 7.5. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором в разрезе:
1 – станина; *2* – сердечник статора; *3* – обмотка статора;
4 – сердечник ротора с короткозамкнутой обмоткой; *5* – вал

Короткозамкнутая обмотка ротора выполняется по типу беличьего колеса (рис. 7.6, *а*). В пазах ротора (рис. 7.6, *б*) укладывают массивные стержни *3*, соединенные на торцовых сторонах медными кольцами *4*. Часто короткозамкнутую обмотку ротора изготовляют из меди, алюминия или латуни. Материал в горячем состоянии заливают в пазы сердечника *2* ротора под давлением. Такая обмотка всегда замкнута накоротко, и включение сопротивлений в нее невозможно.

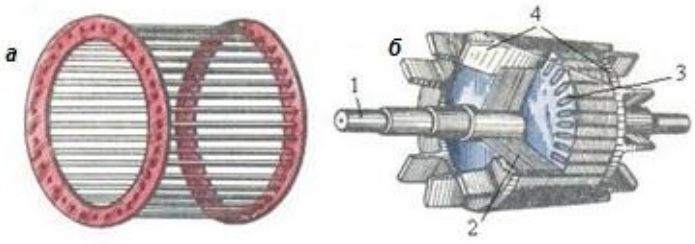


Рис. 7.6. Короткозамкнутый ротор:

а – беличье колесо; *б* – короткозамкнутая обмотка;
1 – вал; *2* – сердечник; *3* – стержни; *4* – кольца

Фазная обмотка ротора выполнена подобно статорной, т. е. проводники соответствующим образом соединяются между собой, образуя трехфазную систему (рис. 7.7).

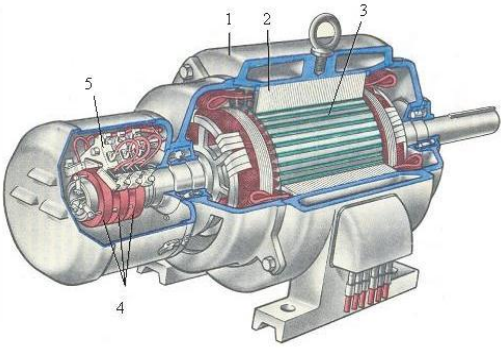


Рис. 7.7. Асинхронный двигатель с фазным ротором в разрезе:
1 – станина; *2* – обмотка статора; *3* – ротор;
4 – контактные кольца; *5* – щетки

Обмотки трех фаз соединены звездой. Начала этих обмоток подключены к трем контактным медным кольцам *4*, укрепленным на валу ротора. Кольца изолированы друг от друга и от вала и вращаются вместе с ротором *3*. При вращении колец поверхности их скользят по металлографитным щеткам *5*, неподвижно укрепленным над кольцами. Обмотка ротора может быть замкнута на какое-либо сопротивление или накоротко при помощи указанных выше щеток.

Двигатели с короткозамкнутым ротором проще и надежнее в эксплуатации, значительно дешевле, чем двигатели с фазным ротором. Однако двигатели с фазным ротором, как мы увидим ниже, обладают лучшими пусковыми и регулировочными свойствами.

В настоящее время асинхронные двигатели выполняют преимущественно с короткозамкнутым ротором и лишь при больших мощностях и в специальных случаях используют фазную обмотку ротора.

На рис. 7.8 приведено условное обозначение асинхронного двигателя с короткозамкнутым (*а*) и фазным (*б*) ротором.

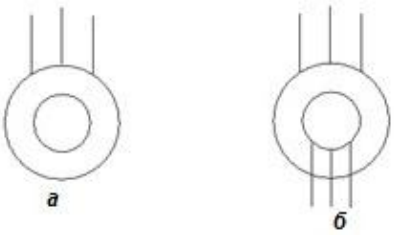


Рис. 7.8. Условные обозначения на электрических схемах асинхронного двигателя с короткозамкнутым (*а*) и фазным (*б*) роторами

Производят асинхронные двигатели мощностью от нескольких десятков ватт до 15 000 кВт при напряжениях обмотки статора до 6 кВ.

Между статором и ротором имеется воздушный зазор, величина которого оказывает существенное влияние на рабочие свойства двигателя.

Наряду с важными положительными качествами – простотой конструкции и обслуживания, малой стоимостью – асинхронный двигатель имеет и некоторые недостатки, из которых наиболее существенным является относительно низкий коэффициент мощности cos φ. У асинхронного двигателя cos φ при полной нагрузке может достигать значений 0,85–0,9; при недогрузках двигателя его cos φ резко уменьшается и при холостом ходе составляет 0,2–0,3.

Низкий коэффициент мощности асинхронного двигателя объясняется большим потреблением реактивной мощности, которая необходима для возбуждения магнитного поля. Магнитный поток в асинхронном двигателе встречает на своем пути воздушный зазор между статором и ротором, который в большой степени увеличивает магнитное сопротивление, а следовательно, и потребляемую двигателем реактивную мощность.

В целях повышения коэффициента мощности асинхронных двигателей воздушный зазор стремятся делать как можно меньшим, доводя его у малых двигателей (порядка 2–5 кВт) до 0,3 мм. В двигателях большой мощности воздушный зазор приходится увеличивать по конструктивным соображениям, но все же он не превышает 2–2,5 мм.

7.4. Работа асинхронного двигателя под нагрузкой

В рабочем режиме ротор двигателя вращается с частотой n_2, меньшей частоты n_1 магнитного поля статора, вращающегося в том же на-

правлении, что и ротор. Поэтому магнитное поле, имеющее большую частоту, скользит относительно ротора с частотой, равной разности частот поля и ротора, т. е.

$$n_S = n_1 - n_2. \tag{7.2}$$

Относительное отставание ротора от вращающегося магнитного поля статора характеризуется *скольжением S*.

Скольжение представляет собой отношение разности частот вращения магнитного поля и вращающегося ротора к частоте поля статора:

$$S = \frac{n_S}{n_1} = \frac{n_1 - n_2}{n_1}. \tag{7.3}$$

Данная формула определяет скольжение в относительных единицах. Скольжение может быть также выражено в процентах:

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\,\%.$$

Если ротор неподвижен ($n_2 = 0$), то скольжение равно единице или 100 %. Если ротор вращается синхронно с магнитным полем, т. е. с одинаковой частотой ($n_1 = n_2$), то скольжение равно нулю. Таким образом, чем больше частота вращения ротора, тем меньше скольжение.

В рабочем режиме асинхронного двигателя скольжение мало. У современных асинхронных двигателей скольжение при полной нагрузке составляет 3–5 %, т. е. ротор вращается с частотой, незначительно отличающейся от частоты магнитного поля статора.

При холостом ходе, т. е. при отсутствии нагрузки на валу, скольжение ничтожно мало и может быть принято равным нулю.

Частоту вращения ротора можно определить из следующих соотношений:

$$n_2 = n_1 - n_S = n_1\left(1 - S\right) = \frac{60 f_1}{p}\left(1 - S\right). \tag{7.4}$$

Двигатель будет работать устойчиво с постоянной частотой вращения ротора при равновесии моментов, т. е. если вращающий момент двигателя M будет равен тормозному моменту на валу двигателя $M_т$, который развивает приемник механической энергии, например резец

токарного станка. Следовательно, можно записать: $M = M_т$.

Любой нагрузке машины соответствует определенная частота вращения ротора n_2 и определенное скольжение S.

Магнитное поле статора вращается относительно ротора с частотой n_S и индуктирует в его обмотке ЭДС E_2, под действием которой по замкнутой обмотке ротора проходит ток I_2.

Если нагрузка на валу машины увеличилась, т. е. возрос тормозной момент $M_т$, то равновесие моментов будет нарушено, так как тормозной момент окажется больше вращающего ($M < M_т$). Это приведет к уменьшению частоты вращения ротора n_2, а, следовательно, к увеличению скольжения S. С увеличением скольжения магнитное поле статора будет пересекать проводники обмотки ротора чаще, ЭДС E_2, индуктированная в обмотке ротора, возрастет, а в результате увеличится как ток в роторе, так и развиваемый двигателем вращающий момент. Скольжение и ток в роторе будут увеличиваться до значений, при которых вновь наступит равновесие моментов, т. е. вращающий момент станет равным тормозному.

Так же протекает процесс изменения частоты вращения ротора и развиваемого момента при уменьшении нагрузки двигателя. С уменьшением нагрузки на валу двигателя тормозной момент становится меньше вращающего, что приводит к увеличению частоты вращения ротора или к уменьшению скольжения. В результате уменьшаются ЭДС и ток в обмотке ротора, а следовательно, и вращающий момент, который вновь становится равным тормозному моменту.

Магнитное поле статора пересекает проводники обмотки статора и индуктирует в ней ЭДС E_1, которая уравновешивает приложенное напряжение сети U_1.

Если пренебречь падением напряжения в сопротивлении обмотки статора, которое мало по сравнению с ЭДС, то между абсолютными значениями приложенного напряжения и ЭДС обмотки статора можно допустить приближенное равенство, т. е. $U_1 = E_1$.

Таким образом, при неизменном напряжении сети будет неизменна и ЭДС обмотки статора. Следовательно, магнитный поток в воздушном зазоре машины, так же как в трансформаторе, при любом изменении нагрузки остается примерно постоянным.

Ток обмотки ротора создает свое магнитное поле, которое направлено противоположно магнитному полю тока обмотки статора. Чтобы результирующий магнитный поток в машине оставался неизменным при любом изменении нагрузки двигателя, размагничивающее магнит-

ное поле обмотки ротора должно быть уравновешено магнитным полем обмотки статора. Поэтому при увеличении тока в обмотке ротора увеличивается и ток в обмотке статора.

Таким образом, асинхронный двигатель подобен трансформатору, у которого при увеличении тока во вторичной обмотке увеличивается ток в первичной обмотке.

Асинхронный двигатель преобразует электрическую энергию, подаваемую на обмотки статора, в механическую (вращение вала ротора). Но входная и выходная мощности не равны друг другу, так как во время преобразования происходят потери энергии: на трение, нагрев, вихревые токи и потери на гистерезисе. Это энергия рассеивается как тепло. Поэтому асинхронный электродвигатель имеет вентилятор для охлаждения.

7.5. Вращающий момент асинхронного двигателя

Вращающий момент асинхронного двигателя создается при взаимодействии вращающегося магнитного поля статора с токами в проводниках обмотки ротора. Поэтому вращающий момент зависит как от магнитного потока статора Φ_m, так и от тока в обмотке ротора I_2. Однако в процессе преобразования энергии (создании вращающего момента) участвует только активная мощность, потребляемая машиной из сети. Вследствие этого вращающий момент зависит не от тока в обмотке ротора I_2, а только от его активной составляющей, т. е. $I_2\cos\varphi_2$. Таким образом, вращающий момент асинхронного двигателя определяется следующим выражением:

$$M = C\Phi_m I_2 \cos\varphi_2, \qquad (7.5)$$

где φ_2 – фазный угол между ЭДС и током в обмотке ротора;

C – конструктивная постоянная машины, зависящая от числа ее полюсов и фаз, числа витков обмотки статора и конструктивного выполнения обмотки.

При условии постоянства приложенного напряжения магнитный поток остается также почти неизменным при любом изменении нагрузки двигателя. Таким образом, в выражении вращающего момента величины Φ_m и C постоянны и вращающий момент пропорционален только активной составляющей тока в обмотке ротора, т. е.

$$M \sim I_2\cos\varphi_2.$$

Изменение нагрузки или тормозного момента на валу двигателя изменяет частоту вращения ротора и скольжение, что вызывает изменение как тока в роторе I_2, так и его активной составляющей $I_2\cos\varphi_2$.

Вместе со скольжением изменяется частота тока ротора. При неподвижном роторе ($n_2 = 0$ и $S = 1$) вращающееся поле с одинаковой частотой пересекает проводники обмотки статора и ротора и частота тока в роторе равна частоте тока сети ($f_2 = f_1$). При уменьшении скольжения обмотка ротора пересекается магнитным полем с меньшей частотой, так что частота тока в роторе уменьшается. Когда ротор вращается синхронно с полем ($n_2 = n_1$ и $S = 0$), проводники обмотки ротора не пересекаются магнитным полем, так что частота тока в роторе равна нулю ($f_2 = 0$). Таким образом, частота тока в роторе пропорциональна скольжению, т. е.

$$f_2 = Sf_1.$$

Активное сопротивление обмотки ротора почти не зависит от частоты, тогда как ЭДС и реактивное сопротивление пропорциональны частоте, т. е. изменяются с изменением скольжения.

На рис. 7.9 показана зависимость вращающего момента от скольжения. При некотором скольжении S_m (примерно 20 %) двигатель развивает максимальный момент, который определяет перегрузочную способность двигателя и обычно в 2–3 раза превышает номинальный момент.

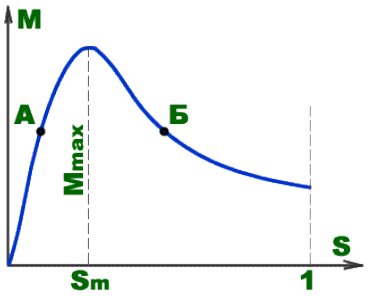


Рис. 7.9. Зависимость вращающего момента асинхронного двигателя от скольжения

При небольших скольжениях (примерно до 20 %) увеличение скольжения вызывает увеличение вращающего момента, так как при этом возрастает активная составляющая тока в роторе ($I_2\cos\varphi_2$).

При больших скольжениях увеличение скольжения будет вызывать уменьшение вращающего момента, так как, несмотря на увеличение силы тока в роторе I_2, ее активная составляющая $I_2\cos\varphi_2$ и, следовательно, вращающий момент уменьшаются вследствие значительного увеличения реактивного сопротивления обмотки ротора.

Устойчивая работа двигателя возможна только на восходящей ветви кривой зависимости момента от скольжения, т. е. при изменении скольжения в пределах от 0 до S_m. Работа двигателя на нисходящей ветви указанной зависимости, т. е. при скольжении $S > S_m$, невозможна, так как здесь не обеспечивается устойчивое равновесие моментов.

Если предположить, что вращающий момент был равен тормозному ($M = M_т$) в точках А и Б, то при случайном нарушении равновесия моментов в одном случае оно восстанавливается, а в другом не восстанавливается. Допустим, что вращающий момент двигателя почему-либо уменьшился (например, при понижении напряжения сети), тогда скольжение начнет увеличиваться. Если равновесие моментов было в точке А, то увеличение скольжения вызовет увеличение вращающего момента двигателя и он станет вновь равным тормозному моменту, т. е. равновесие моментов восстановится. Если же равновесие моментов было в точке Б, то увеличение скольжения вызовет уменьшение вращающего момента, который будет оставаться всегда меньше тормозного, т. е. равновесие моментов не восстановится и скорость вращения ротора будет непрерывно уменьшаться до полной остановки двигателя.

Если приложить к валу двигателя тормозной момент, больший максимального момента, то равновесие моментов не восстановится и ротор двигателя остановится.

Вращающий момент двигателя пропорционален квадрату приложенного напряжения, так как пропорциональны напряжению как магнитный поток, так и сила тока в роторе. Поэтому изменение напряжения в сети вызывает значительное изменение вращающего момента.

7.6. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Рабочие характеристики асинхронного двигателя представляют собой зависимости скольжения S, частоты вращения ротора n_2, развиваемого момента M, потребляемого тока I_1, расходуемой мощности P_1, коэффициента мощности $\cos\varphi$ и КПД η от полезной мощности P_2 на ва-

лу машины. Эти характеристики (рис. 7.10) снимаются при естественных условиях работы двигателя, т. е. двигатель нерегулируемый, частота тока f_1 и напряжение U_1 сети остаются постоянными, а изменяется только нагрузка на валу двигателя.

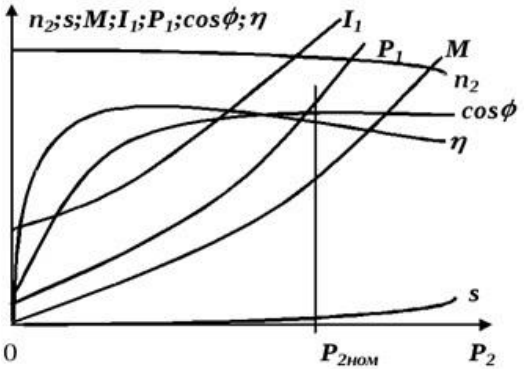


Рис. 7.10. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

При увеличении нагрузки на валу двигателя скольжение S возрастает, причем при больших нагрузках скольжение увеличивается несколько быстрее, чем при малых. При холостом ходе двигателя скольжение очень мало ($S \approx 0$), так как $n_2 \approx n_1$. При номинальной нагрузке скольжение обычно составляет 3–5 %.

При увеличении нагрузки на валу двигателя скольжение возрастает, а частота вращения n_2 будет уменьшаться. Однако изменение частоты вращения при увеличении нагрузки до номинального значения очень незначительно и не превышает 5 %. Поэтому скоростная характеристика асинхронного двигателя является жесткой – она имеет очень малый наклон к горизонтальной оси. При увеличении активного сопротивления ротора двигателя угол наклона этой кривой увеличивается. В этом случае изменения частоты вращения асинхронного двигателя n_2 при колебаниях нагрузки P_2 возрастают. Объясняется это тем, что возрастают электрические потери в роторе.

Вращающий момент M, развиваемый двигателем, уравновешен тормозным моментом $M_т$ на валу и моментом M_0, идущим на преодоление механических потерь, т. е.

$$M = M_т + M_0.$$

При холостом ходе двигателя $M = M_0$. С увеличением нагрузки на валу вращающий момент также увеличивается, причем за счет некоторого уменьшения частоты вращения ротора увеличение M происходит быстрее, чем увеличение полезной мощности P_2 на валу.

Ток I_1, потребляемый двигателем из сети, неравномерно изменяется с увеличением нагрузки на валу двигателя. При холостом ходе и малых нагрузках активная составляющая тока в статоре меньше реактивной составляющей, поэтому ток I_1 определяется в основном реактивной составляющей. При больших нагрузках активная составляющая тока статора становится больше реактивной и изменение нагрузки вызывает большое изменение тока I_1. Таким образом, реактивная составляющая тока остается практически постоянной при любой нагрузке двигателя, а изменение активной составляющей влияет на значение полного тока I_1.

Графически зависимость потребляемой двигателем мощности P_1 выражается прямой линией, незначительно изгибающейся вверх при больших нагрузках, что объясняется увеличением потерь в обмотках статора и ротора с возрастанием нагрузки.

Коэффициент мощности напрямую зависит от активной составляющей тока в статоре, обусловленной потерями мощности в двигателе, и изменяется в зависимости от нагрузки на валу ротора. При холостом ходе $\cos \varphi$ мал (порядка 0,2), а при увеличении нагрузки на валу возрастает, достигая значений 0,8–0,95. При очень больших нагрузках происходит некоторое уменьшение $\cos \varphi$, так как вследствие значительного увеличения скольжения и частоты тока в роторе возрастает реактивное сопротивление обмотки ротора.

Кривая КПД η имеет такой же вид, как в любой машине или трансформаторе. При холостом ходе КПД равен нулю. С увеличением нагрузки на валу двигателя КПД резко увеличивается, а затем уменьшается. Наибольшего значения КПД достигает при такой нагрузке, когда потери мощности в стали и механические потери, не зависящие от нагрузки, равны потерям мощности в обмотках статора и ротора, зависящим от нагрузки.

7.7. Пуск в ход асинхронных двигателей

Пуск асинхронных двигателей можно производить при полном напряжении (прямой пуск) и при пониженном напряжении. Прямой пуск осуществляется при помощи рубильников, переключателей, пакетных

выключателей, магнитных пускателей, контакторов и контроллеров. При прямом пуске к двигателю подается полное напряжение сети. Недостатком этого способа пуска являются большие пусковые токи, которые в 2–7 раз больше номинальных токов двигателей.

При включении асинхронного двигателя в сеть переменного тока по обмоткам его статора и ротора будут протекать токи, в несколько раз превышающие номинальные. Это объясняется тем, что при неподвижном роторе вращающееся магнитное поле пересекает его обмотку с высокой скоростью, равной скорости вращения магнитного поля в пространстве, и индуктирует в этой обмотке большую ЭДС. Последняя создает большой ток в цепи ротора, что вызывает возникновение соответствующего тока и в обмотке статора.

При увеличении числа оборотов ротора скольжение уменьшается, что приводит к понижению ЭДС и тока в обмотке ротора. Это в свою очередь вызывает уменьшение тока в обмотке статора.

Большой пусковой ток нежелателен как для двигателя, так и для источника тока, от которого двигатель получает энергию. При частых пусках большой пусковой ток приводит к резкому повышению температуры обмоток двигателя, что может вызвать преждевременное старение их изоляции. Кроме того, в сети при этом происходит значительная потеря напряжения, что оказывает влияние на работу других приемников энергии, включенных в эту же сеть. Поэтому прямой пуск двигателя непосредственным включением его в сеть допускается только в том случае, когда мощность двигателя намного меньше мощности источника энергии, питающего сеть.

Если мощность двигателя соизмерима с мощностью источника энергии, то необходимо уменьшить ток, потребляемый этим двигателем при пуске в ход.

Двигатели с фазным ротором обладают очень хорошими пусковыми свойствами. Для уменьшения пускового тока обмотку ротора замыкают на активное сопротивление, называемое пусковым реостатом (рис. 7.11). При включении такого сопротивления в цепь обмотки ротора ток в ней уменьшается, а следовательно, уменьшаются токи как в обмотке статора, так и потребляемый двигателем из сети. При этом увеличится активная составляющая тока ротора и, следовательно, вращающий момент, развиваемый двигателем при пуске в ход.

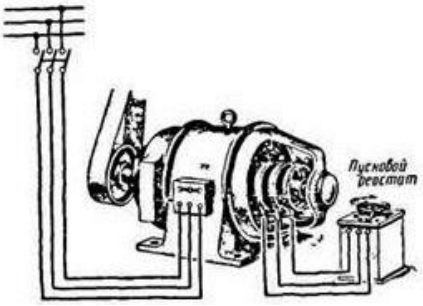


Рис. 7.11. Схема пуска асинхронного двигателя с фазным ротором

Пусковые реостаты имеют несколько контактов, поэтому можно постепенно уменьшать сопротивление, введенное в цепь обмотки ротора. После достижения ротором нормальной частоты вращения реостат полностью выводится, т. е. обмотку ротора замыкают накоротко.

При нормальной частоте вращения ротора скольжение мало и ЭДС, индуктируемая в его обмотке, также незначительна. Поэтому никакие добавочные сопротивления в цепи ротора не нужны.

Пусковые реостаты работают непродолжительное время в процессе разгона двигателя и рассчитываются на кратковременное действие. Если оставить реостат включенным длительное время, то он выйдет из строя.

Двигатели с короткозамкнутым ротором при малой мощности их по сравнению с мощностью источника энергии пускают в ход непосредственным включением в сеть (рис. 7.12).

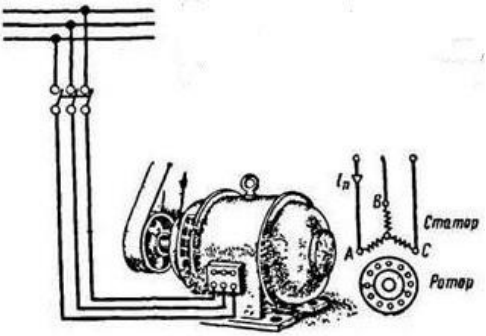


Рис. 7.12. Прямой пуск асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

При большой мощности двигателей пусковой ток уменьшают, понижая приложенное напряжение. Рассмотрим два способа пуска асинхронных двигателей при пониженном напряжении: с помощью переключения обмотки со звезды на треугольник и с помощью автотрансформатора.

На рис. 7.13, *а* показана схема пуска низковольтного асинхронного двигателя *Д* при помощи автотрансформатора *АТ*, а рис. 7.13, *б* изображает схему пуска высоковольтного двигателя. Здесь автотрансформатор *АТ* имеет размыкаемую нулевую точку.

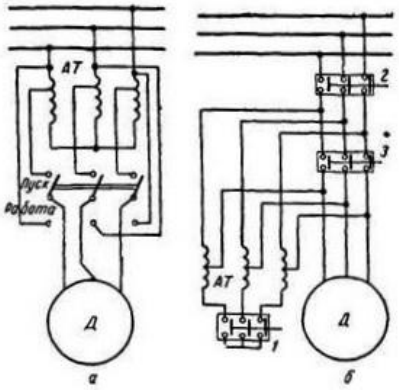


Рис. 7.13. Пуск с помощью автотрансформатора:
а – низковольтного двигателя; *б* – высоковольтного двигателя

Для пуска двигателя *Д* в ход включают масляный выключатель *1*, замыкая тем самым нулевую точку автотрансформатора. Затем включают главный масляный выключатель *2*; к двигателю через автотрансформатор подается из сети пониженное напряжение, и двигатель трогается с места. При достижении двигателем максимально возможной (при данном соединении) скорости выключается масляный выключатель *1* и включается масляный выключатель *3*, отчего двигатель получает полное напряжение сети и развивает нормальную скорость вращения.

При пуске автотрансформаторы понижают напряжение на 50–80 %.

Недостатком такого способа пуска двигателя в ход является резкое уменьшение пускового момента. Для уменьшения пускового тока в *N* раз необходимо приложенное напряжение понизить также в *N* раз.

При этом пусковой момент, пропорциональный квадрату напряжения, уменьшится в N^2 раз. Таким образом, понижение напряжения допустимо при пуске двигателя без нагрузки или при малых нагрузках, когда пусковой момент может быть небольшим.

Часто двигатель пускают в ход посредством переключения обмотки статора со звезды на треугольник (рис. 7.14).

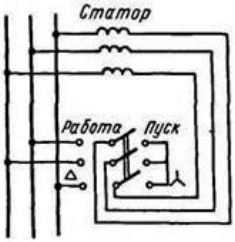


Рис. 7.14. Переключение обмотки статора
со звезды на треугольник при пуске двигателя

При пуске обмотка статора с помощью рубильника соединяется звездой и, как только двигатель разовьет максимально возможную для этого соединения скорость вращения, рубильник откидывается влево, обмотка статора оказывается включенной треугольником и двигатель получает возможность развить полную скорость. При этом способе пуска двигателя пусковой ток уменьшается в три раза. Поясним это на примере.

На рис. 7.15, *а* схематически изображена обмотка статора, имеющая сопротивление 10 Ом и соединенная при пуске звездой. Пусть напряжение между линейными проводами двигателя равно 380 В, а следовательно, напряжение, приходящееся на фазу двигателя при пуске, будет равно:

$$U_{\text{фу}} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В}.$$

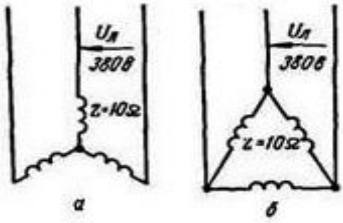


Рис. 7.15. Включение обмотки статора двигателя:
а – звездой; *б* – треугольником

Так как сопротивление фазной обмотки двигателя Z = 10 Ом, то фазный ток будет равен:

$$I_{\text{фу}} = \frac{U_{\text{фу}}}{Z} = \frac{220}{10} = 22 \text{ А}.$$

При соединении звездой $I_{\text{л}} = I_{\text{ф}}$. Поэтому ток, потребляемый двигателем в конце пуска (без учета пусковых токов) будет также равен 22 А.

На рис. 7.15, *б* схематически показан тот же двигатель, если обмотка его соединена треугольником. В этом случае $U_{\text{л}} = U_{\text{ф}}$, а поэтому ток фазы двигателя

$$I_{\text{фΔ}} = \frac{U_{\text{фΔ}}}{Z} = \frac{380}{10} = 38 \text{ А}.$$

Так как при соединении треугольником $I_{\text{л}} = \sqrt{3} I_{\text{ф}}$, то двигатель в этом случае будет потреблять из сети ток

$$I_{\text{лΔ}} = \sqrt{3} I_{\text{фΔ}} = \sqrt{3} \cdot 38 = 66 \text{ А}.$$

Как видно из приведенного примера, линейный ток двигателя при соединении обмоток статора звездой в три раза меньше линейного тока двигателя, статорная обмотка которого соединена треугольником.

Рассмотренный нами способ пуска двигателя уменьшает пусковой ток в три раза, а так как, согласно доказанному выше, момент двигателя пропорционален току ротора и, стало быть, приближенно и току статора, то одновременно пусковой момент двигателя уменьшается также в три раза. Поэтому двигатели с таким способом пуска можно

применять только в тех случаях, когда их пускают вхолостую или слабо нагруженными.

Само собой разумеется, что переключение обмотки статора со звезды на треугольник при пуске можно применять только для двигателей, нормально работающих по схеме «треугольник».

7.8. Двигатели с улучшенными пусковыми свойствами

Простота конструкции и надежность в эксплуатации двигателей с короткозамкнутым ротором являются их существенным достоинством, благодаря чему они получили широкое применение в промышленности. Однако эти двигатели имеют плохие пусковые характеристики.

Значительное улучшение пусковых характеристик асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором достигается изменением конструкции ротора: используют роторы с двойной короткозамкнутой обмоткой (двухклеточный ротор) и с глубокими пазами (рис. 7.16).

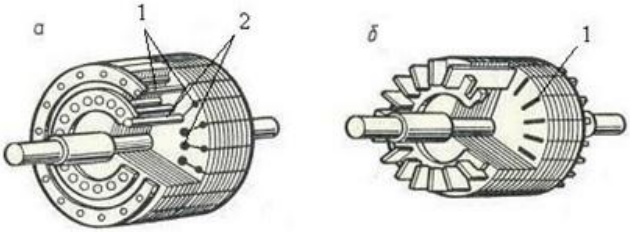


Рис. 7.16. Конструкции роторов двигателей с улучшенными пусковыми свойствами: *а* – с двойной короткозамкнутой обмоткой; *б* – с глубокими пазами; *1* – пусковая обмотка; *2* – рабочая обмотка

Ротор с двойной короткозамкнутой обмоткой был впервые предложен М. О. Доливо-Добровольским в 1889 г. Он имеет две короткозамкнутые обмотки, выполненные в виде беличьих клеток (рис. 7.17), располагающихся на разной глубине.

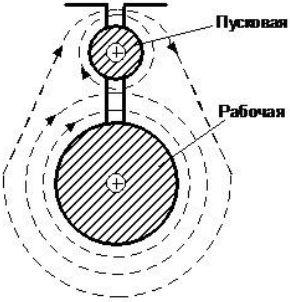


Рис. 7.17. Двойная короткозамкнутая обмотка

Одна обмотка, находящаяся ближе к воздушному зазору, выполнена из стержней малого поперечного сечения и называется пусковой. Внутренняя обмотка выполняется из стержней большого поперечного сечения и называется рабочей. Активное сопротивление пусковой обмотки значительно больше, чем активное сопротивление рабочей обмотки из-за площади поперечного сечения стержней. Индуктивное сопротивление рабочей обмотки значительно больше, чем индуктивное сопротивление пусковой обмотки вследствие того, что стержни рабочей обмотки глубоко погружены в тело ротора и окружены сталью.

Обмотки могут быть как литыми, так и паяными. При паяной конструкции пусковая обмотка выполняется из латуни, а рабочая – из меди. Стержни каждой из обмоток замыкаются отдельными кольцами.

Принцип действия этого двигателя состоит в следующем. В момент включения двигателя в сеть ротор неподвижен и частота тока в роторе равна частоте тока в сети: $f_2 = f_1$. Ток в обмотках распределяется обратно пропорционально их полным сопротивлениям.

Так как реактивные сопротивления обмоток асинхронных машин значительно больше их активных сопротивлений, то при пуске в ход распределение тока между обмотками примерно обратно пропорционально их индуктивным сопротивлениям. Поэтому при пуске в ход ток в основном протекает по проводникам внешней (пусковой) обмотки, имеющей меньшее индуктивное и большее активное сопротивление.

В рабочем режиме скольжение мало и, следовательно, частота тока в роторе также мала ($f_2 \approx 0$). Поэтому индуктивные сопротивления обмоток не имеют значения, и токи в них обратно пропорциональны их активным сопротивлениям.

Таким образом, в рабочем режиме ток в основном проходит по

проводникам внутренней (рабочей) обмотки, имеющим меньшее активное сопротивление. При такой конструкции ротора увеличивается активное сопротивление его обмотки в момент пуска в ход двигателя, что уменьшает пусковой ток и увеличивает пусковой момент так же, как включение пускового реостата в цепь фазного ротора.

В двигателях с глубокими пазами на роторе его короткозамкнутая обмотка выполняется в виде тонких высоких полос (рис. 7.18). При такой конструкции обмотки происходит оттеснение тока к верхней части проводников вследствие того, что нижние части проводников сцеплены с большим числом магнитных линий потока рассеяния, чем верхние части.

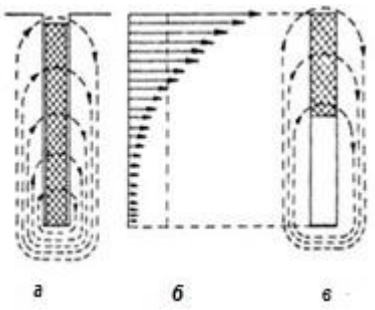


Рис. 7.18. Схема устройства ротора с глубокими пазами и явление вытеснения тока: *а* – магнитное поле; *б* – диаграмма распределения плотности тока; *в* – рабочая часть проводника

Таким образом, ток, протекающий по проводникам, стремится сконцентрироваться преимущественно в верхней их части, что равносильно уменьшению поперечного сечения или увеличению активного сопротивления этих проводников.

Это явление оттеснения тока в верхние части проводников особенно сильно сказывается в момент включения двигателя, когда частота тока в роторе равна частоте тока сети и, следовательно, при пуске в ход увеличивается активное сопротивление обмотки ротора, в результате чего возрастает пусковой момент.

При увеличении скорости вращения ротора частота тока в его обмотке уменьшается, и ток более равномерно распределяется по сечению стержней, и при нормальной скорости вращения неравномерность

распределения тока по поперечному сечению стержней почти полностью исчезает.

Пусковой момент двигателей этого типа $M_{\text{п}} = (1{,}2–1{,}5)M_{\text{н}}$.

7.9. Регулирование частоты вращения трехфазных асинхронных двигателей

Частота вращения ротора в минуту определяется следующим выражением:

$$n_2 = n_1 - n_S = n_1\left(1-S\right) = \frac{60\,f_1}{p}\left(1-S\right).$$

Из этого выражения видно, что частоту вращения ротора можно регулировать изменением любой из трех величин, определяющих ее, т. е. изменением частоты тока сети f_1, числа пар полюсов p и скольжения S.

Изменение скольжения. Этот способ используют в приводе тех механизмов, где установлены асинхронные двигатели с фазным ротором. Например, в приводе подъемно-транспортных машин.

Скольжение можно изменять регулировочным реостатом, введенным в цепь обмотки ротора, а также регулированием напряжения сети.

При регулировании напряжения питающей сети изменяется вращающий момент двигателя пропорционально квадрату напряжения. При уменьшении вращающего момента уменьшится частота вращения ротора, т. е. увеличится скольжение.

Если в цепь фазного ротора вводится регулировочный реостат, то увеличение активного сопротивления ротора не влияет на величину критического момента, но увеличивает критическое скольжение.

Регулировочный реостат включается в цепь обмотки фазного ротора подобно пусковому реостату, но в отличие от пускового он рассчитывается на длительное прохождение тока.

При включении регулировочного реостата ток в роторе уменьшится, что вызовет снижение вращающего момента двигателя и, следовательно, уменьшение частоты вращения или увеличение скольжения. При увеличении скольжения увеличиваются ЭДС и ток в роторе. Частота вращения или скольжения будет изменяться до восстановления равновесия моментов, т. е. пока ток в роторе не примет своего начального значения.

На рис. 7.19 приведены механические характеристики асинхронного двигателя при разных сопротивлениях регулировочного реоста-

та $R_{р3} > R_{р2} > 0, R_{р1} = 0$.

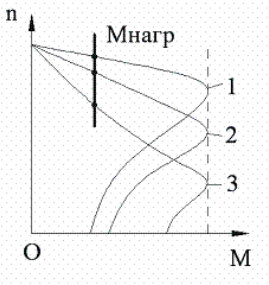


Рис. 7.19. Зависимость механических характеристик асинхронного электродвигателя от изменения сопротивления регулировочного реостата

Как следует из рис. 7.19, при этом способе можно получить большой диапазон регулирования частоты вращения в сторону понижения. Основные недостатки этого способа заключаются в следующем:

– из-за больших потерь на регулировочном реостате снижается КПД, т. е. способ является неэкономичным;

– механическая характеристика асинхронного двигателя с увеличением активного сопротивления ротора становится мягче, т. е. снижается устойчивость работы двигателя;

– невозможно плавно регулировать частоту вращения.

Из-за перечисленных недостатков этот способ применяют для кратковременного снижения частоты вращения.

Изменение числа пар полюсов. Число полюсов машины может быть изменено, если на статоре имеется несколько (обычно две) обмоток с различным числом полюсов или одна обмотка, которую можно переключать на различное число полюсов, или две обмотки, каждая из которых может переключаться на различное число полюсов.

При изменении числа полюсов обмотки статора изменится частота вращения его магнитного поля, а следовательно, и частота вращения ротора двигателя.

Эти двигатели (многоскоростные) имеют более сложную обмотку статора, позволяющую изменять ее число пар полюсов, и короткозамкнутый ротор. При работе асинхронного двигателя необходимо, чтобы обмотки ротора и статора имели одинаковое число пар полюсов. Только короткозамкнутый ротор способен автоматически приобретать

то же число пар полюсов, что и поле статора. Многоскоростные двигатели нашли широкое применение в приводе металлорежущих станков. Нашли применение двух-, трех- и четырехскоростные двигатели.

У двухскоростного двигателя обмотка каждой фазы состоит из двух полуобмоток. Включая их последовательно (рис. 7.20, *а*) или параллельно (рис. 7.20, *б*), можно в два раза изменить число пар полюсов.

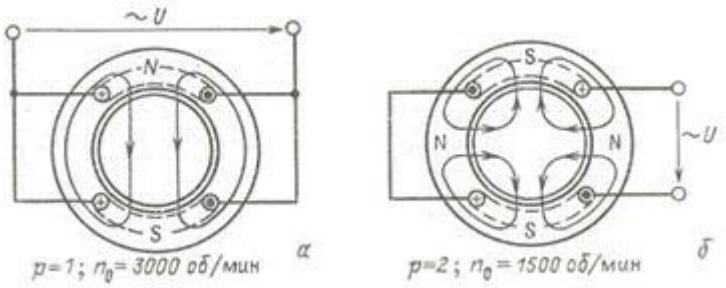


Рис. 7.20. Схема соединения и магнитное поле статора двигателя при параллельном (*а*) и последовательном (*б*) соединении полуобмоток

У четырехскоростного двигателя на статоре должны размещаться две независимые обмотки с разным числом пар полюсов. Каждая из обмоток позволяет в два раза изменять число пар полюсов. Например, у двигателя, работающего от сети с частотой $f = 50$ Гц с частотами вращения 3000, 1500, 1000, 500 об/мин, с помощью одной из обмоток статора можно получить частоту вращения 3000 об/мин и 1500 об/мин (при этом $p = 1$ и $p = 2$). С помощью другой из обмоток можно получить частоту вращения 1000 об/мин и 500 об/мин (при этом $p = 3$ и $p = 6$).

При переключении числа пар полюсов изменяется и магнитный поток в зазоре, что приводит к изменению критического момента $M_{кр}$ (рис. 7.21, *б*). Если при изменении числа пар полюсов одновременно изменять и подведенное напряжение, то критический момент может остаться неизменным (рис. 7.21, *а*). Поэтому при этом способе регулирования могут быть получены два вида семейства механических характеристик.

Достоинства этого способа регулирования: сохранение жесткости механических характеристик, высокий КПД. Недостатки: ступенчатое регулирование; стоимость такого двигателя значительно возрастает вследствие усложнения обмотки статора и увеличения габаритов ма-

шины.

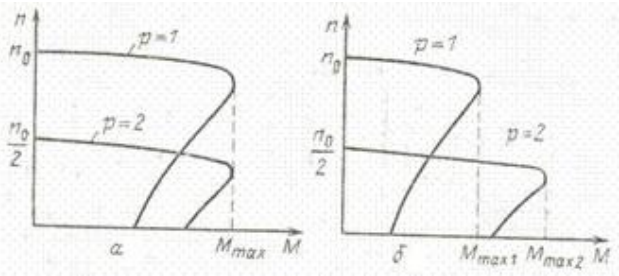


Рис. 7.21. Механические характеристики асинхронного двигателя:
а – при изменении числа пар полюсов и напряжения питающей сети;
б – при изменении числа пар полюсов

Изменение частоты источника питания. В качестве таких источников питания в настоящее время начали находить применение преобразователи частоты (ПЧ), выполняемые на мощных полупроводниковых приборах – тиристорах. Из уравнения трансформаторной ЭДС $U_1 = 4{,}44 w_1 k_1 f \Phi$ следует, что для сохранения неизменным магнитного потока, т. е. для сохранения перегрузочной способности двигателя, необходимо вместе с частотой изменять и действующее значение подведенного напряжения. При выполнении соотношения $U_1/f_1 = U'_1/f'_1$ критический момент не изменяется и получается семейство механических характеристик, представленное на рис. 7.22.

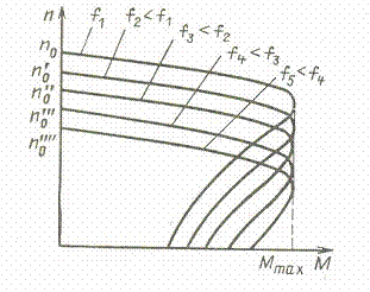


Рис. 7.22. Механические характеристики асинхронного электродвигателя
при частотном регулировании

7.10. Принцип действия однофазных асинхронных двигателей

Однофазные асинхронные двигатели широко применяют при небольших мощностях (до 1–2 кВт). Такой двигатель отличается от трехфазного тем, что на статоре его помещается однофазная обмотка. Ротор однофазного асинхронного двигателя имеет фазную или короткозамкнутую обмотку.

Особенностью однофазных асинхронных двигателей является отсутствие начального или пускового момента, т. е. при включении такого двигателя в сеть ротор его будет оставаться неподвижным.

При включении главной обмотки статора в сеть переменный ток, проходя по обмотке, создает пульсирующее магнитное поле, неподвижное в пространстве, но изменяющееся от $+\Phi_{max}$ до $-\Phi_{max}$. Если поместить ротор, имеющий начальное вращение, в пульсирующее магнитное поле, то он будет продолжать вращаться в том же направлении.

Чтобы понять принцип действия однофазного асинхронного двигателя, разложим пульсирующее магнитное поле на два одинаковых круговых поля, имеющих амплитуду, равную $\Phi_{max}/2$ и вращающихся в противоположные стороны с одинаковой частотой (рис. 7.23):

$$n_{пр} = n_{обр} = \frac{60 f_1}{p} = n_1,$$

где $n_{пр}$ – частота вращения магнитного поля в прямом направлении, об/мин;

$n_{обр}$ – частота вращения магнитного поля в обратном направлении, об/мин.

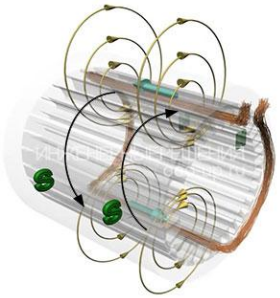


Рис. 7.23. Прямой и обратный вращающиеся магнитные потоки вместо пульсирующего магнитного потока

Рассмотрим случай, когда ротор, находящийся в пульсирующем магнитном потоке, имеет начальное вращение. Например, мы вручную

раскрутили вал однофазного двигателя, одна обмотка которого подключена к сети переменного тока. В этом случае при определенных условиях двигатель будет продолжать развивать вращающий момент, так как скольжение его ротора относительно прямого и обратного магнитного потока будет неодинаковым.

Будем считать, что прямой магнитный поток $\Phi_{пр}$ вращается в направлении вращения ротора, а обратный магнитный поток $\Phi_{обр}$ – в противоположном направлении. Так как частота вращения ротора n_2 меньше частоты вращения магнитного потока n_1, скольжение ротора относительно потока $\Phi_{пр}$ будет равно:

$$S_{пр} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = S,$$

где $S_{пр}$ – скольжение ротора относительно прямого магнитного потока.

Магнитный поток $\Phi_{обр}$ вращается встречно ротору, частота вращения ротора n_2 относительно этого потока отрицательна, а скольжение ротора относительно $\Phi_{обр}$

$$S_{обр} = \frac{n_1 - (-n_2)}{n_1} = 2 - S_{пр}.$$

Согласно закону электромагнитной индукции прямой $\Phi_{пр}$ и обратный $\Phi_{обр}$ магнитные потоки, создаваемые обмоткой статора, наводят в обмотке ротора ЭДС, которые соответственно создают в короткозамкнутом роторе токи $I_{2пр}$ и $I_{2обр}$ (рис. 7.24).

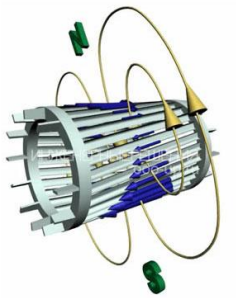


Рис. 7.24. Ток, индуцируемый в роторе
переменным магнитным полем

При этом частота тока в роторе пропорциональна скольжению, следовательно:

$$f_{2пр} = f_1 S_{пр},$$

где $f_{2пр}$ – частота тока $I_{2пр}$, наводимого прямым магнитным потоком, Гц.

$$f_{2обр} = f_1 S_{обр},$$

где $f_{2обр}$ – частота тока $I_{2обр}$, наводимого обратным магнитным потоком, Гц.

Таким образом, при вращающемся роторе, электрический ток $I_{2обр}$, наводимый обратным магнитным полем в обмотке ротора, имеет частоту $f_{2обр}$, намного превышающую частоту $f_{2пр}$ тока ротора $I_{2пр}$, наведенного прямым полем.

Согласно закону Ампера, в результате взаимодействия электрического тока $I_{2пр}$ с магнитным полем $\Phi_{пр}$ возникает вращающий момент (рис. 7.25):

$$M_{пр} = C\Phi_{пр} I_{2пр} \cos \varphi_{2пр}, \qquad (7.6)$$

где $M_{пр}$ – магнитный момент, создаваемый прямым магнитным потоком, Н·м;

C – постоянный коэффициент, определяемый конструкцией двигателя.

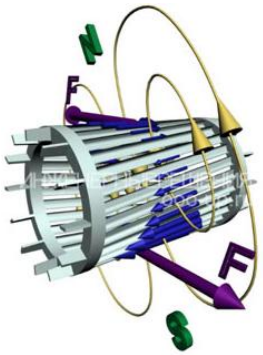


Рис. 7.25. Магнитный момент, действующий на ротор

Электрический ток $I_{2обр}$, взаимодействуя с магнитным полем $\Phi_{обр}$, создает тормозящий момент $M_{обр}$, направленный против вращения ротора, т. е. встречно моменту $M_{пр}$:

$$M_{обр} = C\Phi_{обр} I_{2обр} \cos \varphi_{2обр}, \qquad (7.7)$$

где $M_{обр}$ – магнитный момент, создаваемый обратным магнитным потоком, Н · м.

Результирующий вращающий момент, действующий на ротор однофазного асинхронного двигателя,

$$M = M_{пр} - M_{обр}.$$

Вследствие того, что во вращающемся роторе прямым и обратным магнитным полем будет наводиться ток разной частоты, моменты сил, действующие на ротор в разных направлениях, будут не равны. Поэтому ротор будет продолжать вращаться в пульсирующем магнитном поле в том направлении, в котором он имел начальное вращение.

При работе однофазного двигателя в пределах номинальной нагрузки, т. е. при небольших значениях скольжения $S = S_{пр}$, крутящий момент создается в основном за счет момента $M_{пр}$. Тормозящее действие момента обратного поля $M_{обр}$ незначительно. Это связано с тем, что частота $f_{2обр}$ много больше частоты $f_{2пр}$, следовательно, индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора $X_{2обр} = X_2 S_{обр}$ току $I_{2обр}$ намного больше его активного сопротивления. Поэтому ток $I_{2обр}$, имеющий большую индуктивную составляющую, оказывает сильное размагничивающее действие на обратный магнитный поток $\Phi_{обр}$, значительно ослабляя его.

В режиме нагрузки двигателя $M_{обр}$ не оказывает значительного тормозящего действия на ротор однофазного двигателя ввиду того, что коэффициент мощности невелик:

$$\cos\varphi_{2обр} = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_{2обр}^2}}, \qquad (8.8)$$

где R_2 – активное сопротивление стержней ротора, Ом;

$X_{2обр}$ – реактивное сопротивление стержней ротора, Ом.

При неподвижном роторе ($n_2 = 0$) скольжение $S_{пр} = S_{обр} = 1$ и $M_{пр} = M_{обр}$, поэтому начальный пусковой момент однофазного асинхронного двигателя $M_п = 0$. Для создания пускового момента необходимо привести ротор во вращение в ту или иную сторону. Тогда $S \neq 1$, нарушается равенство моментов $M_{пр}$ и $M_{обр}$, и результирующий электромагнитный момент приобретает некоторое значение (рис. 7.26)

$$M = M_{пр} - M_{обр} \neq 0.$$

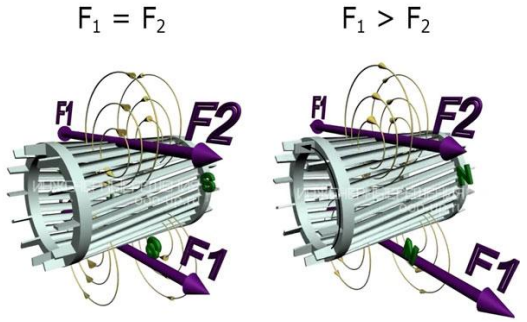


Рис. 7.26. Схема воздействия сил на неподвижный
и вращающийся ротор однофазного асинхронного двигателя

Одним из способов создания пускового момента в однофазном асинхронном двигателе является расположение вспомогательной (пусковой) обмотки *B*, смещенной в пространстве относительно главной (рабочей) обмотки *A* на угол 90 электрических градусов. Чтобы обмотки статора создавали вращающееся магнитное поле, токи I_A и I_B в обмотках должны быть сдвинуты по фазе относительно друг друга. Для получения фазового сдвига между токами I_A и I_B в цепь вспомогательной (пусковой) обмотки *B* включают фазосмещающий элемент, в качестве которого используют активное сопротивление (резистор), индуктивность (дроссель) или емкость (конденсатор).

После того как ротор двигателя разгонится до частоты вращения, близкой к установившейся, пусковую обмотку *B* отключают. Отключение вспомогательной обмотки происходит либо автоматически с помощью центробежного выключателя, реле времени, токового или дифференциального реле, или же вручную с помощью кнопки.

Таким образом, во время пуска двигатель работает как двухфазный, а по окончании пуска – как однофазный.

7.11. Пуск в ход однофазных асинхронных двигателей

Двигатель с расщепленной фазой – однофазный асинхронный двигатель, имеющий на статоре вспомогательную первичную обмотку, смещенную относительно основной, и короткозамкнутый ротор.

Однофазный асинхронный двигатель с пусковым сопротивлением – двигатель с расщепленной фазой, у которого цепь вспомогатель-

ной обмотки отличается повышенным активным сопротивлением.

Для запуска однофазного двигателя можно использовать пусковой резистор $R_п$, который последовательно подключается к пусковой обмотке (рис. 7.27).

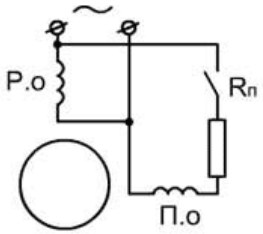


Рис. 7.27. Омический сдвиг фаз,
биффилярный способ намотки пусковой обмотки

В этом случае можно добиться сдвига фаз в 30° между токами главной и вспомогательной обмотки, которого вполне достаточно для пуска двигателя. В двигателе с пусковым сопротивлением разность фаз объясняется разным комплексным сопротивлением цепей.

Также сдвиг фаз можно создать за счет использования пусковой обмотки с меньшей индуктивностью и более высоким сопротивлением. Для этого пусковая обмотка делается с меньшим количеством витков и с использованием более тонкого провода, чем в главной обмотке (рис. 7.28).

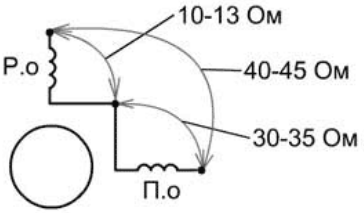


Рис. 7.28. Разное сопротивление и индуктивность обмоток

Отечественной промышленностью изготавливается серия однофазных асинхронных электродвигателей с активным сопротивлением в качестве фазосдвигающего элемента серии АОЛБ мощностью от 18 до 600 Вт при синхронной частоте вращения 3000 и 1500 об/мин, предназначенных для включения в сеть напряжением 127, 220 или 380 В, час-

тотой 50 Гц.

Двигатель с конденсаторным пуском – двигатель с расщепленной фазой, у которого цепь вспомогательной обмотки с конденсатором включается только на время пуска.

Чтобы достичь максимального пускового момента, требуется создать круговое вращающееся магнитное поле. Для этого необходимо, чтобы токи в главной и вспомогательной обмотках были сдвинуты друг относительно друга на 90°. Использование в качестве фазосдвигающего элемента резистора или дросселя не позволяет обеспечить требуемый сдвиг фаз. Лишь включение конденсатора $C_п$ определенной емкости позволяет обеспечить фазовый сдвиг 90° (рис. 7.29).

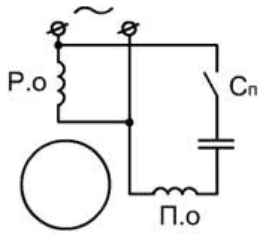


Рис. 7.29. Емкостной сдвиг фаз
с пусковым конденсатором

Среди фазосдвигающих элементов только конденсатор позволяет добиться наилучших пусковых свойств однофазного асинхронного электродвигателя.

Двигатели, в цепь которых постоянно включен конденсатор, используют для работы две фазы и называются ***конденсаторными***. Принцип действия этих двигателей основан на использовании вращающегося магнитного поля. Конденсаторный двигатель, хотя и питается от однофазной сети, по существу, является двухфазным.

Конструктивно конденсаторный асинхронный двигатель представляет собой двухфазный двигатель. На статоре располагают две обмотки фаз, оси которых смещены относительно друг друга на 90 электрических градусов. Обе обмотки занимают равное число пазов. Питание электродвигателя осуществляется от однофазной сети переменного тока, при этом одна обмотка подключается непосредственно к сети, а другая через конденсатор $C_р$ (рис. 7.30). Таким образом, в отличие от однофазного двигателя, который после пуска работает с пульсирую-

щим магнитным потоком, конденсаторный электродвигатель работает с вращающимся магнитным потоком.

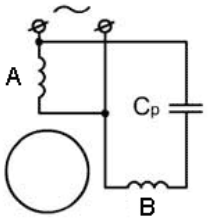


Рис. 7.30. Емкостной сдвиг фаз
с рабочим конденсатором

Емкость рабочего конденсатора, требуемая для получения кругового вращающегося поля, определяется по формуле

$$C_{\text{раб}} = \frac{I_B \cos\varphi_A}{2\pi f U} = \frac{I_A \cos\varphi_A}{2\pi f U k}, \qquad (7.9)$$

где $C_{\text{раб}}$ – емкость рабочего конденсатора, Ф;

I_A – ток обмотки A, А;

I_B – ток обмотки B, А;

φ_A – угол фазового сдвига между током I_A и напряжением питания U при круговом вращающемся поле, град;

U – напряжение питания сети, В;

f – частота сети, Гц;

k – коэффициент, определяемый отношением эффективных чисел витков в обмотках фаз статора B и A.

$$k = \frac{\omega_B k_{\text{об}B}}{\omega_A k_{\text{об}A}}, \qquad (7.10)$$

где ω_A, ω_B – число последовательно соединенных витков в обмотках фаз A и B статора;

$k_{\text{об}A}$, $k_{\text{об}B}$ – обмоточный коэффициент обмоток фаз статора A и B.

Для повышения пускового момента параллельно рабочему конденсатору $C_{\text{р}}$ включают пусковой конденсатор $C_{\text{п}}$ (рис. 7.31). Для создания пускового момента, равного номинальному, требуется пусковой конденсатор $C_{\text{п}}$ емкостью в 2–2,5 раза больше рабочего $C_{\text{р}}$.

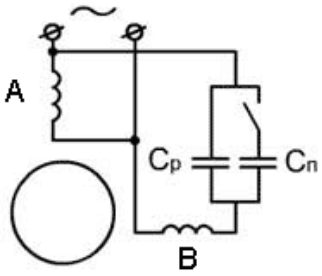


Рис. 7.31. Емкостной сдвиг фаз
с пусковым и рабочим конденсатором

Двигатель с экранированными полюсами – двигатель с расщепленной фазой, у которого вспомогательная обмотка короткозамкнута.

Статор однофазного асинхронного двигателя с экранированными полюсами обычно имеет явно выраженные полюса. На явно выраженных полюсах статора намотаны катушки однофазной обмотки возбуждения. Каждый полюс статора разделен на две неравные части аксиальным пазом. Меньшую часть полюса охватывает короткозамкнутый виток. Ротор такого двигателя короткозамкнутый в виде беличьей клетки.

При включении однофазной обмотки статора в сеть в магнитопроводе двигателя создается пульсирующий магнитный поток, одна часть которого (Ф') проходит по неэкранированной, а другая (Ф") – по экранированной части полюса. Поток Ф" наводит в короткозамкнутом витке ЭДС E_k, в результате чего возникает ток I_k, отстающий от E_k по фазе из-за индуктивности витка. Ток I_k создает магнитный поток Φ_k, направленный встречно Ф", создавая результирующий поток в экранированной части полюса $\Phi_э = Ф'' + \Phi_k$. Таким образом, в двигателе потоки экранированной и неэкранированной частей полюса сдвинуты во времени на некоторый угол.

Пространственный и временной углы сдвига между потоками $\Phi_э$ и Ф' создают условия для возникновения в двигателе вращающегося эллиптического магнитного поля, так как $\Phi_э \neq Ф'$.

Пусковые и рабочие свойства рассматриваемого двигателя невысоки. КПД намного ниже, чем у конденсаторных двигателей такой же мощности, что связано со значительными электрическими потерями в короткозамкнутом витке.

Однофазный электродвигатель с асимметричным магнитопроводом статора (рис. 7.32). Статор такого однофазного двигателя выполняется с ярко выраженными полюсами на несимметричном шихтованном сердечнике. Ротор короткозамкнутый типа «беличья клетка».

Рис. 7.32. Однофазный электродвигатель
с асимметричным магнитопроводом статора

Данный электродвигатель для работы не требует использования фазосдвигающих элементов. Недостатком данного двигателя является низкий КПД.

Трехфазные асинхронные электродвигатели могут быть подключены к однофазной сети с помощью фазосдвигающих элементов. При этом электродвигатель будет работать либо в режиме однофазного двигателя с пусковой обмоткой (рис. 7.33, *а*, *б*, *г*) либо в режиме конденсаторного двигателя с постоянно включенным рабочим конденсатором (рис. 7.33, *в*, *д*, *е*).

Схемы, приведенные на рис. 7.33, *а*, *б*, *д*, применяются, когда выведены все шесть концов обмотки. Электродвигатели с соединением обмоток согласно схемам, приведенным на рис. 7.33, *а*, *б*, *г*, практически равноценны двигателям, которые спроектированы как однофазные электродвигатели с пусковой обмоткой. Номинальная мощность при этом составляет 40–50 % от мощности в трехфазном режиме, а при работе с рабочим конденсатором – 75–80 %.

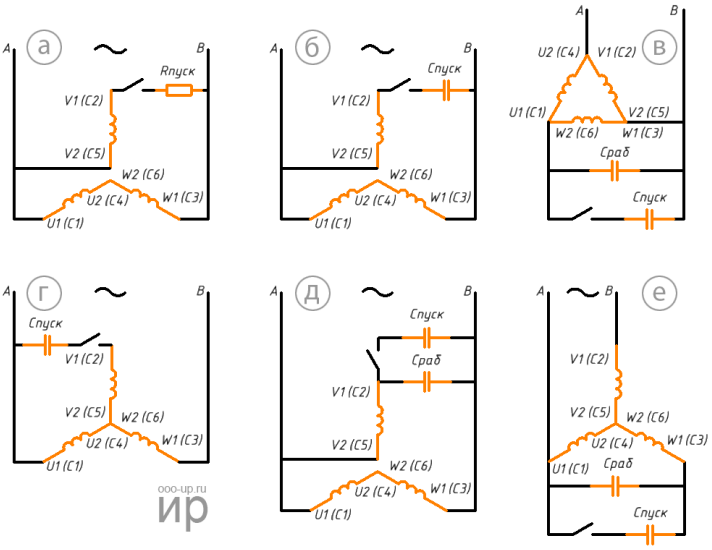


Рис. 7.33. Схемы подключения трехфазного асинхронного электродвигателя к однофазной сети

Емкость рабочего конденсатора при частоте тока 50 Гц для схем, приведенных на рис. 7.33, *в*, *д*, *е*, примерно рассчитывается по следующей формуле:

$$C_{\text{раб}} \approx c\frac{I_{\text{н}}}{U_1}, \qquad (7.11)$$

где $C_{\text{раб}}$ – емкость рабочего конденсатора, мкФ;

c – коэффициент (для рис. 7.33, *в* c = 4800; для рис. 7.33, *д* c = 2700; для рис. 7.33, *е* c = 2800);

$I_{\text{н}}$ – номинальный (фазный) ток статора трехфазного двигателя, А;

U_1 – напряжение однофазной сети, В.

Лекция 8. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

8.1. Принцип действия синхронного генератора

В синхронных машинах частота вращения ротора равна частоте

вращения магнитного поля статора и, следовательно, определяется частотой тока сети и числом пар полюсов, т. е.

$$n = 60f/p \text{ и } f = pn/60.$$

Как и всякая электрическая машина, синхронная машина обратима, т. е. может работать как генератором, так и двигателем.

Электрическая энергия вырабатывается синхронными генераторами, первичными двигателями которых являются либо гидравлические, либо паровые турбины, либо двигатели внутреннего сгорания.

Обычно обмотки возбуждения получают энергию от возбудителя, который представляет собой генератор постоянного тока.

Возбудитель находится на одном валу с рабочей машиной, и мощность его составляет малую величину, порядка 1–5 % мощности синхронной машины, возбуждаемой им.

При небольшой мощности часто используются схемы питания обмоток возбуждения синхронных машин от сети переменного тока через полупроводниковые выпрямители. Простейшим генератором может быть виток из провода *1* и *2*, вращающийся в магнитном поле (рис. 8.1). Магнитное поле возбуждается током обмотки возбуждения, помещенной на полюсах статора *N*–*S*.

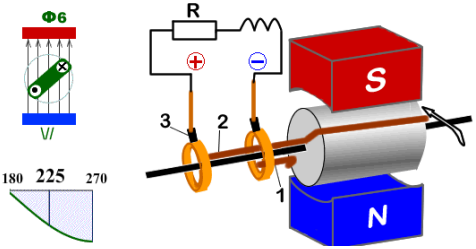


Рис. 8.1. Простейший генератор:
1 и *2* – проводники; *3* – кольца

При вращении витка проводники *1* и *2* пересекают магнитное поле, созданное между полюсами *N*–*S*, вследствие чего в витке будет индуктироваться ЭДС.

Концы витка соединены с кольцами *3*, вращающимися вместе с витком. Если на кольцах поместить неподвижные щетки и соединить их с приемником электрической энергии, то по замкнутой цепи, состоящей из витка, колец, щеток и приемника энергии, пойдет электри-

ческий ток под действием ЭДС.

Полученная в таком простейшем генераторе ЭДС будет непрерывно изменяться в зависимости от положения витка в магнитном поле. Когда проводники *1* и *2* находятся под осями полюсов, то при вращении витка они пересекают в единицу времени наибольшее число линий магнитного поля. Следовательно, в данный момент индуктируемая в витке ЭДС будет иметь наибольшее значение.

В дальнейшем при повороте витка изменится число линий магнитного поля, пересекаемых в единицу времени проводниками *1* и *2*. При повороте витка на 90° в пространстве проводники будут перемещаться в вертикальном направлении, совпадающем с направлением магнитных линий поля. Следовательно, проводники *1* и *2* не пересекают магнитных линий и ЭДС в витке равна нулю.

При повороте витка на угол, больший 90°, изменится направление перемещения этих проводников в магнитное поле, а следовательно, и направление ЭДС, индуктируемой в витке.

Если магнитное поле между полюсами *N* и *S* распределяется равномерно, то ЭДС будет меняться во времени синусоидально. За один оборот витка в пространстве ЭДС, индуктируемая в нем, претерпевает один период изменения.

Если виток вращается при помощи какого-либо первичного двигателя с постоянной частотой вращения *n* в минуту, то в этом витке индуктируется переменная ЭДС с частотой

$$f = n/60.$$

8.2. Устройство синхронного генератора

Возникновение ЭДС в проводниках возможно как при перемещении этих проводников в неподвижном магнитном поле, так и при перемещении магнитного поля относительно неподвижных проводников.

В первом случае полюсы, т. е. индуктирующая часть машины, возбуждающая магнитное поле, помещаются на неподвижной части машины (на статоре), а индуктируемая часть (якорь), т. е. проводники, в которых создается ЭДС, – на вращающейся части машины (на роторе). Во втором случае полюсы помещаются на роторе, а якорь – на статоре.

Выше мы рассмотрели принцип действия синхронного генератора с неподвижными полюсами и вращающимся якорем. В таком генераторе энергия, вырабатываемая им, передается приемнику энергии посредством скользящих контактов – контактных колец и щеток.

Скользящий контакт в цепи большой мощности создает значительные потери энергии, а при высоких напряжениях наличие такого контакта крайне нежелательно. Поэтому генераторы с вращающимся якорем и неподвижными полюсами выполняют только при невысоких напряжениях (до 380/220 В) и небольших мощностях (до 15 кВА).

Наиболее широкое применение получили синхронные генераторы, в которых полюсы помещены на роторе, а якорь – на статоре.

Ток возбуждения протекает по обмотке возбуждения, которая представляет собой последовательно соединенные катушки, помещенные на полюсы ротора. Концы обмотки возбуждения соединены с контактными кольцами, которые крепятся на валу машины. На кольцах помещаются неподвижные щетки, посредством которых в обмотку возбуждения подводится постоянный ток от постороннего источника энергии – генератора постоянного тока, называемого возбудителем.

На рис. 8.2 показан общий вид синхронного генератора с возбудителем.

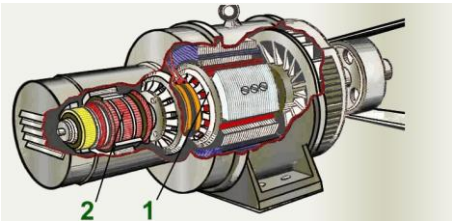


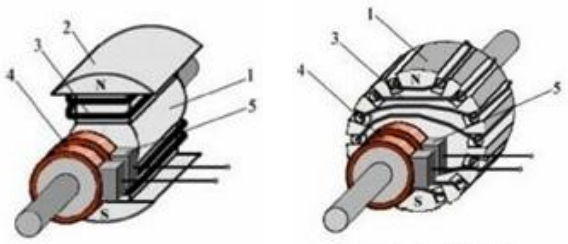
Рис. 8.2. Синхронный генератор:
1 – ротор; *2* – возбудитель

Устройство статора синхронного генератора аналогично устройству статора асинхронной машины. Ротор синхронных генераторов выполняют либо с явно выраженными (выступающими) полюсами, либо с неявно выраженными полюсами, т. е. без выступающих полюсов.

Для подачи тока в обмотку возбуждения на роторе устанавливают два кольца (так как возбуждение осуществляется постоянным током, то на одно из них подают «+», а на другое «–»). Щетки закреплены на щеткодержателе.

В машинах с относительно малой частотой вращения (при большом числе полюсов) роторы должны быть с явно выраженными полюсами (рис. 8.3, *а*), равномерно расположенными по окружности ротора.

Полюс состоит из сердечника, полюсного наконечника и катушки обмотки возбуждения, помещаемой на сердечнике полюса.



а *б*

Рис. 8.3. Ротор синхронной машины
а – явнополюсный; *б* – неявнополюсный;
1 – магнитопровод; *2* – полюса; *3* – обмотка возбуждения;
4 – контактные кольца; *5* – электрические щетки

Первичные двигатели синхронных генераторов с явно выраженными полюсами обычно представляют собой гидравлические турбины, являющиеся тихоходными машинами. При большой частоте вращения такое устройство ротора не может обеспечить нужной механической прочности и поэтому у высокоскоростных машин роторы выполняют с неявно выраженными полюсами (рис. 8.3, *б*).

Сердечники роторов с неявно выраженными полюсами обычно изготовляют из цельных поковок, на поверхности которых фрезеруются пазы. После укладки обмоток возбуждения на роторе пазы его забиваются клиньями, а лобовые соединения обмотки возбуждения укрепляются стальными бандажами, помещенными на торцовых частях ротора. При такой конструкции ротора допускаются большие частоты вращения. Для генераторов с неявно выраженными полюсами первичными двигателями обычно являются паровые турбины, принадлежащие к числу быстроходных машин.

8.3. Работа синхронного генератора под нагрузкой

Если синхронный генератор не нагружен, т. е. работает вхолостую, то тока в обмотках статора нет. Магнитный поток полюсов, созданный током возбуждения, индуктирует в трехфазной обмотке статора ЭДС. При нагрузке генератора по обмотке статора протекает ток.

При симметричной нагрузке токи в фазах обмотки статора равны и сдвинуты на $^1/_3$ периода. Токи статора создают вращающееся магнитное поле, частота вращения которого

$$n_1 = 60f/p = n,$$

т. е. магнитное поле, созданное токами в обмотке статора, вращается синхронно с магнитным полем полюсов.

В обмотке статора синхронного генератора создается ЭДС, величина которой зависит от магнитного потока полюсов. Если магнитный поток полюсов очень мал, то и ЭДС также мала. При увеличении магнитного потока возрастает и ЭДС машины. Таким образом, при постоянной частоте вращения ротора ЭДС пропорциональна магнитному потоку, который возбуждается постоянным током, протекающим по проводникам обмотки возбуждения.

Если повысить ток в обмотке возбуждения, то возрастет и магнитный поток полюсов, что вызовет увеличение ЭДС машины. Следовательно, изменение тока в обмотке возбуждения вызывает соответствующее изменение ЭДС машины и позволяет регулировать напряжение на зажимах генератора.

При холостом ходе синхронного генератора напряжение равно ЭДС, индуктированной в обмотке статора. При нагрузке генератора напряжение не равно ЭДС, так как в сопротивлении (активном и реактивном) обмотки статора возникает падение напряжения. Кроме того, токи, проходящие по обмоткам статора, создают поток реакции якоря, который воздействует на поток полюсов, так что при нагрузке магнитный поток не будет равен магнитному потоку полюсов при холостой работе генератора. Поэтому изменение нагрузки, т. е. тока в статоре генератора, будет вызывать изменение напряжения на зажимах генератора в случае, если ток в обмотке возбуждения остается неизменным.

На рис. 8.4, *а* изображены внешние характеристики синхронного генератора при активной и реактивной нагрузках.

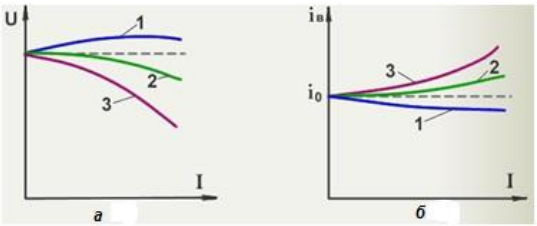


Рис. 8.4. Характеристики синхронного генератора:
а – внешние; *б* – регулировочные;
1 – емкостная; *2* – активная; *3* – индуктивная

Эти характеристики показывают зависимость напряжения на зажимах генератора от тока нагрузки при неизменных частоте вращения ротора и токе возбуждения. Различный вид этих характеристик при активной, индуктивной и емкостной нагрузках объясняется неодинаковым воздействием поля реакции якоря на магнитный поток полюсов.

Для нормальной работы любого приемника электрической энергии требуется постоянное напряжение сети. Чтобы обеспечить постоянное напряжение сети при изменении нагрузки в синхронном генераторе, изменяют и ток возбуждения. Зависимость, показывающая, каким образом необходимо изменить ток в обмотке возбуждения для того, чтобы при изменении нагрузки генератора напряжение на его зажимах оставалось неизменным, называется регулировочной характеристикой (рис. 8.4, *б*).

При активной нагрузке увеличение тока в статоре вызывает незначительное понижение напряжения, так как реакция якоря уменьшает магнитный поток в малой степени. При этой нагрузке требуется незначительно увеличить ток возбуждения для обеспечения постоянства напряжения. При индуктивной нагрузке создается размагничивающее поле реакции якоря, уменьшающее поток полюсов. Поэтому для постоянства напряжения (т. е. для постоянства результирующего магнитного потока) необходимо в большей мере увеличить ток возбуждения для компенсации размагничивающего поля реакции якоря.

При емкостной нагрузке происходит усиление магнитного поля и для постоянства напряжения следует уменьшить ток возбуждения при увеличении тока в статоре.

Наиболее часто синхронные генераторы работают на общую мощную сеть электростанции или энергосистемы. Напряжение такой сети $U_с$ и частота тока в ней неизменны. ЭДС генератора $E_г$ равна и противоположна напряжению сети

$$E_г = -U_с.$$

Результирующее магнитное поле $\Phi_р$ статора, вращающееся с частотой

$$n_1 = 60f/p$$

в пространстве, опережает напряжение $E_г$ на 90° (рис. 8.5).

При неизменном напряжении сети $U_с$ амплитуда магнитного потока $\Phi_р$ результирующего магнитного поля статора также неизменна.

При активной нагрузке генератора ток статора I совпадает по фазе с напряжением $U_г$. Поток реакции якоря $\Phi_я$ совпадает по фазе с током I,

так что вектор тока в статоре I в другом масштабе определит вектор $\Phi_я$. Результирующий магнитный поток создается действием потока полюсов Φ_m и потока реакции якоря $\Phi_я$ и может быть представлен геометрической суммой этих магнитных потоков.

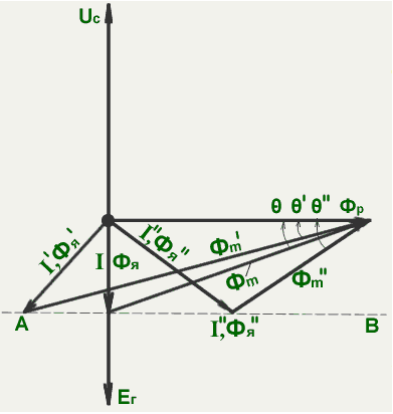


Рис. 8.5. Векторная диаграмма синхронного генератора при различных токах возбуждения

Изменение тока возбуждения генератора не вызывает изменения его активной мощности, так как мощность, потребляемая им от первичного двигателя, остается неизменной (вращающий момент первичного двигателя и частота вращения постоянны).

Активная составляющая тока статора постоянна и конец вектора $I\Phi_я$ находится на прямой AB, параллельной горизонтальной оси. Если увеличить ток возбуждения, то возрастет поток полюсов Φ_m', вектор которого находится между прямой AB и концом неизменного вектора $\Phi_р$. В этом случае изменится как по величине, так и по направлению вектор I' и $\Phi_я'$, т. е. ток окажется отстающим по фазе от напряжения генератора.

При уменьшении тока возбуждения уменьшится также и поток полюсов Φ_m'', что приведет к изменению тока в статоре $I''\Phi_я''$ как по величине, так и по фазе.

Таким образом, изменение тока возбуждения генератора, работающего на мощную сеть, вызывает изменение реактивной составляющей тока в статоре, т. е. изменяет реактивную мощность, вырабатываемую генератором.

Для изменения активной мощности необходимо изменить вращающий момент первичного двигателя, приводящего во вращение ротор синхронного генератора. Под действием вращающего момента первичного двигателя M_1 ротор машины с помещенными на нем полюсами приводится во вращение с частотой вращения в минуту n. Результирующее поле статора вращается в том же направлении с частотой $n_1 = n$. Следовательно, поле полюсов Φ_m и результирующее поле статора $\Phi_р$ вращаются синхронно, оставаясь неподвижными друг относительно друга, и между этими полями устанавливается взаимодействие. В результате создается электромагнитный тормозной момент $M_э$, уравновешивающий момент первичного двигателя.

Для включения генератора в сеть необходимо:

одинаковое чередование фаз в сети и генераторе;

равенство напряжения сети и ЭДС генератора;

равенство частот ЭДС генератора и напряжения сети;

включение генератора в тот момент, когда ЭДС генератора в каждой фазе направлена встречно напряжению сети.

Невыполнение этих условий ведет к тому, что в момент включения генератора в сеть возникают токи, которые могут оказаться большими и вывести из строя генератор.

При включении генераторов в сеть используют специальные устройства – синхроноскопы. Простейшим синхроноскопом являются три лампы накаливания, включаемые между зажимами генератора и контактами сети. Лампы должны быть рассчитаны на двойное напряжение сети и до включения генератора будут одновременно загораться и погасать.

В момент, когда ЭДС генератора равна и направлена встречно напряжению сети, лампы погаснут, так как напряжение на каждой лампе равно нулю. При погасании ламп генератор включается в сеть. До включения генератора в сеть ЭДС его измеряется вольтметром и регулированием тока возбуждения устанавливается равной напряжению сети. Частота ЭДС генератора регулируется изменением частоты вращения первичного двигателя.

8.4. Конструкции синхронных двигателей

Синхронный двигатель не имеет принципиальных конструктивных отличий от синхронного генератора. Так же как и в генераторе, на статоре синхронного двигателя помещается трехфазная обмотка, при

включении которой в сеть трехфазного переменного тока будет создано вращающееся магнитное поле $\Phi_р$, частота вращения в минуту которого

$$n_1 = 60f/p.$$

Существуют следующие типы синхронных двигателей: с обмоткой возбуждения, с постоянными магнитами, реактивные, гистерезисные, реактивно-гистерезисные и шаговые.

Синхронный электродвигатель с обмоткой возбуждения (рис. 8.6) имеет явнополюсный ротор с электромагнитным возбуждением. Для создания постоянного магнитного поля ротора требуется источник постоянного тока. Обмотки ротора двигателя соединены с контактными кольцами, к которым через щетки подводится постоянный ток. Преимуществом данных двигателей является отсутствие дорогостоящих магнитов, недостатком – наличие щеток и необходимость питания обмоток ротора.

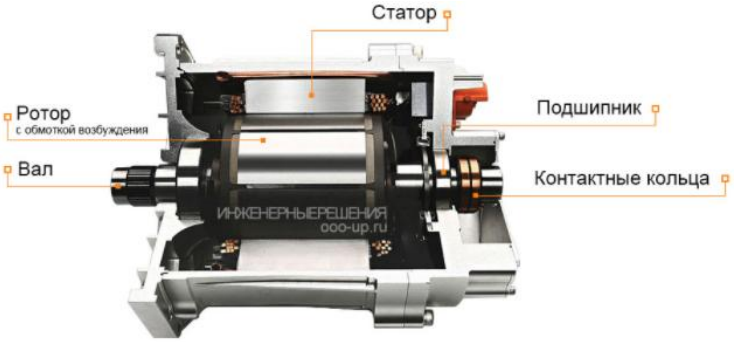


Рис. 8.6. Синхронный электродвигатель с обмоткой возбуждения

Синхронный электродвигатель с постоянными магнитами (рис. 8.7) имеет ротор с постоянными магнитами. Обычно ротор располагается внутри статора электродвигателя, также существуют конструкции с внешним ротором – электродвигатели обращенного типа (рис. 8.8). Ротор состоит из постоянных магнитов. В качестве постоянных магнитов используются материалы с высокой коэрцитивной силой. По конструкции ротора синхронные двигатели делятся на электродвигатели с явно выраженными полюсами и электродвигатели с неявно выраженными полюсами.

Рис. 8.7. Синхронный электродвигатель со встроенными постоянными магнитами

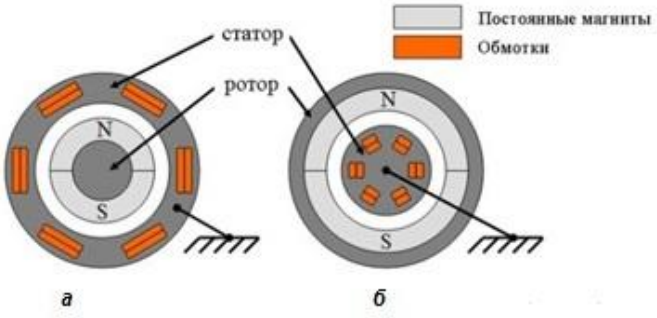


Рис. 8.8. Конструкции синхронного двигателя с постоянными магнитами:
а – стандартная; *б* – обращенная

Также по конструкции ротора синхронные двигатели с постоянными магнитами делятся на синхронные двигатели с поверхностной установкой постоянных магнитов (англ. SPMSM – surface permanent magnet synchronous motor) и синхронные двигатели со встроенными (инкорпорированными) магнитами (англ. IPMSM – interior permanent magnet synchronous motor) (рис. 8.9).

Статор состоит из корпуса и сердечника с обмоткой. Наиболее распространены конструкции с двух- и трехфазной обмоткой.

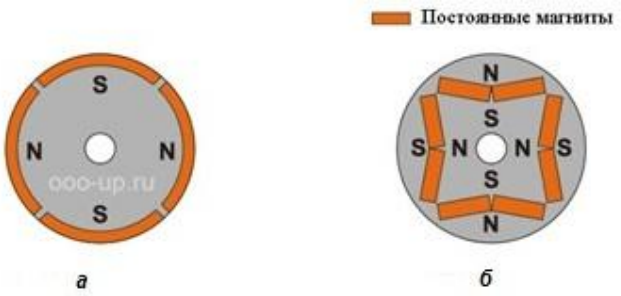


Рис. 8.9. Конструкции роторов синхронных двигателей с постоянными магнитами: *а* – с поверхностной установкой магнитов; *б* – со встроенными магнитами

В зависимости от конструкции статора синхронный двигатель с постоянными магнитами бывает (рис. 8.10) с распределенной обмоткой и с сосредоточенной обмоткой.

Рис. 8.10. Статоры синхронного электродвигателя с постоянными магнитами: *а* – с распределенной обмоткой; *б* – с сосредоточенной обмоткой

Распределенной называют такую обмотку, у которой число пазов на полюс и фазу $Q = 2, 3, \ldots, k$ (рис. 8.11, *а*).

Сосредоточенной называют такую обмотку, у которой число пазов на полюс и фазу $Q = 1$ (рис. 8.11, *б*). При этом пазы расположены равномерно по окружности статора. Две катушки, образующие обмотку, можно соединить как последовательно, так и параллельно. Основной недостаток таких обмоток – невозможность влияния на форму кривой ЭДС.

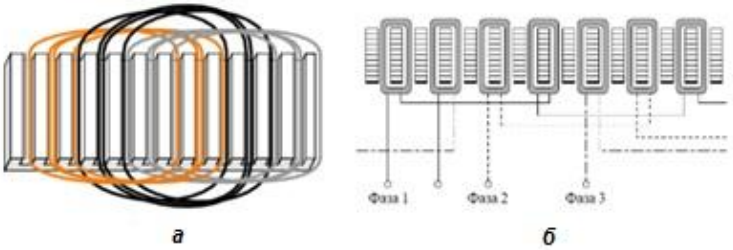


Рис. 8.11. Схемы обмоток статора синхронного электродвигателя с постоянными магнитами: *а* – распределенная; *б* – сосредоточенная

В отличие от коллекторного двигателя постоянного тока функции коллектора и щеток выполняют полупроводниковые ключи. Такой электродвигатель имеет такие же преимущества, что и коллекторный двигатель постоянного тока, при этом не требует текущего ремонта (бесщеточный) в процессе эксплуатации, но требует сложной системы управления. Бесщеточные синхронные электродвигатели с постоянными магнитами имеют ряд преимуществ по сравнению с другими двигателями, обладая лучшими показателями: мощность (объем), КПД, момент (инерция) и др.

Синхронный реактивный электродвигатель (рис. 8.12) – двигатель с ротором из ферромагнитного материала. Статор реактивного двигателя бывает с распределенной и сосредоточенной обмоткой и состоит из корпуса и сердечника с обмоткой.

Рис. 8.12. Синхронный реактивный электродвигатель:
а – общий вид; *б* – статор с распределенной обмоткой

Выделяют три основных типа ротора реактивного двигателя: ротор с явно выраженными полюсами, аксиально-расслоенный ротор и поперечно-расслоенный ротор (рис. 8.13).

Рис. 8.13. Конструкции роторов синхронного реактивного двигателя:
а – с явно выраженными полюсами; *б* – аксиально-расслоенный;
в – поперечно-расслоенный

Принцип действия синхронного реактивного электродвигателя основан на свойствах ферромагнитных тел ориентироваться так, чтобы сцепленный с ним магнитный поток оказался максимальным. Основными преимуществами электродвигателя являются: простая и надежная конструкция ротора (без магнитов и короткозамкнутой обмотки), низкий нагрев (в роторе отсутствуют токи и во время работы он не нагревается, что увеличивает срок службы), низкий момент инерции ротора (быстрый разгон и экономия электроэнергии), возможность регулирования частоты вращения (частотный преобразователь) и низкая цена изготовления. При одинаковых размерах реактивный электродвигатель развивает больший момент, чем асинхронный, но имеет более низкий коэффициент мощности из-за того, что магнитный поток создается только за счет реактивного тока. Данный электродвигатель для работы требует систему управления.

Гистерезисный электродвигатель (рис. 8.14) – синхронный электродвигатель с неявнополюсным гистерезисным ротором. Вращающий момент этого электродвигателя создается за счет магнитного гистерезиса материала ротора. Достоинствами гистерезисных двигателей являются простота устройства, надежность в эксплуатации, отсутствие пусковых приспособлений, плавность втягивания в синхронизм, практически неизменный ток при пуске и работе. К недостаткам можно отнести относительно высокую стоимость материала ротора.

Рис. 8.14. Синхронный гистерезисный двигатель

Реактивно-гистерезисный электродвигатель (рис. 8.15) – это гибридный синхронный электродвигатель с явно выраженными полюсами, ротор которого выполнен из магнитотвердого материала с большим остаточным намагничиванием. Пуск электродвигателя происходит за счет асинхронного и гистерезисного моментов, а работа – за счет гистерезисного и реактивного моментов.

Рис. 8.15. Конструкция синхронного реактивно-гистерезисного электродвигателя

Статор однофазного реактивно-гистерезисного электродвигателя подобен статору однофазного асинхронного электродвигателя с экранированными полюсами и имеет шихтованный двухполюсный сердечник с явно выраженными полюсами. Для упрощения установки однофазной обмотки сердечник статора выполняют разборным, состоящим из двух половин. Полюсы сердечника статора оканчиваются полюсными наконечниками. Каждый полюс разделен на две равные части продольным пазом, на одной из частей расположены короткозамкну-

тые медные экранирующие витки, обеспечивающие получение в однофазном двигателе вращающегося магнитного поля. Двигатели с экранированными полюсами нереверсивны – ротор всегда вращается только в одну сторону – от неэкранированной части полюса статора к экранированной.

Ротор включает две или более пластин (дисков) толщиной по 0,4 мм из закаленной магнитотвердой стали. Для создания гистерезисного момента выбирается сталь с большим остаточным намагничиванием. Пластины имеют форму колец с перемычками. Магнитное сопротивление ротора в направлении перемычек меньше, и поэтому магнитные проводимости по продольной и поперечной осям не равны, что обеспечивает получение на роторе еще и реактивного момента. Кольцевой обод на пластинах ротора обеспечивает получение асинхронного и гистерезисного моментов. Ротор закреплен на валу с помощью прорезей в перемычках пластин. Вал электродвигателя связан с редуктором, понижающим частоту вращения и увеличивающим вращающий момент. Ротор с редуктором помещен в герметичный корпус из немагнитного металла.

В реактивно-гистерезисном электродвигателе создается три электромагнитных вращающих момента. При пуске двигателя на ротор действуют вихревой и гистерезисный моменты. При этом магнитный гистерезис стального ротора снижает КПД двигателя, но значительно увеличивает пусковой момент. После пуска ротор втягивается в синхронизм и вращается с неизменной синхронной частотой под действием реактивного и гистерезисного моментов.

Синхронные реактивно-гистерезисные двигатели при сравнительно больших габаритных размерах и массе имеют низкие энергетические показатели (КПД и cos φ). Однако они широко применялись в автоматических устройствах благодаря простоте конструкции, технологичности и возможности работы от однофазного питания.

Шаговый электродвигатель (рис. 8.16) – синхронный бесщеточный электродвигатель, который без устройств обратной связи преобразует сигнал управления в угловое перемещение ротора с фиксацией его в заданном положении.

Шаговые двигатели надежны и недороги, так как ротор не имеет контактных колец и коллектора. Ротор имеет либо явно выраженные полюса, либо тонкие зубья. Реактивный шаговый двигатель имеет ротор из магнитомягкого материала с явно выраженными полюсами. Шаговый двигатель с постоянными магнитами имеет ротор на посто-

янных магнитах. Гибридный шаговый двигатель имеет составной ротор, включающий полюсные наконечники (зубья) из магнитомягкого материала и постоянные магниты. Определить, имеет ротор постоянные магниты или нет, можно посредством вращения обесточенного двигателя. Если при вращении имеются фиксирующий момент и (или) пульсации, значит, ротор выполнен на постоянных магнитах.

Рис. 8.16. Гибридный шаговый электродвигатель

Статор шагового двигателя имеет сердечник с явно выраженными полюсами, который обычно делается из ламинированных штампованных листов электротехнической стали для уменьшения вихревых токов и нагрева. Статор шагового двигателя обычно имеет от двух до пяти фаз.

Главное преимущество шаговых электродвигателей – точность, а также возможность осуществлять позиционирование и регулировать скорость без датчика обратной связи.

8.5. Пуск в ход синхронных двигателей

На роторе двигателя помещена обмотка возбуждения, включаемая в сеть источника постоянного тока. Ток возбуждения создает магнитный поток полюсов Φ_m. Вращающееся магнитное поле, полученное токами обмотки статора, увлекает за собой полюсы ротора. При этом ротор может вращаться только синхронно с полем, т. е. с частотой, равной частоте вращения поля статора. Таким образом, частота вращения синхронного двигателя строго постоянна, если неизменна частота тока питающей сети.

Основным достоинством синхронных двигателей является возможность их работы с потреблением опережающего тока, т. е. двигатель

может представлять собой емкостную нагрузку для сети. Такой двигатель повышает cos φ всего предприятия, компенсируя реактивную мощность других приемников энергии. Так же как и в генераторах, в синхронных двигателях изменение реактивной мощности, т. е. изменение cos φ, достигается регулированием тока возбуждения. При некотором токе возбуждения, соответствующем нормальному возбуждению, cos φ = 1. Уменьшение тока возбуждения вызывает появление отстающего (индуктивного) тока в статоре, а при увеличении тока возбуждения (перевозбужденный двигатель) – опережающего (емкостного) тока в статоре.

Достоинством синхронных двигателей является также меньшая, чем у асинхронных, чувствительность к изменению напряжения питающей сети. У синхронных двигателей вращающий момент пропорционален напряжению сети в первой степени, тогда как у асинхронных – квадрату напряжения. Вращающий момент синхронного двигателя создается в результате взаимодействия магнитного поля статора с магнитным полем полюсов. От напряжения питающей сети зависит только магнитный поток поля статора. Синхронные двигатели выполняют преимущественно с явно выраженными полюсами, и работают они в нормальном режиме с опережающим током при cos φ = 0,8.

Возбуждение синхронные двигатели получают либо от возбудителя, либо от сети переменного тока через полупроводниковые выпрямители. Пуск в ход синхронного двигателя непосредственным включением его в сеть невозможен, так как при включении обмотки статора в сеть создается вращающееся магнитное поле, а ротор в момент включения неподвижен.

Поэтому для пуска в ход двигателя необходимо предварительно довести частоту вращения ротора до синхронной частоты или близкой к ней.

В настоящее время исключительное применение имеет так называемый асинхронный пуск синхронных двигателей, сущность которого заключается в следующем.

В полюсных наконечниках ротора синхронного двигателя уложена пусковая обмотка, выполненная в виде беличьего колеса, наподобие короткозамкнутой обмотки ротора асинхронной машины. Обмотка статора двигателя включается в трехфазную сеть, и пуск его производится так же, как и пуск асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. После того как двигатель разовьет частоту, близкую к синхронной (примерно 95 %), обмотка возбуждения включается в сеть по-

стоянного тока и двигатель входит в синхронизм, т. е. частота ротора увеличивается до синхронной.

При пуске в ход двигателя обмотка возбуждения замыкается на сопротивление, примерно в 10–12 раз большее сопротивления самой обмотки. Нельзя обмотку возбуждения при пуске в ход оставить разомкнутой или замкнуть накоротко. Если при пуске в ход обмотка возбуждения окажется разомкнутой, то в ней будет индуктироваться очень большая ЭДС, опасная как для изоляции обмотки, так и для обслуживающего персонала.

Создание ЭДС большой величины объясняется тем, что при пуске в ход поле статора вращается с большой частотой относительно неподвижного ротора и с большой частотой пересекает проводники обмотки возбуждения, имеющей большое число витков.

Работа синхронной машины с потреблением из сети переменного тока дает возможность использовать ее в качестве компенсатора. Компенсатором является синхронный двигатель, работающий без нагрузки и предназначенный для повышения cos φ предприятия.

Конструктивно компенсатор отличается от синхронного двигателя незначительно. Компенсатор не несет механической нагрузки, поэтому его вал и ротор легче, а воздушный зазор меньше, чем у двигателя. Основным недостатком синхронных двигателей является потребность в источнике как переменного, так и постоянного тока. Потребность в источнике постоянного тока для питания обмотки возбуждения синхронного двигателя делает его крайне неэкономичным при небольших мощностях.

Лекция 9. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

9.1. Принцип действия и устройство машины постоянного тока

Простейшим генератором является виток, вращающийся в магнитном поле полюсов *N* и *S* (рис. 9.1). В таком витке индуктируется переменная во времени ЭДС. Поэтому при соединении концов витка с контактными кольцами, вращающимися вместе с витком, в нагрузке через неподвижные щетки протекает переменный ток, т. е. такая машина является генератором переменного тока.

Для преобразования переменного тока в постоянный применяют коллектор, принцип действия которого состоит в следующем. Концы витка *1* присоединены к двум медным полукольцам (сегментам), назы-

ваемым коллекторными пластинами. Пластины жестко укреплены на валу машины и изолированы как друг от друга, так и от вала. На пластинах помещены неподвижные щетки *2* и *3*, электрически соединенные с приемником энергии.

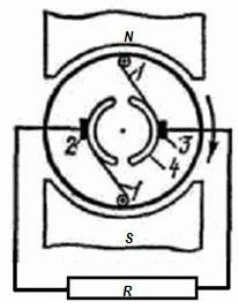


Рис. 9.1. Схема устройства генератора постоянного тока:
1 – виток; *2* и *3* – щетки; *4* – коллекторные пластины

При вращении витка коллекторные пластины также вращаются вместе с валом машины и каждая из неподвижных щеток *2* и *3* соприкасается то с одной, то с другой пластиной.

Щетки на коллекторе установлены так, чтобы они переходили с одной пластины на другую в тот момент, когда ЭДС, индуктируемая в витке, была равна нулю. В этом случае при вращении якоря в витке индуктируется переменная ЭДС, изменяющаяся синусоидально при равномерном распределении магнитного поля, но каждая из щеток соприкасается с той коллекторной пластиной и соответственно с тем из проводников, которые в данный момент находятся под полюсом определенной полярности.

Следовательно, ЭДС на щетках *2* и *3* знака не меняет, и ток по внешнему участку замкнутой электрической цепи проходит в одном направлении от щетки *2* через сопротивление *R* к щетке *3*. Однако несмотря на неизменность направления ЭДС во внешней цепи величина ее меняется во времени, т. е. получена не постоянная, а пульсирующая ЭДС. Ток во внешней цепи будет также пульсирующим.

Если поместить на якоре два витка под углом 90° один к другому и концы этих витков соединить с четырьмя коллекторными пластинами, то пульсация ЭДС и тока во внешней цепи значительно уменьшится.

При увеличении числа коллекторных пластин пульсация быстро уменьшается и при большом числе коллекторных пластин ЭДС и ток практически постоянны.

На рис. 9.2 показан общий вид машины постоянного тока. Неподвижная часть является индуктирующей, т. е. создающей магнитное поле, а вращающаяся часть – индуктируемой (якорем).

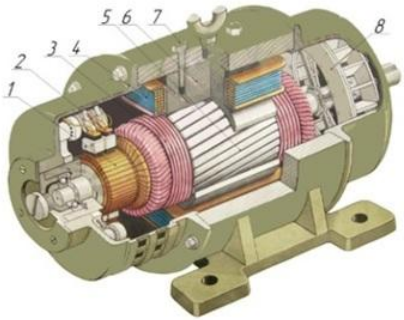


Рис. 9.2. Устройство машины постоянного тока:
1 – коллектор; *2* – щетки и щеткодержатель; *3* – обмотка якоря;
4 – полюсная катушка; *5* – якорь; *6* – сердечник полюса возбуждения;
7 – станина; *8* – вентилятор

Любая электрическая машина состоит, как правило, из двух составных частей: неподвижной части – статора, располагаемой обычно снаружи, и вращающейся внутренней части – ротора. Всю вышеперечисленную совокупность вращающихся деталей называют по имени главной из них – якорем. Таким образом, на практике термин «якорь» имеет двоякое значение: во-первых, совокупность вращающихся частей машины постоянного тока, во-вторых, собственно якорь.

Статор современной машины постоянного тока (рис. 9.3) состоит из ярма, главных, или основных, магнитных полюсов с намагничивающими их катушками из изолированного или голого медного провода круглого или прямоугольного сечения и из добавочных, или коммутационных, магнитных полюсов с намагничивающими их катушками из изолированного или из голого (с изоляционными прокладками) медного провода круглого или прямоугольного сечения.

Термин «статор» в применении к машинам постоянного тока на практике не используется, вместо него пользуются термином «магнитная система или индуктор». Термин «ярмо» также заменяют на прак-

тике термином «машины постоянного тока», так как в качестве конструктивной части машины ярмо выполняет эту роль.

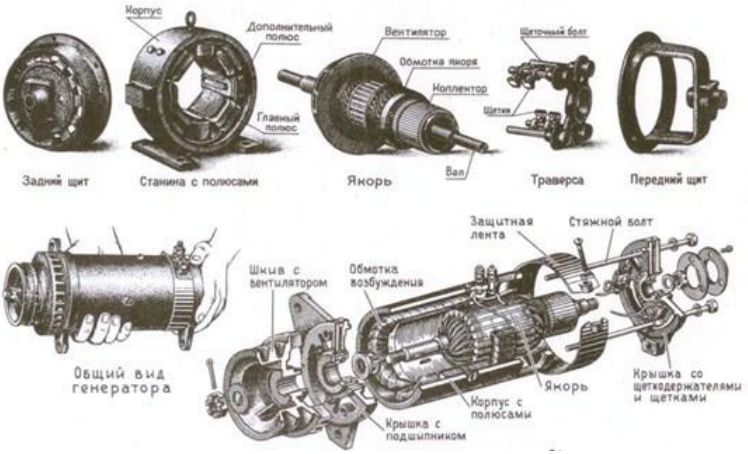


Рис. 9.3. Узлы и детали машины постоянного тока

Неподвижная часть машины состоит из главных полюсов, дополнительных полюсов и станины (рис. 9.4).

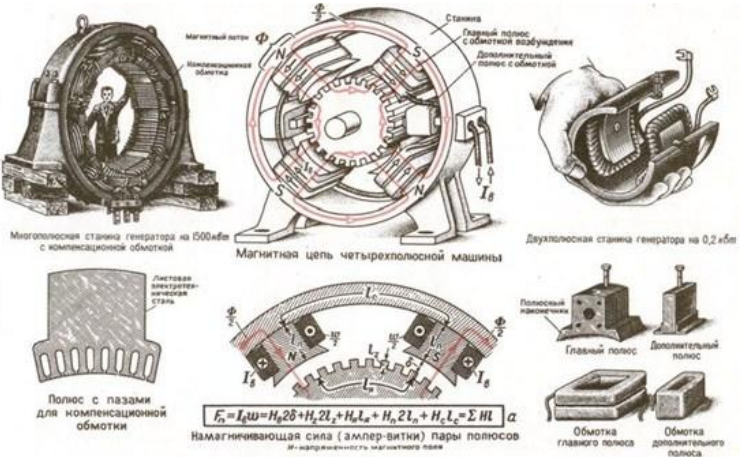


Рис. 9.4. Магнитная система машины постоянного тока

Главный полюс представляет собой электромагнит, создающий магнитный поток. Он состоит из сердечника, обмотки возбуждения и полюсного наконечника. Полюсы крепятся на станине с помощью болта. Сердечник полюса отливается из стали и имеет поперечное сечение овальной формы. На сердечнике полюса помещена катушка обмотки возбуждения, намотанная из изолированного медного провода. Катушки всех полюсов соединяются последовательно, образуя обмотку возбуждения. Ток, проходящий по обмотке возбуждения, создает магнитный поток. Полюсный наконечник удерживает обмотку возбуждения на полюсе и обеспечивает равномерное распределение магнитного поля под полюсом. Полюсному наконечнику придают такую форму, при которой воздушный зазор между полюсами и якорем одинаков по всей длине полюсной дуги.

Добавочные полюсы имеют также сердечник и обмотку. Добавочные полюсы расположены между главными полюсами, и число их может быть либо равным числу главных полюсов, либо вдвое меньшим. Добавочные полюсы устанавливают в машинах больших мощностей; они служат для устранения искрения под щетками. В машинах малых мощностей добавочных полюсов обычно нет.

В больших машинах постоянного тока, предназначаемых для тяжелых условий работы, в полюсных башмаках главных магнитных полюсов, которым в этом случае придают особо развитую форму, проштамповывают ряд пазов для укладки в них компенсационной обмотки. Она предназначается для воспрепятствования искажению формы распределения индукции основного магнитного потока в пространстве, отделяющем полюсный башмак от якоря. Это пространство называется *междужелезным пространством* или *главным электромашинным зазором*.

Компенсационная обмотка выполняется, как и прочие обмотки машины, из меди и изолируется. Обмотки добавочных полюсов и компенсационная обмотка соединяются с обмоткой якоря последовательно.

Станину отливают из стали; она является остовом машины. На станине крепят главные и добавочные полюсы, а также на торцовых сторонах ее – боковые щиты с подшипниками, удерживающими вал машины (см. рис. 9.3).

Вращающаяся часть машины (якорь) состоит из сердечника (рис. 9.5), обмотки и коллектора.

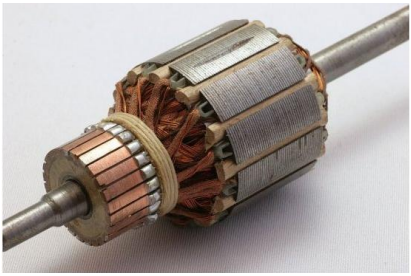


Рис. 9.5. Якорь машины постоянного тока

Сердечник якоря представляет собой цилиндр, собранный из листов электротехнической стали. Листы изолируются друг от друга лаком или бумагой для уменьшения потерь на вихревые токи (рис. 9.6). Стальные листы штампуют на станках по шаблону; они имеют пазы, в которых укладываются проводники обмотки якоря. В теле якоря делают воздушные каналы для охлаждения обмотки и его сердечника. Обмотка тщательно изолируется от сердечника и закрепляется в пазах деревянными клиньями. Лобовые соединения укрепляются стальными бандажами. Все секции обмотки, помещенные на якоре, включаются между собой последовательно, образуя замкнутую цепь, и присоединяются к коллекторным пластинам.

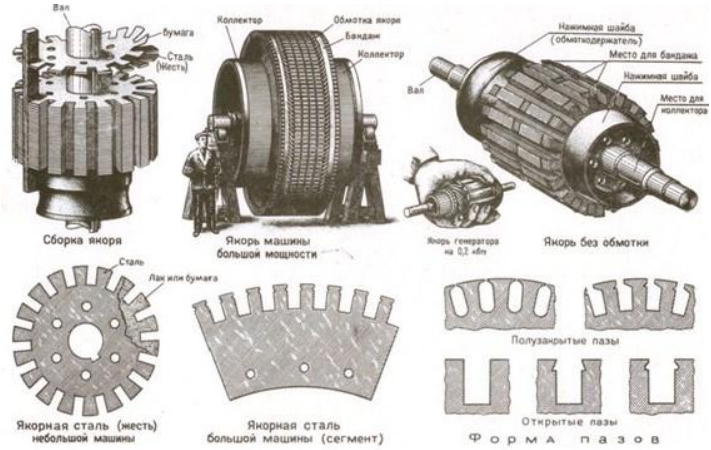


Рис. 9.6. Составные элементы якоря машины постоянного тока

Коллектор представляет собой цилиндр, состоящий из отдельных пластин (рис. 9.7).

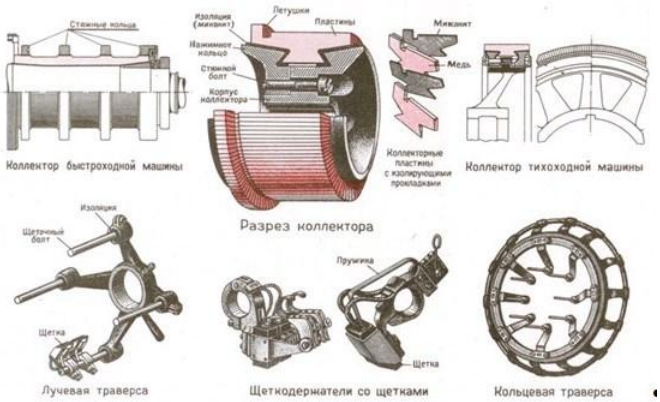


Рис. 9.7. Токосъемное устройство

Коллекторные пластины изготовляют из твердотянутой меди и изолируют между собой и от корпуса прокладками из миканита. Для крепления на втулке коллекторным пластинам придают форму ласточкина хвоста, который зажимается между выступом на втулке и шайбой, имеющими форму, соответствующую форме пластины. Шайба крепится к втулке болтами.

Коллектор является наиболее сложной в конструктивном отношении и наиболее ответственной в работе частью машины. Поверхность коллектора должна быть строго цилиндрической во избежание биения и искрения щеток.

Для соединения обмотки якоря с внешней цепью на коллекторе помещают неподвижные щетки (рис. 9.8), которые могут быть графитными, угольно-графитными или бронзо-графитными.

Рис. 9.8. Щетка

В машинах высокого напряжения применяют графитные щетки, имеющие большое переходное сопротивление между щеткой и коллектором, в машинах низкого напряжения – бронзо-графитные щетки. Щетки помещают в особых щеткодержателях. Щетка, помещенная в обойме щеткодержателя, прижимается пружиной к коллектору (рис. 9.9). На каждом щеткодержателе может находиться несколько щеток, включенных параллельно.

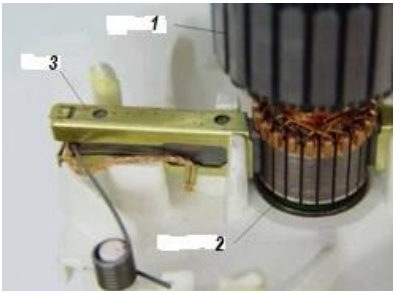


Рис. 9.9. Токособирательный аппарат:
1 – якорь; *2* – коллектор; *3* – щеткодержатель

Щеткодержатели помещаются на щеточных болтах-пальцах, которые, в свою очередь, закреплены на траверсе.

Щеточные пальцы изолируются от траверсы изоляционными шайбами и втулками. Число щеткодержателей обычно равно числу полюсов.

Траверса устанавливается на подшипниковом щите в машинах малой и средней мощности или прикрепляется к станине в машинах большой мощности. Траверсу можно поворачивать и этим изменять положение щеток относительно полюсов.

Обычно траверса находится в таком положении, при котором расположение щеток в пространстве совпадает с расположением осей главных полюсов.

Щетки, щеткодержатели, пальцы (или бракеты) и траверса (или суппорт) составляют так называемый токособирательный аппарат машины постоянного тока. В него входят также соединения между собой зонных комплектов щеток одной и той же полярности.

Концы вала якоря машины, называемые шейками вала, вставляют в подшипники. В небольших и средних машинах подшипники укрепляют в подшипниковых щитах, которые в то же время выполняют роль

защиты машины от внешних воздействий, а также служат для полного закрытия машины, если она выполняется закрытой.

Малые машины постоянного тока с подшипниковыми щитами не имеют, как правило, фундаментной плиты. Их устанавливают на болтах, которые крепят к бетонному или кирпичному фундаменту, или к полу, или на особых балочках, называемых салазками.

Иногда генераторы, а также двигатели имеют всего один подшипник. Другой конец вала имеет фланец или обрабатывается под насадку полумуфты для соединений со свободным концом вала приводного двигателя (в случае генератора) или механизма (в случае двигателя).

9.2. Обмотки якорей и ЭДС машины постоянного тока

Обмотки якорей машины постоянного тока изготовляют из изолированных медных проводов, а в машинах больших мощностей – из шин прямоугольного поперечного сечения; обмотки выполняются замкнутыми. При изготовлении обмотки из шин прямоугольного поперечного сечения (стержней) каждая секция может состоять из двух активных проводов (одновитковая секция). Из изолированного медного провода секции обмоток изготовляют в виде катушек с определенным числом витков (многовитковые секции). В машинах постоянного тока наиболее широкое применение находят двухслойные обмотки, у которых в пазах якоря активные части секций размещаются в два слоя (рис. 9.10).

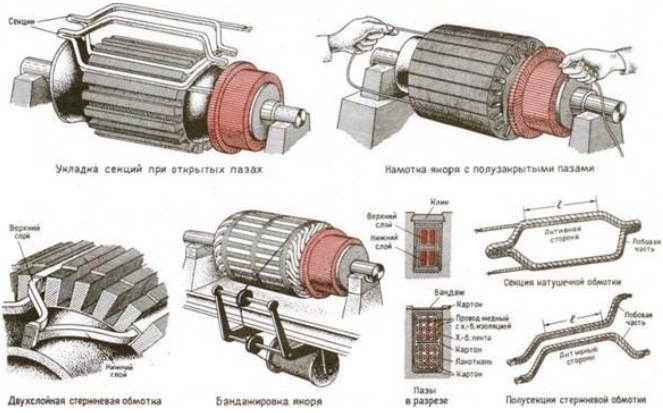


Рис. 9.10. Обмотка якоря

Кольцевой якорь в настоящее время не применяется, так как внутренние стороны спиральной обмотки не участвуют в образовании ЭДС, а только соединяют между собой активные проводники, лежащие на его внешней стороне. Обмотка используется не полностью. В применяемом сейчас барабанном якоре все проводники обмотки размещаются только с внешней стороны якоря.

Виток обмотки состоит из двух заложенных в пазах сердечника активных сторон *1* и *1'*, имеющих лобовые соединения *3* (рис. 9.11, *а*). ЭДС витка будет наибольшей, если к проводнику, лежащему под северным полюсом, присоединить проводник, лежащий под южным полюсом. В этом случае при обходе витка ЭДС активных проводников складываются арифметически. Соединить два рядом лежащих проводника нельзя, так как их результирующая ЭДС будет равна нулю (рис. 9.11, *б*).

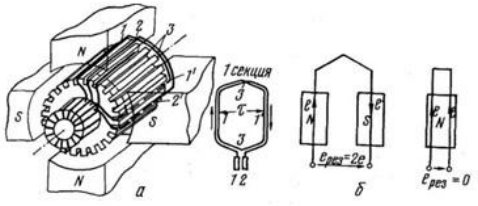


Рис. 9.11. Начало укладки двухслойной барабанной, петлевой обмотки в пазы якоря четырехполюсной машины

Длина окружности якоря, приходящаяся на один полюс, называется полюсным делением и обозначается τ:

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}, \qquad (9.1)$$

где D – диаметр окружности сердечника якоря;

$2p$ – число полюсов машины.

Один или несколько последовательно соединенных витков образуют секцию. Секции обмотки соединяются между собой последовательно, т. е. начало следующей секции присоединяется к концу предыдущей. В месте соединения секций делается отпайка к коллекторной пластине.

В машинах постоянного тока применяется обычно двухслойная обмотка, она укладывается во всех пазах в два слоя (рис. 9.12, *а*).

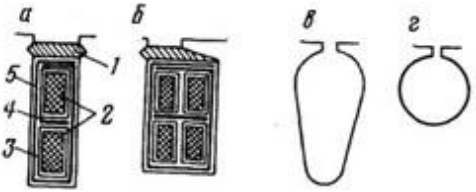


Рис. 9.12. Пазы машины постоянного тока:
а – открытый; *б* – полуоткрытый; *в* и *г* – полузакрытый;
1 – клин; *2* – проводники; *3* – изоляция слоя;
4 – междуслойная изоляция; *5* – пазовая изоляция

Первые активные стороны каждой секции размещаются в верхнем слое пазов, а вторые активные стороны – в нижнем слое. При изображении развернутых схем обмоток активные стороны, лежащие в верхнем слое паза, изображаются сплошной линией, а стороны нижнего слоя – прерывистой. Две активные стороны разных секций, располагающиеся в пазу одна над другой в верхнем и нижнем слоях, образуют элементарный паз. В действительном пазу сердечника якоря может размещаться несколько элементарных пазов (рис. 9.12, *б*). Пазы мощных машин выполняются открытыми (рис. 9.12, *а*); в машинах меньших мощностей применяются полуоткрытые и полузакрытые пазы (рис. 9.12, *б, в, г*).

ЭДС витка будет иметь максимальное значение в том случае, если его ширина y_1 (рис. 9.13) равна полюсному делению τ. Ширина витка y_1 получила название *шаг обмотки*. Обмотка, у которой шаг $y_1 = \tau$, называется *диаметральной*.

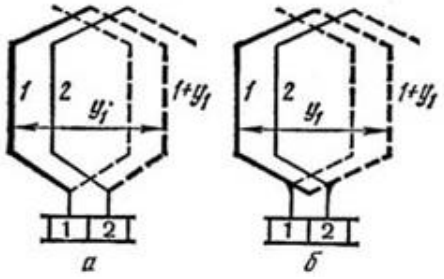


Рис. 9.13. Секция простой параллельной обмотки:
а – одновитковая; *б* – многовитковая

Секции, образующие обмотки, соединяются между собой так, чтобы индуктированные в них ЭДС были направлены согласно, т. е. в одну сторону. Для этого начальные (конечные) проводники последовательно соединенных секций должны находиться в любой момент под полюсами одинаковой полярности. В зависимости от порядка соединения секций друг с другом обмотки могут быть параллельными (петлевыми) и последовательными (волновыми).

На рис. 9.13 показаны (толстой линией) одновитковая (*а*) и многовитковая (*б*) секции параллельной обмотки, состоящие из активной части верхнего слоя паза *1* и нижнего слоя паза $1 + y_1$. В этих обмотках последовательно соединяются между собой секции начальные (конечные), активные стороны которых находятся под одним полюсом в расположенных рядом пазах. Таким образом, концы секции параллельной обмотки присоединяются к двум соседним коллекторным пластинам (*1'* и *2'*), причем в многовитковых секциях к пластине *1'* подключается начало первого витка, а к пластине *2'* – конец последнего витка, соединяемый с началом следующей секции. Любая коллекторная пластина (например, *1'*) соединяется с двумя активными проводами, в каждом из которых проходит ток одной параллельной ветви обмотки, так что между двумя щетками различной полярности обмотка образует две параллельные ветви.

При параллельных обмотках число щеток должно быть всегда равно числу полюсов $2p$ и, следовательно, число параллельных ветвей $2a$ в этих обмотках равно числу полюсов, т. е. $2a = 2p$ или $a = p$.

При большом числе полюсов параллельная обмотка образует много параллельных ветвей, что дает возможность понизить ток в одной ветви и уменьшает поперечное сечение провода обмотки.

В последовательных обмотках начальные (конечные) активные провода секций находятся под различными полюсами одинаковой полярности (рис. 9.14).

Активные стороны первой секции находятся под полюсами N_1 и S_2. Активные стороны второй секции, последовательно соединенной с первой, находятся под полюсами N_2-S_2, третьей секции – под полюсами N_3 и S_3 и т. д. После включения всех секций по окружности якоря соединяется верхний проводник пары n-1, лежащей рядом (обычно слева), с проводником пары n, от которого начали обход обмотки. Последовательно с верхним проводником пары n-1 включаем проводники, лежащие под полюсами S_1, N_2, S_2 и т. д. по окружности якоря, и заканчиваем проводником, лежащим рядом с проводником n-1. Затем

вновь соединяем пары проводников, находящиеся под различными полюсами по окружности якоря и т. д., пока все проводники не окажутся включенными в замкнутую цепь. Вне зависимости от числа полюсов простая последовательная обмотка образует две параллельные ветви, т. е. $2a = 2$. Поэтому при любом числе полюсов машина может иметь только две щетки, если обмотка якоря последовательная, причем эти щетки должны помещаться на расстоянии $1/2p$ части окружности коллектора. Например, при $p = 2$ расстояние между щетками должно быть равно четверти окружности коллектора. Это дает возможность делать доступной для осмотра не всю окружность коллектора, а только ее часть.

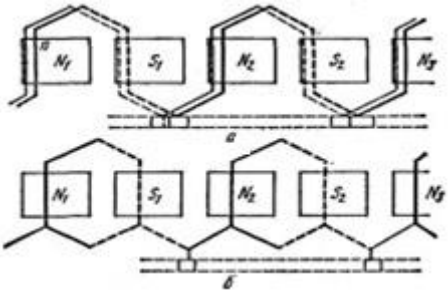


Рис. 9.14. Развернутая схема секций простой последовательной обмотки:
а – одновитковая; *б* – многовитковая

Наличие только двух параллельных ветвей свидетельствует о том, что в каждой ветви последовательно соединяется большое число активных проводов и ЭДС машины может иметь большое значение. Поэтому последовательные обмотки находят применение для машин высокого напряжения (до 500 кВт).

В проводнике, перемещающемся в магнитном поле в направлении, перпендикулярном направлению магнитных линий этого поля, создается ЭДС:

$$e = Blv,$$

где B – среднее значение магнитной индукции, Тл;

l – длина проводника, м;

v – скорость перемещения проводника, м/с.

На якоре машины укладывается большое число активных проводников, которое обозначим буквой N. В каждой параллельной ветви обмотки будет последовательно включено $N/2a$ активных проводника.

Таким образом, ЭДС машины будет равна

$$E = eN/2a = BlvN/2a. \quad (9.2)$$

Скорость перемещения проводников в магнитном поле определяется диаметром якоря D:

$$v = \pi D \frac{n}{60}, \quad (9.3)$$

где n – частота вращения якоря, об/мин.

Выразив длину окружности якоря через полюсное деление τ, получим

$$v = 2p\tau n/60.$$

Имея в виду, что произведение среднего значения магнитной индукции B на осевую длину полюса l и на полюсное деление τ представляет собой магнитный поток одного полюса

$$\Phi = Bl\tau,$$

получим для ЭДС машины следующее выражение:

$$E = \frac{pN}{60a} n\Phi. \quad (9.4)$$

Для каждой машины величины p, N и a постоянны, так что отношение $pN/60a = C$ представляет собой величину, постоянную для данной машины. Следовательно, ЭДС машины постоянного тока определяется следующим выражением:

$$E = Cn\Phi, \quad (9.5)$$

т. е. ЭДС машины постоянного тока равна произведению постоянной конструктивной величины C на частоту вращения якоря в минуту n и магнитный поток полюсов Ф. Это выражение показывает, что для изменения ЭДС (или напряжения) машины необходимо изменить либо частоту вращения якоря, либо магнитный поток полюсов. Так как изменение частоты вращения двигателя, приводящего в движение генератор, связано со значительными сложностями, на практике регулировку ЭДС и напряжения производят изменением магнитного потока, который зависит от тока в обмотке возбуждения. В цепь обмотки возбуждения включают реостат для изменения тока возбуждения.

9.3. Электромагнитный момент машины постоянного тока

Принцип действия машины постоянного тока основан на явлениях электромагнитной индукции (при движении проводника в магнитном поле в нем наводится ЭДС) и электромагнитной силы (на проводник с током в магнитном поле действует сила $F = BU$). Рассмотрим его на примере машины с кольцевым якорем (рис. 9.15, *а*).

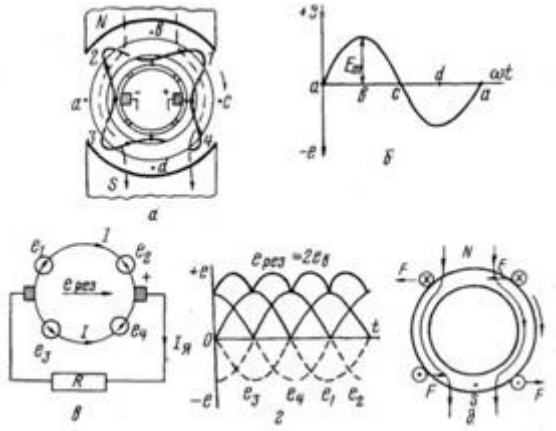


Рис. 9.15. Принцип работы машины постоянного тока:
а – устройство; *б* – график ЭДС витка; *в* – схема замещения обмотки;
г – график ЭДС обмотки; *д* – направление электромагнитных сил

На сердечнике якоря размещена обмотка, состоящая, например, из четырех витков. Все витки соединены последовательно и образуют замкнутый контур. Начало одного и конец следующего витка подсоединены к одной и той же пластине коллектора. Щетки на коллекторе делят обмотку на две равные части – на две параллельные ветви, верхнюю и нижнюю. В каждой ветви последовательно соединены два витка.

При вращении якоря наружные (активные) стороны витков пересекают магнитные силовые линии и в них, согласно закону электромагнитной индукции, возбуждается ЭДС. Направление ЭДС определим по правилу правой руки. Изменение ЭДС в одном витке за один оборот якоря показано на рис. 9.15, *б*. За начало отсчета принят момент времени, когда виток *1* находился в точке *а* и ЭДС в нем была равна нулю (виток не пересекал магнитных силовых линий). Через четверть оборо-

та (точка *b*) ЭДС e_1 имеет максимальное значение, через пол-оборота (точка *c*) $e_1 = 0$. После пересечения геометрической нейтрали *ac* ЭДС в витке изменяет направление – в точке *d* она имеет отрицательный максимум, в точке *a* – снова равна нулю. ЭДС в витке изменяется по синусоидальному закону.

Рассмотрим, как изменяется ЭДС ветви (напряжение на щетках). Обмотку с наведенными ЭДС можно представить в виде электрической схемы (рис. 9.15, *в*). Так как витки сдвинуты по окружности якоря на 90°, то ЭДС в них сдвинуты по фазе (во времени) на четверть периода (рис. 9.15, *г*). Результирующая ЭДС ветви при вращении якоря равна сумме мгновенных значений ЭДС тех двух витков, которые окажутся в этот момент времени в одной ветви. Для положения якоря, указанного на рис. 9.15, *а*

$$e_{\text{рез}} = e_1 + e_2.$$

Следует обратить внимание на то, что в одной ветви находятся витки только с одинаковым направлением ЭДС. Когда в витке *1* ЭДС e_1 получит отрицательное направление, виток перейдет в нижнюю ветвь, а на его место, в верхнюю ветвь, придет виток *3*, ЭДС в котором будет иметь положительное направление. Результирующая ЭДС, т. е. ЭДС ветви $e_{\text{рез}}$, постоянна по направлению, по величине она несколько изменяется, пульсирует (рис. 9.15, *г*, см. $e_{\text{рез}}$). При большом (десятки или сотни) количестве витков и пластин коллектора пульсации уменьшаются и напряжение на щетках практически постоянное.

Коллектор играет роль механического переключателя. Он переключает витки обмотки при изменении знака ЭДС в витке из одной параллельной ветви в другую и таким образом превращает переменные ЭДС отдельных витков в постоянное напряжение на щетках.

Токи ветвей, верхней и нижней, складываясь, образуют ток якоря, здесь $I_{\text{я}} = 2I$. В общем случае, если число ветвей $2a$, ток в якоре

$$I_{\text{я}} = 2aI.$$

ЭДС обмотки равна ЭДС отдельной параллельной ветви (рис. 9.15, *в*).

Если к щеткам, скользящим по коллектору вращающегося якоря, подключить сопротивление *R* (рис. 9.15), то ЭДС создаст ток в цепи якоря. Машина будет работать в качестве *генератора*. Напряжение *U* на его зажимах меньше ЭДС *E* на величину падения напряжения во внутреннем сопротивлении якоря $R_{\text{я}}$:

$$U = E - R_я I_я.$$

На проводник с током в магнитном поле действует сила Ампера. Применив правило левой руки к рис. 9.15, *д*, найдем, что электромагнитные силы создают тормозной момент, так как направление сил противоположно направлению вращения якоря. Вращающий момент первичного двигателя, приводящего якорь во вращение, должен преодолевать тормозной электромагнитный момент генератора.

Подадим на щетки неподвижного якоря напряжение сети U. В обмотке возникнет ток, и на каждый проводник будут действовать силы Ампера. Они приведут якорь во вращение. Машина начнет работать в режиме *электродвигателя.* Но во всяком проводнике, движущемся в магнитном поле, возникает ЭДС. При указанном на рис. 9.15 направлении токов якорь будет вращаться против движения часовой стрелки. По правилу правой руки найдем, что направление ЭДС в якоре двигателя противоположно направлению тока. Поэтому ЭДС двигателя называют противо-ЭДС. Приложенное к зажимам двигателя напряжение уравновешивает противо-ЭДС и падение напряжения на внутреннем сопротивлении якоря:

$$U = E + R_я I_я.$$

Одна и та же машина постоянного тока может работать как генератором, так и двигателем. Это свойство называется обратимостью машины.

Один проводник обмотки при диаметре якоря D создает электромагнитный момент (рис. 9.15, *д*):

$$M_1 = \frac{D}{2} F.$$

Суммарный момент всей обмотки, имеющей N проводников:

$$M_1 = \frac{D}{2} FN.$$

Подставив среднее значение силы $F = B_{ср} lI$, где $B_{ср} = Ф/S$ – среднее значение индукции под полюсом, ток в проводнике $I = I_я/2a$ и диаметр якоря D, выраженный через длину полюсного деления, получим:

$$M_1 = \frac{\tau p}{\pi} B_{ср} l \frac{I_я}{2a} N. \qquad (9.6)$$

Учитывая, что магнитный поток одного полюса

$$\Phi = B_{\text{ср}} 1\tau = B_{\text{ср}} S_{\text{пол}},$$

получим

$$M = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_{\text{я}}, \tag{9.7}$$

где конструктивная постоянная машины

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

Тогда окончательно получим:

$$M = C_M \Phi I_{\text{я}}. \tag{9.8}$$

Электромагнитный момент машины постоянного тока определяется величиной и направлением магнитного потока и тока в якоре. В генераторах это тормозной момент, у двигателей – вращающий момент.

9.4. Реакция якоря

При холостом ходе машины тока в обмотке якоря нет, магнитное поле Φ_0 создается только обмоткой возбуждения (рис. 9.16, *а*). Оно симметрично относительно оси полюсов и распределяется равномерно в воздушном зазоре. Предположим, что щетки установлены на геометрической нейтрали, т. е. на линии, проходящей через центр якоря и перпендикулярной оси полюсов.

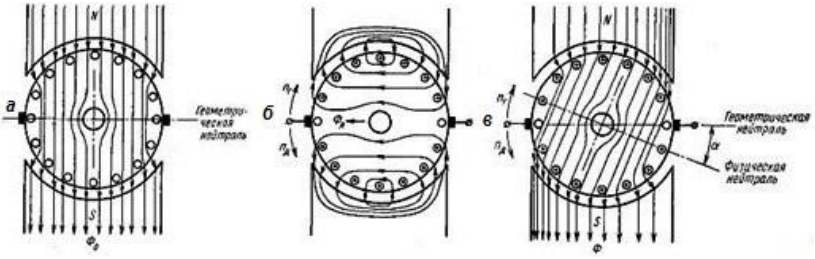


Рис. 9.16. Магнитное поле машины постоянного тока:
а – магнитное поле полюсов; *б* – магнитное поле якоря;
в – результирующее магнитное поле при нагрузке

При нагрузке машины в обмотке якоря протекает ток, который создает свое магнитное поле $Ф_я$ (рис. 9.16, *б*). Магнитный поток якоря направлен по линии, на которой расположены щетки. Если щетки расположены на геометрической нейтрали, то поток якоря направлен перпендикулярно основному магнитному потоку и поэтому называется *поперечным магнитным потоком*.

Магнитные силовые линии замыкаются вокруг проводников обмотки через сталь якоря и полюсов. Так как направление токов в проводниках между щетками неизменно, то поле вращающегося якоря оказывается неподвижным относительно щеток и полюсов возбуждения. Сам якорь становится магнитом, ось магнита совпадает с линией щеток. Влияние магнитного поля якоря на поле полюсов называется ***реакцией якоря***.

Наложением двух магнитных полей – поля полюсов и поля якоря – создается результирующее магнитное поле (рис. 9.16, *в*). При этом под одним краем полюса (под набегающим для генератора и под сбегающим для двигателя) магнитные линии якоря и полюса будут направлены встречно и поэтому здесь создается ослабление магнитного поля; а под другим краем полюса (под сбегающим для генератора и под набегающим для двигателя) силовые линии направлены одинаково, и магнитное поле усиливается. Таким образом, под одним краем полюса результирующий магнитный поток Ф увеличивается по сравнению с основным магнитным потоком, под другим краем полюса – уменьшается. В результате он становится несимметричным по отношению к осевой линии полюсов.

Физическая нейтраль – линия, проходящая через центр якоря и проводники обмотки якоря, в которых индуцируемая результирующим магнитным потоком ЭДС равна нулю. Данная линия поворачивается на угол α по отношению к геометрической нейтрали (в сторону опережения у генераторов, в сторону отставания – у двигателей). При холостом ходе физическая нейтраль совпадает с геометрической.

В результате реакции якоря магнитная индукция в зазоре машины становится еще более неравномерной. В проводниках якоря, находящихся в точках повышенной магнитной индукции, индуцируется большая ЭДС, что приводит к увеличению разности потенциалов между соседними пластинами коллектора и возникновению искрения на коллекторе. Иногда электрическая дуга перекрывает весь коллектор, образуя «круговой огонь».

Кроме того, реакция якоря приводит к уменьшению ЭДС якоря, ес-

ли машина работает в области, близкой к насыщению. Это связано с тем, что когда основной магнитный поток Φ_0 создает насыщенное состояние магнитопровода, увеличение магнитного потока на $+\Delta\Phi$ под одним краем полюса будет меньшим, чем уменьшение на $-\Delta\Phi$ под другим (рис. 9.17). Это приводит к уменьшению суммарного потока полюса и ЭДС якоря, так как

$$E = Cn\Phi.$$

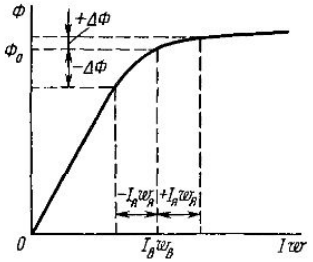


Рис. 9.17. Ослабление магнитного поля реакцией якоря вследствие насыщения

Отрицательное влияние реакции якоря можно уменьшить, сдвигая щетки на физическую нейтраль. При этом поток якоря поворачивается на угол α и встречный поток под набегающим краем полюса генератора уменьшается. Сдвиг щеток осуществляют у генератора по направлению вращения якоря, а у двигателя – против направления вращения якоря. Угол α меняется с изменением тока якоря $I_я$. На практике щетки обычно устанавливают на угол, соответствующий средней нагрузке.

Также для ослабления реакции якоря можно увеличить воздушный зазор между якорем и полюсами.

В машинах средней и большой мощностей применяют компенсационную обмотку, расположенную в пазах главных полюсов (см. рис. 9.4) и включаемую последовательно с обмоткой якоря так, чтобы ее магнитный поток $\Phi_к$ был противоположен магнитному потоку $\Phi_я$. Если при этом $\Phi_к = \Phi_я$, то магнитный поток в воздушном зазоре из-за реакции якоря практически не искажается.

9.5. Коммутация тока

Из рис. 9.15 видно, что при вращении якоря секции обмотки пооче-

редно переходят из одной ветви якоря в другую. Переключение секции из одной ветви якоря в другую называется ***коммутацией*** (от лат. *commutatio* – изменение). Под коммутацией в широком смысле слова понимаются все явления и процессы, возникающие под щеткой при работе машины.

На рис. 9.18 показана развертка части обмотки якоря, состоящей из четырех проводников, части коллектора (две коллекторные пластины) и щетки. Проводники *2* и *3* образуют коммутируемый виток, который на рис. 9.18, *а* показан в положении, которое он занимает до коммутации, на рис. 9.18, *в* – после коммутации, а на рис. 9.18, *б* – в период коммутации. Коллектор и обмотка якоря вращаются в указанном стрелкой направлении с частотой вращения *n*, щетка неподвижна.

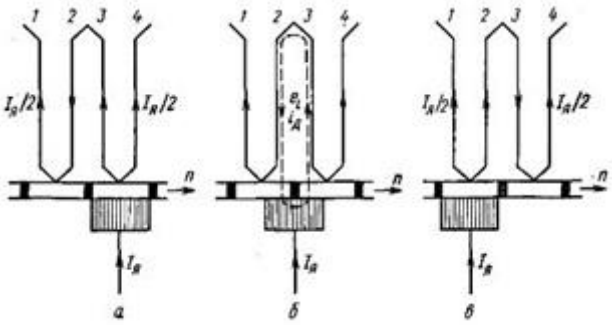


Рис. 9.18. Схема процесса коммутации

В момент времени до коммутации ток якоря $I_я$ проходит через щетку, правую коллекторную пластину и разделяется между параллельными ветвями обмотки якоря пополам. Одна ветвь состоит из проводников *1*, *2* и *3*, а вторая – из проводника *4*.

После коммутации проводники *2* и *3* перешли в другую параллельную ветвь и направление тока в них изменилось на противоположное. Это изменение произошло за время, равное периоду коммутации $T_к$, т. е. за время, которое требуется, чтобы щетка перешла с правой пластины на соседнюю левую (в действительности щетка перекрывает сразу несколько пластин коллектора, но в принципе это не влияет на процесс коммутации).

Период коммутации тем больше, чем шире щетка и чем медленнее вращается коллектор (якорь):

$$T_{к} = \frac{b_{щ}}{v_{к}}, \qquad (9.9)$$

где $b_{щ}$ – ширина щетки, м;

$v_{к}$ – окружная скорость коллектора, м/с.

Период коммутации длится тысячные доли секунды.

Один из моментов периода коммутации показан на рис. 9.18, *б*. Коммутируемый виток оказывается замкнутым накоротко коллекторными пластинами и щеткой. Так как за период коммутации происходит изменение направления тока в витке *2–3*, то это означает, что по витку протекает переменный ток, создающий переменный магнитный поток.

Последний индуцирует в коммутируемом витке ЭДС самоиндукции e_L:

$$e_L = -L\frac{di}{dt},$$

где L – индуктивность секции.

Согласно принципу Ленца, ЭДС самоиндукции стремится поддержать в проводнике ток прежнего направления. Следовательно, направление e_L совпадает с направлением тока в витке до коммутации.

Под действием ЭДС самоиндукции в короткозамкнутом витке *2–3* протекает большой дополнительный ток $i_{д}$, так как сопротивление контура мало. В месте контакта щетки с левой пластиной ток $i_{д}$ направлен противоположно току якоря, а в месте контакта щетки с правой пластиной направление этих токов совпадает.

Чем ближе к окончанию периода коммутации, тем меньше площадь контакта щетки с правой пластиной и тем больше плотность тока. По окончании периода коммутации контакт щетки с правой пластиной разрывается и образуется электрическая дуга. Чем больше ток $i_{д}$, тем мощнее электрическая дуга.

Так как в действительности щетка замыкает не одну, а 2–3 коллекторные пластины, то в коммутации участвуют одновременно еще 2–3 секции. Изменение тока в них вызывает в рассматриваемой секции ЭДС взаимоиндукции $e_{м}$. Результирующая ЭДС самоиндукции и взаимной индукции называется ***реактивной ЭДС***:

$$e_{р} = e_L + e_{м}.$$

Если щетки располагаются на геометрической нейтрали, то в коммутируемом витке магнитным потоком якоря индуцируется ЭДС вращения $e_{вр}$. На рис. 9.19 в увеличенном масштабе показаны проводники коммутируемого витка, расположенные на геометрической нейтрали, и направление ЭДС самоиндукции e_L для генератора, совпадающее с направлением тока якоря в этом проводнике до коммутации.

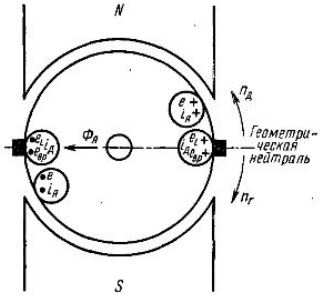


Рис. 9.19. Направление ЭДС в коммутируемом витке

Направление $e_{вр}$ определяется по правилу правой руки и всегда совпадает с направлением e_L. В результате $i_д$ еще больше увеличивается. Возникающая электрическая дуга между щеткой и коллекторной пластиной может разрушить поверхность коллектора, в результате чего ухудшается контакт между щеткой и коллектором.

Реактивные ЭДС, препятствуя изменениям тока, вызывают неравномерное распределение плотности тока под щеткой, что является причиной образования искрения, которое особенно интенсивно в момент размыкания щеткой секции обмотки. Чрезмерная плотность тока при наличии разности потенциалов между щеткой и коллектором приводит к образованию дугового разряда, который ионизирует тончайшие слои воздуха, находящегося между щеткой и коллектором и способствует развитию дуги. Дуга может перейти к щетке другой полярности, образовав круговой огонь на коллекторе (рис. 9.20), и это приведет к повреждению последнего.

Искрение щеток может быть также вызвано рядом других причин: неровностью поверхности коллектора, биением щеток, загрязненностью поверхности коллектора, наличием влаги на ней и т. д. Даже незначительное искрение щеток нежелательно, так как увеличивается износ щеток и коллектора и повышается нагрев последнего вследствие

увеличения переходного сопротивления между щеткой и коллектором.

Рис. 9.20. Круговой огонь на коллекторе

Для улучшения условий коммутации в машинах малой мощности (до 1 кВт) сдвигают щетки в сторону физической нейтрали. При расположении щеток на физической нейтрали коммутируемый виток не пересекает никакого внешнего магнитного потока и ЭДС вращения не индуцируется. Если сдвинуть щетки дальше физической нейтрали, как показано на рис. 9.21, то в коммутируемом витке результирующий магнитный поток будет индуцировать компенсирующую ЭДС $e_к$, направление которой противоположно направлению ЭДС самоиндукции e_L.

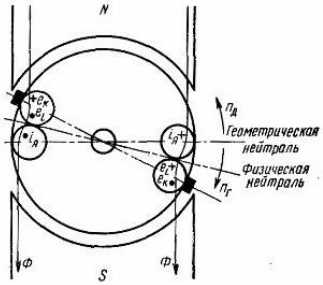


Рис. 9.21. Направление ЭДС в коммутируемом витке
при сдвиге щеток за физическую нейтраль

Для устранения искрения, вызванного коммутацией, необходимо скомпенсировать реактивную ЭДС $e_р$ и ЭДС вращения $e_{вр}$:

$$e_р + e_{вр} + e_к = 0.$$

Таким образом будет скомпенсирована не только ЭДС вращения, но и ЭДС самоиндукции (частично или полностью). Как указывалось ранее, угол сдвига физической нейтрали все время меняется, и поэтому щетки обычно устанавливают со сдвигом на некоторый средний угол по отношению к ней.

Уменьшение ЭДС в коммутируемом витке приводит к уменьшению тока $i_д$ и ослаблению электрического разряда между щеткой и коллекторной пластиной.

Улучшить условия коммутации машин постоянного тока мощностью 1 кВт и выше можно установкой добавочных полюсов ($N_{дп}$ и $S_{дп}$ на рис. 9.22). Добавочный полюс располагают по геометрической нейтрали. У генераторов одноименный добавочный полюс располагается за основным полюсом по ходу вращения якоря, а у двигателя – наоборот. Обмотки добавочных полюсов включают последовательно с обмоткой якоря таким образом, чтобы создаваемый ими поток $Ф_{дп}$ был направлен навстречу потоку якоря $Ф_я$.

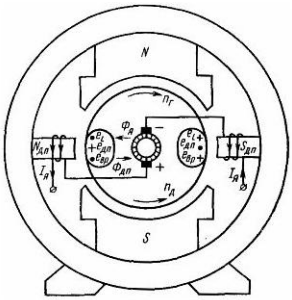


Рис. 9.22. Схема включения обмоток
добавочных полюсов

Так как оба эти потока создаются одним током (током якоря), то можно подобрать число витков обмотки добавочных полюсов и воздушный зазор между ними и якорем такими, чтобы потоки были равны по значению при любом токе якоря. Поток добавочных полюсов будет всегда компенсировать поток якоря и, таким образом, ЭДС вращения в коммутируемом витке будет отсутствовать.

В некоторых современных двигателях постоянного тока применены следующие решения: обмотки якоря и индуктора меняются местами: первую размещают на статоре, вторую – на роторе. Скользящий кон-

такт при этом остается, но из-за низкой нагрузки в обмотке возбуждения он намного проще и надежнее коллекторно-щеточного. Переключение между обмотками якоря, теперь расположенного в неподвижной части, осуществляется при помощи полупроводниковых ключей, срабатывающих по сигналу датчика положения ротора, т. е. коллектор заменен электронным переключателем. Такие двигатели называют бесколлекторными, за рубежом – BLDC-двигателями.

9.6. Способы возбуждения генераторов постоянного тока

Генераторы постоянного тока могут быть выполнены с магнитным и электромагнитным возбуждением. Для создания магнитного потока в генераторах с магнитным возбуждением используют постоянные магниты, а в генераторах с электромагнитным возбуждением – электромагниты. Постоянные магниты применяют лишь в машинах очень малых мощностей (рис. 9.23).

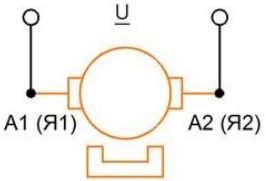


Рис. 9.23. Схема МПТ с постоянными магнитами

Генераторы с магнитным возбуждением практически не применяются, тогда как коллекторный двигатель постоянного тока с постоянными магнитами является наиболее распространенным. Индуктор этого двигателя включает постоянные магниты, которые создают магнитное поле статора. Такие двигатели обычно используются в задачах, не требующих больших мощностей. Они дешевле в производстве, чем коллекторные двигатели с обмотками возбуждения. При этом вращающий момент ограничен полем постоянных магнитов статора. Двигатель с постоянными магнитами очень быстро реагирует на изменение напряжения. Благодаря постоянному полю статора легко управлять скоростью двигателя. Недостатком является то, что со временем магниты теряют свои магнитные свойства, в результате чего уменьшается поле статора, и снижаются характеристики двигателя.

Таким образом, электромагнитное возбуждение является наиболее

широко используемым способом для создания магнитного потока. При этом способе возбуждения магнитный поток создается током, проходящим по обмотке возбуждения.

В зависимости от способа питания обмотки возбуждения генераторы постоянного тока могут быть с независимым возбуждением и с самовозбуждением.

При независимом возбуждении (рис. 9.24, *а*) обмотки индуктора и якоря не имеют электрического соединения.

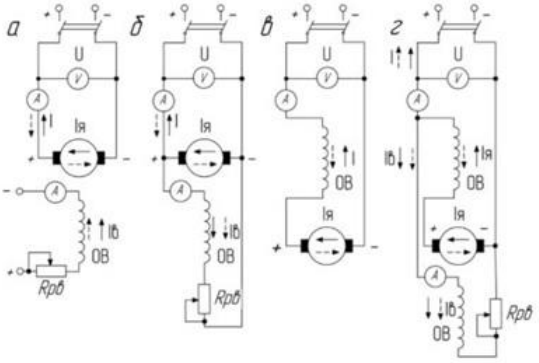


Рис. 9.24. Способы возбуждения МПТ

У генераторов этого типа обмотку возбуждения питает сеть постоянного тока, аккумулятор или специально предназначенный для этого генератор – возбудитель. Мощность последнего – несколько сотых мощности основного генератора. Областью применения генераторов с независимым возбуждением являются системы значительной мощности, где напряжение на обмотке возбуждения существенно отличается от генерируемого, поэтому питание обмотки возбуждения от цепи якоря недопустимо по конструктивным соображениям, а также системы регулирования скорости вращения двигателей, запитанных от генераторов.

У двигателей с независимым возбуждением запитана и якорная обмотка. В основном это также агрегаты большой мощности. Независимость обмотки индуктора позволяет удобнее и экономичнее регулировать ток возбуждения. Еще одна особенность таких моторов – постоянство магнитного потока возбуждения при любой нагрузке на валу. Если напряжение на обмотке возбуждения равно напряжению обмотки якоря, то их подключают параллельно друг другу.

Генераторы с самовозбуждением в зависимости от включения обмотки возбуждения могут быть параллельного (рис. 9.24, *б*), последовательного (рис. 9.24, *в*) и смешанного (рис. 9.24, *г*) возбуждения.

У генераторов параллельного возбуждения обмотки индуктора и якоря соединены в одну цепь параллельно друг другу. При этом ток мал (несколько процентов от номинального тока якоря) и обмотка возбуждения имеет большое число витков. Генераторы этого типа обычно применяются для средних мощностей.

В двигателях с параллельным возбуждением на индуктор подается то же напряжение и от того же источника питания, что и на якорь. По своим характеристикам они идентичны моторам с независимым возбуждением и обладают следующими особенностями: при изменении нагрузки частота вращения практически не трансформируется (замедление составляет не более 8 % при переводе от холостого хода к номинальной нагрузке); можно с минимальными потерями регулировать частоту вращения, причем в широких пределах (двукратно, а у специально сконструированных моторов и шестикратно). Индуктор вращающегося двигателя с параллельным возбуждением нельзя отсоединять от цепи якоря, даже если он уже отключен. Это приведет к наведению значительной ЭДС в обмотке возбуждения с последующим выходом мотора из строя. Находящийся рядом персонал может получить травму.

У генераторов последовательного возбуждения ток возбуждения равен току якоря и обмотка возбуждения имеет малое количество витков. Генераторы этого типа почти не применяются, поскольку процесс самовозбуждения происходит достаточно бурно и устройство не способно обеспечить необходимое большинству потребителей постоянство напряжения. Их используют только в специальных установках.

Двигатели этого типа широко применяют в качестве тяговых (электровозы, троллейбусы, краны и пр.): по сравнению с аналогами параллельного возбуждения при нагрузке они дают более высокий вращающий момент с одновременным уменьшением скорости вращения. Пусковой момент также высок. Недопустимо включать двигатели последовательного возбуждения в сеть в режиме холостого хода (без нагрузки на валу) или с нагрузкой менее 25 % от номинальной, так как при малых нагрузках частота вращения якоря резко возрастает, достигая значений, при которых возможно механическое разрушение двигателя, поэтому в приводах с двигателями последовательного возбуждения недопустимо применять ременную передачу, при обрыве ко-

торой двигатель переходит в режим холостого хода. Исключение составляют двигатели последовательного возбуждения мощностью до 100–200 Вт, которые могут работать в режиме холостого хода, так как их мощность механических и магнитных потерь при больших частотах вращения соизмерима с номинальной мощностью двигателя.

При смешанном возбуждении на полюсах генератора помещаются две обмотки возбуждения – параллельная и последовательная. Существует два вида схемы: основная обмотка индуктора включена параллельно с якорной, вспомогательная – последовательно; основная обмотка индуктора включена последовательно с якорной, вспомогательная – параллельно. Подключение параллельной обмотки до последовательной называют *коротким шунтом*, за последовательной – *длинным шунтом*.

Генераторы этого типа применяются крайне редко. Двигатели сочетают в себе достоинства аналогов с параллельным и последовательным возбуждением: способны работать на холостом ходу и при этом развивают значительное тяговое усилие. Однако в настоящее время они почти не применяются.

Процесс самовозбуждения генераторов постоянного тока протекает одинаково при любой схеме возбуждения. Рассмотрим, например, процесс самовозбуждения в генераторах параллельного возбуждения, получивших наиболее широкое применение. Какой-либо первичный двигатель вращает якорь генератора, магнитная цепь (ярмо и сердечники полюсов) которого имеет небольшой остаточный магнитный поток Φ_0. Этим магнитным потоком в обмотке вращающегося якоря индуктируется ЭДС E_0, составляющая несколько процентов от номинального напряжения машины.

Под действием ЭДС E_0 в замкнутой цепи, состоящей из якоря и обмотки возбуждения, проходит ток $I_в$. Магнитодвижущая сила обмотки возбуждения $\omega I_в$ (где ω – число витков) направлена согласно с потоком остаточного магнетизма и увеличивает магнитный поток машины Φ, вызывая повышение как ЭДС в обмотке якоря E, так и тока в обмотке возбуждения $I_в$. Увеличение последнего приводит к дальнейшему возрастанию Φ, что, в свою очередь, увеличивает E и $I_в$.

Из-за насыщения стали магнитной цепи машины самовозбуждение происходит не беспредельно, а до какого-то определенного напряжения, зависящего от частоты вращения якоря машины и сопротивления в цепи обмотки возбуждения. При насыщении стали магнитной цепи увеличение магнитного потока замедляется и процесс самовозбужде-

ния заканчивается. Увеличение сопротивления в цепи обмотки возбуждения уменьшает как ток в ней, так и магнитный поток, возбуждаемый этим током. Поэтому уменьшаются ЭДС и напряжение, до которого возбуждается генератор.

Напряжение, так же как и ЭДС, прямо пропорционально частоте, вследствие чего с изменением частоты вращения изменяется и напряжение, до которого возбуждается генератор.

9.7. Пуск двигателей постоянного тока

Для пуска двигателя могут быть применены три способа: прямой пуск, реостатный пуск, пуск путем изменения питающего напряжения.

При прямом пуске обмотка якоря подключается непосредственно к сети. Обычно в электродвигателях постоянного тока падение напряжения $I_я R_я$ во внутреннем сопротивлении цепи обмотки якоря при номинальном токе составляет 5–10 % от $U_н$, поэтому при прямом пуске ток $I_я = U_н/R_я = (10–20)I_н$, что недопустимо для машины. По этой причине прямой пуск применяют только для двигателей очень малой мощности (до нескольких сотен ватт), в которых сопротивление $R_я$ относительно велико, и лишь в отдельных случаях – для двигателей мощностью в несколько киловатт. При прямом пуске таких двигателей пусковой ток $I_п = (4–6)I_н$.

Для маломощных двигателей (до 1 кВт) при условии отсутствия нагрузки на валу можно применить прямой пуск, потому что масса движущихся частей двигателя невелика, а сопротивление обмотки относительно большое. При прямом пуске таких двигателей пусковые токи не превышают значений $(3–5)I_н$, что для таких двигателей не критично.

Когда двигатель работает при постоянном напряжении и сопротивлении обмотки якоря, ток в якоре можно найти с помощью формулы

$$I_я = \frac{U - E_{пр}}{R_я}, \qquad (9.10)$$

где U – напряжение питающей сети, В;

$E_{пр}$ – противо-ЭДС, В;

$R_я$ – сопротивление обмотки якоря, Ом.

Противо-ЭДС $E_{пр}$ возникает при вращении якоря в магнитном поле статора, при этом в двигателе она направлена против якоря. Но когда якорь двигателя неподвижен, $E_{пр} = 0$, а значит, выражение для тока примет следующий вид:

$$I_{я} = \frac{U}{R_{я}}.$$

Это и есть выражение для определения пускового тока.

Глядя на формулу, можно прийти к выводу, что добиться снижения пускового тока возможно либо снижением напряжения, либо увеличением сопротивления якорной обмотки.

Рассмотрим более подробно способ пуска двигателя постоянного тока с помощью введения дополнительного сопротивления в цепь якоря. При этом пусковой ток будет равен:

$$I_{я} = \frac{U}{R_{я} + R_{д}}.$$

Таким образом можно добиться величины пускового тока в нужном диапазоне, безопасном для двигателя. Добавочное сопротивление может быть как в виде реостата, так и в виде нескольких резисторов. Это необходимо для того, чтобы в процессе запуска двигателя менять сопротивление в якорной цепи.

Следует знать, что с дополнительным сопротивлением в обмотке якоря двигатель работает не на естественной, а на более мягкой искусственной характеристике, которая не подходит для нормальной работы двигателя.

Пусковой реостат выполняется из провода или ленты с высоким удельным сопротивлением, разделенных на секции. Провода присоединяются к медным кнопочным или плоским контактам в местах перехода от одной секции к другой. По контактам перемещается медная щетка поворотного рычага реостата. Реостаты могут иметь и другое выполнение. Они рассчитаны на кратковременный режим работы. Разделение на секции дает возможность ступенчато изменять ток в якоре двигателя в процессе пуска его в ход.

Схема пуска двигателя параллельного возбуждения с пусковым реостатом приведена на рис. 9.25, *а*.

Пусковой реостат данного двигателя имеет три зажима, обозначаемые буквами *Л, Я* и *Ш*. Зажим *Л* соединен с движком реостата и подключается к одному из полюсов рубильника (к линии). Зажим *Я* соединяется с сопротивлением реостата и подключается к зажиму якоря. Зажим *Ш* соединен с неподвижной контактной дугой *д*, помещенной на реостате (шунт). Подвижный контакт пускового реостата *П* скользит по контактной дуге *д* так, что между ними имеется непрерывный

контакт. К зажиму *Ш* через регулировочное сопротивление $R_{рв}$ присоединяется обмотка возбуждения. Вторые зажимы якоря и обмотки возбуждения соединены между собой перемычкой и подключены ко второму полюсу рубильника, включающего двигатель в сеть.

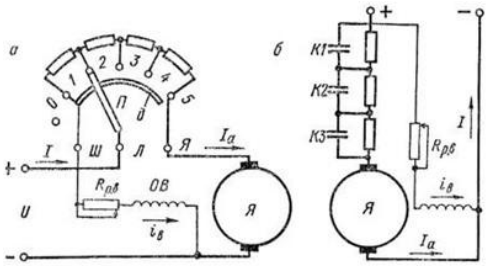


Рис. 9.25. Схема пуска двигателя параллельного возбуждения:
а – с помощью пускового реостата; *б* – с помощью пусковых сопротивлений

При пуске в ход включается рубильник и подвижный контакт реостата *П* переводится на контакт *1*, так что последовательно с якорем соединены все четыре секции пускового реостата, т. е. его полное сопротивление, которое выбирается таким, чтобы наибольший пусковой ток был равен $I_{max} \leq (1{,}7–2{,}5)I_н$.

По обмотке возбуждения также будет проходить ток, возбуждающий магнитный поток. В результате взаимодействия магнитных полей якоря и обмотки возбуждения создается пусковой момент. Если пусковой момент больше тормозного момента на валу двигателя, то якорь машины начнет вращаться. Под действием инерции частота вращения не может изменяться мгновенно, поэтому увеличение будет происходить постепенно. Также возрастать будет и противо-ЭДС, что вызовет уменьшение тока в якоре и вращающего момента двигателя.

Когда ток в якоре уменьшится до минимального значения $I_{min} = (1{,}1–1{,}3)I_н$, подвижный контакт реостата *П* переведется на контакт *2*. При этом сопротивление пускового реостата уменьшится на одну ступень, что увеличит ток. Сопротивление всех ступеней пускового реостата выбирают так, чтобы при переводе подвижного контакта с одного контакта на другой ток в якоре изменялся от I_{min} до I_{max}.

С увеличением тока в якоре возрастает вращающий момент, вследствие чего частота вращения вновь увеличивается. С увеличением частоты вращения якоря возрастает противо-ЭДС, что вызывает уменьшение тока в якоре. Когда ток в якоре вновь достигнет значения I_{min},

подвижный контакт реостата *П* переведется на контакт *3*.

Таким образом, сопротивление пускового реостата постепенно (ступенями) уменьшается, пока оно полностью не будет выведено (подвижный контакт реостата *П* переводится на контакт *5*), и в рабочем режиме ток и частота вращения якоря принимают установившиеся значения, соответствующие тормозному моменту на валу двигателя.

Механическая характеристика пуска двигателя с помощью четырехступенчатого пускового реостата будет выглядеть следующим образом (рис. 9.26).

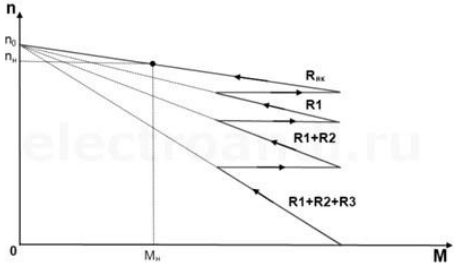


Рис. 9.26. Механическая характеристика пуска двигателя с помощью четырехступенчатого пускового реостата

На первой ступени, когда подключенное сопротивление максимально и равно $R1 + R2 + R3$, двигатель начинает свой разгон. После достижения определенной точки, которую получают с помощью расчетных данных, сопротивление $R3$ шунтируют. При этом двигатель переходит на новую характеристику и разгоняется на ней все до той же точки. Таким образом двигатель выходит на естественную характеристику, не пострадав от действия больших пусковых токов и моментов.

Число ступеней пускового реостата зависит от разности $I_{max} - I_{min}$, причем чем меньше разность этих токов, тем больше число ступеней. Обычно пусковые реостаты имеют число ступеней в пределах 2–7. При пуске двигателя в ход регулировочное сопротивление $R_{рв}$ (рис. 9.25, *б*) в цепи обмотки возбуждения должно быть полностью выведено, т. е. ток возбуждения должен быть наибольшим, что дает возможность уменьшить пусковой ток. Для пуска двигателя необходимо создать пусковой момент, больший тормозного момента на валу.

Подвижный контакт пускового реостата *П* соединен с контактом *1*. Это необходимо для того, чтобы при отключении двигателя от сети не было разрыва цепи обмотки возбуждения, имеющей значительную ин-

дуктивность. При отключении двигателя подвижный контакт переводится на холостой контакт *0* и рубильник отключается. При этом обмотка возбуждения будет замкнута на сопротивление пускового реостата и якоря, что дает возможность избежать перенапряжений и дугообразования.

Автоматизировать переключение пускового реостата неудобно. Поэтому в автоматизированных установках вместо пускового реостата используют пусковые сопротивления, которые поочередно шунтируются контактами *К1, К2, К3* автоматически работающих контакторов. Для упрощения схемы и уменьшения количества аппаратов число ступеней принимается минимальным (у двигателей малой мощности обычно 1–2 ступени).

Реостатный пуск применяют на электровозах и электропоездах постоянного тока.

При приблизительно постоянной массе поезда, характерной для электропоездов, выключение ступеней пускового реостата производят автоматически. Для этой цели на электропоездах предусмотрено специальное реле ускорения (реле минимального тока), срабатывающее, когда пусковой ток уменьшается до установленного значения, и тем самым обеспечивающее замыкание соответствующих контакторов. На электровозах ступени пускового реостата выключаются по мере увеличения скорости движения поезда непосредственно самим машинистом при помощи ручного аппарата, называемого контроллером машиниста. Однако на некоторых электровозах применяют автоматическое выключение ступеней пусковых реостатов с той или иной скоростью.

При реостатном пуске возникают довольно большие потери энергии в пусковом реостате. Этот недостаток можно устранить, если пускать двигатель путем плавного повышения напряжения, подаваемого на обмотку якоря. Такой пуск называют ***безреостатным***. Для этого необходимо иметь отдельный источник постоянного тока с регулируемым напряжением (генератор или управляемый выпрямитель). Безреостатный пуск применяют на электроподвижных составах переменного тока и тепловозах.

9.8. Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока

Двигатели постоянного тока получили широкое распространение и

часто являются незаменимыми благодаря ценному свойству – возможности плавно и экономично регулировать частоту вращения в широких пределах.

Частота вращения якоря двигателя при любой схеме возбуждения определяется следующим выражением:

$$n = \frac{U - I\left(R_{\text{я}} - R_{\text{с}}\right)}{C\Phi}, \qquad (9.11)$$

где $R_{\text{с}}$ – сопротивление последовательной обмотки возбуждения (для двигателя параллельного возбуждения $R_{\text{с}} = 0$), Ом.

Это выражение показывает, что частота вращения двигателя зависит от напряжения питающей сети, сопротивления цепи якоря и магнитного потока.

Частоту вращения регулируют путем *изменения напряжения сети* в том случае, когда источником электрической энергии является какой-либо генератор.

Угловая скорость двигателя постоянного тока независимо от нагрузки изменяется прямо пропорционально напряжению, подводимому к якорю. Поскольку все регулировочные характеристики являются жесткими, а степень их жесткости остается для всех характеристик неизменной, работа двигателя является стабильной на всех угловых скоростях и, следовательно, обеспечивается широкий диапазон регулирования скорости независимо от нагрузки. Этот диапазон равен 10 и может быть расширен за счет специальных схем управления.

При данном способе угловую скорость можно уменьшать и увеличивать относительно основной. Повышение скорости ограничено возможностями источника энергии с регулируемым напряжением и номинальным напряжением двигателя.

Если источник энергии обеспечивает возможность непрерывного изменения подводимого к двигателю напряжения, то регулирование скорости двигателя будет плавным.

Данный способ регулирования является экономичным, так как регулирование угловой скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения осуществляется без дополнительных потерь мощности в силовой цепи якоря и обеспечивает плавное регулирование в широком диапазоне $n_{\max}/n_{\min} \geq 25$. Наибольшая частота вращения здесь ограничивается условиями коммутации, а наименьшая – условиями охлаждения двигателя. Еще одним достоинством рассматриваемого способа регулирования является то, что он допускает безреостатный

пуск двигателя при пониженном напряжении.

Разновидностью регулирования частоты вращения изменением подводимого к цепи якоря напряжения является импульсное регулирование, применяемое для двигателей постоянного тока с независимым возбуждением.

Для регулирования частоты вращения двигателя *изменением сопротивления цепи якоря* используют регулировочный реостат, включенный последовательно с якорем. В отличие от пускового, регулировочный реостат должен быть рассчитан на длительное прохождение тока.

В сопротивлении регулировочного реостата происходит большая потеря энергии, т. е. такой способ регулирования частоты вращения является неэкономичным, к тому же он используется только под нагрузкой, при этом вращающий момент остается постоянным. Частоту вращения можно изменять только в сторону уменьшения, при этом диапазон регулирования ограничен, так как при снижении частоты вращения до $0{,}5n_н$ стабильность работы двигателя резко ухудшается. Трудно обеспечить плавность регулирования, так как требуется значительное количество ступеней регулирования и соответственно большое число контактов. Все это приводит к уменьшению КПД двигателя.

Достоинством рассмотренного способа регулирования являются простота и надежность схемы управления.

Учитывая большие потери в реостате при малых скоростях, данный способ регулирования частоты вращения применяется для приводов с кратковременным и повторно-кратковременным режимами работы.

Регулирование частоты вращения двигателя *изменением величины магнитного потока* осуществляется за счет введения в цепь обмотки возбуждения дополнительного регулировочного реостата (при параллельном и смешанном возбуждении) или шунтированием обмотки возбуждения регулируемым сопротивлением (при последовательном возбуждении). При ослаблении магнитного потока частота вращения двигателя как при нагрузке, так и при холостом ходе возрастает, а при усилении потока – уменьшается. Практически возможно изменение скорости только в сторону увеличения ввиду насыщения двигателя.

При ослаблении магнитного потока допустимый момент двигателя изменяется по закону гиперболы, а мощность остается постоянной. Диапазон регулирования скорости для данного способа n_{max}/n_{min} = 2–4. Регулирование осуществляется плавно.

Существенными преимуществами данного способа регулирования

скорости являются его простота и высокая экономичность.

Данный способ регулирования используют в приводах в качестве вспомогательного, обеспечивающего повышение частоты вращения при холостом ходе механизма.

9.9. Потери и КПД машин постоянного тока

В машинах постоянного тока при работе происходит потеря энергии, которая складывается их трех составляющих.

Первой составляющей являются ***потери в стали*** $P_{ст}$ на гистерезис и вихревые токи, возникающие в сердечнике якоря. При вращении якоря машины сталь его сердечника непрерывно перемагничивается. На его перемагничивание затрачивается мощность, называемая потерями на гистерезис. Одновременно при вращении якоря в магнитном поле в сердечнике его индуктируются вихревые токи. Потери на гистерезис и вихревые токи, называемые потерями в стали, обращаются в тепло и нагревают сердечник якоря.

Потери в стали зависят от магнитной индукции и частоты перемагничивания сердечника якоря.

Магнитная индукция определяет ЭДС машины или, иначе, напряжение, а частота перемагничивания зависит от частоты вращения якоря. Поэтому при работе машины постоянного тока в режиме генератора или двигателя потери в стали будут постоянными, не зависящими от нагрузки, если напряжение на зажимах якоря и частота его вращения постоянны.

Ко второй составляющей относятся потери энергии на нагревание проводов обмоток возбуждения и якоря протекающими по ним токами, называемыми ***потерями в обмотках*** $P_{обм}$.

Потери в обмотке якоря и в щеточных контактах зависят от тока в якоре, т. е. являются переменными – меняются при изменениях нагрузки.

Третья составляющая – ***механические потери*** $P_{мех}$, представляющие собой потери энергии на трение в подшипниках, трение вращающихся частей о воздух и щеток о коллектор. Эти потери зависят от частоты вращения якоря машины. Поэтому механические потери также постоянны и не зависят от нагрузки.

КПД машины определяется по формуле

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\,\%, \qquad (9.12)$$

где P_2 – полезная мощность, Вт;

P_1 – потребляемая мощность, Вт.

При работе машины постоянного тока в качестве генератора полезная мощность равна:

$$P_2 = UI,$$

где U – напряжение на зажимах генератора, В;

I – ток при нагрузке генератора, А.

Потребляемая мощность определится из выражения

$$P_1 = P_2 + P_{ст} + P_{обм} + P_{мех} = UI + P_{ст} + P_{обм} + P_{мех},$$

а КПД

$$\eta = \frac{UI}{UI + P_{ст} + P_{обм} + P_{мех}} \cdot 100\,\%. \qquad (9.13)$$

При работе машины постоянного тока в качестве двигателя потребляемая мощность равна:

$$P_1 = UI,$$

где U – напряжение питающей сети, В;

I – ток, потребляемый двигателем из сети, А.

Полезная мощность определится из выражения

$$P_2 = P_1 - P_{ст} - P_{обм} - P_{мех} = UI - P_{ст} - P_{обм} - P_{мех},$$

а КПД

$$\eta = \frac{UI - P_{ст} - P_{обм} - P_{мех}}{UI} \cdot 100\,\%. \qquad (9.14)$$

9.10. Универсальные двигатели

Универсальный двигатель – вращающийся электродвигатель, который может работать при питании от сети как постоянного, так и однофазного переменного тока.

Конструкция универсального коллекторного электродвигателя (рис. 9.27) не имеет принципиальных отличий от конструкции коллекторного электродвигателя постоянного тока с обмотками возбуждения, за исключением того, что вся магнитная система (и статор, и ротор)

выполняется шихтованной и обмотка возбуждения делается секционированной. Шихтованная конструкция и статора, и ротора обусловлена тем, что при работе на переменном токе их пронизывают переменные магнитные потоки, вызывая значительные магнитные потери.

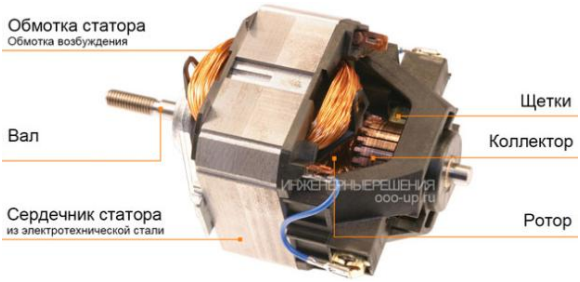


Рис. 9.27. Конструкция универсального двигателя

Секционирование обмотки возбуждения вызвано необходимостью изменения числа витков обмотки возбуждения с целью сближения рабочих характеристик при работе электродвигателя от сетей постоянного и переменного тока.

Универсальный коллекторный электродвигатель может быть выполнен как с последовательным, так и с параллельным и независимым возбуждением. В настоящее время универсальные коллекторные электродвигатели выполняют только с последовательным возбуждением (рис. 9.28).

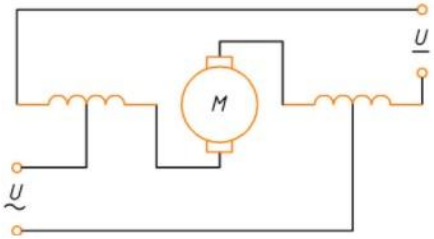


Рис. 9.28. Схема универсального коллекторного двигателя

Возможность работы универсального двигателя от сети переменного тока объясняется тем, что при изменении полярности подводимого напряжения изменяются направления токов в обмотке якоря и обмотке возбуждения. При этом изменение полярности полюсов статора прак-

тически совпадает с изменением направления тока в обмотке якоря. В итоге направление электромагнитного вращающего момента не изменяется.

У двигателя последовательного возбуждения ток якоря является и током возбуждения, что обеспечивает почти одновременное изменение направления тока в обмотке якоря и магнитного потока возбуждения при переходе от положительного полупериода переменного напряжения сети к отрицательному.

Коэффициент полезного действия универсального двигателя при его работе от сети переменного тока более низкий, чем при его работе от сети постоянного тока. Другой недостаток универсального двигателя – тяжелые условия коммутации, вызывающие интенсивное искрение на коллекторе при включении двигателя в сеть переменного тока. Этот недостаток объясняется наличием трансформаторной связи между обмотками возбуждения и якоря, что ведет к наведению в коммутируемых секциях трансформаторной ЭДС, ухудшающей процесс коммутации в двигателе.

Наличие щеточно-коллекторного узла является причиной ряда недостатков универсальных коллекторных двигателей, особенно при их работе на переменном токе (искрение на коллекторе, радиопомехи, повышенный шум, невысокая надежность). Однако эти двигатели по сравнению с асинхронными и синхронными при частоте питающего напряжения f = 50 Гц позволяют получать частоту вращения до 10000 об/мин и более (наибольшая синхронная частота вращения при f = 50 Гц равна 3000 об/мин).

Благодаря тому, что универсальный двигатель может иметь высокую скорость вращения при работе от однофазной сети переменного тока без использования дополнительных преобразовательных устройств, он получил широкое применение в таких домашних приборах, как пылесосы, блендеры, фены и др. Также универсальный электродвигатель широко используется в таких инструментах, как дрели и шуруповерты.

Благодаря тому, что скорость вращения универсального двигателя легко регулируется изменением величины питающего напряжения, ранее он широко использовался в стиральных машинах. Сейчас благодаря развитию преобразовательной техники более широкое использование получают бесщеточные электродвигатели (синхронные и асинхронные), скорость вращения которых регулируется изменением частоты напряжения питающей сети.

ЧАСТЬ 2 ЭЛЕКТРОНИКА

Электро́ника (от греч. «электрон») – область науки и техники, занимающаяся созданием и практическим использованием различных устройств и приборов, работа которых основана на изменении концентрации и перемещении заряженных частиц (электронов) в вакууме, газе или твердых кристаллических телах, и других физических явлениях

Возникновению электроники предшествовало изобретение радио. Поскольку радиопередатчики сразу же нашли применение (в первую очередь на кораблях и в военном деле), для них потребовалась элементная база, созданием и изучением которой и занялась электроника. Элементная база первого поколения была основана на электронных лампах. Соответственно получила развитие вакуумная электроника. Её развитию способствовало также изобретение телевидения и радаров, которые нашли широкое применение во время Второй мировой войны.

Но электронные лампы обладали существенными недостатками. Это прежде всего большие размеры и высокая потребляемая мощность (что было критичным для переносных устройств). Поэтому начала развиваться твердотельная электроника, а в качестве элементной базы стали применять диоды и транзисторы.

Дальнейшее развитие электроники связано с появлением компьютеров. Компьютеры, основанные на транзисторах, отличались большими размерами и потребляемой мощностью, а также низкой надежностью (из-за большого количества деталей). Для решения этих проблем начали применяться микросборки, а затем и микросхемы. Число элементов микросхем постепенно увеличивалось, стали появляться микропроцессоры. В настоящее время развитию электроники способствует появление сотовой связи, а также различных беспроводных устройств, навигаторов, коммуникаторов, планшетов и т. п.

Основными вехами в развитии электроники можно считать:

- изобретения А. С. Поповым радио (7 мая 1895 года), и начало использования радиоприёмников,
- изобретение Ли де Форестом лампового триода, первого усилительного элемента,
- использование Лосевым полупроводникового элемента для усиления и генерации электрических сигналов,
- развитие твердотельной электроники,

- использование проводниковых и полупроводниковых элементов (работы Иоффе, Шоттки),
- изобретение в 1947 году транзистора (Уильям Шокли, Джон Бардин и Уолтер Браттейн),
- создание интегральной микросхемы и последующее развитие микроэлектроники, основной области современной электроники.

Тема 1. Полупроводниковые приборы

Электропроводность полупроводников. Полупроводниками называются материалы, занимающие промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Особенностью металлических проводников является наличие свободных электронов - носителей электрических зарядов. В диэлектриках свободных электронов нет и поэтому они не проводят тока.

В отличие от проводников полупроводники имеют не только электронную, но и «дырочную» проводимости, которые в сильной степени зависят от температуры, освещенности, сжатия, электрического поля и других факторов.

Химическую связь двух соседних атомов с образованием на одной орбите общей пары электронов (рис. 3.1, а) называют ковалентной или парноэлектронной и условно изображают двумя линиями, соединяющими электроны (рис. 3.1, б). Например, германий принадлежит к элементам четвертой группы периодической системы элементов Менделеева и имеет на внешней орбите четыре валентных электрона. Каждый атом в кристалле германия образует ковалентные связи с четырьмя соседними атомами (рис. 3.1, в).

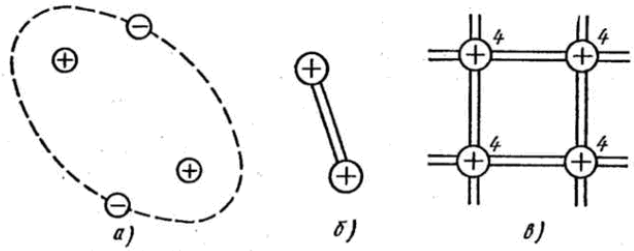


Рис. 1 Кристаллическая решетка полупроводника:
а — парноэлектронная (ковалентная) связь атомов, *б* — ее схематическое изображение, *в* — связи в кристаллической решетке германия

При отсутствии примесей и температуре, близкой к абсолютному нулю, все валентные электроны атомов в кристалле германия взаимно связаны и свободных электронов нет, так что германий не обладает проводимостью. При повышении температуры или при облучении увеличивается энергия электронов, что приводит к частичному нарушению ковалентных связей и появлению свободных электронов. Уже при комнатной температуре под действием внешнего электрического поля свободные электроны перемещаются и в кристалле возникает электрический ток. Электропроводность, обусловленная перемещением свободных электронов, называется электронной проводимостью полупроводника, или n-проводимостью.

При появлении свободных электронов в ковалентных связях образуется свободное не заполненное электроном (вакантное) место - «электронная дырка». Так как дырка возникла в месте отрыва электрона от атома, то в области ее образования возникает избыточный положительный заряд. При наличии дырки какой-либо из электронов соседних связей может занять место дырки и нормальная ковалентная связь в этом месте восстановится, но будет нарушена в том месте, откуда ушел электрон. Новую дырку может занять еще какой-нибудь электрон и т. д. Схема образования и заполнения дырки условно показана на рис. 3.2.

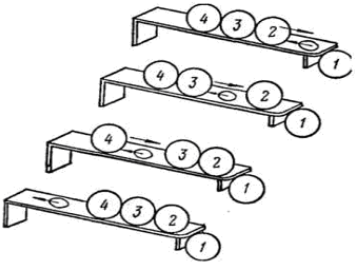


Рис. 2. Схема образования и заполнения дырок в кристалле германия

В установленной наклонно подставке имеется четыре отверстия (дырки), в которых расположено четыре шара (электрона). Если шар 1 сместится вправо, то он освободит отверстие (дырку) и упадет с подставки, а в отверстие, которое занимал этот шар, переместится шар 2.

Свободное отверстие (дырку) шара 2 займет шар 3, а отверстие последнего - шар 4.

Под действием внешнего электрического поля дырки перемещаются в направлении сил поля, т. е. противоположно перемещению электронов.

Проводимость, возникающая в результате перемещения дырок, называется дырочной проводимостью, или p-n проводимостью.

Таким образом, при электронной проводимости один свободный электрон проходит весь путь в кристалле, а при дырочной проводимости большое число электронов поочередно замещают друг друга в ковалентных связях и каждый из них проходит свой отрезок пути.

В кристалле чистого полупроводника при нарушении ковалентных связей возникает одинаковое число свободных электронов и дырок. Одновременно с этим происходит обратный процесс - рекомбинация, при которой свободные электроны заполняют дырки, образуя нормальные ковалентные связи. При определенной температуре число свободных электронов и дырок в единице объема полупроводника в среднем остается постоянным. При повышении температуры число свободных электронов и дырок сильно возрастает и проводимость германия значительно увеличивается. Электропроводность полупроводника при отсутствии в нем примесей называется его собственной электропроводностью.

Свойства полупроводника в сильной степени меняются при наличии в нем ничтожного количества примесей. Вводя в кристалл полупроводника атомы других элементов, можно получить в кристалле преобладание свободных электронов над дырками или, наоборот, преобладание дырок над свободными электронами. Например, при замещении в кристаллической решетке атома германия атомом пятивалентного вещества (мышьяка, сурьмы, фосфора) четыре электрона этого вещества образуют заполненные связи с соседними атомами германия, а пятый электрон окажется свободным (рис. 3.3, а), поэтому такая примесь увеличивает электронную проводимость (n-проводимость) и называется донорной. При замещении атома германия атомом трехвалентного вещества (индий, галлий, алюминий) его электроны вступят в ковалентную связь с тремя соседними атомами германия, а связи с четвертым атомом германия будут отсутствовать, так как у индия нет четвертого электрона (рис. 3.3, б).

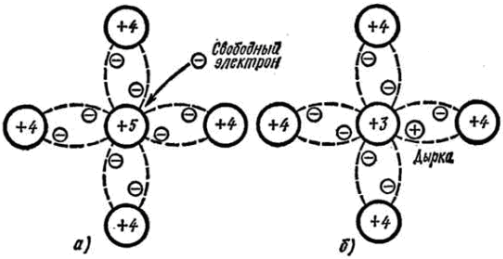


Рис. 3 Схема связи примесей с германием:
а — пятивалентной (донорной), *б* — трехвалентной (акцепторной)

Восстановление всех ковалентных связей возможно, если недостающий четвертый электрон будет получен от ближайшего атома германия. Но в этом случае на месте электрона, покинувшего атом германия, появится дырка, которая может быть заполнена электроном из соседнего атома германия. Последовательное заполнение свободной связи эквивалентно движению дырок. Примеси с меньшим числом валентных электронов в атоме по сравнению с атомом данного полупроводника вызывают преобладание дырочной проводимости и называются акцепторными.

Носители заряда, определяющие вид проводимости в примесном полупроводнике, называются основными (дырки в p-полупроводнике и электроны в n-полупроводнике), а носители заряда противоположного знака - неосновными.

Полупроводниковые диоды. Полупроводниковый диод (вентиль) представляет собой контактное соединение двух полупроводников, один из которых с электронной проводимостью (n-типа), а другой - с дырочной (p-типа, рис. 3.4, а).

Вследствие большой концентрации электронов в полупроводнике n будет происходить диффузия их из первого полупроводника во второй. Аналогично будет происходить диффузия дырок из второго полупроводника p-типа в первый n-типа. В тонком пограничном слое полупроводника n-типа возникает положительный заряд, а в пограничном слое полуводника p-типа - отрицательный заряд. Между этими слоями возникает разность потенциалов (потенциальный барьер) и образуется электрическое поле с некоторой напряженностью, которая препятствует диффузии электронов и дырок из одного полупроводника в другой. Таким образом, на границе двух полупроводников возникает тонкий слой, обедненный носителями зарядов (электронов и дырок) и обла-

дающий большим сопротивлением. Этот слой называется запирающим p-n-переходом.

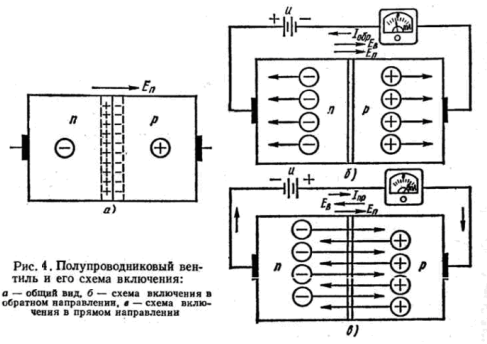


Рис. 4. Полупроводниковый вентиль и его схема включения:
а — общий вид, *б* — схема включения в обратном направлении, *в* — схема включения в прямом направлении

Вследствие теплового движения в электрическое поле p-n-перехода попадают неосновные носители зарядов (электроны из p-области и дырки из n-области). Движение неосновных носителей зарядов под действием сил поля p-n-перехода направлено встречно диффузионному току основных носителей и называется дрейфовым или тепловым током, зависящим в сильной степени от температуры. При отсутствии внешнего электрического поля дрейфовый ток уравновешивается диффузионным и суммарный ток через p-n-переход равен нулю.

Соединив положительный зажим источника питания с металлическим электродом полупроводника n-типа, а отрицательный зажим с электродом полупроводника p-типа, получим внешнее электрическое поле, направленное согласно с полем p-n-перехода, усиливающее его (рис. 3.4, б). Такое поле еще больше будет препятствовать прохождению основных носителей зарядов через запирающий слой и через диод пройдет малый обратный ток, обусловленный неосновными носителями заряда. Обратный ток диода в значительной мере зависит от температуры, увеличиваясь с ее повышением.

При изменении полярности источника питания (рис. 3.4, в) внешнее электрическое поле окажется направленным встречно полю p-n-перехода и под действием этого поля электроны и дырки начнут двигаться навстречу друг другу и число основных носителей заряда в переходном слое возрастет, уменьшая потенциальный барьер и сопротивление переходного слоя.

Таким образом, в цепи устанавливается прямой ток, который будет значительным даже при относительно небольшом напряжении источника питания.

При небольшом прямом напряжении (1 В) на зажимах диода в его цепи проходит относительно большой ток, а при значительных обратных напряжениях ничтожно мал.

Таким образом, полупроводниковый диод обладает односторонней проводимостью, т. е. является электрическим вентилем. Промышленность производит электрические вентили германиевые, кремниевые, селеновые и меднозакисные. Германиевые и кремниевые вентили изготовляют двух типов: точечные и плоскостные.

У точечного германиевого диода помещен кристалл германия с электронной проводимостью, в который острием входит контактный пружинящий вывод анода. Под контактным острием в результате специальной термической обработки создается область с дырочной проводимостью.

В плоскостном германиевом диоде на пластину германия с электронной проводимостью накладывается таблетка из индия, которая в процессе изготовления диода нагревается до 500°С и плавится так, что ее атомы диффундируют в германий, образуя область с дырочной проводимостью.

На границе двух областей (с электронной и дырочной проводимостью) появляется запирающийр-n-переход.

Как в точечном, так и в плоскостном диоде германий припоем укреплен на кристаллодержателе, к которому приварен вывод катода. Вывод анода также припоем укрепляется в области с дырочной проводимостью и выводится наружу в верхней части диода Металлический корпус сварен с кристаллодержателем и стеклянным изолятором.

Кремниевые диоды отличаются от германиевых не только материалом полупроводника, но и некоторыми преимуществами, а именно:

более высокой предельной температурой,

много меньшим обратным током,

более высоким пробивным напряжением.

Однако сопротивление кремниевого вентиля в прямом направлении значительно больше чем германиевого.

Селеновый вентиль состоит из алюминиевого диска, с одной стороны покрытого слоем кристаллического селена, обладающего дырочной проводимостью, который служит одним электродом. Другим электродом является нанесенный на селен слой сплава кадмия и олова, при

диффузии из которого атомов кадмия в селен образуется слой) обладающий электронной проводимостью. Селеновые вентили имеют значительно меньшие обратные напряжения (до 60 В) и плотности тока, чем германиевые и кремниевые, так что их габариты и масса значительно больше.

Однако характеристики селеновых вентилей более стабильны, что позволяет соединять их последовательно и параллельно для увеличения обратных напряжений и прямых токов. Кроме того, селеновые вентили обладают свойством самовосстановления, которое сводится к следующему: если через пробитую шайбу пропустить большой ток, то селен нагревается и плавится, закрывая место пробоя и восстанавливая вентильное свойство диода.

Меднозакисный вентиль состоит из медного диска со слоем закиси меди, к которому прилегает для получения хорошего контакта свинцовый диск с латунным радиатором большого диаметра. Слой закиси меди образуется при термической обработке меди в атмосфере кислорода. Наружный слой закиси меди, полученный при избытке кислорода, обладает дырочной проводимостью, а слой закиси, полученной при недостатке кислорода, электронной проводимостью. Между этими двумя слоями закиси меди возникает p-n-переход.

Меднозакисные вентили имеют низкие обратные напряжения (10 В) и плотности тока (0,1 А/см^2) и в преобразовательных устройствах не используются. Их применение ограничено измерительными приборами в силу стабильности их характеристик.

Транзисторы. Транзистором называется полупроводниковый прибор в двумя p-n-переходами, предназначенный для усиления и генерирования электрических колебаний и представляющий собой пластину кремния или германия, состоящую из трех областей. Две крайние области всегда обладают одинаковым типом проводимости, а средняя - противоположной проводимостью. Транзисторы, у которых крайние обладают электронной проводимостью, называются транзисторами n-p-n-типа (рис. 3.5, а); транзисторы, у которых крайние области обладают дырочной, а средняя электронной проводимостями - транзисторами p-n-p-типа (рис. 3.5, б). Физические процессы, происходящие в транзисторах двух типов, аналогичны и различие между ними заключается в том, что полярности включения источников питания их противоположны, а также в том, что если в транзисторе n-p-n-типа электрический ток создается в основном электронами, то в транзисторе p-

n-p-типа - дырками. Смежные области, отделенные друг от друга p-n-переходами, называются эмиттером Э, базой Б и коллектором К.

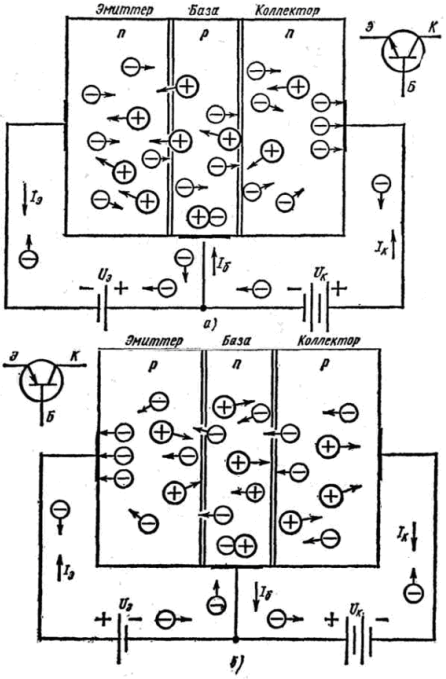


Рис. 5. Принцип работы и условное обозначение транзистора:
а—n-p-n, б—p-n-p

Эмиттер является областью, испускающей (эмигрирующей) носители зарядов электронов в транзисторе n-p-n-типа и дырок в транзисторе p-n-p-типа, коллектор - область, собирающая носители зарядов, база - средняя область, основание.

В условиях работы транзистора к левому p-n-переходу прикладывается напряжение эмиттер - база в прямом направлении, а к правому p-n-переходу - напряжение база - коллектор - в обратном. Под действием электрического поля большая часть носителей зарядов из левой области (эмиттера), преодолевая p-n-переход, переходит в очень узкую среднюю область (базу). Далее большая часть носителей зарядов продолжает двигаться ко второму переходу и, приближаясь к нему, попа-

дает в электрическое поле, созданное внешним источником. Под влиянием этого поля носители зарядов втягиваются в правую область (коллектор), увеличивая ток в цепи батареи.

Если увеличить напряжение на эмиттере, то возрастет количество носителей зарядов, перешедших из эмиттера в базу, т. е. увеличится ток эмиттера на некоторую величину. При этом также увеличится ток коллектора на величину.

В базе незначительная часть носителей зарядов, перешедших из эмиттера, рекомбинирует со свободными носителями зарядов противоположной полярности, убыль которых пополняется новыми носителями зарядов из внешней цепи, образующими ток базы. Таким образом, ток коллектора окажется меньше тока эмиттера, незначительно отличаясь от последнего. Отношение приращения тока коллектора к приращению тока эмиттера при постоянном напряжении коллектора называется коэффициентом усиления по току и обычно имеет значение 0,9-0,995.

Если цепь эмиттер - база разомкнута и ток в ней равен нулю, а между коллектором и базой приложено напряжение,, то в цепи коллектора будет проходить небольшой обратный (тепловой) ток, обусловленный неосновными носителями зарядов. Этот ток в сильной степени зависит от температуры и является одним из параметров транзистора (меньшее его значение соответствует лучшим качествам транзистора).

Так как левый (эмиттерный) p-n-переход находится под прямым напряжением, то он обладает малым сопротивлением. На правый же коллекторный) p-n-переход воздействует обратное напряжение и он имеет большое сопротивление. Поэтому напряжение, прикладываемое к эмиттеру, весьма мало (десятые доли вольта), а напряжение, подаваемое на коллектор, может быть достаточно большим (до нескольких десятков вольт). Изменение тока в цепи эмиттера, вызванное малым напряжением, создает примерно такое же изменение тока в цепи коллектора, где действует значительно большее напряжение, в результате чего транзистор осуществляет усиление мощности.

Электронная эмиссия. В электронных лампах прохождение тока связано с перемещением электронов в вакууме, который является непроводящей средой.

Под вакуумом понимают такую высокую степень разрежения воздуха или газа, при которой движение электронов происходит без столкновения с молекулами газа.

Источником электронов в электронных лампах служит металлический электрод - катод, с поверхности которого электроны выходят в окружающую среду. В металлах вокруг атомов движутся электроны, слабо связанные с ними. При нормальной температуре и при отсутствии внешнего электрического поля выхода электронов из катода нет вследствие недостаточности: их кинетической энергии.

Некоторая часть электронов, обладающая наибольшей энергией, выходит за пределы металла и образует электронный слой вокруг катода, который вместе с расположенным на поверхности катода слоем положительных ионов (атомов, лишившихся электронов) образует некоторую разность потенциалов, называемую потенциальным барьером. Эта разность потенциалов препятствует выходу электронов за пределы проводника.

Для выхода электронов из катода необходимо им сообщить энергию, равную работе по преодолению тормозящего действия электрического поля или потенциального барьера. Эта энергия называется работой выхода, а ее отношение к заряду электрона - потенциалом выхода.

В зависимости от способа сообщения дополнительной энергии электронам для выхода из катода различают следующие виды эмиссии:

термоэлектронную,
вторичную,
под ударами тяжелых частиц,
автоэлектронную,
фотоэлектронную.

Термоэлектронной эмиссией называется явление выхода электронов из катода при его нагревании. При повышении температуры металла скорость движения электронов и их кинетическая энергия увеличиваются и число электронов, покидающих катод, возрастает.

Вторичной электронной эмиссией называется явление выхода вторичных электронов под действием ударов первичных электронов о поверхность тела. Летящие первичные электроны ударяются о поверхность проводника и проникают в его поверхностный слой, отдавая часть своей энергии вторичным электронам проводника. Если в результате столкновения вторичные электроны будут обладать энергией, большей работы выхода, то они выйдут за пределы проводника. Так как первичный электрон, обладающий значительной энергией, может отдать ее одному или нескольким электронам, то число вторичных электронов может быть больше первичных.

Электронной эмиссией под ударами тяжелых частиц называется явление выхода электронов под действием ударов ионов или возбужденных атомов (молекул) о поверхность проводника, т. е. этот вид эмиссии подобен вторичной электронной эмиссии.

Автоэлектронной эмиссией называется явление выхода электронов из катода под действием сильного электрического поля у его поверхности. Сила, действующая на электрон, находящийся в электрическом поле, пропорциональна заряду электрона и напряженности поля. Поэтому при достаточно большой напряженности электрического поля силы, действующие на электроны, становятся достаточными для преодоления потенциального барьера и выхода электронов из холодного катода.

Фотоэлектронной эмиссией называется явление выхода электронов под действием излучения, поглощаемого катодом, когда электроны катода получают дополнительную энергию для выхода от частиц света - фотонов. Лучистая энергия испускается и поглощается определенными порциями - квантами. Если энергия кванта больше работы выхода, то электрон может покинуть катод. Явление выхода электронов из катода под действием световой энергии называется фотоэффектом.

Все электроны, вылетающие из катода в единицу времени, удаляются от него внешним электрическим полем и образуют электрический ток эмиссии. С повышением температуры катода, увеличением энергии первичных электронов или тяжелых частиц, напряженности ускоряющего поля вблизи катода, светового потока ток эмиссии растет, так как увеличивается число эмиттированных (вылетевших из катода) электронов.

Если же внешнего ускоряющего поля нет и эмиттированные электроны не удаляются от катода, то они скапливаются вокруг него, образуя объемный отрицательный заряд (электронное облако), который создает вблизи катода тормозящее электрическое поле, препятствующее дальнейшему выходу электронов из катода.

Электроды электровакуумных ламп. Электродами электровакуумных ламп являются катоды, аноды и сетки.

Катод лампы, эмиттирующий электроны, характеризуется следующими параметрами:

максимальной плотностью катодного тока,

эффективностью,

рабочей температурой,

долговечностью.

Катодным током является электронный поток, направленный от катода к другим электродам. Для увеличения долговечности электронной лампы максимальный катодный ток обычно значительно меньше полного эмиссионного тока катода.

Максимально допустимый катодный ток, приходящийся на единицу поверхности катода, эмиттирующего электроны, называется максимальной плотностью катодного тока, значение которой в современных электронных лампах 0,1-1 А/см^2.

Эффективность катода (мА/Вт) показывает ток его эмиссии в миллиамперах на один ватт мощности, затраченной на разогрев катода. Чем выше эффективность катода, тем больший ток эмиссии можно получать от него при меньшей затрате мощности в цепи накала. Эффективность катода составляет 2-100 мА/Вт.

Рабочая температура также определяет экономичность катода. Чем ниже рабочая температура катода, тем меньшая мощность требуется для его нагрева. Обычно рабочая температура 1000-2500°С.

Долговечность катода характеризуется временем, в течение которого катод может непрерывно работать, сохраняя свои важнейшие параметры в пределах установленных норм.

Термоэлектронные катоды (до 50 основных типов) по роду эмиттирующих поверхностей можно разделить на четыре группы:

металлические,
металлопленочные,
полупроводниковые,
сложные (металлополупроводниковые и
металлокерамические).

Металлические (или однородные) катоды неактивированные и наименее экономичные, но хорошо работают в сложных температурных условиях, обладают высокой стойкостью при бомбардировке их ионами остаточных газов под воздействием сильных электрических полей. Они применяются в мощных лампах и в тех случаях, когда требуется высокая стабильность параметров катода во времени. Для изготовления металлических катодов применяют металлы с высокой температурой плавления, обладающие хорошими механическими свойствами: прочностью, ковкостью, тягучестью. Наиболее распространенным типом металлического катода является вольфрамовый (рабочая температура 2500°С, температура плавления 3395°С). Реже материалом катода служит *тантал и ниобий*.

Металлопленочные катоды представляют собой металлические катоды, поверхность которых покрыта одним или несколькими слоями вещества, имеющего положительный заряд, который создает электрическое поле, уменьшающее работу выхода электронов. Наиболее распространенными металлопленочными катодами являются карбидированный и бариевовольфрамовый. Такие катоды экономичнее металлических, но уступают им в отношении стабильности параметров и механической прочности.

Полупроводниковые катоды обладают высокой эффективностью и находят широкое применение. В таких катодах основание покрыто относительно толстым слоем активного вещества с электропроводностью электронного типа. К полупроводниковым катодам относятся оксидный и ториево-оксидный катоды.

Сложные катоды являются

металлополупроводниковыми, выполненными на основе оксидных катодов, или

металлокерамическими.

Оксидные катоды делятся на две группы: первая - катоды из составной пористой структуры, пропитанной активной массой, и вторая - оксидно-никелевые катоды, полученные на основе прессования карбонатов и никелевого порошка с последующей обработкой и активированием.

Металлокерамические катоды изготовляют из порошков вольфрама, окиси тория и керамики путем прессования и спекания при высокой температуре.

По своей конструкции катоды могут быть прямого накала и подогревными. В катодах прямого накала нить накала является эмиттирующей поверхностью. Они применяются в лампах большой мощности и выполняются из проволоки или ленты, которым придают различную форму: нить, решетка, Л- или М-образная, спиральная, беличье колесо. Катоды прямого накала имеют малую массу и, следовательно, малую теплоемкость, так что время их разогрева относительно мало и эффективность их выше, чем у подогревных катодов. Особенностью катодов прямого накала является их неэквипотенциальность, т. е. изменение потенциала по длине нити вследствие падения напряжения от проходящего по ней тока. При питании катодов прямого накала переменным током неэквипотенциальность приводит к появлению фона переменного тока в анодной цепи лампы.

К недостаткам катодов прямого накала относится также малая площадь эмиттирующей поверхности и недостаточная жесткость конструкции. Катоды прямого накала выполняют металлическими и активированными торием или барием.

У подогревных катодов эмиттирующая поверхность и подогреватель отделены друг от друга и могут быть электрически не связаны между собой. Они имеют большую эмиттирующую поверхность и массу, что позволяет получить значительный эмиссионный ток и высокую тепловую инерцию. Однако время разогрева у них велико, а эффективность ниже, чем у катодов прямого накала. Потенциал подогревного катода одинаков по всей длине; фон переменного тока, обусловленный неэквипотенциальностью поверхности, здесь отсутствует. Подогреватели подогревательных катодов, изготовленные в виде спирали из вольфрама или сплава вольфрама с рением, помещают внутри катода. В качестве изолирующего материала применяют окись алюминия или окись бериллия.

Анод является коллектором электронов, которые отдают ему кинетическую энергию, полученную ими в ускоряющем поле лампы. При этом анод нагревается и, чтобы максимальная температура анода не превышала установленной для данной лампы величины, его охлаждают.

Существует пять способов охлаждения анода:

лучеиспускание через вакуум (анод находится внутри баллона),

теплопроводность через массивный вывод (анод находится внутри стеклянного или металлокерамического баллона, на его вывод надет радиатор),

воздушное,

водяное,

пароводяное.

В первом и втором способах охлаждение естественное, в остальных трех - принудительное потоком воздуха, воды или пара.

Предельно допустимая температура анода выбирается в зависимости от его материала, типа катода, способа охлаждения, газовыделения из анода и материала баллона лампы.

Максимальная мощность, рассеиваемая на аноде. Допустимая мощность, рассеиваемая на аноде, устанавливается в зависимости от допустимой температуры анода, его материала, охлаждаемой поверхности, цвета этой поверхности и способа охлаждения.

Материалом анодов в лампах с небольшими нагрузками служит никель и алюминированное железо, в лампах с большими нагрузками при естественном охлаждении - молибден, тантал и титан, при искусственном охлаждении - медь. В ионных приборах, кроме того, используют графит.

Конструктивно анодам электронных ламп придают цилиндрическую, эллиптическую и коробчатую формы.

Сетки электровакуумных ламп изготовляют

спиральными,

рамочными,

штампованными.

«Спиральные сетки навивают из проволоки различного диаметра на специальных автоматах и сваривают с траверсами (держателями) точечной сваркой. При изготовлении рамочных сеток на рамку натягивают проволоку очень малого диаметра (10 мкм); в результате жесткости таких сеток возможно достигать очень малых расстояний между электродами.

В электронных лампах число сеток может быть от одной до шести, и каждая из них имеет свое назначение и название. В зависимости от назначения сеток материалом для них может быть вольфрам, молибден, сплавы никеля и другие металлы.

Электроды электронных ламп помещаются в баллонах из стекла (натриевого, боросиликатного, свинцового, кварцевого), которое широко применяется благодаря своим физическим свойствам (малые теплопроводность и газовыделение) и низкой стоимости.

Применяют также комбинированные оболочки - металлостеклянные и металлокерамические. Для комбинированных оболочек используют сталь, медь, алюминий и титан, а керамические оболочки изготовляют из окиси алюминия, кремнезема, форстерита и стеатита. Недостатками стекла являются невысокая механическая прочность и термостойкость, вследствие чего стекло не выдерживает больших перепадов температур. Этих недостатков лишена металлокерамическая конструкция, имеющая малые диэлектрические потери, что очень важно при работе на СВЧ (сверхвысокие частоты).

Для поддержания в лампах высокого вакуума применяют геттер - поглотитель газов, выделяющихся из электродов при их нагреве или электронно-ионной бомбардировке. Наиболее распространенным геттером является барий, который, связывая остаточный газ, осаждается в

виде окислов и чистого бария на стенках колбы, окрашивая ее в серовато-зеркальный цвет.

Колбы электронных ламп с электродами помещаются на цоколе. Схема соединения электродов со штырьками называется цоколевкой лампы и приводится в справочнике.

Миниатюрные и сверхминиатюрные лампы не имеют цоколя и выводы от электродов в них выполняют гибкими проводами, которые припаивают к соответствующим узлам схемы. При этом отсчет выводов ведется от цветной метки, поставленной на одном из выводов.

Тема 2. Газоразрядные приборы и фотоэлементы

Электронные усилители предназначены для усиления напряжения, тока или мощности слабых электрических сигналов (колебаний). Усиление колебаний осуществляется электронной лампой или транзистором под воздействием источников энергии, питающих усилитель.

Электронные усилители можно классифицировать по ряду признаков:

1) по роду усиливаемой величины - усилители напряжения, усилители тока, усилители мощности;

2) по диапазону частот - усилители низкой частоты, усилители высокой частоты, усилители постоянного тока;

3) по числу каскадов (ступеней) усиления - одно-, двух- и многокаскадные.

Мощность выходных колебаний усиливается в основном в связи с усилением напряжения в усилителях напряжения и усилением тока в усилителях тока и мощности.

Основными параметрами усилителей являются коэффициент усиления, диапазон усиливаемых частот, выходное напряжение или выходная мощность, кпд.

Коэффициентом усиления усилителя напряжения называется отношение напряжения на выходе к напряжению на входе, т. е. **Ku=Uвых/UBx.**

Коэффициентом усиления усилителя мощности называется отношение мощности на выходе к мощности на входе усилителя, т. е. **KP = Рвых/Рвх.**

Коэффициент усиления многокаскадного усилителя равен произведению коэффициентов усиления его каскадов. По способу связи между каскадами усилители могут быть с гальванической, резистивно-

емкостной и трансформаторной связями. В диапазоне частот усилителя изменения коэффициента усиления не должны превышать допустимых пределов. Промышленным кпд усилителя называется отношение выходной мощности усилителя к суммарной мощности питания всех его цепей, т. е. **= Рвых/Рпит**

Проходя через усилитель, форма электрического сигнала нарушается под воздействием частотных, амплитудных и фазовых искажений. Частотные искажения формы электрического сигнала возникают вследствие различной степени усиления напряжений различных частот, составляющих усиливаемый сигнал.

Частотные искажения оцениваются коэффициентом частотных искажений, показывающим, насколько усиление на данной частоте **f** отклоняется от усиления на средней частоте, т. е. **M = Kcp/Kf**. Обычно допустимое значение коэффициента частотных искажений принимают **M = 1,25**.

Амплитудные или нелинейные искажения возникают вследствие нелинейности характеристик электронных ламп, транзисторов, сопротивления нагрузки и вызывают искажения формы кривых усиливаемых сигналов. Фазовые искажения, представляющие собой изменения фазы электрического сигнала на выходе усилителя относительно фазы сигнала на его входе, возникают из-за реактивных элементов (индуктивностей и емкостей), включаемых в схему усилителя.

В усилителях широко используют обратную связь, т. е. воздействие выходной цепи усилителя на ее входную цепь. Для соединения выходной цепи усилителя с его входом служит цепь обратной связи.

Если сигнал с выхода усилителя на его вход приходит совпадающим по фазе с усиливаемым сигналом, то это увеличит общий коэффициент усиления и обратная связь называется положительной. Если обратная связь вызывает уменьшение коэффициента усиления, то она называется отрицательной. Отрицательная обратная связь улучшает стабильность работы и характеристики усилителя, уменьшает нелинейные искажения, так как всякая гармоника, искажающая форму сигнала, после усиления подается через цепь обратной связи на вход усилителя с противоположной фазой, частично компенсируя искажение сигнала. При использовании в качестве усилителя электронной лампы необходимо, чтобы сетка имела отрицательный потенциал относительно катода, так как при положительном потенциале на сетке возникают сеточные токи, которые искажают усиливаемый сигнал.

Для создания отрицательного смещения на сетке лампы может быть использован отдельный источник - батарея смещения, но применение такого источника увеличивает габариты, массу и стоимость устройства. Поэтому обычно применяют автоматическое смещение сеточного напряжения, которого достигают падением напряжения на резисторе **RCM** , включенном в цепь катода усилительной лампы. Постоянная составляющая анодного тока **Ia=**, проходя по этому резистору, создает падение напряжения **UCM = IaRCM**, и потенциал сетки автоматически понижается относительно катода на величину **Uсм**. Переменная составляющая анодного тока замыкается через шунтирующий конденсатор **Сш**, включенный параллельно резистору **Rсм.**

Сопротивление конденсатора **Сш** для переменной составляющей должно быть много меньше сопротивления **RCM** с тем, чтобы падение напряжения переменной составляющей анодного тока в резисторе **RCM** не влияло на сеточное напряжение.

Отрицательное смещение подается на сетку через резистор **Rc**, через который электроны, попавшие на сетку, стекают на катод. Если отключить резистор **Rc**, то на сетке будут скапливаться электроны, заряд которых может запереть лампу.

На зажимы резистора **Rc** подается напряжение от источника входного сигнала **uвх**, подлежащего усилению. Сопротивление резистора **Rc** должно быть достаточно большим (0,5 - 1 МОм) с тем, чтобы входное сопротивление схемы было стабильным.

Транзисторные усилители наиболее часто работают по схеме с общим эмиттером, так как эта схема обеспечивает достаточно большое входное сопротивление и коэффициент усиления. Эта схема транзисторного усилителя эквивалентна схеме усилителя на электронной лампе. Изменение потенциала базы под действием входного напряжения **uвх** вызывает изменение как коллекторного тока **iк**, так и напряжения эмиттер - коллектор **uэк**, являющегося выходным.

Помимо влияния температуры отрицательным свойством транзисторов является ухудшение их усилительных свойств с повышением частоты. Неосновные носители проходят через базу не мгновенно, и инжектированные в базу в один и тот же момент неосновные носители достигают коллекторного перехода в разное время, вследствие чего уменьшается амплитуда и искажается форма выходного сигнала. Вместе с этим происходит запаздывание по фазе между коллекторным и эмиттерным токами. Кроме того, с ростом частоты емкость коллектор-

ного перехода шунтирует его сопротивление, что уменьшает коэффициент передачи.

По этим причинам с повышением частоты уменьшается коэффициент усиления по току и частота, при которой он достигает величины 0,707 своего начального значения, называется граничной частотой.

Если для получения заданного коэффициента усиления одного усилительного каскада недостаточно, применяют многокаскадные усилители.

Тема 3. Устройства электроники

Выпрямители. Выпрямителем называется статический преобразователь переменного тока в постоянный, который используется в ряде отраслей промышленности (транспорт, электрохимия, питание электронной аппаратуры и т. д.).

Для преобразования переменного тока в постоянный служат электрические вентили различных типов: электронные (кенотроны), полупроводниковые (германиевые, кремниевые и др.), ионные (газотроны, тиратроны и др.). Каждый вентиль характеризуется следующими параметрами: амплитудой тока, средним значением тока, амплитудой обратного напряжения, внутренним сопротивлением.

Амплитуда тока вентиля ограничивается насыщением (кенотроны с вольфрамовым катодом) или началом разрушения катода (кенотроны с оксидированным катодом, газотроны, тиратроны). Среднее значение тока определяет тепловой режим вентиля, так что повышение среднего значения тока поведет к перегреву вентиля. Амплитуда обратного напряжения - это то наибольшее напряжение, которое может быть приложено к вентилю в обратном (непроводящем) направлении, не подвергая его опасности пробоя.

Внутреннее сопротивление определяет потери энергии и падение напряжения в вентиле. Так как вольтамперная характеристика вентилей нелинейна, то внутреннее сопротивление не постоянно и чем меньше оно, тем экономичнее выпрямитель, так как меньше потери энергии в нем.

Для выпрямления больших токов селеновые вентили соединяют параллельно, а для получения высоких напряжений - последовательно. Параллельно можно соединять вентили одной группы, вольт-амперные характеристики которых совпадают, а последовательно - вентили одного класса с совпадающими обратными характеристиками.

Вольтамперные характеристики германиевых и кремниевых вентилей имеют большой разброс и сильно меняются с изменением температуры

Сглаживающие фильтры. Выпрямленное напряжение при любой схеме выпрямления помимо постоянной составляющей **U0** (среднее значение) содержит переменную составляющую (пульсацию), амплитуда **Um~** и частота **f1** которой зависят от схемы выпрямления.

Для однополуперйодной схемы выпрямления **Um~ = 1,57U0** и **f1 = f**, где **f** - частота тока сети. Для всех остальных схем выпрямления **Um~ = (2/(m- 1)) x U0** и **f1 = mf**, где **m** - число фаз выпрямления (**m = 2** для двухполупериодной и мостовой схем, **m = 3** для трехфазной схемы и т. д.).

Пульсация напряжения оказывает вредное влияние - увеличивает потери, создает помехи и др. Поэтому выпрямленное напряжение обычно непригодно для питания потребителя и необходимо уменьшить его пульсацию, для чего устанавливают сглаживающий фильтр между выпрямителем и приемником энергии. Степень ослабления пульсации сглаживающим фильтром определяется коэффициентом сглаживания, равным отношению амплитуд переменных составляющих напряжений на входе и выходе фильтра, т. е. **q = Um~вх/Um~вых**

Фильтры могут быть емкостные, индуктивные и индуктивно-емкостные. В емкостном фильтре конденсатор **С** включен параллельно нагрузке и напряжение на конденсаторе равно напряжению на нагрузке. Когда напряжение вторичной обмотки трансформатора больше напряжения на нагрузке (**u2 > uн**), вентиль **Д** открыт и через него проходит ток **iВ**, заряжающий конденсатор **iс** и питающий нагрузку **iН**, т. е. **iВ = iс + iн.**

Стабилизаторы напряжения. Все потребители электрической энергии чувствительны к изменениям напряжения, т. е. требует его постоянства (стабилизации) с определенной степенью точности. В качестве параметрических стабилизаторов применяют газоразрядные и кремниевые стабилитроны.

Газоразрядный стабилитрон, представляющий собой прибор тлеющего разряда, имеет стеклянный баллон, заполненный смесью инертных газов аргон-неон, аргон-гелий или других газов при низком давлении. Внутри баллона помещены два электрода - катод **1** и анод **2.** Вольтамперная характеристика стабилитрона имеет такой же вид, как и любого газоразрядного прибора.

Стабилитрон характеризуется следующими величинами: напряжением стабилизации **Uc**, напряжением зажигания **U3**, минимальным током ионизации **Imin**, максимальным током **Imax**, превышение которого ведет к разрушению катода, динамическим сопротивлением на рабочем участке в диапазоне от **Imin** до **Imax.**

Кремниевые стабилитроны представляют собой разновидность кремниевых диодов с повышенной концентрацией носителей зарядов в полупроводниках.

При изменении напряжения на входе **UBX**, например при его увеличении, в некоторой степени повысится напряжение на выходе, т. е. на стабилитроне, что вызовет возрастание тока как в стабилитроне, так и в гасящем сопротивлении, и, следовательно, увеличится падение напряжения на этом сопротивлении.

Таким образом, при повышении напряжения на входе возрастет падение напряжения на гасящем сопротивлении, компенсируя повышение напряжения на входе стабилизатора и поддерживая постоянство напряжения на нагрузке.

Понижение напряжения на входе вызовет уменьшение падения напряжения на гасящем сопротивлении, так как ток в этом сопротивлении, как и в стабилитроне, уменьшится. Как газоразрядные, так и кремниевые стабилитроны соединяют последовательно для получения различных напряжений на нагрузке.

Импульсная и цифровая техника. Для получения переменных токов высокой частоты служат ламповые генераторы, которые преобразуют энергию постоянного тока в электрическую энергию переменного тока заданной частоты. По способу возбуждения колебаний генераторы подразделяются на генераторы с независимым возбуждением и генераторы с самовозбуждением или автогенераторы.

В генераторах с независимым возбуждением переменное напряжение заданной частоты подается от постороннего источника и генераторы являются усилителями мощности гармонических колебаний. В генераторах с самовозбуждением незатухающие колебания создаются под воздейст- - о вием выходной цепи генератора на его входную цепь через положи¬тельную обратную связь.

На изо схема лампового генератора с самовозбуждением, содержащая колебательный контур **LC**. Если зарядить конденсатор **C**, а затем замкнуть его на катушку индуктивности **L**, то конденсатор будет периодически разряжаться и заряжаться, а в цепи колебательного контура возникнут электрические колебания тока и напряжения с частотой,

зависящей от емкости конденсатора **С** и индуктивности катушки **L**, т. е. **0=1/LC**, где **0** — собственная угловая частота контура.

Эти колебания будут затухающими, так как в контуре происходит потеря энергии. Для получения незатухающих колебаний переменного тока необходимо периодически с определенной частотой добавлять энергию в колебательный контур с тем, чтобы компенсировать потери энергии в нем. Триод **Л** является быстродействующим устройством, позволяющим добавлять в колебательный контур необходимую энергию.

Переменный ток, возникающий в колебательном контуре и проходящий по виткам катушки **L**, возбуждает переменное магнитное поле, которое индуктирует в обмотке **Lc** переменную эдс **ec** с частотой тока колебательного контура. Эта эдс воздействует на сетку лампы и управляет током в цепи ее анода.

При положительном значении эдс катушки обратной связи она уменьшит отрицательное смещение на сетке лампы **- (UCM - ec)** и анодный ток увеличится, при отрицательном значении эдс **ec** она увеличит отрицательное смещение на сетке лампы **—(UCM+ec)** и уменьшит анодный ток.

Таким образом, анодный ток лампы будет пульсирующим, изменяющимся от наибольшего до наименьшего значения с частотой, равной частоте эдс обмотки обратной связи, т. е. частоте тока колебательного контура. При этом наибольшее значение анодный ток принимает в момент, когда эдс **ec** имеет максимальное положительное значение, т. е. **ec** совпадает по фазе с переменной составляющей анодного тока и, следовательно, обратная связь положительная.

Постоянная составляющая анодного тока не может пройти в колебательный контур, так как этому препятствует разделительный конденсатор **Ср**, и замкнется через источник питания и разделительную индуктивность **Lp**, которая установлена, чтобы переменная составляющая не шунтировалась источником питания.

При высокой частоте индуктивное сопротивление разделительной индуктивности **0Lp** велико и оно препятствует прохождению переменной составляющей анодного тока, замыкающейся через колебательный контур. Для возбуждения незатухающих колебаний переменная составляющая анодного тока лампы должна быть достаточной, чтобы компенсировать потери энергии в контуре.

В противном случае колебания будут затухающими и генератор работать не сможет. В результате магнитной связи незатухающие коле-

бания передаются в выходную обмотку **Lн**, откуда поступают в нагрузку **Rн**.

На рассмотренной схеме автогенератора между колебательным контуром и сеткой лампы использована трансформаторная обратная связь. Автогенераторы могут быть также с индуктивной и с емкостной обратной связью.