

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

А.Е. СИДОРОВ, Г.В. ВАГАПОВ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ
ПРЕДПРИЯТИЙ, ОРГАНИЗАЦИЙ, УЧРЕЖДЕНИЙ

Учебное пособие

Казань 2013

УДК 621.313
ББК 31.26
С23

Рецензенты:

кандидат технических наук, доцент Тольяттинского государственного
университета *В.В. Вахнина*;

кандидат технических наук, доцент Казанского государственного
энергетического университета *П.П. Павлов*

Сидоров А.Е., Вагапов Г.В.

С23 Электрические машины и электрооборудование предприятий,
организаций, учреждений: Учебное пособие /А.Е. Сидоров,
Г.В. Вагапов – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2013. – 288 с.

Предназначено для использования студентами, обучающимися по направлению
подготовки 140400 «Электроэнергетика и электротехника» при изучении дисциплин
«Электрические и электронные аппараты», «Электро-оборудование
промышленности», «Энергосиловое оборудование промышленных предприятий».

УДК 621.313
ББК 31.26

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебное пособие написано в соответствии с учебной программой по дисциплине «Проектирование систем электроснабжения» для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника». Оно также может быть полезно и для инженеров-электриков, работающих в области эксплуатации электрических машин и электрооборудования предприятий, хозяйств и учреждений.

В учебном пособии принят следующий порядок изложения тем материала: трансформаторы, асинхронные машины, синхронные машины, электрические машины постоянного тока, специальные электрические машины и преобразователи, коллекторные электрические машины переменного тока. Отдельным разделом изложены вопросы проектирования подстанций электроснабжения предприятий, хозяйств и учреждений.

При изложении главное внимание уделено устройству, основным вопросам теории и экспериментальному исследованию электрооборудования общего назначения. Рассмотрены вопросы расчета отдельных элементов конструкций. Кроме этого, в начале каждой главы изложены методические рекомендации по изучению содержания разделов, а в конце предложены вопросы для контроля.

Авторы выражают благодарность рецензентам работы за полезные замечания.

Особую признательность авторы выражают заведующей кафедрой «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений» к.т.н., профессору Н.В. Роженцовой за ценные замечания и предложения в период работы над рукописью, доценту В.И. Капаеву за большую работу по редактированию рукописи. Авторы выражают благодарность О.И. Хакимовой, Н.И. Коноваловой, А.М. Хисамеевой за помощь в оформлении рукописи.

ВВЕДЕНИЕ

Электротехника – область науки и техники, которая занимается изучением электрических и магнитных явлений, при преобразовании энергии одного вида в другую, а также ее использованием в практических целях.

Можно выделить три основные направления: 1) преобразование различных видов энергии природы в электрическую энергию; 2) превращение одних веществ природы в другие; 3) получение и передача информации.

Научно-технический прогресс невозможен без электрофикации и автоматизации в сфере производства, как и всех отраслей народного хозяйства. Все это приводит к непрерывному росту потребления электрической энергии и, как следствие, к увеличению ее производства.

В настоящее время основными источниками электрической энергии являются электрические генераторы. Это класс электрических машин, которые преобразуют механическую энергию в электрическую энергию. Машины, в которых происходит обратное преобразование энергии, называются двигателями.

Электродвигатель – основной элемент электропривода рабочих исполнительных механизмов электрооборудования предприятий, организаций, учреждений. Хорошая управляемость электрической энергии, простота ее распределения позволили широко применять многодвигательный электропривод, когда отдельные элементы системы в целом приводятся в движение самостоятельными двигателями. Многодвигательный привод значительно упрощает систему в целом путем уменьшения числа механических передач, связывающих отдельные звенья системы, создает возможности в автоматизации различных процессов.

За последнее время значительно возросло применение электрических машин малой мощности – микромашин мощностью от долей до нескольких сотен ватт. Такие электрические машины используются в устройствах автоматики и вычислительной технике.

Передачу электроэнергии на большие расстояния осуществляют при высоком напряжении, чем обеспечиваются минимальные электрические потери в линиях электропередач. Поэтому в процессе передачи и распределения электрической энергии приходится неоднократно повышать и понижать напряжение. Этот процесс выполняется посредством электромагнитных устройств, называемых трансформаторами. Трансформатор не является электрической машиной, так как его работа

не связана с преобразованием электрической энергии в механическую энергию и наоборот; он преобразует лишь напряжение электрической энергии. Однако электромагнитные процессы, протекающие в трансформаторах, аналогичны процессам, происходящим при работе электрических машин. Кроме того, электрическим машинам и трансформаторам свойственна единая природа электромагнитных и энергетических процессов, возникающих при взаимодействии магнитного поля и проводника с током. По этим причинам тема «Трансформаторы» составляет неотъемлемую часть курса «Электрические машины».

ГЛАВА 1

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ. МАГНИТНОЕ ДЕЙСТВИЕ ТОКА

1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

1.1.1. Общие сведения

Для того чтобы зажечь электрическую лампу, её нужно присоединить к сети – к проводам, идущим от установленных на электростанциях специальных машин, называемых генераторами и вырабатывающих электрическую энергию. По этим проводам к лампе подводится энергия, необходимая для накала её нити.

Крупные станции питают сотни тысяч ламп и двигателей. Необходимую для этого энергию они получают от сжигания угля, нефти, торфа, от падающих масс воды (гидростанции) или получают её из недр атомов.

От генераторов, установленных на электростанциях, электрическая энергия через линии передачи и преобразующие подстанции подводится ко всем потребителям – к электрическим двигателям, вращающим станки и поднимающим грузы, к сварочным аппаратам, электропечам и многим другим.

Но электрические лампы и двигатели могут получать питание не только от сети электрических станций. В карманном фонаре нить лампы накаливается, если она соединена с гальваническими элементами (батареей), помещенными внутри карманного фонаря.

Электрический двигатель, применяемый для запуска автомобильного мотора, питается от аккумулятора. В вагонах поезда для электрического освещения также пользуются аккумуляторами, а во время хода поезда лампы питаются энергией от специального генератора, т.е. от машины, вырабатывающей электрическую энергию. Эта машина приводится в движение колесами вагона.

Все перечисленные здесь источники питания – электрические машины на электростанциях, аккумуляторы – не являются, конечно, источниками энергии, они только преобразуют подведенную к ним энергию (механическую или химическую) в энергию электромагнитную, передаваемую дальше по проводам. В батареях аккумуляторов энергия бывает запасена в форме химических соединений. И, как всем известно, батарейки карманных фонарей нужно менять после определенного срока,

когда запасенная в батарее энергия израсходовалась. Аккумуляторы можно периодически ставить на зарядку, чтобы подвести к ним новую порцию энергии. Электроэнергия, полученная потребителем, вновь превращается либо в тепло и свет (лампы и нагревательные приборы), либо в механическую энергию (зарядка аккумулятора, электрохимические установки).

Научиться понимать законы, по которым происходят эти превращения энергии, овладеть ими, суметь направить процесс по тому пути, который нам нужен, – это и значит изучить электрические машины и электрооборудование предприятий, организаций и учреждений. Это изучение мы начнем с рассмотрения простейшей электротехнической установки.

1.1.2. Методические указания

Перед изучением данной главы целесообразно повторить материал по дисциплине физика. Это связано с тем, что в основе принципа действия электрических машин лежит преобразование механической энергии в электрическую энергию и наоборот.

Принцип действия электрических машин рекомендуется изучать по условно-логическим схемам, обращая внимание на функциональные различия в работе отдельных элементов машин в различных режимах. Важно разобраться в отличии различных типов машин. Причем при изучении принципа действия генераторов и двигателей необходимо понять, с каким законом связано появление электродвижущей силы и вращающего момента.

При изучении материала главы необходимо знать основные формулы, определяющие частоту вращения поля, электродвижущую силу, частоту вращения ротора, вращающий момент. Для лучшего запоминания формул следует выписать их в отдельную таблицу.

С точки зрения применения и эксплуатации электрических машин, важно знать их рабочие характеристики, особенности пуска в ход, регулирования напряжения и частоты вращения ротора.

Необходимо не только изучить электрические схемы и способы регулирования, но и разобраться в физических процессах, протекающих в генераторе или двигателе, уяснить преимущества и недостатки каждого способа.

При изучении конструкции машин, явлений и характеристик целесообразно пользоваться временными и векторными диаграммами, что облегчит понимание многих особенностей их функционирования.

Данная глава позволит вспомнить все основополагающие физические явления и процессы, протекающие в электрической машине и электрооборудовании.

После усвоения материала важно ответить на вопросы самоконтроля, самостоятельно проработать ряд задач.

1.2. МАГНИТЫ И МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Магниты. Свойства магнитов притягивать железные предметы (рис. 1.1.1) и отклонять компасную стрелку (рис. 1.1.2) всем хорошо знакомы.



Рис. 1.1.1. Подковообразный магнит притягивает железные тела.

На рисунке изображены металлические гвозди, притянутые магнитом. Каждый из гвоздей, приближаясь к магниту, сам становится магнитом и способен притягивать другие гвозди



Рис. 1.1.2. Компасная стрелка поворачивается магнитом: ее южный полюс стремится повернуться к северному полюсу магнита

Компасная стрелка – это тоже магнит, но очень маленький и легкий. Стрелка укреплена на игле и может свободно поворачиваться. Если ничто не мешает стрелке, она повернется так, что один из ее концов (*N*) обратится к северу, а другой (*S*) – к югу. Это удивительное свойство компасной стрелки было открыто более 3000 лет назад в Китае и с тех пор широко применяется.

Магнитные полюсы. Каждый магнит обладает двумя полюсами – северным (*N*) и южным (*S*). Проявление взаимодействия магнитов представлено на (рис. 1.2), который позволяет констатировать, что одноименные полюсы магнитов отталкиваются один от другого, а разноименные полюсы притягиваются.



Рис. 1.2. На рисунке показано: если расположить рядом два магнита, они начинают взаимодействовать друг с другом. При этом одинаковые магнитные полюса (север/север или юг/юг) отталкиваются друг от друга, в то время как разные магнитные полюса (север/юг) притягиваются друг к другу

Это обусловлено направлениями силовых линий, характеризующих магнитное поле, которым обладает любой магнит (рис. 1.3.1). Принимая во внимание направления силовых линий магнита, их взаимодействие легко объяснить (рис. 1.3.2). Если силовые линии магнитов направлены встречно, то происходит их отталкивание друг от друга, при согласном направлении магниты притягиваются друг к другу.

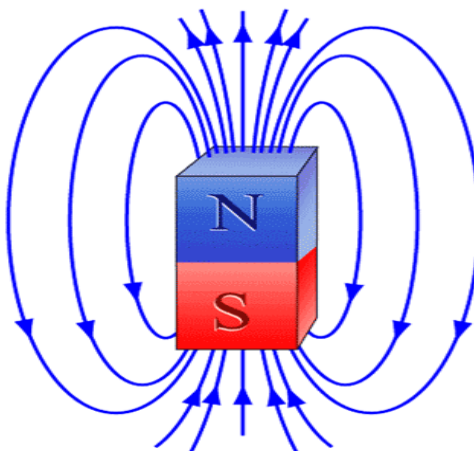


Рис. 1.3.1. На рисунке показано направление силовых линий постоянного магнита

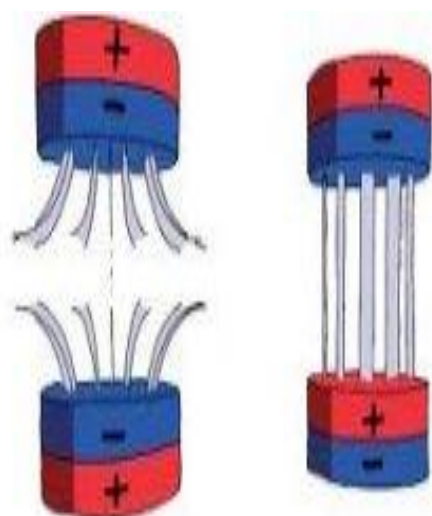


Рис. 1.3.2. На рисунке показано взаимодействие двух постоянных магнитов

Простые опыты (рис. 1.4) со стрелками компаса показывают, что одноименные полюсы стрелок отталкиваются один от другого, а разноименные полюсы стрелок притягиваются.

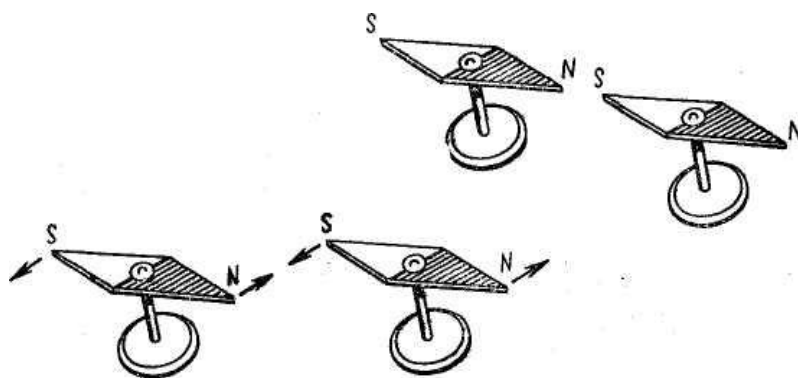


Рис. 1.4. На рисунке слева показаны два компаса. Их полюсы действуют друг на друга. Стрелками показаны силы, действующие на полюсы. Поворачиваясь вокруг своих осей, стрелки займут положение, показанное в правой части рисунка

Сама наша Земля – это огромный магнит: около северного географического полюса лежит ее южный магнитный полюс (рис. 1.5), а около южного географического полюса лежит ее северный магнитный полюс. Поэтому-то к северному географическому полюсу и притягивается северный полюс магнитной стрелки (рис. 1.6).

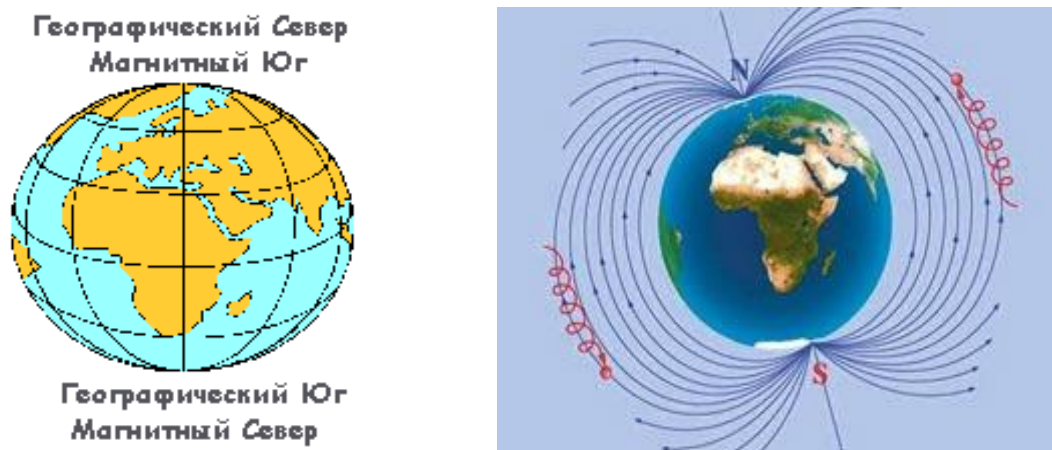


Рис. 1.5. На рисунке показаны магнитные полюса и направления действия силовых линий магнитного поля земли

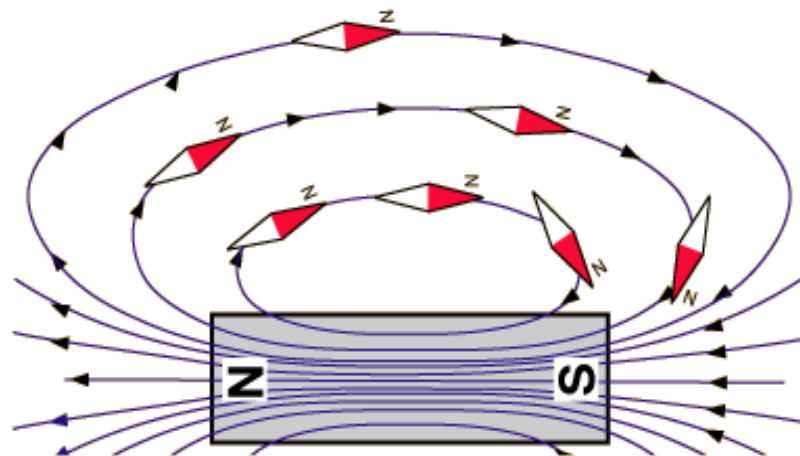


Рис. 1.6. На рисунке показано поведение магнитной стрелки компаса на различных широтах, при этом важно правильно определить положение магнитных полюсов земли

Магнитное поле. От концов компасной стрелки до магнитных полюсов Земли – несколько тысяч километров. Как же они воздействуют на таком расстоянии на компас?

Обычно взаимодействие между телами происходит при их соприкосновении. Например, если нужно закрутить винт, прежде всего приводим в соприкосновение с ним отвертку и поворачиваем его – отвертка касается винта, рука налегает на отвертку.

Положите на стол стальной шарик (хотя бы от подшипника) и приблизьте к нему магнит: шарик покатится к магниту прежде, чем они коснутся друг друга (рис. 1.8).

Значит, магнитные свойства заключены не только в теле самого магнита с его полюсами, но и в окружающем его пространстве. В пространстве, окружающем магнит, существует магнитное поле.



Рис. 1.7. На рисунке показаны постоянный магнит и рядом с ним два компаса

Магнитное поле — один из видов материи, один из видов ее проявления. Магнитное поле может наблюдаться как в воздухе, так и в безвоздушном пространстве. Ему не мешают ни камни, ни дерево, ни металлы — оно как бы пронизывает их. Железо и подобные ему металлы способны усиливать магнитное поле. Внимательно просмотрите рис. 1.9–1.11.

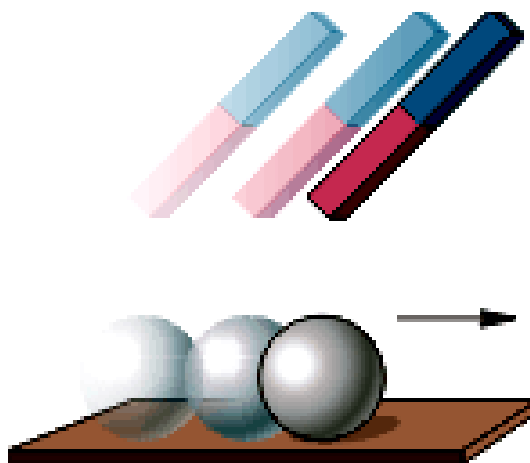


Рис. 1.8. Магнит действует на расстоянии

В магнитном поле заключена энергия. В самом деле, под действием магнитного поля возникают силы, приводящие в движение тела: поворачивающие стрелку, притягивающие гвозди, заставляющие катиться шарик. За счет энергии, запасенной в магнитном поле, совершается работа.

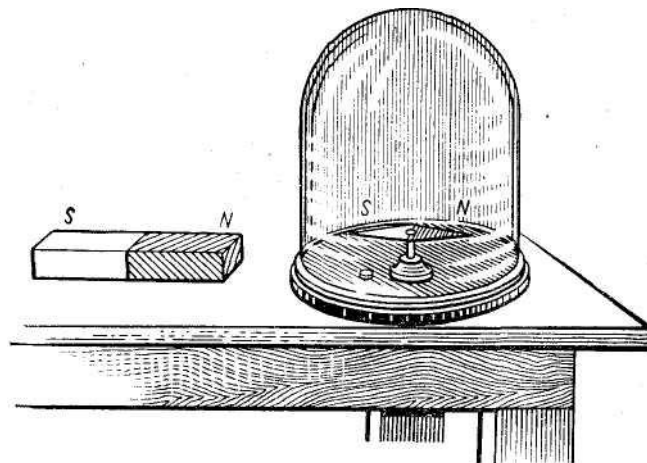


Рис. 1.9. Магнитная стрелка помещена под стеклянный колпак, из которого выкачан воздух. Стержневой магнит, расположенный рядом, оказывает на компасную стрелку такое же действие, как в воздухе

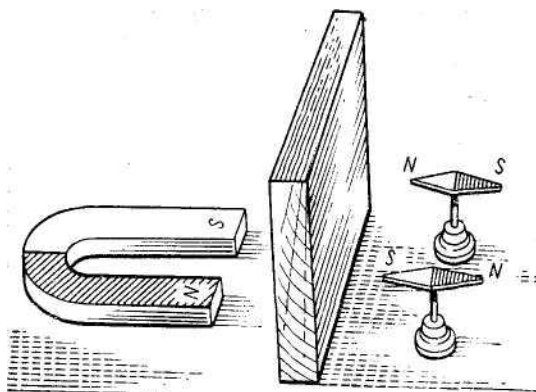


Рис. 1.10. Расположив между магнитом и стрелкой деревянную доску или металлическую (но не железную) пластину, легко убедиться, что действие магнита на компас не изменится

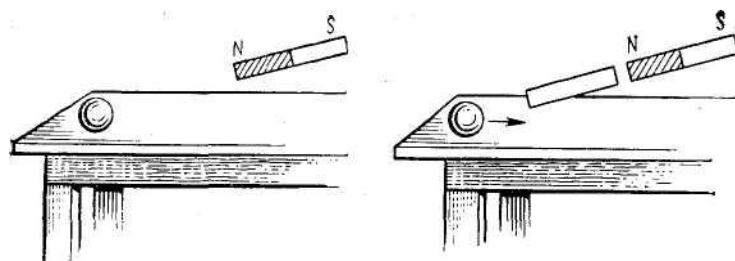


Рис. 1.11. Слева показаны стальной шарик и стержневой магнит. Расстояние между ними слишком велико, и шарик остается неподвижным: магнитное поле в месте расположения шарика слишком слабо. Справа к тому же стержневому магниту приставлен железный брусок. Магнитное поле усилено железным бруском, и шарик покатился

1.3. МАГНИТНОЕ ДЕЙСТВИЕ ТОКА

Электрический ток производит магнитное действие (рис. 1.12). Другими словами, вокруг проводника с током образуется магнитное поле. Это замечательное открытие, и его дальнейшее изучение привело к важным практическим следствиям: электрические машины (двигатели и генераторы), электромагниты, телеграфные и телефонные аппараты основаны именно на взаимодействии электрического тока и магнитного поля.

Ясно, что изучающим электрические машины очень важно понять законы взаимодействия электрического тока и магнитного поля.

Правило винта. Направление, в котором ток стремится повернуть компасную стрелку, легко определить, пользуясь правилом винта (рис. 1.13 и 1.14).

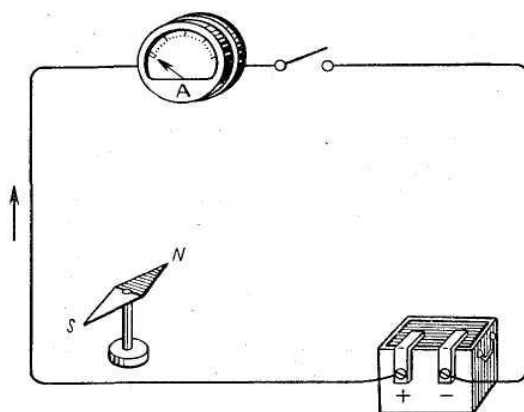


Рис. 1.12. Магнитная стрелка поворачивается под действием тока. Ток в проводах направлен по ходу часов; северный конец стрелки повернут от нас. Если изменить направление тока, положение стрелки изменится на прямо противоположное: северный конец обернется к нам

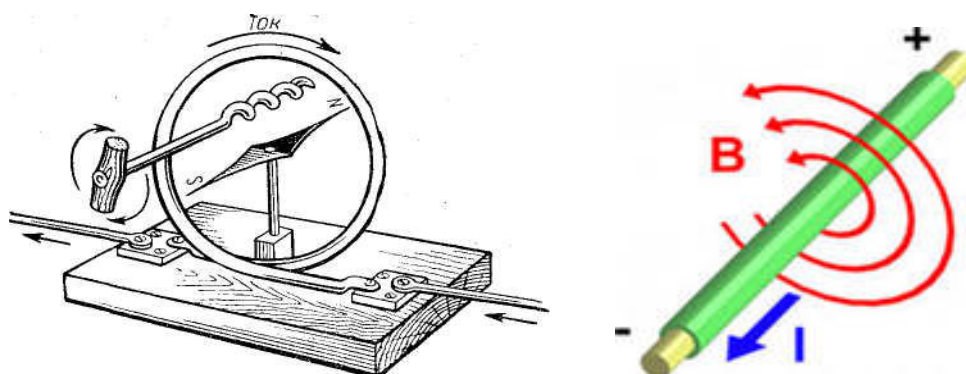


Рис. 1.13. Правило винта. На рисунке изображены круговой ток и расположенная на оси компасная стрелка. Если винт поворачивается по направлению кругового тока, он будет ввинчиваться в направлении от южного конца к северному концу компасной стрелки

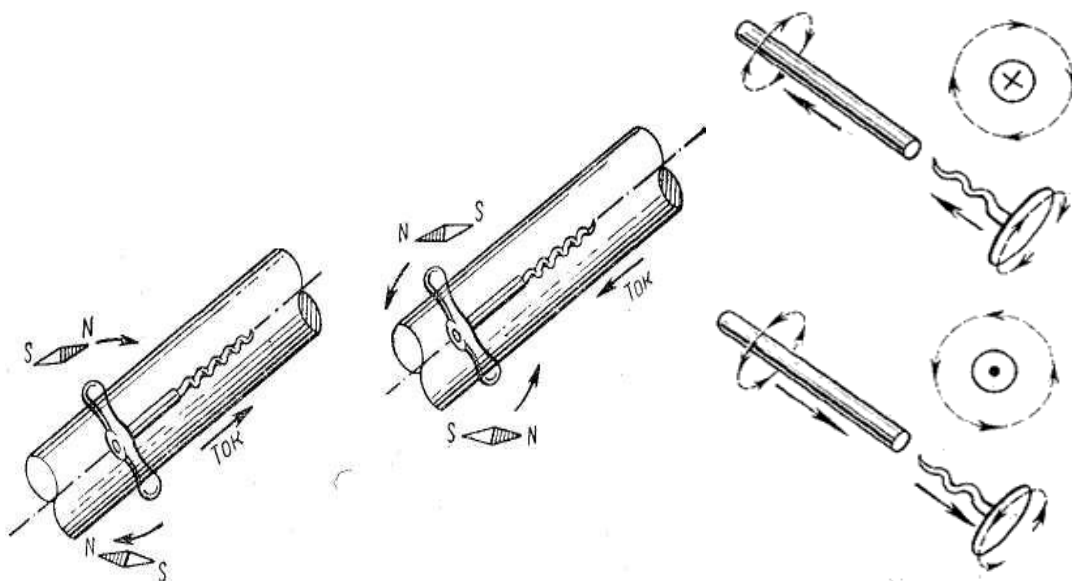


Рис. 1.14. Правило винта. На рисунке изображены прямолинейные проводники с током и по две компасные стрелки, расположенные вблизи проводников. Они повернуты в определенном направлении магнитным полем тока. Северные концы компасных стрелок показывают, в каком направлении нужно вращать рукоятку, чтобы винт ввинчивался по направлению тока

1.4. ДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОВОДНИК С ТОКОМ

Ток оказывает силовое действие на магниты. Значит, нужно ожидать, что магниты также оказывают силовое действие на проводник с током. Действительно, если расположить провод с током между полюсами магнита, на этот провод будет действовать сила. Величина этой силы зависит от тока, от размеров проводника и, конечно, от того, находится проводник в сильном или в слабом магнитном поле. В сильных магнитных полях электрических машин развиваются огромные усилия, способные поворачивать валы больших прокатных станов.

Наконец, эта сила зависит от того, в каком направлении расположен проводник по отношению к магнитным полюсам или, точнее, по отношению к направлению магнитного поля.

1.5. МАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Мы несколько раз говорили, что магнитное поле может быть сильнее или слабее и что оно имеет направление. Действительно, вспомним, что в разных точках пространства около полюсов магнита стрелка компаса поворачивается по-разному.

Магнитные явления очень важны для электриков, поэтому займемся более подробным рассмотрением магнитного поля. Установим прежде всего количественную меру, пользуясь которой, можно сравнивать между собой разные магнитные поля и производить расчеты.

Сила магнитного поля определяется количественным значением величины, носящей название магнитной индукции, а также ее направлением.

Определяя скорость тела, недостаточно сказать 50 м/с, нужно еще сказать, в каком направлении это тело движется, например: под углом 45° к горизонту в направлении с востока на запад.

В этом отношении магнитная индукция похожа на такие величины, как скорость. Для ее полного определения нужно знать не только ее значение, но и направление.

Направление. В качестве направления магнитной индукции (силы магнитного поля) принято считать то, в котором располагается северный конец магнитной стрелки.

Количественное значение. Мерой количественного значения магнитной индукции может служить механическая сила, действующая на проводник с током: чем больше сила, испытываемая проводником, тем сильнее магнитное поле.

Единицы магнитной индукции. Сила магнитного поля (магнитная индукция) выражается в теслах (сокращенно Тл). В электрических машинах и трансформаторах магнитная индукция порядка 1 Тл. В лабораторных условиях достигаются поля порядка нескольких десятков Тл.

1.6. СИЛА, ДЕЙСТВУЮЩАЯ НА ПРОВОДНИК С ТОКОМ

Расположим прямолинейный проводник перпендикулярно направлению поля так, чтобы он образовал прямой угол с компасной стрелкой (рис. 1.15). В таких условиях опыт показывает, что на проводник действует сила F , равная произведению магнитной индукции B , длины проводника и тока I .

Это значит, что двукратное увеличение магнитного поля B приводит к двукратному увеличению силы F ; десятикратное увеличение тока I влечет за собой десятикратное увеличение силы и т.д.

Сказанное можно представить такой математической формулой:

$$F = BIl,$$

где F – сила; B – индукция; l – длина проводника; I – ток.

Если магнитная индукция измерена в теслах (Тл), длина проводника – в метрах (м), ток – в амперах (А), то значение силы будет выражено в ньютонах (Н).

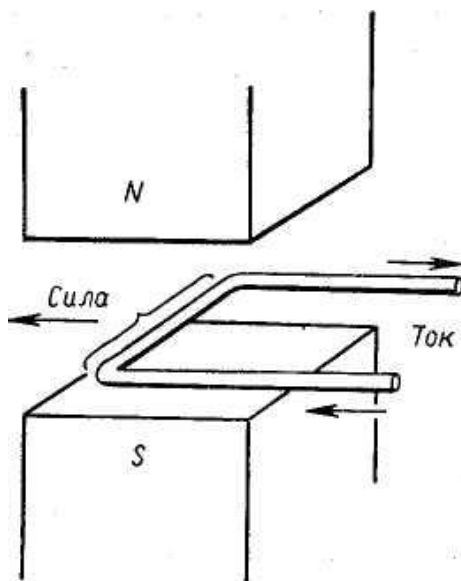


Рис. 1.15. Проводник с током расположен между полюсами магнита. В таком устройстве легко измерить силу, действующую на участок проводника, отмеченный фигурной скобкой. Силы, действующие на параллельные участки проводников, взаимно уравновешиваются

Пример 1. Провод длиной 1 м расположен перпендикулярно направлению магнитного поля (рис. 1.11). Магнитная индукция равна 1,5 Тл. Ток в проводе равен 200 А. Чему равна механическая сила, действующая на провод?

Пользуясь приведенной выше формулой, найдем: $F = 1,5 \cdot 1 \cdot 200 = 300 \text{ Н}$.

Такого порядка силы мы встречаем в электрических машинах, однако, в магнитном поле располагается не один провод, а целый ряд проводов (обмотка машины).

Пример 2. В магнитном поле с индукцией 1 Тл расположено 100 связанных между собой проводов с током 1 мА в каждом, длина каждого из проводов 2 см. Провода расположены перпендикулярно направлению магнитного поля. Чему равна сила, действующая на связку проводов?

$$F = 100 \cdot 1 \cdot 0,02 \cdot 0,001 = 2 \text{ мН},$$

где мН – миллиньютон, т.е. одна тысячная доля ньютона.

Такого порядка силы мы встречаем в измерительных приборах, где по тонким проводам рамки проходит малый измеряемый ток.

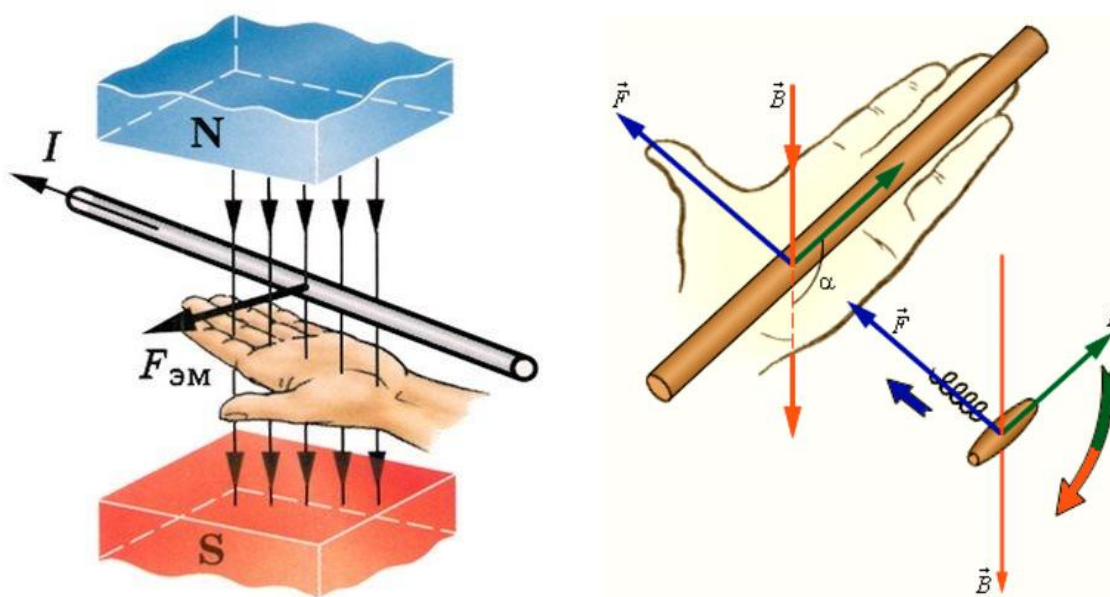


Рис. 1.16. Правило левой руки

Правило левой руки. Направление силы, действующей на проводник, определяется по правилу левой руки (рис. 1.16): если расположить ладонь левой руки таким образом, чтобы магнитное поле было направлено к ладони (входило в ладонь), а четыре вытянутых пальца направить вдоль электрического тока, то отогнутый большой палец укажет направление силы.

1.7. НАГЛЯДНОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Проведем в магнитном поле ряд непрерывных линий так, чтобы эти линии всюду совпадали с направлением силы поля (с направлением магнитной индукции). Полученная картина может служить изображением магнитного поля.

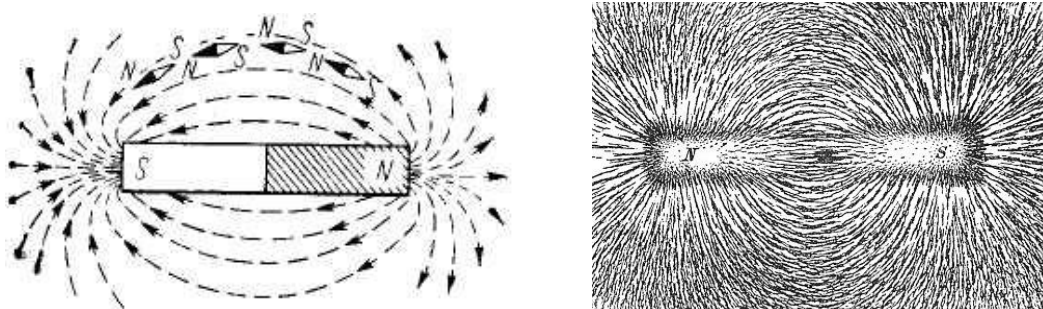


Рис. 1.17. Магнитное поле стержневого магнита

Если перемещать вдоль линии магнитного поля маленькую, свободно подвешенную компасную стрелку, то ее ось всюду будет совпадать с близлежащим участком линии. На одной из линий рис. 1.17 изображены компасные стрелки в четырех положениях.

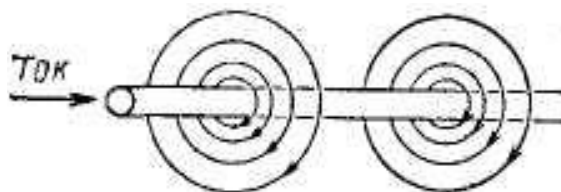


Рис. 1.18. Магнитное поле прямолинейного проводника с током

На рис. 1.17, 1.18 посредством линий изображены магнитные поля постоянного магнита и прямолинейного проводника с током. Стрелки на линиях показывают направление магнитного поля (то направление, которое указывал бы северный конец компасной стрелки).

Для того чтобы по рисунку можно было судить и о силе поля, условились проводить линии тем ближе одну к другой, чем сильнее поле.

Из рис. 1.17 видно, что самое сильное поле – непосредственно около полюсов магнита. Из рис. 1.18 видно, что поле тока сильнее всего около провода, а по мере удаления от него поле ослабевает.

В § 1.2 говорилось, что небольшие железные тела под влиянием магнита сами становятся магнитами (рис. 1.1.1). Поэтому понятно, что если положить на доску постоянный магнит и посыпать доску железными опилками, то они расположатся так, как расположились бы маленькие компасные стрелки. Картины, получаемые посредством опилок, дают наглядное представление о поле.

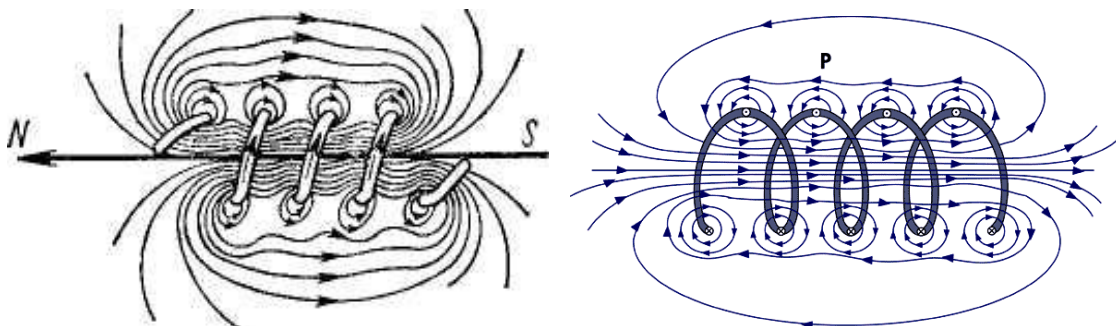


Рис. 1.19. Картина магнитного поля катушки

На рис. 1.19 изображено магнитное поле катушки. Если свернуть провод спиралью, намотав его как катушку, то одинаково направленные

поля отдельных витков сложатся друг с другом, усиливая поле внутри катушки. Направление магнитной линии совпадает с осью катушки, и поле достигает там наибольшей величины. Поле внутри катушки приблизительно однородно, т.е. сила поля остается приблизительно одинаковой в различных точках. Одинаковыми будут и расстояния между соседними магнитными линиями, имеющими наибольшую плотность внутри катушки.

1.8. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТОКОВ

Мы уже знаем, во-первых, что проводник с током создает вокруг себя магнитное поле, во-вторых, что проводник с током, находясь в магнитном поле, подвергается воздействию силы.

Из этого вытекает такое следствие: два провода с током должны воздействовать один на другой. В самом деле, рассмотрим два параллельных провода, токи в которых имеют противоположные направления (рис. 1.20).

Ток первого из них создает вокруг себя магнитное поле, показанное на рис. 1.20 одной круговой линией. Эта линия проходит через второй провод. Применяя правило левой руки ко второму проводу, легко убедиться в том, что он отталкивается от первого.

Сила, с которой первый ток, направленный на нас, действует на второй, равна по величине и противоположна по направлению той силе, с которой второй ток действует на первый. В качестве самостоятельного упражнения рекомендуем читателю разобрать этот же пример, рассматривая магнитное поле второго тока, действующее на первый ток.

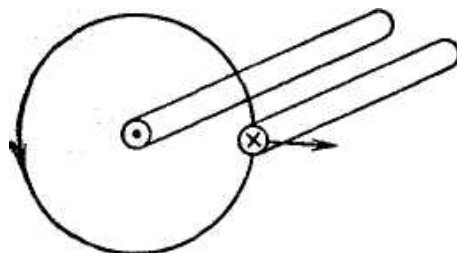


Рис. 1.20. Провода с противоположно направленными токами взаимно отталкиваются.

На рисунке изображено сечение проводов плоскостью чертежа. Направление токов схематически изображено точкой (острие стрелки, направленной к нам) и крестиком (хвост стрелки, направленной от нас). Кольцевая линия показывает магнитное поле первого тока. Применяя правило левой руки для определения силы, действующей на второй провод, нужно расположить левую руку ладонью вниз и вытянуть четыре пальца в сторону чертежа. Отогнутый большой палец покажет, что сила направлена вправо

Итак, между направленными в противоположные стороны токами существуют силы отталкивания. Между токами одинакового направления существуют силы притяжения.

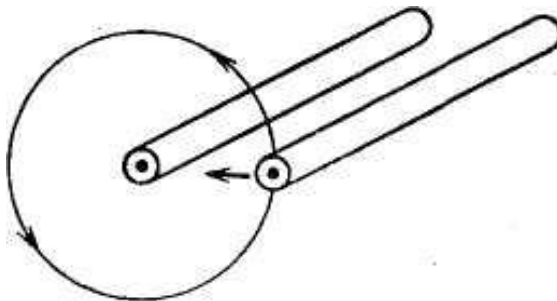


Рис. 1.21. Провода с одинаково направленными токами взаимно притягиваются

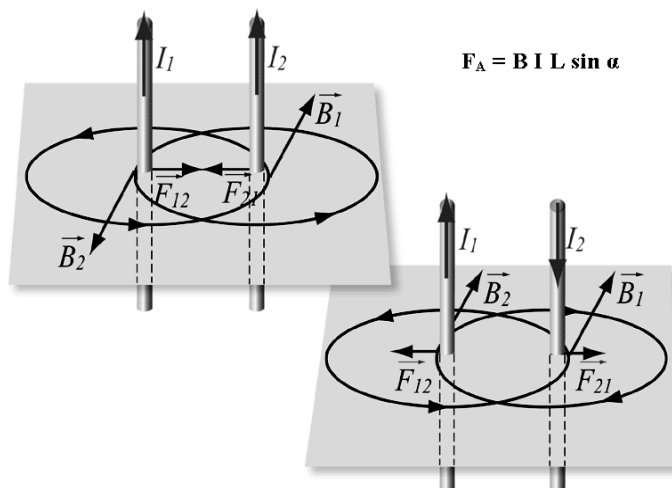


Рис. 1.22. Доказательство взаимодействия проводников с током

Вычисление силы взаимодействия прямолинейных параллельных проводов. Покажем, как вычисляется сила взаимодействия двух прямолинейных параллельных проводов, обтекаемых токами. Вокруг прямолинейного провода с током I создается магнитное поле, индукция которого равна

$$B = k \frac{I}{d}.$$

Здесь d – расстояние от оси провода до той точки поля, индукцию в которой мы ищем; $k = 2 \cdot 10^{-7}$; очевидно, что чем больше это расстояние,

тем меньше соответствующее значение магнитной индукции. Измеряя ток I в амперах, а расстояние d – в метрах, получаем значение магнитной индукции в теслах.

Если в магнитном поле, созданном током I , находится другой провод с током I' , то сила, действующая на него, равна (формула § 1.6)

$$F(\text{Н}) = B(\text{Тл}) I' (\text{А}) l (\text{м}).$$

Рассчитаем силу взаимодействия между двумя проводами, расстояние между которыми равно 20 см, в условиях короткого замыкания, т.е. при очень большом токе, например 30000 А. Первый провод создает поле, индукция которого на расстоянии 20 см оказывается равной

$$B = \frac{2 \cdot 10^{-7} \cdot 30000}{0,2} = 0,03 \text{ Тл.}$$

Если длина проводов равна 1 м, то сила взаимодействия проводов

$$F = 0,03 \cdot 30000 \cdot 1 = 900 \text{ Н.}$$

1.9. ИЗМЕНЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЗДАЕТ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩУЮ СИЛУ

В начале прошлого столетия получили распространение первые электрохимические источники тока. Их появление привело к ряду важных открытий. К их числу относятся открытие электрической дуги и открытие магнитных проявлений тока – электрический ток способен вызвать отклонение магнитной стрелки; провода с электрическим током взаимно отталкиваются или притягиваются.

Ряд этих открытий завершился знаменитым опытом Фарадея (1831), значение которого для развития электротехники было исключительно большим.

Проведение опыта Фарадея схематически показано на рис. 1.23–1.27. В таком виде его нетрудно осуществить.

На трубку из плотного картона нанесены две обметки. Первая из них может соединяться с источником тока, например с аккумулятором. Вторая обмотка изолирована от первой, т.е. между этими обмотками нет электрического соединения (нет контакта). Цепь второй обмотки замкнута на магнитоэлектрический прибор.

Самое существенное в постановке опыта заключается в следующем: вторая обмотка находится в магнитном поле первой, конечно, когда в первой обмотке есть электрический ток. Фарадей искал ответа на вопрос: *не вызывает ли магнитное поле первой обмотки возникновение электрического тока во второй?*

Для того чтобы получить ответ на этот вопрос, в цепь второй обмотки и включен чувствительный амперметр (гальванометр).

Картина, изображенная на рис. 1.23, дает, казалось бы, отрицательный ответ.

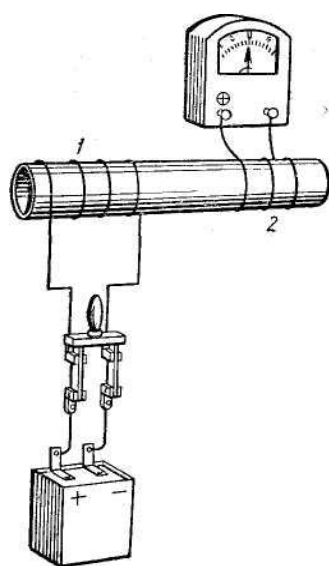


Рис. 1.23. Опыт Фарадея
(цепь аккумулятора замкнута)

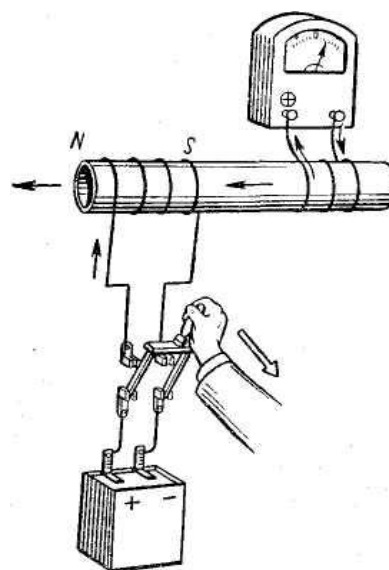


Рис. 1.24. Опыт Фарадея
(цепь аккумулятора разрывается)

На рис. 1.23 в первой (1) обмотке проходит ток (цепь аккумулятора замкнута). Вторая (2) обмотка находится в магнитном поле первой обмотки. Несмотря на это тока в цепи второй обмотки нет: стрелка амперметра стоит на нуле.

На рис. 1.24 ток первой обмотки разрывается. Магнитное поле, в котором находится вторая обмотка, изменяется (оно исчезает). Стрелка амперметра, включенного в цепь второй обмотки, слегка отбрасывается вправо и быстро возвращается в исходное (нулевое) положение. Под действием изменяющегося магнитного поля возникает ток.

Магнитное поле изменяется включением и выключением тока.

Проведем более тщательно наши наблюдения, сосредоточив внимание на стрелке амперметра как раз в то время, когда цепь первой обмотки разрывается (рис. 1.24) или, наоборот, замыкается (рис. 1.25). В этом случае можно заметить, что при разрыве цепи первой обмотки во второй обмотке возникает ток. Этот ток длится недолго – стрелка слегка отклонится вправо и вновь вернется в нулевое положение (рис. 1.24).

Точно так же можно заметить возникновение тока во второй обмотке при включении тока в цепь первой обмотки (рис. 1.25). И этот ток длится недолго – стрелка слегка отклонится влево и вновь вернется в исходное (нулевое) положение.

В чем же различие между первым наблюдением (рис. 1.23) и двумя последующими?

В первом наблюдении мы имели дело с неизменным током в первой обмотке, а, следовательно, и с неизменным магнитным полем.

Электрический ток может возникать в замкнутой цепи, если ее провода находятся в изменяющемся магнитном поле.

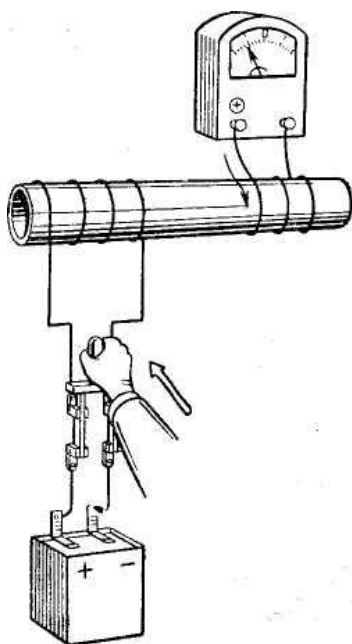


Рис. 1.25. Опыт Фарадея. Производится включение тока в цепь первой обмотки. Магнитное поле, в котором находится вторая обмотка, изменяется (поле возникает). Стрелка амперметра, включенного в цепь второй обмотки, слегка отбрасывается влево и быстро возвращается в исходное положение. Под действием изменяющегося магнитного поля возникает ток

Но если в цепи проводов возникает ток, значит, в цепи действует ЭДС (вспомним второй закон Кирхгофа).

Другими словами, *в проводах электрической цепи при изменении магнитного поля возникает (наводится) ЭДС.*

Магнитное поле изменяется введением стали. Магнитное поле можно изменять не только посредством изменения тока. Известно, что внесение железа усиливает поле. Значит, если внутрь нашей картонной трубы внести пакет из стальных пластин (рис. 1.26), то магнитное поле, создаваемое первой катушкой, усилится.

Возникает ли ЭДС во второй обмотке при выдвигании пакета?

Опыт дает утвердительный ответ (рис. 1.26). Обратим внимание на то, что при вдвигании стали стрелка прибора отклоняется в ту же сторону, что и при включении тока.

При выдергивании стального пакета стрелка отклоняется в ту же сторону, что и при выключении тока (в обоих случаях магнитное поле уменьшается).

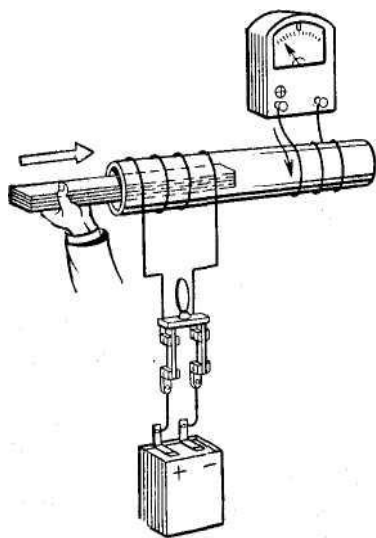


Рис. 1.26

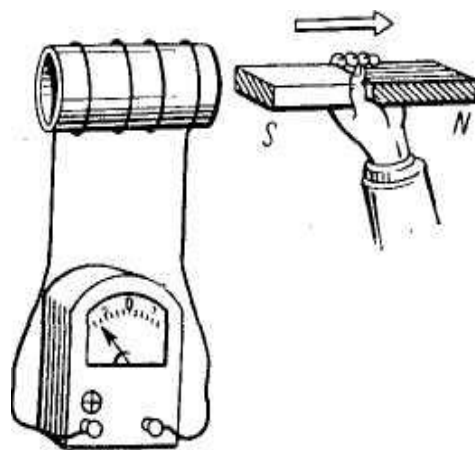


Рис. 1.27

Рис. 1.26. При вдвигании пакета стальных пластин магнитное поле усиливается. Стрелка амперметра, включенного в цепь второй обмотки, отклоняется влево, как это наблюдается и при включении тока (рис. 1.25)

Рис. 1.27. При удалении стержневого магнита от обмотки, замкнутой на амперметр, в обмотке возникает ЭДС

Магнитное поле изменяется из-за перемещения самой катушки.

Рассмотрим еще один опыт. Магнитное поле создается обмоткой со стальным сердечником. Ток в обмотке поддерживается аккумулятором. Вторая обмотка намотана на независимый картонный каркас (картонное кольцо). Эта обмотка замкнута через гибкий шнур на измерительный прибор и не имеет никакого электрического соединения с цепью первой обмотки.

В цепи второй обмотки возникает ЭДС, когда она удаляется из поля, создаваемого первой обмоткой.

Магнитное поле изменяется из-за перемещения постоянного магнита. Рассмотрим еще один опыт, понятие о котором дает рис. 1.27. При удалении стержневого магнита в неподвижной обмотке наводится ЭДС.

Этот опыт показывает, что ЭДС действительно наводится именно изменением магнитного поля, а не взаимодействием токов, как могло бы казаться, например, из опытов, изображенных на рис. 1.23 и 1.24.

Дальнейшие наблюдения позволили установить много новых фактов, которые в конце концов удалось обобщить, а также важные общие законы.

1.10. ПРАВИЛО ЛЕНЦА

Русский академик Э.Х. Ленц установил уже в 1834 г. свое знаменитое правило, позволяющее легко определить направление ЭДС, наводимой магнитным полем: наводимая ЭДС всегда направлена так, чтобы создавать ток, противодействующий происходящим изменениям.

Поясним это примерами.

Примечание. Направление магнитного поля, создаваемое токами обмоток, во всех примерах определяется по правилу винта (§ 1.3, рис. 1.13, 1.14).

Пример 1. В первой обмотке ток нарастает и создает магнитное поле, направление которого показано стрелкой 1 (рис. 1.28, а). Электродвижущая сила, наводимая во второй обмотке, создает в ней ток. Магнитное поле тока второй обмотки по правилу Ленца должно быть направлено навстречу нарастающему магнитному полю первой обмотки. Магнитное поле наведенного тока противодействует нарастанию поля.

Сопоставьте сказанное здесь с направлениями токов, показанными на рис. 1.25.

Пример 2. В первой обмотке ток I_1 уменьшается, соответственно ослабевают и магнитное поле, направление которого показано стрелкой 1 (рис. 1.28, б) Электродвижущая сила, наводимая во второй обмотке, создает в ней ток I_2 . Магнитное поле тока второй обмотки (показано стрелкой 2) по правилу Ленца должно быть направлено одинаково с магнитным полем первой обмотки. Магнитное поле наведенного тока поддерживает убывающее поле, другими словами, оно противодействует происходящему изменению.

Сопоставьте сказанное здесь с направлением токов на рис. 1.24.

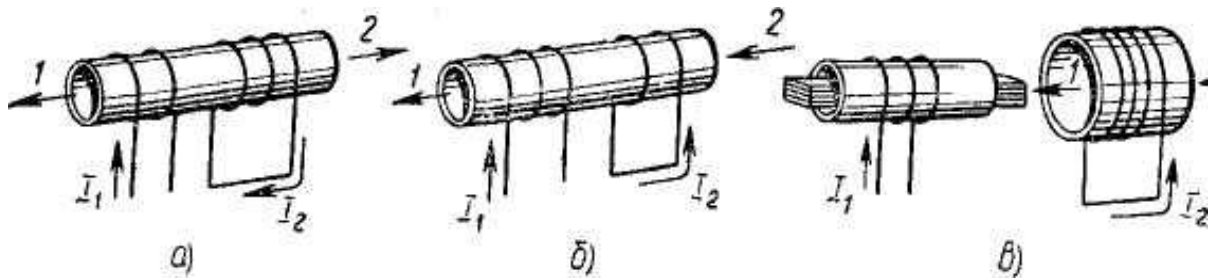


Рис. 1.28. К закону Фарадея:

а – ток I_1 нарастает; *б* – ток уменьшается; *в* – ток I_1 не меняется, вторая катушка отодвигается

Пример 3. Обмотка, образующая замкнутую цепь, удаляется из магнитного поля другой первой обмотки, соединенной с источником тока. Направление магнитного поля неподвижной обмотки показано стрелкой 1 (рис. 1.28, *в*). Электродвижущая сила, наводимая во второй обмотке, создает в ней ток. Магнитное поле второй обмотки по правилу Ленца должно быть направлено одинаково с полем первой обмотки. Магнитное поле, исчезающее во второй обмотке из-за того, что она удаляется, поддерживается током, наведенным во второй обмотке.

Пример 4. Самостоятельно убедитесь в том, что направление тока, наведенного во второй обмотке, в условиях опыта, изображенного на рис. 1.26, соответствует правилу Ленца.

1.11. МАГНИТНЫЙ ПОТОК

Для того чтобы уяснить смысл нового для нас понятия «магнитный поток», подробно разберем несколько опытов с наведением ЭДС, обращая внимание на количественную сторону производимых наблюдений.

В наших опытах будем пользоваться установкой, изображенной на рис. 1.29.

Она состоит из большой многovitковой катушки, намотанной, скажем, на трубу из плотного проклеенного картона. Питание катушки производится от аккумулятора через рубильник и регулировочный реостат. О величине тока, устанавливающегося в катушке, можно судить по амперметру (на рис. 1.29 не показан).

Внутри большой катушки может устанавливаться другая маленькая катушка, концы которой подведены к магнитоэлектрическому прибору – гальванометру.

Для наглядности рисунка часть катушки показана вырезанной – это позволяет увидеть расположение маленькой катушки.

При замыкании или размыкании рубильника в маленькой катушке наводится ЭДС, и стрелка гальванометра на короткое время отбрасывается из нулевого положения.

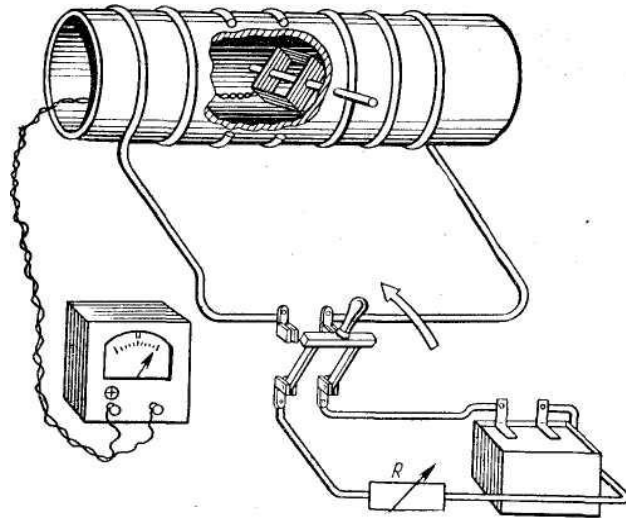


Рис. 1.29. Устройство, на котором можно изучать наведение ЭДС изменяющимся магнитным полем

По отклонению можно судить о том, в каком случае наведенная ЭДС больше, в каком меньше. Замечая число делений, на какое отбрасывается стрелка, можно количественно сравнивать действие, производимое наведенными ЭДС.

Первое наблюдение. Вставив внутрь большой катушки маленькую, закрепим ее и пока не будем ничего изменять в их расположении.

Включим рубильник и, меняя сопротивление реостата, включенного вслед за аккумулятором, установим определенное значение тока, например

$$I = 1 \text{ A.}$$

Произведем теперь выключение рубильника, наблюдая за гальванометром. Пусть его отброс n окажется равным 5 делениям вправо: $n = 5$ когда выключается ток 1 А.

Снова включим рубильник и, меняя сопротивление, увеличим ток большой катушки до 4 А.

Дадим гальванометру успокоиться и снова выключим рубильник, наблюдая за гальванометром.

Если его отброс составлял 5 делений при выключении тока 1 А, то теперь при выключении 4 А заметим, что отброс увеличился в 4 раза: $n = 20$, когда выключается ток 4 А.

Продолжая такие наблюдения легко заключить, что отброс гальванометра, а значит, и наведенная ЭДС возрастают пропорционально росту отключаемого тока.

Известно, что изменение тока вызывает изменение магнитного поля (его индукции), поэтому правильный вывод из нашего наблюдения такой, *наводимая ЭДС пропорциональна скорости изменения магнитной индукции.*

Более подробные наблюдения подтверждают правильность этого вывода.

Второе наблюдение. Продолжим наблюдение за отбросом гальванометра, производя выключение одного и того же тока, например, $I = 4\text{A}$, будем изменять число витков N маленькой катушки, оставляя неизменными ее расположение и размеры.

Предположим, что отброс гальванометра

$$I = 20$$

наблюдался при $N = 100$ (100 витков на малой катушке).

Как изменится отброс гальванометра, если удвоить число витков?

Опыт показывает, что

$$I = 40 \text{ при } N = 200.$$

Именно этого и следовало ожидать.

В самом деле, все витки маленькой катушки находятся под одинаковым воздействием магнитного поля, и в каждом витке должна наводиться одинаковая ЭДС.

Обозначим ЭДС одного витка буквой E_1 , тогда ЭДС 100 витков, включенных последовательно один за другим, должна быть в 100 раз больше:

$$E = 100E_1.$$

При 200 витках

$$E = 200 E_1.$$

При любом ином числе витков

$$E = NE_1.$$

Если ЭДС возрастает пропорционально числу витков, то, само собой, отброс гальванометра должен быть тоже пропорционален числу витков.

Это и показывает опыт. Итак, *наводимая ЭДС пропорциональна числу витков*.

Еще раз подчеркиваем, что размеры маленькой катушки и ее расположение во время нашего опыта оставались неизменными. Само собой разумеется, что опыт проводился в одной и той же большой катушке при выключении того же тока.

Третье наблюдение. Прodelав несколько опытов с одной и той же маленькой катушкой при неизменности включаемого тока, легко убедиться в том, что величина наводимой ЭДС зависит от того, как расположена маленькая катушка.

Для наблюдения зависимости наводимой ЭДС от положения маленькой катушки усовершенствуем несколько нашу установку (рис. 1.30).

К выходящему наружу концу оси маленькой катушки приделаем указательную стрелку и круг с делением (вроде тех, которые можно встретить на радиоприемниках). Поворачивая стерженек, мы теперь по положению указательной стрелки можем судить о том положении, которое занимает маленькая катушка внутри большой.

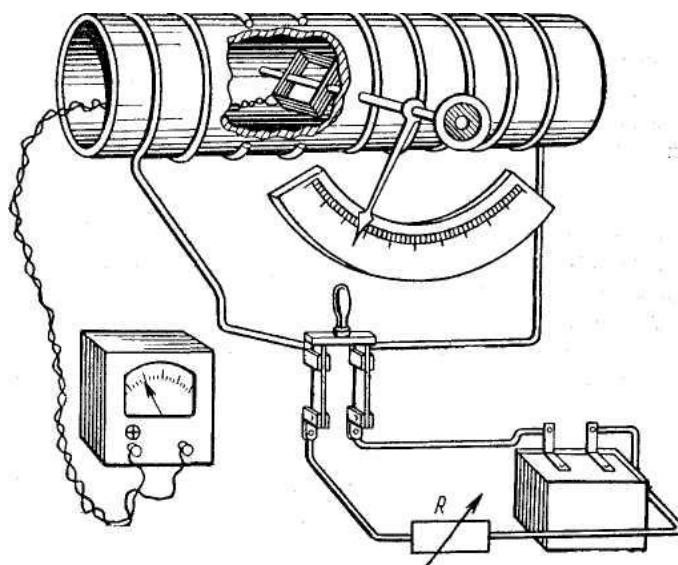


Рис. 1.30. Устройство для поворачивания маленькой катушки, закрепленной на стержне, пропущенном через стенки большой катушки. Стержень связан с указательной стрелкой. Положение стрелки на полукольце с делениями показывает, как расположена маленькая катушка

Наблюдения показывают, что *наибольшая ЭДС наводится тогда, когда ось маленькой катушки совпадает с направлением магнитного поля*, другими словами, когда оси большой и малой катушек параллельны.

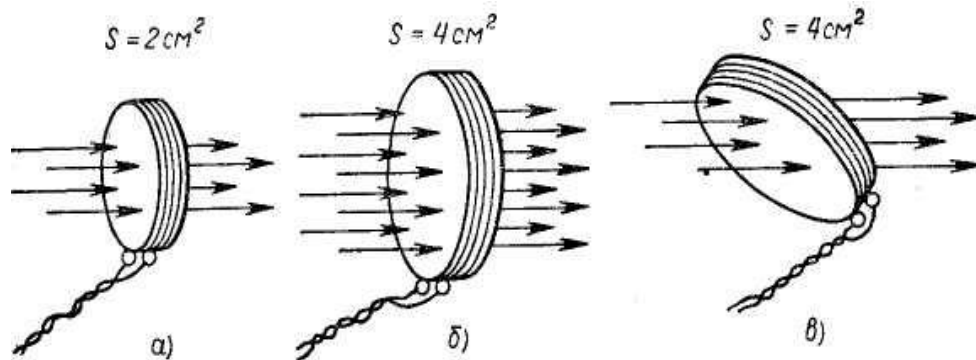


Рис. 1.31. К выводу понятия «магнитный поток». Магнитное поле $B = 0,2 \text{ Тл}$ изображено линиями, проведенными из расчета две линии на 1 см^2 :

a – катушка площадью 2 см^2 расположена перпендикулярно направлению поля. С каждым витком катушки сцеплен магнитный поток $\Phi = 2 \cdot 10^{-4} \cdot 0,2 = 4 \cdot 10^{-5} \text{ Вб}$. Этот поток изображен четырьмя линиями, пересекающими катушку; b – катушка площадью 4 см^2 расположена перпендикулярно направлению поля. С каждым витком катушки сцеплен магнитный поток $\Phi = 4 \cdot 10^{-4} \cdot 0,2 = 8 \cdot 10^{-5} \text{ Вб}$. Этот поток изображен восемью линиями, пересекающими катушку; c – катушка площадью 4 см^2 расположена наклонно. Магнитный поток, сцепленный с каждым из ее витков, изображен четырьмя линиями. Он равен $\Phi = 4 \cdot 10^{-5} \text{ Вб}$, так как каждая линия изображает, как это видно из рис. 2.26, a и b , поток в $1 \cdot 10^{-5} \text{ Вб}$. Поток, сцепленный с катушкой, уменьшается из-за ее наклона

Такое расположение маленькой катушки показано на рис. 1.31, a и b . По мере поворота катушки наводимая в ней ЭДС будет все меньше и меньше.

Наконец, если плоскость маленькой катушки станет параллельной линиям поля, в ней не будет наводиться никакой ЭДС. Может возникнуть вопрос, что же будет при дальнейшем повороте маленькой катушки?

Если мы повернем катушку больше чем на 90° относительно исходного положения, то изменится знак наводимой ЭДС. Линии поля будут входить в катушку с другой стороны.

Четвертое наблюдение. Важно провести еще одно заключительное наблюдение.

Выберем определенное положение, в которое будем ставить маленькую катушку.

Условимся, например, ставить ее всегда в такое положение, чтобы наводимая ЭДС была возможно большей (конечно, при данном числе витков и данном значении отключаемого тока). Изготовим несколько маленьких катушек разного диаметра, но с одинаковым числом витков.

Будем ставить эти катушки в одно и то же положение и, выключая ток, будем наблюдать за отбросом гальванометра.

Опыт покажет нам, что *наводимая ЭДС пропорциональна площади поперечного сечения катушек.*

Магнитный поток. Все наблюдения позволяют нам сделать вывод о том, что *наводимая ЭДС всегда пропорциональна изменению магнитного потока.*

Но что такое магнитный поток?

Сначала будем говорить о магнитном потоке через плоскую площадку S , образующую прямой угол с направлением магнитного поля. В этом случае магнитный поток равен произведению площади на индукцию или

$$\Phi = SB,$$

где S – площадь нашей площадки, м^2 ; B – индукция, Тл; Φ – магнитный поток, Вб.

Единицей потока служит вебер.

Изображая магнитное поле посредством линий, мы можем сказать, что *магнитный поток пропорционален числу линий, пронизывающих площадку.*

Если линии поля проведены так, что число их на 1 см^2 перпендикулярно поставленной плоскости равняется индукции поля B , то поток равен числу таких линий.

На рис. 1.31 магнитное поле в 0,2 Тл изображено линиями, проведенными из расчета двух линий на 1 см^2 . Каждая линия, таким образом, соответствует магнитному потоку величиной

$$\Phi_0 = BS = 0,2 \frac{1 \cdot 10^{-4}}{2} = 10^{-5} \text{ Вб}.$$

Теперь для того чтобы определить величину магнитного потока, достаточно просто сосчитать количество линий, пронизывающих площадку, и умножить это число на 10^{-5} .

В случае рис. 1.26, а магнитный поток через площадку в 2 см^2 , перпендикулярную направлению поля,

$$\Phi = 0,2 \cdot 2 \cdot 10^{-4} = 4 \cdot 10^{-5} \text{ Вб}.$$

На рис. 1.31, *а* эта площадка пронизана четырьмя магнитными линиями. В случае рис. 1.31, *б* магнитный поток через поперечную площадку в 4 см^2 при индукции 0,2 Тл

$$\Phi = 0,2 \cdot 4 \cdot 10^{-4} = 8 \cdot 10^{-5} \text{ Вб},$$

и мы видим, что площадка пронизана восемью магнитными линиями.

Магнитный поток, сцепленный с витком. Говоря о наведенной ЭДС, нам нужно иметь в виду поток, сцепленный с витком.

Поток, сцепленный с витком — это поток, пронизывающий поверхность, ограниченную витком.

На рис. 1.31 поток, сцепленный с каждым витком катушки, в случае рис. 1.31, *а* равен $4 \cdot 10^{-5}$ Вб, а в случае рис. 1.31, *б* поток равен $8 \cdot 10^{-5}$ Вб.

Если площадка не перпендикулярна, а наклонена к магнитным линиям, то уже нельзя определять поток просто произведением площади на индукцию. Поток в этом случае определяется как произведение индукции на площадь проекции нашей площадки. Речь идет о проекции на плоскость, перпендикулярную линиям поля, или как бы о тени, отбрасываемой площадкой (рис. 1.32).

Однако при любой форме площадки поток по-прежнему пропорционален числу линий, проходящих через нее, или равен числу единичных линий, пронизывающих площадку.

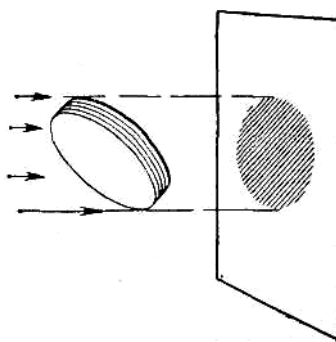


Рис. 1.32. Наводимая ЭДС пропорциональна площади той тени, которую отбрасывает наша маленькая катушка на плоскость, перпендикулярную линиям поля

Так, на рис. 1.31, *в* поток через площадку в 4 см^2 при индукции 0,2 Тл равен всего $4 \cdot 10^{-5}$ Вб (линии ценю по 10^{-5} Вб). Изображение магнитного поля линиями очень помогает при определении потока.

Если с каждым из N витков катушки сцеплен поток Φ , можно назвать произведение $N\Phi$ полным потоком сцепления катушки. Понятием потоком сцепления можно особенно удобно пользоваться, когда с разными

витками сцеплены разные потоки. В этом случае полным потоко-сцеплением называют сумму потоков, сцепленных с каждым из витков.

Несколько замечаний о слове «поток». Почему мы говорим о потоке? Связано ли со словом «поток» представление о каком-то течении чего-то магнитного? В самом деле, говоря «электрический ток», мы представляем себе движение (поток) электрических зарядов. Так же ли обстоит дело и в случае магнитного потока?

Нет, когда мы говорим «магнитный поток», мы имеем в виду только определенную меру магнитного поля (произведение силы поля на площадь), похожую на меру, которой пользуются инженеры и ученые, изучающие движение жидкостей. При движении воды они называют ее потоком произведения скорости воды на площадь поперечно расположенной площадки (поток воды в трубе равен ее скорости на площадь поперечного сечения трубы).

Конечно, само магнитное поле, представляющее собой один из видов материи, связано и с особой формой движения. У нас еще нет достаточно отчетливых представлений и знаний о характере этого движения, хотя о свойствах магнитного поля современным ученым известно многое: магнитное поле связано с существованием особой формы энергии, его основной мерой является индукция, другой очень важной мерой является магнитный поток.

1.12. ЗАКОН НАВЕДЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ

Все опыты с наведением ЭДС, а также теоретические рассуждения приводят к тому, что

ЭДС, наводимая в электрической цепи, равна скорости изменения потока, сцепленного с ней.

Выразим сказанное математической формулой. Для этого введем один новый знак Δ или d . Первый из них – это греческая буква (читается дельта), второй – это латинская буква d . Каждая из этих букв, поставленная перед обозначением какой-нибудь величины, выражает ее изменение. Так, например, если время обозначить буквой t , то Δt выражает изменение времени или промежуток времени. Если через s обозначить путь, то Δs обозначает отрезок пути или пройденный путь. В таком случае отношение $\Delta s/\Delta t$ выражает скорость v :

$$\frac{\text{пройденный путь}}{\text{время}} = \text{скорость},$$

или

$$\Delta s / \Delta t = v.$$

Пусть за промежуток времени Δt магнитный поток, сцепленный с витком, равномерно изменяется на $\Delta \Phi$. В таком случае скорость изменения потока можно обозначить отношением $\Delta \Phi / \Delta t$. Это отношение и равно наводимой ЭДС:

$$E = \Delta \Phi / \Delta t.$$

Эта формула представляет собой математическое выражение одного из важнейших электротехнических законов.

Направление ЭДС всегда может быть определено по правилу Ленца.

Пусть, например, за 0,01 с ($\Delta t = 0,01$ с) поток, сцепленный с витком, равномерно возрастаая, изменился на $2 \cdot 10^{-4}$ Вб ($\Delta \Phi = 2 \cdot 10^{-4}$ Вб), значит, за это время в витке наводилась ЭДС

$$E = \Delta \Phi / \Delta t = 2 \cdot 10^{-4} / 0,01 = 0,02 \text{ В}.$$

Пример 1. Виток площадью 4 см^2 находится в магнитном поле. Сила поля (индукция) возрастает с нуля до 0,2 Тл за 0,05 с. Плоскость витка образует угол 90° с направлением поля. Чему равна ЭДС, наводимая в витке?

Решение. Поток, сцепленный с витком, достигает значения

$$\Phi = BS = 0,2 \cdot 4 \cdot 10^{-4} = 8 \cdot 10^{-5} \text{ Вб}$$

за 0,05 с, значит, поток $\Phi = 8 \cdot 10^{-5}$ Вб начал возрастать с нуля и $\Delta t = 0,05$ с.

Наводимая ЭДС.

$$E = 8 \cdot 10^{-5} / 0,05 = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ В},$$

или 1,6 мВ (милливольт).

Пример 2. Катушка состоит из 500 витков:

$$N = 500.$$

Каждый из витков сцеплен с магнитным потоком, возрастающим до $\Phi = 8 \cdot 10^{-5}$ Вб за время $\Delta t = 0,05$ с. Чему равна ЭДС, наводимая во всей катушке?

Решение: В каждом из витков наводится ЭДС, равная $1,6 \cdot 10^{-3}$ В (см. предыдущий пример). Значит, во всей катушке наводится ЭДС

$$E = N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = 500 \cdot 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ В} = 0,8 \text{ В}.$$

Пример 3. Катушка состоит из 200 витков. Площадь каждого витка 400 см^2 . Магнитная индукция направлена вдоль оси катушки и равномерно возрастает от 0,5 до 1,2 Тл за время 0,01 с.

Чему равна ЭДС, наводимая в катушке?

Решение. В каждом витке поток изменяется на

$$\Delta \Phi = S(B_1 - B_2) = 0,4(1,2 - 0,5) = 0,028 \text{ Вб}.$$

Здесь через B_2 и B_1 обозначены новое значение $B_2 = 1,2$ Тл и старое значение $B_1 = 0,5$ Тл, с которого началось возрастание поля.

Наводимая ЭДС

$$E = N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = 200 \frac{0,028}{0,01} = 500 \text{ В}.$$

Пример 4. Виток площадью 500 см^2 расположен в магнитном поле так, что его ось образует угол 45° с направлением поля. Индукция магнитного поля, равная 0,08 Тл, равномерно уменьшается до нуля за 0,1 с. Чему равна ЭДС, наводимая в витке?

Решение. Проведем 10 параллельных линий, отстоящих на одинаковом расстоянии одна от другой и пронизывающих виток, расположенный поперек поля (ось витка совпадает с направлением поля). Рядом нарисуем виток, наклоненный на угол 45° , и сосчитаем, сколько линий пронизает наклоненный виток.

Из рисунка легко найти, что при наклоне витка его пронизывает 7 линий вместо 10 (ср. рис. 1.31 и 1.32).

Но 10 линиям соответствовал поток

$$\Phi_{\perp} = BS = 0,08 \cdot 0,05 = 4 \cdot 10^{-5} \text{ Вб}.$$

Значит, 7 линиям соответствует поток

$$\Phi_{\angle 45^\circ} = \frac{7 \text{ линий}}{10 \text{ линий}} \Phi_{\perp} = 2,8 \cdot 10^{-5} \text{ Вб}.$$

Знаками $\perp$ и $\angle 45^\circ$ отмечены потоки при перпендикулярном расположении витка и при его расположении под углом 45° .

1.13. НАВЕДЕНИЕ ЭДС В ПРЯМОЛИНЕЙНОМ ПРОВОДНИКЕ, ДВИЖУЩЕМСЯ В ПОЛЕ

В современных машинах – генераторах – получение ЭДС основано на только что рассмотренном законе. Однако в отличие от примеров предыдущего параграфа в электрических машинах изменение магнитного потока происходит вследствие движения проводника в магнитном поле.

Представим себе, что в узкой щели между полюсами большого электромагнита расположена часть жесткой прямоугольной рамки, согнутой из толстого провода (рис. 1.33 и 1.34). Эта рамка не совсем замкнута, и ее концы соединены с гибким шнуром. Шнур подведен к гальванометру. При движении рамки в направлении, указанном стрелкой, сцепленный с рамкой магнитный поток изменится. При изменении магнитного потока наводится ЭДС. О величине ЭДС можно судить по отклонению стрелки гальванометра.

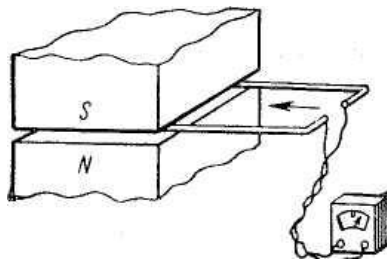


Рис. 1.33. Рамка из жесткого провода вдвигается в щель между полюсами электромагнита. Цепь рамки замкнута проводами, присоединенными к гальванометру

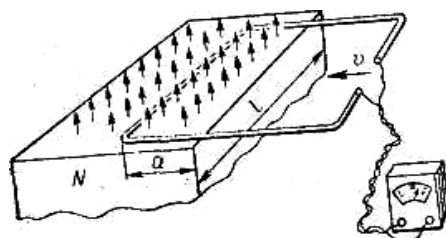


Рис. 1.34. То же, что на рис. 1.33, но для ясности верхняя часть электромагнита (южный полюс) не изображена. Стрелка v показывает направление движения рамки. Ширина рамки обозначена буквой l . Размер a показывает, насколько глубоко рамка вдвинута в щель. Магнитное поле показано рядом стрелок

На рис. 1.34 для большей ясности рисунка верхняя часть электромагнита (южный полюс) не показана вовсе. На том же рисунке магнитное поле изображено рядом маленьких стрелок. Поле между полюсами направлено именно так, как показывают маленькие стрелки.

В пространстве между полюсами поле обладает постоянной индукцией. По мере удаления от полюсов поле очень быстро ослабляется. Можно даже спокойно считать, что за пределами щели поле отсутствует.

Вычислим магнитный поток Φ , охватываемый рамкой.

Для этого нужно умножить магнитную индукцию B на ту часть площади рамки, которая находится между полюсами. Если рамка имеет ширину l и выдвинута на глубину a (рис. 1.34), то площадь S , пронизываемая полем,

$$S = la.$$

Сцепленный с рамкой магнитный поток

$$\Phi = BS = Bla.$$

Чем глубже вдвинута рамка, тем больше поток.

Пусть рамка доходит до середины ширины полюса, как показано на рисунке. В таком случае сцепленный с нею поток изображается 16 линиями. Вдвинем рамку еще глубже, так, чтобы она доходила до $3/4$ ширины полюса. Тогда поток будет состоять уже из 24 линий. Когда рамка охватит весь полюс, поток увеличится до 32 линий.

Но чему равна скорость увеличения потока?

Она, конечно, зависит от той скорости, с какой рамка вдвигается в щель между полюсами.

Но можно и точнее определить скорость возрастания потока.

При движении рамки в формуле

$$\Phi = Bla$$

изменяется только размер a (глубина, на которую вдвинута рамка), значит, изменение потока $\Delta \Phi$ зависит от изменения именно этого размера a .

За промежуток времени Δt увеличение этого размера можно представить такой формулой:

$$\Delta a = v\Delta t,$$

где v – скорость, с которой движется рамка.

Но если мы знаем изменение размера a (т.е. Δa), то нетрудно подсчитать и соответствующее изменение потока ($\Delta \Phi$):

$$\Delta\Phi = Bl \Delta a = Blv \Delta t.$$

Таким образом, мы почти закончили вывод формулы для наведенной ЭДС. Нам нужно только определить скорость изменения потока ($\Delta\Phi/\Delta t$). Деля левую и правую части последнего равенства на Δt , находим

$$E = \Delta\Phi/\Delta t = Blv.$$

Это и есть формула для вычисления ЭДС, *наводимой в прямолинейном проводнике, движущемся в магнитном поле со скоростью v .*

Выведенная формула справедлива, когда: 1) проводник расположен под прямым углом к направлению магнитного поля и к направлению скорости; 2) скорость (v) тоже образует прямой угол с направлением поля.

Приведенные здесь выводы справедливы и в том случае, когда провод неподвижен, а движутся сами полюсы вместе с создаваемым ими магнитным полем.

Мы нашли формулу для движения рамки, а применили ее как формулу для ЭДС, наводимой в прямолинейном проводнике, движущемся поперек поля. Легко объяснить основания для этого: в боковых проводах, расположенных параллельно направлению скорости, никакой ЭДС не наводится. Вся ЭДС наводится в поперечном проводе длиной l , движущемся в магнитном поле. В самом деле, если этот поперечный провод выйдет за пределы поля, то при дальнейшем движении рамки сцепленный с ней поток достигнет наибольшего значения (32 линии) и не будет изменяться, конечно, только до тех пор, пока задняя сторона рамки не войдет в щель между полюсами. Значит, в боковых проводах (параллельных) никакой ЭДС не наводится, даже когда они движутся в магнитном поле.

Правило правой руки. Направление ЭДС, наводимой при движении провода, можно определить, пользуясь правилом правой руки (рис. 1.35): *если правая рука расположена так, что линии поля входят в ладонь, а отогнутый большой палец совпадает с направлением движения, то четыре вытянутых пальца показывают направление наводимой ЭДС.*

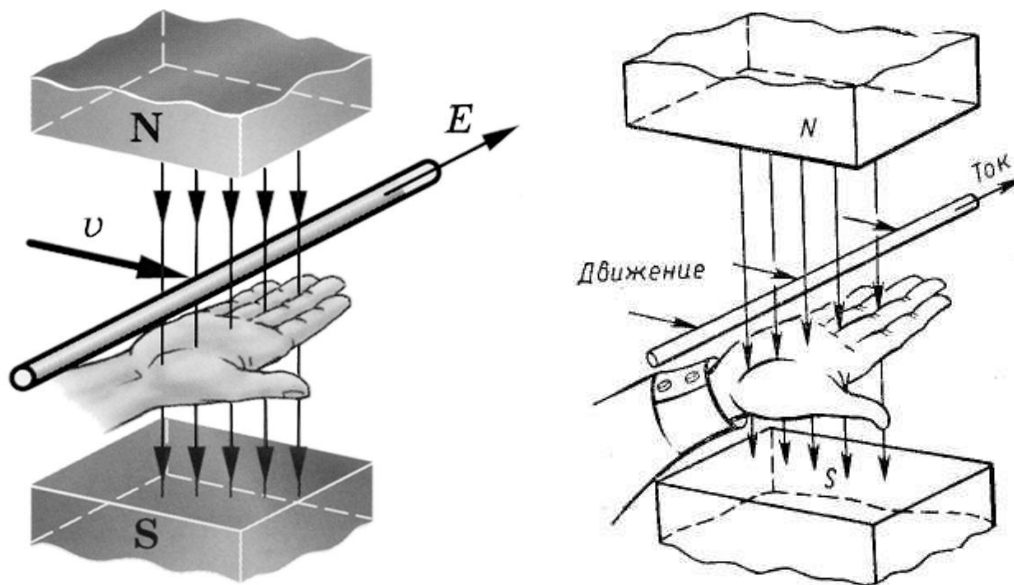


Рис. 1.35. Правило правой руки

Направление наводимой ЭДС – это то направление, в котором под ее действием в замкнутой цепи должен протекать ток.

Легко убедиться в том, что правило правой руки полностью согласуется с правилом Ленца. Предоставляем читателю самостоятельно убедиться в этом.

Пример. Между полюсами движется провод, как показано на рис. 1.33 и 1.34. Магнитная индукция $B = 1,2$ Тл. Длина провода $l = 80$ см. Скорость $v = 50$ м/с. Найти ЭДС, наводимую в проводе.

Решение. По формуле

$$E = Blv$$

находим

$$E = 1,2 \cdot 0,8 \cdot 50 = 48 \text{ В.}$$

Конечно, такая ЭДС наводится в проводе только в течение того промежутка времени, когда провод находится между полюсами.

Магнитные поля, скорости и размеры, подобные указанным в этом примере, можно встретить в электрических машинах.

1.14. ВЗАИМНАЯ ИНДУКЦИЯ

В первых опытах (§ 1.9 и 1.11) с наведением (или индукцией) ЭДС мы наблюдали наведение ЭДС в одной цепи под действием изменения тока в другой. Но первая цепь ничем по существу не отличалась от второй; поэтому, изменяя ток во второй цепи, мы, конечно, обнаружили бы наведение ЭДС в первой цепи.

Наведение ЭДС в одной цепи, вызванное изменением тока в другой, называют взаимной индукцией (наведением).

Наводимая ЭДС прямо пропорциональна скорости изменения тока.

Коэффициент пропорциональности между ЭДС, наводимой в первой цепи, и скоростью изменения тока во второй называют взаимной индуктивностью; его принято обозначать буквой M .

Единица индуктивности. Если скорость изменения тока выражать в амперах за секунду (А/с), а ЭДС – в вольтах, то коэффициент пропорциональности между этими величинами M оказывается выраженным в единицах, носящих наименование генри (Гн).

Если $M = 1$ Гн, то ЭДС, наводимая в одной цепи изменением тока в другой, численно равна скорости изменения тока. Представим скорость изменения тока отношением $\Delta i / \Delta t$, где Δi – приращение тока, происшедшее за промежуток времени Δt .

Тогда все только что сказанное можно записать такой формулой:

$$E = M \frac{\Delta i}{\Delta t}.$$

Явление взаимной индукции имеет очень большое значение в современной электротехнике.

На явлении взаимной индукции основана работа трансформаторов, о которых будет рассказано ниже.

Пример 1. Взаимная индуктивность между двумя катушками равна 2 миллигенри (мГн), т.е. двум тысячным генри. Ток в первой катушке изменяется со скоростью 800 А/с. Чему равна ЭДС, наводимая во второй катушке?

Решение. Электродвижущая сила E равна скорости изменения тока $\Delta i / \Delta t$, умноженной на коэффициент взаимной индукции M , или

$$E = M \frac{\Delta i}{\Delta t} = 0,002 \cdot 800 = 1,6 \text{ В.}$$

Пример 2. Если рядом с мощной линией передачи на протяжении целого километра проходила воздушная линия телефонной или телеграфной связи, то между ними существовала бы значительная индуктивная связь – магнитный поток, создаваемый током в линии передачи, пронизывал бы петлю проводов линии связи.

Для случая одного из подобных сближений двух линий взаимная индуктивность M была вычислена и оказалась равной $8 \cdot 10^{-5}$ Гн (восемью стотысячным генри).

При коротком замыкании в линии передачи скорость нарастания тока ($\Delta i / \Delta t$) может достигать до огромной величины $3 \cdot 10^6$ А/с (3 млн ампер за секунду).

Заметим, что такая скорость нарастания наблюдается при токе замыкания, достигающем наибольшего значения – порядка 10 000 А. При этом за одну тысячную долю секунды ($\Delta t = 0,001$ с) ток может возрасти на 3000 А ($\Delta i = 3000$ А).

Требуется найти, какой величины может достигнуть ЭДС в линии связи при коротком замыкании в электрической линии передачи.

Решение:

$$E = M (\Delta i / \Delta t) = 8 \cdot 10^{-5} \cdot 3 \cdot 10^6 = 240 \text{ В.}$$

Полученный ответ показывает со всей очевидностью необходимость отдаления линии связи от линии передачи или принятие других мер.

Отметим, что даже много меньшая наводка ЭДС мешает хорошей работе связи.

Электродвижущая сила взаимной индукции возникает потому, что с изменением тока связано изменение потока, как об этом уже говорилось (§ 1.10–1.13). Поэтому коэффициент взаимной индукции M можно рассматривать и как коэффициент пропорциональности между током одной цепи и потоком, сцепленным с другой цепью.

1.15. САМОИНДУКЦИЯ

Мы уже несколько раз рассматривали такой опыт.

В первой катушке изменяется ток. Изменение тока первой катушки сопровождается изменением потока, сцепленного со второй катушкой. Изменение этого потока создает ЭДС во второй катушке.

Пора задать вопрос: почему мы говорили только о второй катушке? Ведь, казалось бы, изменение первого тока должно вызывать изменение потока не только во второй катушке, а и в первой (и даже прежде всего в первой). Не должна ли наводиться (индуктироваться) ЭДС и в самой той обмотке, в которой изменяется ток?

Да, конечно, во всякой цепи при изменении в ней тока возникает ЭДС, вызванная изменением магнитного потока, сопровождающим изменение тока.

Когда изменение тока наводит ЭДС в той самой цепи, в которой ток изменяется, тогда говорят о собственной индукции или о самоиндукции (т.е. о самонаведении).

В тех случаях, когда с протеканием тока связан большой магнитный поток (например, многовитковая катушка со стальным сердечником), явление самоиндукции выступает очень отчетливо.

Вероятно, каждому приходилось наблюдать большую искру (или дугу), сопровождающую отключение катушки со стальным сердечником (например, отключение обмотки электромагнита или обмотки возбуждения электрических машин постоянного тока).

Откуда возникает большое напряжение, способное зажигать эту дугу между расходящимися контактами рубильника? Это напряжение создается ЭДС самоиндукции: при выключении рубильника ток начинает быстро уменьшаться; уменьшение тока сопровождается уменьшением магнитного потока, а быстрое изменение потока способно создавать большую ЭДС.

Собственная индуктивность. Электродвижущая сила самоиндукции E пропорциональна скорости изменения тока ($\Delta i / \Delta t$); коэффициент (множитель) пропорциональности между скоростью изменения тока и ЭДС, наводимой током в своей собственной цепи, называется собственной индуктивностью цепи.

Этот коэффициент обозначают буквой L (эль), он выражается в генри, если единицами для остальных величин служат вольт, ампер и секунда.

Сказанное здесь выражается такой математической формулой:

$$E = L \frac{\Delta i}{\Delta t}.$$

Собственная индуктивность цепи обозначается на схеме подобием катушки (рис. 1.36).

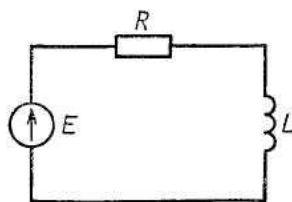


Рис. 1.36. Принятое обозначение собственной индуктивности электрической цепи L

Пример. Собственная индуктивность многовитковой катушки со стальным сердечником составляет

$$L = 20 \text{ Гн.}$$

Через катушку протекает ток 10 А. Спрашивается, какая ЭДС самоиндукции возникает в катушке, если цепь разрывается и ток равномерно спадает до нуля за одну десятую долю секунды?

Решение. В рассматриваемом случае $\Delta i = 10 \text{ A}$, $\Delta t = 0,1 \text{ с}$, значит, $\Delta i / \Delta t = 100 \text{ A/с}$.

Наводимая ЭДС самоиндукции

$$E = L \frac{\Delta i}{\Delta t} = 20 \cdot 100 = 2000 \text{ В}.$$

Как видно, эта ЭДС очень велика несмотря на постепенность выключения.

Направление ЭДС самоиндукции. Электродвижущая сила самоиндукции в соответствии с правилом Ленца всегда направлена так, чтобы препятствовать происходящему изменению тока.

Если ток нарастает, ЭДС самоиндукции стремится противодействовать току; если ток убывает, ЭДС самоиндукции стремится поддерживать ток в цепи.

Вопросы для самоконтроля

1. Может ли существовать электрическое поле в металлическом проводнике?
2. Какие заряды перемещаются в металле в процессе электростатической индукции?
3. Сохранится ли поле отдельных зарядов внутри металла, если убрать внешнее поле?
4. Можно ли, пользуясь графиком постоянного тока, определить, какое количество электричества прошло через проводник за данное время?
5. Будет ли проходить в цепи постоянный ток, если вместо источника ЭДС включить заряженный конденсатор?
6. Какое поле возникает вокруг движущихся электрических зарядов?
7. Будет ли наводиться ЭДС индукции в проводнике, если он неподвижен, а магнитное поле перемещается относительно этого проводника?
8. Как изменяется ЭДС самоиндукции при подключении катушки к источнику постоянного тока?

ГЛАВА 2

ТРАНСФОРМАТОРЫ

2.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

2.1.1. Общие сведения

В конструкцию многих электротехнических устройств (дросселей, электрические машины переменного тока, трансформаторы и т.д.) входят магнитные цепи с переменной магнитодвижущей силой. В рассматриваемых магнитных цепях переменный магнитный поток создается обмоткой магнитопровода, обтекаемой переменным током. Конструкция магнитной цепи с переменной магнитодвижущей силой определяется ее функциональным назначением. Для понимания особенностей электромагнитных процессов, протекающих в магнитных цепях с переменной магнитодвижущей силой, целесообразно рассмотреть трансформатор, который является наиболее характерным представителем магнитных цепей с переменной магнитодвижущей силой. При этом электромагнитные процессы в нем обладают наибольшей общностью проявления. Изучение основ теории трансформатора важно не только само по себе, но и является той базой, на основе которой изучаются асинхронные и синхронные машины, широко применяемые в энергетике и электрооборудовании предприятий, хозяйств и учреждений.

2.1.2. Методические указания

Для лучшего понимания теории работы трансформаторов необходимо повторить основные законы электротехники (Кирхгофа, электромагнитной индукции, полного тока), явления само- и взаимной индукции. Кроме того, следует обратить внимание на материал, посвященный катушке с ферромагнитным сердечником.

При изучении теории важно понять физику процессов в нагруженном трансформаторе и, в частности, что при неизменном первичном напряжении магнитный поток трансформатора практически не зависит от нагрузки трансформатора. Магнитодвижущая сила вторичной обмотки действует против магнитодвижущей силы первичной обмотки, т.е. стремится размагнитить трансформатор, и магнитный поток есть результат действия обеих этих магнитодвижущих сил. Все изменения режима вторичной цепи вызывают изменения режима в первичной цепи, а физика работы трансформатора описывается тремя уравнениями: электрического состояния первичной и вторичной цепей и магнитодвижущих сил.

Для технической грамотной эксплуатации трансформатора необходимо знать и использовать его номинальные данные, внешние характеристики, группы соединений.

2.2. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

Трансформатором называется статическое (т.е. без движущихся частей) электромагнитное устройство, предназначенное чаще всего для преобразования одного переменного напряжения в другое или другие напряжения той же частоты.

Простейший трансформатор состоит из замкнутого магнитопровода (сердечник), выполненного из ферромагнитного материала и двух обмоток, расположенных на стержнях магнитопровода (рис. 2.1. а).

Обмотка трансформатора, подключенная к источнику переменного тока Г, называется первичной. Соответственно первичными именуется все величины, относящиеся к этой обмотке, число витков, напряжение, ток и т.д. Буквенные обозначения их снабжаются индексом 1, например, w_1 , u_1 , i_1 . Обмотка, к которой подключается приемник (потребитель электроэнергии) П, называется **вторичной**. Относящиеся к ней величины называются вторичными и их буквенные обозначения снабжаются индексом 2, например w_2 , u_2 , i_2 . Условное изображение трансформатора в электрических схемах показано на рис. 2.1, б.

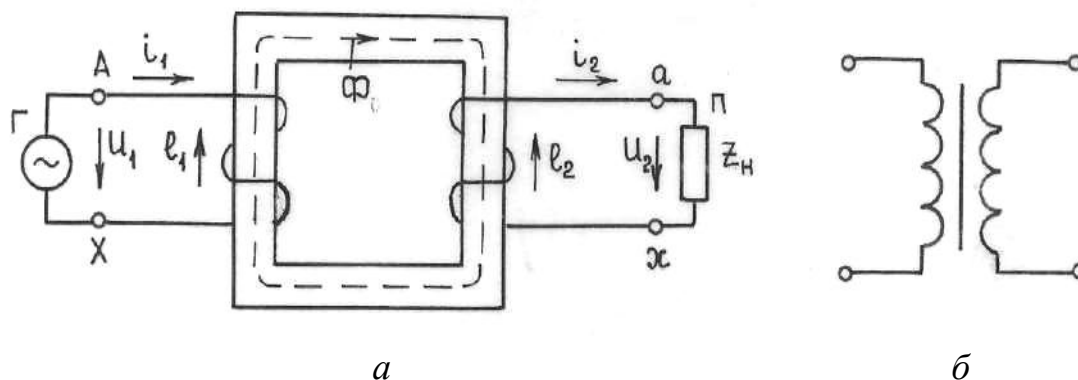


Рис. 2.1

Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции. Под действием переменного напряжения u_1 , по виткам первичной обмотки протекает переменный ток i_1 , создающий переменную магнито-движущую силу $w_1 u_1$, которая, в свою очередь, создает переменный основной магнитный поток Φ , замыкающийся по стальному магнитопроводу. Применение магнитопровода с большой магнитной проводимостью способствует увеличению магнитного потока и усилению электромагнитной

связи между обмотками. Замыкаясь, магнитный поток Φ оказывается сцепленным как с первичной, так и со вторичной обмотками.

При синусоидальном первичном напряжении магнитный поток также будет синусоидальным: $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$. Магнитный поток индуцирует в первичной обмотке ЭДС **самоиндукции**, пропорциональную числу витков обмотки и скорости изменения магнитного потока;

$$\ell_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt} = -\omega w_1 \Phi_m \cos \omega t = E_{1m} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}), \quad (2.1)$$

где $E_{1m} = \omega w_1 \Phi_m$ – амплитуда первичной ЭДС.

Как видно из формулы (2.1), ЭДС первичной обмотки отстает по фазе от магнитного потока на угол $\pi/2$.

Синусоидальный магнитный поток, сцепленный со вторичной обмоткой, индуцирует в ней ЭДС **взаимоиндукции**

$$\ell_2 = -w_{21} \frac{d\Phi}{dt} = -\omega w_2 \Phi_m \cos \omega t = E_{21m} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}), \quad (2.2)$$

где $E_{2m} = \omega w_2 \Phi_m$ – амплитуда вторичной ЭДС.

Сравнивая выражение (2.1.) с (2.2), видим, что вторичная ЭДС совпадает по фазе с первичной ЭДС, т.е. также отстает по фазе от магнитного потока на угол $\pi/2$. Это и следовало ожидать, так как обе ЭДС индуцируются одним и тем же магнитным потоком.

Действующие значения первичной и вторичной ЭДС:

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega w_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w_1 \Phi_m = 4,44 f w_1 \Phi_m, \quad (2.3)$$

$$E_2 = \frac{E_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega w_2 \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w_2 \Phi_m = 4,44 f w_2 \Phi_m.$$

Так как частота ЭДС одинакова и индуцируется одним и тем же магнитным потоком, то первичная ЭДС отличается от вторичной только в том случае, если число витков w_1 и w_2 обмоток неодинаково. Чем больше витков обмотки, тем больше ЭДС в ней индуцируется.

Отношение первичной ЭДС к вторичной называется **коэффициентом трансформации трансформатора**.

$$k = E_1/E_2 = w_1/w_2 \quad (2.4)$$

и равно отношению числа витков обмотки. Коэффициент трансформации может быть как больше, так и меньше единицы.

Роль ЭДС e_1 и e_2 в обмотках трансформатора различна. ЭДС e_1 первичной обмотки уравнивает напряжение источника u_1 , уменьшает ток i_1 . ЭДС e_2 вторичной обмотки создает ток i_2 (если к выводам вторичной обмотки подключена нагрузка z_H). Вторичная обмотка становится источником питания нагрузки с напряжением u_2 на ее зажимах. При заданном напряжении U_1 (или E_1) можно получить любое значение ЭДС E_2 (или U_2), подобрав соответствующим образом числа витков обмоток:

$$E_2 = E_1 w_2 / w_1. \quad (2.5)$$

Если необходимо повысить напряжение источника питания, то число витков вторичной обмотки делают больше числа витков первичной обмотки ($w_2 > w_1$). Такой трансформатор называется повышающим. Если это напряжение надо понизить, то $w_2 < w_1$. В этом случае трансформатор будет понижающим. Если требуется несколько различных значений вторичного напряжения, то на тот же магнитопровод наматывают несколько вторичных обмоток с различным числом витков.

Таким образом, первичная обмотка потребляет электроэнергию от источника и посредством магнитного поля передает ее вторичной обмотке. Обмотки электрически не связаны между собой. Трансформатор позволяет передавать от источника потребителям одну и ту же мощность при различных напряжениях и токах:

$$S = U_1 I_1 = U_2 I_2 = \text{const}. \quad (2.6)$$

Трансформатор – это устройство переменного тока. Если же его первичную обмотку подключить к источнику постоянного тока, то магнитный поток в магнитопроводе также будет постоянным как по величине, так и по направлению ($d\Phi/dt = 0$), поэтому в обмотках трансформатора не будет наводиться ЭДС. Кроме того, отсутствие в первичной обмотке противоЭДС e_1 , направленной всегда против напряжения сети u_1 , обуславливает протекание недопустимо большого тока i_1 в первичной обмотке, что вызывает тепловое разрушение трансформатора.

Трансформатор, имеющий первичную и одну вторичную обмотки, называется двухобмоточным. Если трансформатор имеет несколько вторичных обмоток, рассчитанных на различные напряжения, то он называется многообмоточным.

По роду трансформируемого переменного тока трансформаторы подразделяются на однофазные, трехфазные и многофазные.

Область применения трансформаторов очень широка, чем и объясняется их конструктивное разнообразие и большой диапазон мощностей (от долей вольт-ампер до сотен мегавольт-ампер). В зависимости от назначения трансформаторы подразделяются на силовые, измерительные и специальные. Силовые трансформаторы применяются для передачи и распределения электрической энергии.

Измерительные трансформаторы используются для включения электроизмерительных приборов в электрические цепи большой мощности и высокого напряжения.

Специальные трансформаторы в каждом отдельном случае имеют свое назначение, к ним относятся, например, пиковые, импульсные, стабилизирующие трансформаторы и др.

Основными частями наиболее распространенных силовых трансформаторов являются сердечник и обмотки.

Сердечник трансформатора представляет собой замкнутый магнитопровод, служащий для проведения магнитного потока через первичную и вторичную обмотки. Для уменьшения потерь мощности на гистерезис и вихревые токи сердечник изготавливают из отдельных изолированных друг от друга бумажной, лаковой изоляцией или окалиной пластин электротехнической стали.

В зависимости от конфигурации сердечника трансформаторы подразделяют на стержневые (рис. 2.2, а), броневые (рис. 2.2, б) и тороидальные (рис. 2.2, в).

Трансформаторы большой и средней мощности обычно изготавливают стержневыми, так как они проще по конструкции, имеют лучшие условия для охлаждения обмоток. Сердечник таких трансформаторов набирается из отдельных пластин прямоугольной формы.

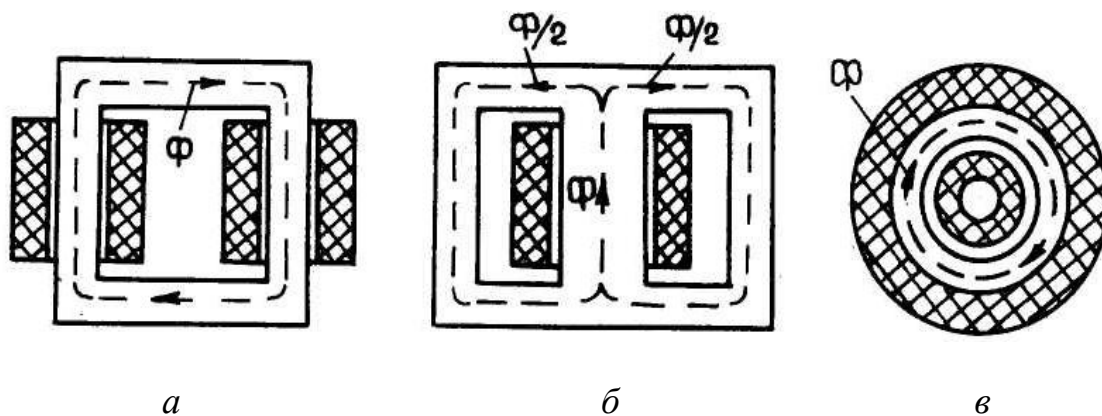


Рис. 2.2

Трансформаторы большой и средней мощности обычно изготавливают стержневыми, так как они проще по конструкции, имеют лучшие условия для охлаждения обмоток. Сердечник таких трансформаторов набирается из отдельных пластин прямоугольной формы (рис. 2.3, *а*). Для уменьшения магнитного сопротивления их набирают так, чтобы стыки пластин в двух соседних слоях были в разных местах. Трансформаторы малой мощности могут иметь сердечник, собранный из пластин, выполненных в форме буквы Ш, и прямоугольных полос (рис. 2.3, *б*).

Сердечники трансформаторов малой мощности можно навивать из узкой ленты электротехнической стали. Такой сердечник называется ленточным (рис. 2.4, *б*). Это позволяет уменьшить воздушные зазоры в сердечнике и снизить магнитное сопротивление, а следовательно, и ток холостого хода. В большинстве случаев ленточные сердечники разрезают (рис. 2.4, *а*), чтобы на них легче было посадить заранее намотанные обмотки. Для уменьшения зазора места разреза шлифуют и затем половинки сердечников соединяют.

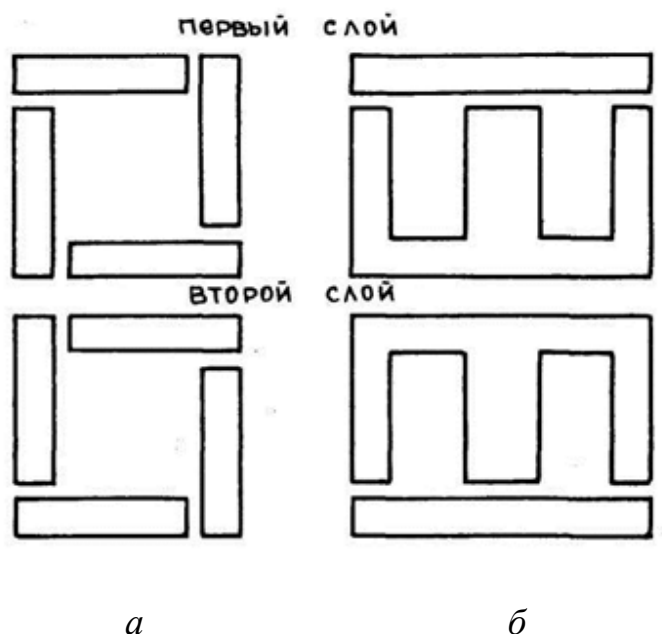


Рис. 2.3

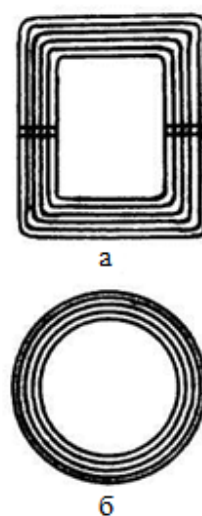


Рис. 2.4

В трансформаторах, работающих при высокой частоте, сердечники изготавливают из порошковых ферромагнитных материалов (ферритов).

Обмотки трансформаторов обычно выполняют из изолированного медного провода круглого или прямоугольного сечения. Обмотки изолируют как от сердечника, так и друг от друга. В качестве изоляции применяют электротехнический картон, специальную бумагу или ткань, пропитанную лаком.

По способу охлаждения трансформаторы делятся на сухие и масляные. Сухие трансформаторы имеют естественное воздушное охлаждение, которое может быть использовано только для трансформаторов малой мощности. При увеличении мощности увеличиваются интенсивность тепловыделения и нагрев обмоток. Чтобы обеспечить допустимую для изоляции температуру нагрева, применяют масляное охлаждение. Для этого трансформатор помещают в специальный кожух, заполненный трансформаторным маслом. Масло является одновременно и изолирующей и охлаждающей средой.

2.3. РЕЖИМ ХОЛОСТОГО ХОДА ТРАНСФОРМАТОРА

Режимом холостого хода трансформатора называется такой режим его работы, когда первичная обмотка включена на номинальное напряжение сети, а вторичная обмотка разомкнута, т.е. нагрузка отсутствует.

В режиме холостого хода к первичной обмотке подведено номинальное напряжение U_t , по ней протекает **ток холостого хода** i_{1x} , который создает в магнитопроводе переменный магнитный поток первичной обмотки Φ_1 (рис. 2.5). Преобладающая часть этого потока замыкается по замкнутому сердечнику, сцепляется одновременно с обеими обмотками и называется **основным потоком** Φ_0 . Другая часть (незначительная по величине) замыкается по путям рассеивания, сцепляется только с первичной обмоткой и называется потоком рассеивания $\Phi_{\delta 1}$ первичной обмотки.

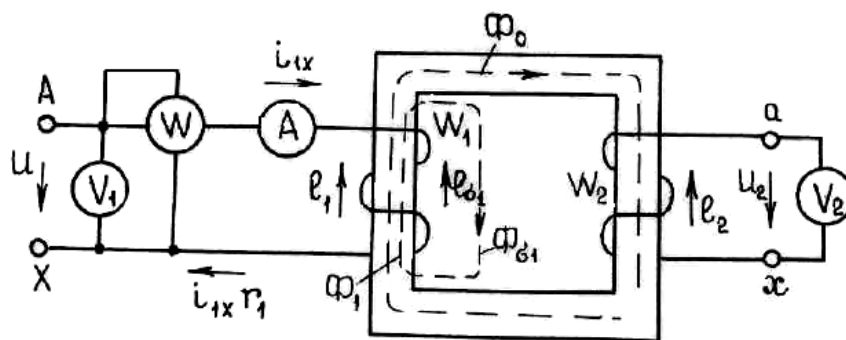


Рис. 2.5

Переменный во времени основной поток Φ_0 , пронизывающий одновременно обе обмотки, наводит в первичной обмотке ЭДС e_1 и во вторичной – e_2 . Поток рассеивания первичной обмотки $\Phi_{\delta 1}$, изменяющийся также во времени, наводит в первичной обмотке ЭДС рассеивания $e_{\delta 1}$. Так как вторичная обмотка разомкнута, ток по ней не протекает.

При синусоидальном напряжении u_1 основной поток Φ_0 и создаваемые ЭДС e_1 и e_2 также будут изменяться по синусоидальному закону (п. 2.2). Из полученных формул (2.1) и (2.2) следует, что ЭДС e_1 и e_2 отстают по фазе от основного потока на угол $\pi/2$, а действующие значения этих ЭДС определяются формулами (2.3).

Поток рассеяния первичной обмотки $\Phi_{\delta 1}$, изменяющийся во времени также по синусоидальному закону, наводит в первичной обмотке ЭДС $e_{\delta 1}$ рассеяния $e_{\delta 1}$, которая (по аналогии с e_1 и Φ_0) отстает по фазе от потока $\Phi_{\delta 1}$ на угол $\pi/2$. Действующее значение ЭДС рассеяния $e_{\delta 1}$ определяется формулой:

$$E_{\delta 1} = 2\pi f L_{\delta 1} I_{1X} = x_{\delta 1} I_{1X} \quad (2.7)$$

где $x_{\delta 1} = 2\pi f L_{\delta 1}$ – индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки трансформатора; $L_{\delta 1}$ – индуктивность рассеяния первичной обмотки трансформатора.

При этом комплекс действующего значения ЭДС $e_{\delta 1}$ равен

$$\underline{E} = -j \underline{I_{1X}} x_{\delta 1}$$

Следует иметь в виду, что $x_{\delta 1}$ и $L_{\delta 1}$ – величины фиктивные, введенные для учета потока рассеяния $\Phi_{\delta 1}$.

Поток рассеяния $\Phi_{\delta 1}$ и ток холостого хода I_{1X} совпадают по фазе, так как поток рассеяния $\Phi_{\delta 1}$ создается током холостого хода I_{1X} и замыкается по воздуху.

Трансформатор, работающий в режиме холостого хода, фактически является катушкой индуктивности с ферромагнитным сердечником, включенной в цепь переменного тока. Для такой цепи ток холостого хода I_{1X} имеет две составляющие (рис. 2.6): реактивную намагничивающую составляющую $I_{1X\mu}$, создающую основной магнитный поток Φ_0 ($I_{1X\mu}$ и Φ_0 совпадают по фазе), и активную составляющую I_{1Xa} , которая обусловливается потерями мощности в сердечнике трансформатора на гистерезис и вихревые токи (I_{1Xa} опережает Φ_0 на $\pi/2$).

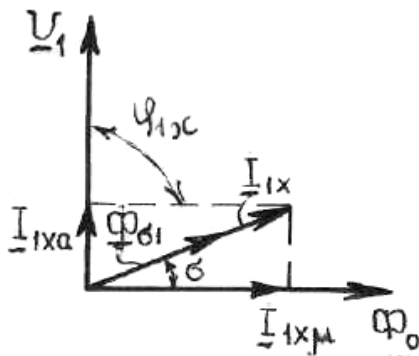


Рис. 2.6

Ток холостого хода трансформатора выражается через составляющие следующим образом:

$$I_{1X} = \sqrt{I_{1Xa}^2 + I_{1X\mu}^2}.$$

Форма тока холостого хода трансформатора отличается от синусоиды, но для удобства его заменяют эквивалентным синусоидальным (по действующему значению током, опережающим основной магнитный поток на угол δ , называемый углом потерь в стали сердечника. При выполнении сердечника из специальной электротехнической стали этот угол равен $5-10^\circ$.

Таким образом, в режиме холостого хода в первичной обмотке трансформатора действуют приложенное напряжение u , ЭДС самоиндукции e_1 , ЭДС рассеяния $e_{\delta 1}$ и активное падение напряжения $i_{1X} r_1$, где r_1 – активное сопротивление первичной обмотки трансформатора (рис. 2.5).

Согласно второму закону Кирхгофа, уравнение ЭДС и напряжения первичной обмотки имеет вид

$$u_1 = -e_1 - e_{\delta 1} = i_{1X} r_1 \quad (2.8)$$

В режиме холостого хода во вторичной обмотке тока нет и в ней действуют ЭДС взаимной индукции e_2 и напряжение на выходных режимах u_2 .

Согласно второму закону Кирхгофа, уравнение ЭДС и напряжений вторичной обмотки имеет вид

$$u_2 = e_2. \quad (2.9)$$

Переходя от мгновенных значений ЭДС и напряжений к комплексам их действующих значений, можно записать уравнения электрического состояния обмоток при холостом ходе трансформатора:

$$U_{-1} = -E_{-1} + j I_{-1X} x_{\delta 1} + I_{-1X} r_1 = -E_{-1} + (r_1 + j x_{\delta 1}) I_{-1X} = -E_{-1} + I_{-1X} z \quad (2.10)$$

$$U_{-2} = E_{-2}, \quad (2.11)$$

где $z_{-1} = r_1 + j x_{\delta 1}$ – полное сопротивление первичной обмотки.

Ток холостого хода трансформатора I_{-1X} , а также сопротивления r_1 и $x_{\delta 1}$ его обмоток относительно малы. Так, например, в силовых трансформаторах малой мощности ток холостого хода не превышает 10 % от номинального тока первичной обмотки, а у трансформаторов большой мощности он уменьшается до 2,5–3%. Поэтому очень малы падения напряжений $I_{-1X} r_1$ и $I_{-1X} x_{\delta 1}$ – доли процента от номинального значения напряжения U_{-1} . Ими можно пренебречь и записать уравнения в виде

$$U_{-1} \approx -E_{-1} \quad (2.12)$$

$$U_{-2} \approx E_{-2}$$

Поэтому в режиме холостого хода по измеренным напряжениям U_{-1} и U_{-2} можно достаточно точно определить значение коэффициента трансформации

$$k = \frac{W_1}{W_2} = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_2}. \quad (2.13)$$

Из векторной диаграммы (рис. 2.6) видно, что небольшой ток холостого хода трансформатора I_{-1X} сдвинут относительно подводимого напряжения U_{-1} на угол ϕ_{1X} , близкий к 90° . Хотя ток холостого хода невелик, его большая реактивная составляющая $I_{-1X\mu}$ снижает коэффициент

мощности трансформатора при холостом ходе ($\cos\varphi_{1X} = 0,1-0,2$). Коэффициент мощности трансформатора в режиме холостого хода определяется по формуле

$$\cos\varphi_{1X} = \frac{P_X}{U_1 I_{1X}} \quad (2.14)$$

где P_X – мощность, потребляемая трансформатором в режиме холостого хода.

Так как при холостом ходе ток во вторичной обмотке I_2 и отдаваемая мощность P_2 равны нулю, то мощность P_X целиком расходуется на покрытие потерь:

$$P_X = P_{M1} + P_C.$$

Таким образом, для определения мощности потерь в стали трансформатора используется режим холостого хода. Ваттметр, включенный в цепи первичной обмотки, зафиксирует, в основном, только мощность потерь в стали сердечника.

Опыт холостого хода является одним из двух обязательных контрольных опытов при испытании трансформатора и проводится по схеме (рис. 2.5). Комплект измерительных приборов, включенных в схему, дает возможность измерить напряжения U_1 и U_2 , ток I_{1X} и мощность P_X .

При изменении входного напряжения U_1 от 0 до $1,1 \cdot U_{1\text{ном}}$ ($U_{1\text{ном}}$ – номинальное первичное напряжение) можно снять характеристики холостого хода: $I_{1X} = f(U_1)$; и $P_X = f(U_1)$ и $\cos\varphi_{1X} = f(U_1)$ (рис. 2.7).

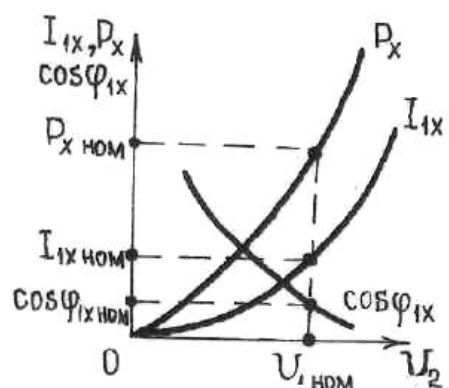


Рис. 2.7

Построенные характеристики позволяют определить номинальное значение тока холостого хода $I_{1XНОМ}$, номинальные потери мощности холостого хода (потери в стали) $P_{I_{XНОМ}}$ и номинальное значение коэффициента мощности $\cos\varphi_{1XНОМ}$, соответствующие номинальному значению напряжения $U_{1НОМ}$. Эти важнейшие параметры всегда указывают в паспортных данных трансформатора. По значению этих параметров можно судить о качестве стали сердечника и качестве его сборки.

Кроме того, из опыта холостого хода можно определить коэффициент трансформации трансформатора $k = U_1/U_2$.

2.4. РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРА ПОД НАГРУЗКОЙ

При разомкнутой вторичной обмотке по первичной обмотке протекает ток холостого хода I_{1X} . Этот ток создает магнитодвижущую силу холостого хода $I_{1X}w_1$, под действием которой в сердечнике возникает магнитный поток холостого хода Φ_0 (рис. 2.5). Изменяющийся магнитный поток пронизывает обмотки и согласно закону электромагнитной индукции (ЭМИ) в обмотках наводятся ЭДС E_1 и E_2 . Так как ток холостого хода I_{1X} и поток рассеяния $\Phi_{\delta 1}$ малы, то в уравнении электрического состояния первичной обмотки (2.10) величинами $I_{1X}r_1$ и $jI_{1X}x_{\delta 1}$ можно пренебречь. В этом случае уравнение электрического состояния первичной обмотки будет иметь вид

$$\underline{U_1} + \underline{E_1} = 0. \quad (2.16)$$

Рассмотрим электромагнитные процессы в трансформаторе под нагрузкой при характерных условиях работы, когда $\underline{U_1} = const$.

Если к зажимам $a - x$ вторичной обмотки трансформатора (рис. 2.8) присоединить нагрузку с сопротивлением Z_H , то под действием ЭДС E_2 по вторичной обмотке потечет ток I_2 . Этот ток создает магнитодвижущую силу $I_2 w_2$ вторичной обмотки, под действием которой в сердечнике возникает магнитный поток Φ_2 . Так как ЭДС вторичной обмотки E_2 представляет собой ЭДС взаимоиндукции, то ток I_2 ,

созданный этой ЭДС, в соответствии с правилом Ленца, оказывает размагничивающее влияние на сердечник трансформатора, т.е. ток I_2 создает поток Φ_2 , направленный встречно основному потоку Φ_1 первичной обмотки.

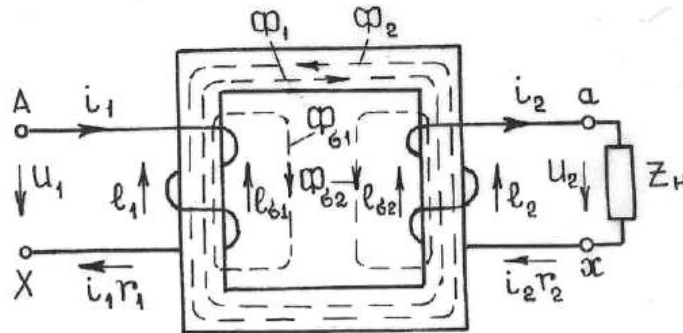


Рис. 2.8

Суммарный магнитный поток $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$ будет стремиться уменьшиться по сравнению с основным магнитным потоком первичной обмотки в режиме холостого хода Φ_0 . Вследствие этого ЭДС первичной обмотки E_2 , индуцируемая суммарным потоком, также уменьшится.

Условие (2.16) нарушается. Теперь $U_1 + E_1 = \Delta U_1 \neq 0$. Под действием ΔU_1

в замкнутом контуре первичной обмотки потечет компенсационный ток I_{1K} , который создает магнитодвижущую силу $I_{1K}w_1$, равную по значению и направленную противоположно магнитодвижущей силе $I_2 w_2$. Таким

образом, магнитодвижущая сила $I_{1K} w_1$ компенсирует магнитодвижущую

силу $I_2 w_2$ и восстанавливает прежнее значение магнитного потока

в сердечнике.

Чем больше I_2 , тем больше I_{1K} ток первичной обмотки

$I_1 = I_0 + I_{1K}$, а также потребляемая ею мощность $S_1 = U_1 I_1$. Так

осуществляется передача электрической мощности от первичной обмотки ко вторичной, не связанной с ней электрически.

Передачу мощности осуществляет магнитный поток.

Условно-логическая схема, иллюстрирующая физические процессы и взаимную связь отдельных величин, представлена на рис. 2.9.

Таким образом, в режиме нагрузки по первичной обмотке протекает ток I_1 , а по вторичной обмотке – ток I_2 . Каждый из токов создает свою магнитодвижущую силу $I_1 w_1, I_2 w_2$ соответственно. Как было показано, создаваемые этими магнитодвижущими силами магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 , замыкаясь по сердечнику, складываются и при любом значении токов I_1 и I_2 их сумма остается постоянной по значению и равна потоку Φ_0 .

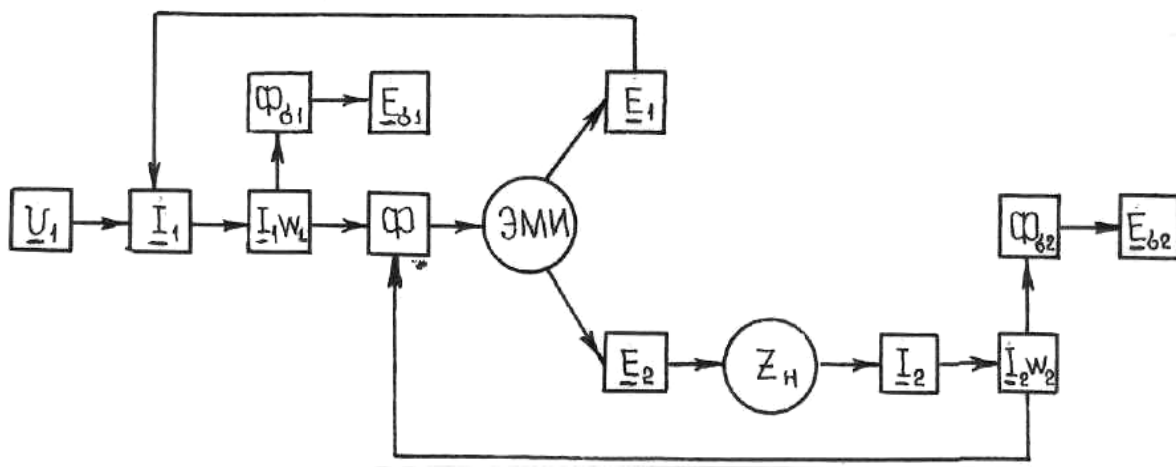


Рис. 2.9

Следовательно, результирующий поток при нагрузке равен потоку при холостом ходе: $\Phi_1 + \Phi_2 = \Phi_0$. **Неизменность магнитного потока при переходе от режима холостого хода к режиму нагрузки является важнейшим свойством трансформатора.** Магнитный поток Φ_0 создается магнитодвижущей силой холостого хода $I_{1X} w_1$. Следовательно, **сумма**

магнитодвижущих сил первичной и вторичной обмоток всегда остается постоянной, равной $I_{1X} w_1$. В этом основное свойство трансформатора. С учетом этого можно записать **уравнение равновесия магнитодвижущих** трансформатора

$$\underline{I_{1X} w_1} = \underline{I_1 w_1} + \underline{I_2 w_2}. \quad (2.17)$$

Разделив все члены уравнения (2.17) на w_1 , получим:

$$\underline{I_{1X}} = \underline{I_1} + \underline{I_2} w_2 / w_1 \quad (2.18)$$

или

$$\underline{I_{1X}} = \underline{I_1} + \underline{I_2}' , \quad (2.19)$$

где $\underline{I_2}' = \underline{I_2} w_2 / w_1 = \underline{I_2} / k$ – ток вторичной обмотки, приведенный к первичной.

Из формулы (2.19) получаем уравнение для первичного тока

$$\underline{I_1} = \underline{I_{1X}} - \underline{I_2}' = \underline{I_{1X}} - \underline{I_2} w_2 / w_1, \quad (2.20)$$

которое является **уравнением токов трансформатора**.

Из этого уравнения следует, что ток первичной обмотки имеет две составляющие: намагничивающую и нагрузочную. Первая равна току холостого хода $\underline{I_{1X}}$, а вторую $\underline{I_2}'$ называют **приведенным током нагрузки**.

Как указывалось, ток холостого хода составляет единицы процентов от номинального первичного тока, поэтому иногда $\underline{I_{1X}}$ пренебрегают и считают, что $\underline{I_1} = -\underline{I_2}'$ или $\underline{I_1} = \underline{I_2}'$. Тогда из выражения (2.20) можно получить соотношение токов трансформатора

$$\frac{\underline{I_1}}{\underline{I_2}} = \frac{w_2}{w_1} = \frac{1}{k}. \quad (2.21)$$

Из формулы (2.21) следует, что токи в обмотках трансформатора обратно пропорциональны числам витков этих обмоток: ток больше в обмотке с меньшим числом витков и меньше в обмотке с большим числом витков. Поэтому обмотки низкого напряжения выполняют проводом большего сечения, чем обмотки высокого напряжения, имеющие большее число витков.

Магнитодвижущие силы первичной и вторичной обмоток кроме основных магнитных потоков Φ_1 и Φ_2 , замыкающихся по стальному сердечнику, создают магнитные потоки рассеяния $\Phi_{\delta 1}$ и $\Phi_{\delta 2}$ (рис. 2.8). Эти потоки сцеплены только с одной обмоткой и значительную часть пути замыкаются по воздуху. За счет потоков рассеяния в обмотках наводится ЭДС рассеяния $e_{\delta 1}$ и $e_{\delta 2}$. При этом комплексы действующих значений ЭДС рассеяния равны: $\underline{E}_{-\delta 1} = -j \underline{I}_{-1} x_{\delta 1}$ и $\underline{E}_{-\delta 2} = -j \underline{I}_{-2} x_{\delta 2}$, где $x_{\delta 1} = 2\pi f L_{\delta 1}$ и $x_{\delta 2} = 2\pi f L_{\delta 2}$ – индуктивные сопротивления рассеяния обмоток.

Таким образом, в режиме нагрузки в первичной обмотке трансформатора действуют приложенное напряжение u_1 , ЭДС самоиндукции e_1 , ЭДС рассеяния $e_{\delta 1}$ и активное падение напряжения в активном сопротивлении первичной обмотки $i_1 r_1$. Согласно второму закону Кирхгофа, уравнение электрического состояния первичной обмотки в режиме нагрузки имеет вид

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 r_1 + j \underline{I}_1 x_{\delta 1} = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 \underline{z}_1, \quad (2.22)$$

где $\underline{z}_1 = r_1 + jx_{\delta 1}$ – полное сопротивление первичной обмотки трансформатора. Из этого уравнения следует, что подводимое к первичной обмотке напряжение $\underline{U}_1$ уравнивается основной ЭДС $\underline{E}_1$, а также активным и индуктивным падениями напряжения на этой обмотке. Во вторичной обмотке ток i_2 замкнутой цепи создается ЭДС взаимной индукции e_2 , которая в значительной части идет на создание напряжения на выводах вторичной обмотки $u_2 = i_2 z_n$. Оставшаяся часть ЭДС e_2 идет на компенсацию ЭДС рассеяния $e_{\delta 2}$ и активного падения напряжения в активном сопротивлении вторичной обмотки $i_2 r_2$. Согласно второму закону Кирхгофа уравнение электрического состояния вторичной обмотки в режиме нагрузки имеет вид

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - \underline{I}_2 r_2 - j \underline{I}_2 x_{\delta 2} = \underline{E}_2 - \underline{I}_2 \underline{z}_2, \quad (2.23)$$

где $\underline{z}_2 = r_2 + jx_{\delta 2}$ – полное сопротивление вторичной обмотки трансформатора.

Это уравнение подобно уравнению напряжения на зажимах источника электроэнергии.

Из (2.23) видно, что напряжение U_2 на зажимах вторичной обмотки трансформатора отличается от ЭДС E_2 на значение активного и индуктивного падений напряжения на вторичной обмотке.

Работа трансформатора под нагрузкой сопровождается увеличением потерь энергии в нем по сравнению с режимом холостого хода. Кроме потерь энергии при холостом ходе (P_X – мощность потерь в сердечнике), которые не зависят от токов в обмотках, возникают потери энергии в обмотках, пропорциональные квадрату тока в них. Мощность этих потерь $P_M = P_{M1} + P_{M2}$, где $P_{M1} = I_1^2 r_1$ – мощность потерь энергии в активном сопротивлении первичной обмотки, а $P_{M2} = I_2^2 r_2$ – мощность потерь энергии в активном сопротивлении вторичной обмотки, называют мощностью потерь в меди. Таким образом, в режиме нагрузки мощность потерь трансформатора складывается из мощности потерь в стали P_C и мощности потерь в меди P_M , т.е. $P_{\Pi} = P_C + P_M$.

Из анализа работы трансформатора под нагрузкой вытекают следующие выводы:

1. Со стороны зажимов первичной обмотки трансформатор является потребителем электроэнергии.
2. Со стороны зажимов вторичной обмотки трансформатор является источником электроэнергии.
3. Передача электроэнергии от первичной обмотки ко вторичной осуществляется магнитным потоком.
4. Выходная мощность трансформатора, за вычетом небольшой по величине мощности потерь, равна входной мощности.
5. При изменении режимов работы трансформатора магнитный поток в его сердечнике практически не изменяется по величине.

2.5. КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРА

Следует различать режим аварийного короткого замыкания трансформатора в эксплуатационных условиях и опыт короткого замыкания.

Аварийным коротким замыканием трансформатора называется такой режим его работы, когда напряжение первичной обмотки равно номинальному напряжению: $U_1 = U_{1ном}$, а вторичная обмотка замкнута

накоротко, т.е. сопротивление нагрузки равно нулю. Это аварийный режим работы, который, если не приняты специальные меры защиты, приводит к выходу трансформатора из строя вследствие резкого возрастания токов и напряжения обмоток.

Под **опытом короткого замыкания** трансформатора понимается такой режим, при котором его вторичная обмотка замкнута накоротко (рис. 2.10), а к первичной обмотке подведено пониженное напряжение $U_{1К}$ (примерно 5–10 % номинального первичного напряжения $U_{1НОМ}$). Его значение выбирают так, чтобы ток $I_{1К}$ в первичной обмотке был равен номинальному значению $I_{1НОМ}$ несмотря на короткое замыкание вторичной обмотки.

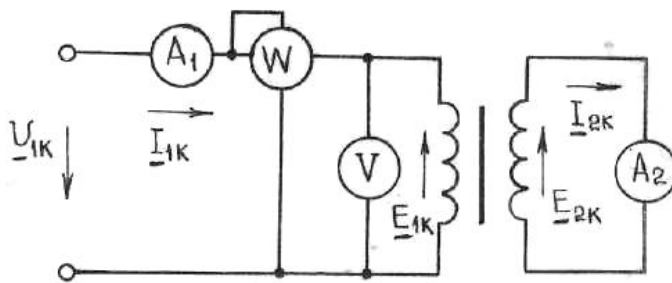


Рис. 2.10

При помощи комплекта измерительных приборов (рис. 2.10) посредством опыта определяются напряжение $U_{1К}$, ток $I_{1К}$ и мощность $P_{1К}$. Ток $I_{2К}$ при номинальном значении $I_{1К}$, также будет иметь номинальное значение.

ЭДС $E_{-2К}$ при этом опыте будет лишь покрывать внутреннее падение напряжения, т.е. $E_{-2К} = I_{-2К} Z_{-2К}$, а при номинальной нагрузке $E_{-2НОМ} = I_{-2НОМ} Z_{-2НОМ} + U_{-2НОМ}$ (см. 2.23), поэтому $E_{-2К}$, составляет лишь несколько процентов от $E_{-2НОМ}$. Малой ЭДС $E_{-2К}$ соответствует малый основной

магнитный поток (рис. 2.10). Потери энергии в сердечнике пропорциональны квадрату магнитного потока, поэтому при опыте короткого замыкания они незначительны. Но в обеих обмотках при этом опыте токи имеют номинальные значения, поэтому потери энергии в обмотках такие же, как и при номинальной нагрузке. Следовательно, мощность $P_{1К}$, получаемая трансформатором из сети при опыте короткого замыкания, затрачивается на потери энергии в проводах обмоток:

$$P_{-1K} = I_{1K}^2 r_1 + I_{2K}^2 r_2. \quad (2.24)$$

Таким образом, ваттметр, включенный в цепи первичной обмотки, в режиме короткого замыкания трансформатора зафиксирует в основном только мощность потерь в меди $P_{1K} \approx P_m$.

Вместе с тем по величине напряжения короткого замыкания определяется (в % к первичному номинальному напряжению) падение напряжения в трансформаторе при номинальной нагрузке:

$$U_K = \frac{U_{1K}}{U_{1НОМ}} 100 \%. \quad (2.25)$$

Это напряжение, являющееся важным параметром трансформатора, называется **напряжением короткого замыкания** и указывается в паспортных данных трансформатора. Согласно ГОСТу, напряжение короткого замыкания $U_K = 5,5\text{--}10,5 \%$.

2.6. ВНЕШНЯЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТРАНСФОРМАТОРА

Вместе с сетью, к которой подключена первичная обмотка, трансформатор является источником питания для приемников, подключенных ко вторичной обмотке. Поэтому трансформатор можно рассматривать как активный двухполюсник относительно выводов вторичной обмотки (рис. 2.8). Важнейшая характеристика активного двухполюсника – **внешняя вольтамперная характеристика**, представляющая собой зависимость напряжения на выходе U_2 от тока I_2 при $U_1 = \text{const}$.

У идеализированного трансформатора $U_{2ИД} = \frac{U_1}{k} = \text{const}$, т.е. напряжение $U_{2ИД}$ не зависит от нагрузки. Поэтому его внешняя характеристика идет параллельно оси I_2 , напряжение $U_{2ИД}$ равно напряжению холостого хода $U_{2Х}$ (рис. 2.11, прямая 1).

У реального трансформатора существует ЭДС от полей рассеяния и падения напряжений на активных сопротивлениях обмоток (2.22 и 2.23). При обычной активно-индуктивной нагрузке напряжение U_2 уменьшается с ростом тока I_2 и внешняя характеристика имеет вид наклонной кривой (рис. 2.11, кривая 2). Чем больше сопротивления r_1 и $x_{\delta 1}$, r_2 и $x_{\delta 2}$ (2.22 и 2.23), тем больше отличается напряжение U_2 от $U_{2ИД}$. Изменение вторичного

напряжения $\Delta U_2 = U_{2X} - U_2$ называют падением напряжения в трансформаторе. При увеличении нагрузки падение напряжения растет, а вторичное напряжение уменьшается. Это положение справедливо для нагрузки, носящей индуктивный характер. У силовых трансформаторов при номинальном токе $I_{2\text{НОМ}}$ отношение $\Delta U_2/U_{2X}$ имеет порядок 5–10 %. Трансформатор проектируют так, чтобы напряжение холостого хода U_{2X} было на 5 % больше номинального напряжения его приемников.

При емкостной нагрузке в определенном диапазоне значений тока I_2 напряжение U_2 несколько превышает напряжение U_{2X} (рис. 2.11, кривая 3).

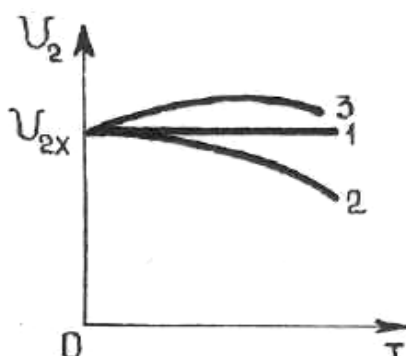


Рис. 2.11

Это обусловлено тем, что емкостная составляющая сопротивления нагрузки компенсирует индуктивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки, а емкостная (опережающая) составляющая тока во вторичной обмотке совпадает по фазе с намагничивающим током первичной обмотки, т.е. оказывает на сердечник трансформатора подмагничивающее действие.

2.7. КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

Разность между подводимой к трансформатору мощностью P_1 мощностью отдаваемой им в нагрузку P , представляет собой потери мощности в трансформаторе $P_{\Pi} = P_1 - P_2$. В энергетическом отношении трансформатор является весьма совершенным аппаратом и потери в трансформаторах большой мощности находятся в пределах 1–5% от номинальной мощности трансформатора (меньше потери мощности у трансформатора большой мощности).

Коэффициент полезного действия трансформатора

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \text{ или } \eta\% = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)100\%. \quad (2.26)$$

Практически к.п.д. трансформаторов очень высок. Так, для трансформаторов малых мощностей $\eta = 85\text{--}95\%$, для трансформаторов больших мощностей $\eta = 95\text{--}99,5\%$.

Разность между значениями P_2 и P_1 , равная потерям мощности в трансформаторе, очень мала. Если для определения КПД в формулу (2.26) подставлять показания ваттметров, измеряющих мощности P_1 и P_2 , то это может привести к большим ошибкам, так как точность показаний ваттметров находится в пределах разности между P_1 и P_2 (при определенных условиях можно получить даже значение КПД, превышающее 100 %). Поэтому КПД трансформатора определяют косвенным путем по формуле

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{(P_2 + P_{\Pi})}. \quad (2.27)$$

Потери мощности в трансформаторе состоят из потерь в стали P_C и потерь в меди P_M :

$$P_T = P_C + P_M.$$

Потери мощности P_C пропорциональны квадрату магнитного потока и, следовательно, квадрату первичного напряжения U_1 . При $U_1 = \text{const}$, что соответствует нормальным условиям работы трансформатора, P_C постоянны и не зависят от тока нагрузки (рис. 2.12). Эти потери определяются из опыта холостого хода $P_C = P_{1X}$, и в паспорте трансформатора указывают их номинальное значение $P_{1X\text{ном}}$ (при $U_1 = U_{1\text{ном}}$). У большинства трансформаторов составляет менее 1 % от номинальной мощности.

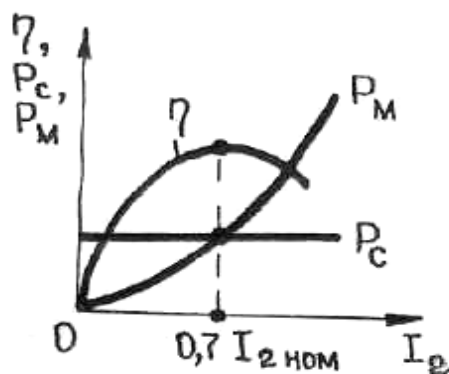


Рис. 2.12

Потери мощности в меди P_M зависят от тока (от нагрузки) и являются потерями переменными. Эти потери пропорциональны квадрату токов в проводах обмоток (рис. 2.12) и для номинального режима могут быть определены из опыта короткого замыкания трансформатора $P_{МНОМ} = P_{1К}$.

В зависимости от нагрузки КПД трансформатора

$$\eta = \frac{P_2}{(P_2 + P_C + P_M)}. \quad (2.28)$$

Наибольший к.п.д. будет при такой нагрузке, при которой постоянные потери равны потерям переменным ($P_C = P_M$) (рис. 1.12). Обычно трансформаторы изготовляют такими, чтобы максимальное значение к.п.д. находилось в пределах нагрузки 0,5–0,7 от номинальной, так как они в основном работают именно с такой нагрузкой.

2.8. АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ

При постоянной величине действующего значения напряжения на зажимах первичной обмотки трансформатора $U_1 = 4,44f w_1 \Phi_m$ в его сердечнике поддерживается почти неизменный магнитный поток Φ_m . Последний индуцирует в каждом витке первичной обмотки ЭДС, тоже практически не зависящую от тока. Вследствие этого можно считать постоянным и почти не зависящим от тока обмотки распределение напряжения между отдельными ее частями. Указанное обстоятельство используется в автотрансформаторе – аппарате, основанном на том же принципе, что и трансформатор, но имеющем лишь одну обмотку высшего напряжения w_1 (рис. 2.13), часть которой служит обмоткой низшего

напряжения w_2 . Обмотка высшего напряжения может служить первичной или вторичной обмоткой, поэтому автотрансформатор может быть как понижающим, так и повышающим.

В отличие от трансформатора в автотрансформаторе первичная и вторичная обмотки электрически соединены, вследствие чего энергия (рис. 2.13) из сети передается в нагрузку Z_H не только электромагнитным полем, но и электрическим путем. Благодаря этому при одной и той же передаваемой мощности, которая считается номинальной мощностью автотрансформатора, его электромагнитная мощность меньше и он имеет меньшие размеры, массу и потери энергии. Следовательно, автотрансформатор выгоднее, экономичнее трансформатора.

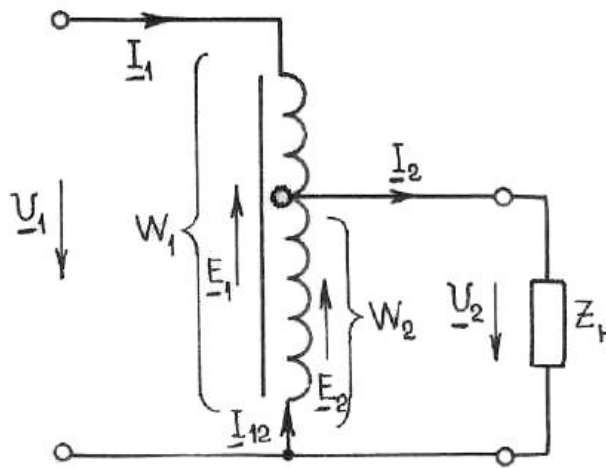


Рис. 2.13

В режиме холостого хода к первичной обмотке с числом витков w_1 подводят напряжение U_1 и по ней протекает ток холостого хода. Поэтому режим холостого хода автотрансформатора ничем не отличается от режима холостого хода обычного трансформатора. Напряжение U_1 равномерно распределяется по виткам w_1 первичной обмотки. Напряжение U_2 на вторичной обмотке с числом витков составляет такую долю от U_1 , какую долю витков составляют от w_1 .

Таким образом, $U_2 = \frac{U_1 w_2}{w_1} = \frac{U_1}{k}$, где $k = \frac{w_1}{w_2} = \frac{U_1}{U_2}$ — коэффициент трансформации автотрансформатора. В понижающем автотрансформаторе $k > 1$, в повышающем $k < 1$.

В режиме нагрузки в автотрансформаторе протекают токи I_1 и I_2 . Первичная и вторичная мощности автотрансформатора из-за незначительности потерь равны, т.е. $S_1 = S_2$ или $U_1 I_1 = U_2 I_2$.

Ток $I_2 = \frac{I_1 U_1}{U_2} = I_1 k$ понижающего трансформатора больше тока I_1 .

Как видно из рис. 2.13, по общим виткам ($w_1 - w_2$) протекает разность токов I_{12} :

$$I_{12} = I_2 - I_1 = I_2 \left[1 - \left(\frac{I_1}{I_2} \right) \right] = I_2 \left[1 - \left(\frac{1}{k} \right) \right]. \quad (2.29)$$

Как следует из формулы (2.29), чем ближе коэффициент трансформации k к единице, тем меньше ток I_{12} , тем меньшее сечение можно взять для изготовления общей части обмоток, тем легче и дешевле будет автотрансформатор, тем экономически выгоднее их применение.

Потери мощности в стали сердечника автотрансформатора такие же, как у трансформатора. Потери на нагрев обмоток у автотрансформатора меньше, так как обмотка только одна и при этом по части ее витков протекает не весь ток. Поэтому к.п.д. автотрансформаторов больше, чем обычных трансформаторов.

К недостаткам автотрансформаторов следует отнести более тяжелые условия короткого замыкания, так как сопротивление автотрансформатора меньше, а ток короткого замыкания больше, чем у трансформатора, и возможно попадание высокого напряжения в сеть низкого напряжения при межвитковом коротком замыкании внутри автотрансформаторов. Вследствие этого автотрансформаторы применяются лишь в тех случаях, где требуется сравнительно небольшое изменение напряжения.

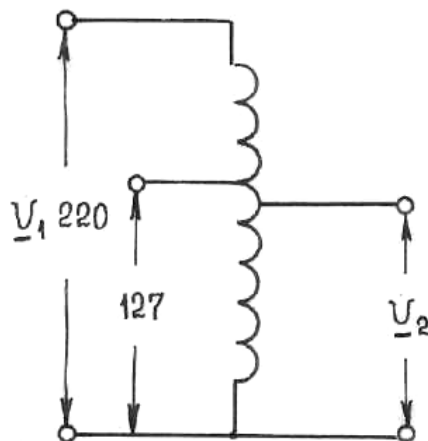


Рис. 2.14

Широкое распространение получили лабораторные автотрансформаторы небольшой мощности (ЛАТРы), у которых благодаря наличию скользящего контакта можно изменять вторичное напряжение в достаточных пределах (рис. 2.14).

2.9. ТРЕХФАЗНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Магнитная система трехфазных трансформаторов имеет два конструктивных исполнения. На рис. 2.15, *а* изображен трехфазный трансформатор, состоящий из трех однофазных. Такой трансформатор называется трехфазным групповым. Каждая из трех фаз имеет самостоятельный магнитопровод поэтому электромагнитные процессы в каждой из фаз протекают самостоятельно и вся изложенная ранее теория и полученные уравнения ЭДС, МДС и токов для однофазного трансформатора здесь справедливы (для каждой фазы в отдельности).

Трехстержневой трансформатор (рис. 2.15, *б*) имеет связанную магнитную систему трех фаз. Первичная и вторичная обмотки каждой фазы располагаются на одном стержне. При симметричной трехфазной системе первичного напряжения система магнитных потоков фаз также симметрична (рис. 1.16). Следовательно, в любой момент времени направление фазных магнитных потоков в стержнях таково, что их сумма равна нулю.

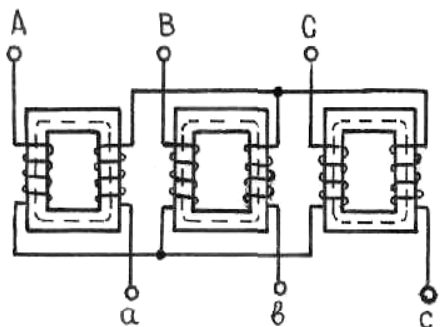


Рис. 2.15

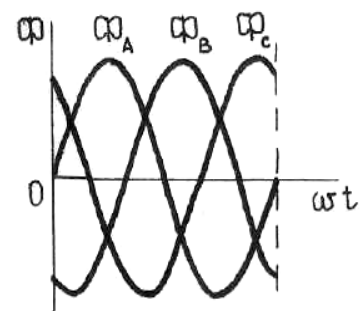
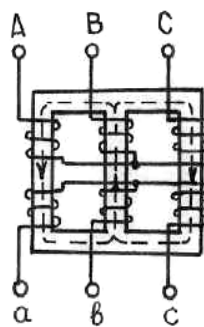


Рис. 2.16

Магнитная система трехстержневого трансформатора в пространственном отношении несимметрична (рис. 2.15, *б*). Магнитный поток фазы *B*, расположенной на среднем стержне, замыкается через два крайних стержня, т.е. по двум параллельным кратчайшим путям. Магнитный поток фазы *A* (или *C*), расположенный на крайнем стержне, замыкается также

по двум параллельным путям (через средний и другой крайний стержни). Но путь замыкания через крайний стержень длиннее, чем через средний, и поэтому общее магнитное сопротивление для потока крайней фазы больше, чем для потока средней фазы. Поэтому для создания симметричной системы фазных потоков требуются разные МДС фаз: для средней фазы, имеющей меньшее магнитное сопротивление, требуется МДС меньшая, чем для крайних фаз. Следствием этого является несимметричная система токов холостого хода, при которой ток $I_{ХВ}$ меньше, чем токи $I_{ХА}$ и $I_{ХС}$.

В режиме нагрузки несимметрия первичных токов незаметна, так как токи холостого хода относительно малы. Поэтому в режиме нагрузки можно считать, что все фазы трехстержневого трансформатора находятся в одинаковых условиях и все выводы теории однофазного трансформатора можно распространить на трехстержневой трансформатор. Однако следует заметить, что это распространяется только на фазные величины.

Трехстержневой трансформатор при одинаковой мощности имеет меньшие габариты и массу, чем трехфазный групповой. Однако в трехфазном групповом трансформаторе проще решается вопрос резервирования, так как здесь в качестве резерва достаточно иметь один запасной однофазный трансформатор (1/3 общей мощности), так как маловероятно одновременное повреждение всех трех однофазных трансформаторов. Для трехстержневого трансформатора в качестве резерва нужно иметь другой трехстержневой трансформатор на полную мощность.

Как первичные, так и вторичные обмотки трансформаторов могут быть соединены по схемам «звезда» (символ Y или Υ при выведенной нейтральной точке) или «треугольник» (символ Δ). Схему соединения первичной и вторичной обмоток двухобмоточного трехфазного трансформатора обозначают дробью, в числителе которой указывается схема соединения первичной обмотки, а в знаменателе схема соединения вторичной обмотки. Таким образом, могут быть соединения Y/Y , Y/Δ , Δ/Δ и Δ/Y . Существуют и другие, более сложные соединения, например, соединение типа «зигзаг».

Обмотку высшего напряжения трехфазного трансформатора с экономической точки зрения выгоднее соединять звездой, так как для получения заданного линейного напряжения U_L требуется фазное напряжение $U_\Phi = \frac{U_L}{\sqrt{3}}$, а следовательно, меньше число витков обмотки и облегченная ее изоляция.

Обмотка, соединенная треугольником, также имеет свои преимущества. Как было показано ранее, ток холостого хода трансформатора несинусоидален и имеет явно выраженную третью гармонику. При соединении обмоток звездой без нейтрального провода гармоники третьего порядка, совпадающие по фазе во всех фазных токах холостого хода, отсутствуют. Это приводит к искажению магнитных потоков и возникновению гармоник ЭДС третьего порядка. Напряжение вторичной обмотки будет несинусоидально. При наличии обмотки, соединенной треугольником, под действием гармоник ЭДС третьего порядка в замкнутом треугольнике обмоток потечет ток и падение напряжения в обмотках уравнивает ЭДС третьей гармоники. Линейные напряжения обмотки, соединенной треугольником, будут синусоидальными, а следовательно, и напряжение на нагрузке будет синусоидальным. Поэтому у трехфазных трансформаторов большой мощности одну из обмоток (обычно низшего напряжения) соединяют треугольником.

Схемы соединения обмоток трехфазного трансформатора на электрических схемах показаны на рис. 2.17. Начала и концы первичных обмоток фаз обозначают прописными буквами (A, B, C и X, Y, Z), а начала и концы вторичных обмоток фаз – строчными (a, b, c и x, y, z).

При использовании трехфазных трансформаторов в сложных системах с большим числом трансформации и при наличии параллельно работающих трансформаторов всегда необходимо знать сдвиг фаз между первичным и вторичным линейным напряжениями. Этот сдвиг характеризуется группой соединения обмоток. Группа соединения в общем случае зависит от схем соединения, направления намотки и выбора начала и конца обмоток.

Примем за условное положительное направление фазных ЭДС направление от конца к началу обмотки. Если направление намотки первичной и вторичной обмоток одинаково, а за начало принят тот вывод каждой обмотки, от которого ведется наматывание, фазные ЭДС E_1 и E_2 совпадают по фазе, как это показано на рис. 2.18. E_1 и E_2 окажутся противоположными по фазе, если изменить направление намотки одной из обмоток или поменять местами ее начало и конец. Других взаимных положений векторов фазных ЭДС быть не может.

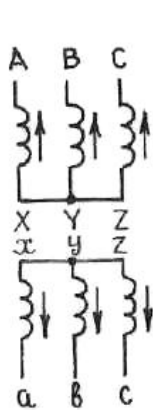


Рис. 2.17

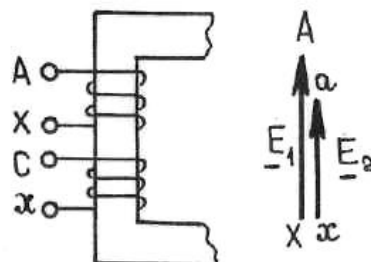
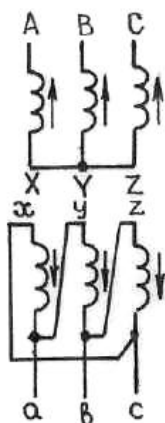


Рис. 2.18

У трансформаторов нормального исполнения направление намотки и обозначение выводов обмоток таково, что фазные первичная и вторичная ЭДС совпадают по фазе. Тогда группа соединения обмоток зависит только от схем соединения.

В зависимости от схемы соединения обмоток (напомним, что возможны следующие схемы соединения обмоток Y/Y, Y/Δ, Δ/Δ, Δ/Y) линейная вторичная ЭДС фаз a и b — E_{ab} может совпадать по направлению с линейной первичной ЭДС фаз A и B — E_{AB} , либо отличаться от него на угол, кратный 30° . Это позволяет использовать циферблат часов для определения группы соединения обмоток трехфазного трансформатора.

Группа соединения обмоток трехфазного трансформатора определяется цифрой часового циферблата, на которую «указывает» вектор линейной вторичной ЭДС E_{ab} при условии, что вектор линейной первичной ЭДС — E_{AB} «направлен на нуль часов».

Для случая соединения первичной и вторичной обмоток звездой (рис. 1.17, а) векторные диаграммы фазных и линейных ЭДС изображены на рис. 1.19, а.

Сначала строят диаграмму фазных ЭДС, диаграмма линейной ЭДС находится по формуле $E_{AB} = E_A - E_B$ для первичной $E_{ab} = E_a - E_b$ и для вторичной обмоток. Из векторных диаграмм видно, что при совпадении по фазе фазных ЭДС линейные ЭДС первичной E_{AB} и вторичной E_{ab} обмоток также совпадают по фазе.

Таким образом, если повернуть на 30° по часовой стрелке вектор первичной линейной ЭДС $\underline{E}_{AB}$ и «направить» его на цифру 0 (или 12) часового циферблата, то вектор вторичной линейной ЭДС $\underline{E}_{ab}$ после поворота его на 30° по часовой стрелке будет направлен также на 0. Это означает, что при соединении обеих обмоток звездой получили группу соединения 0. Группа соединения обмоток трансформатора указывается следующим образом: $\frac{Y}{Y} - 0$.

При соединении первичной обмотки звездой, а вторичной треугольником (рис. 2.17, б) получим группу соединения – II, т.е. $Y/\Delta - II$. Определение группы соединения обмоток для данного случая иллюстрируется векторными диаграммами, представленными на рис. 2.19, б.

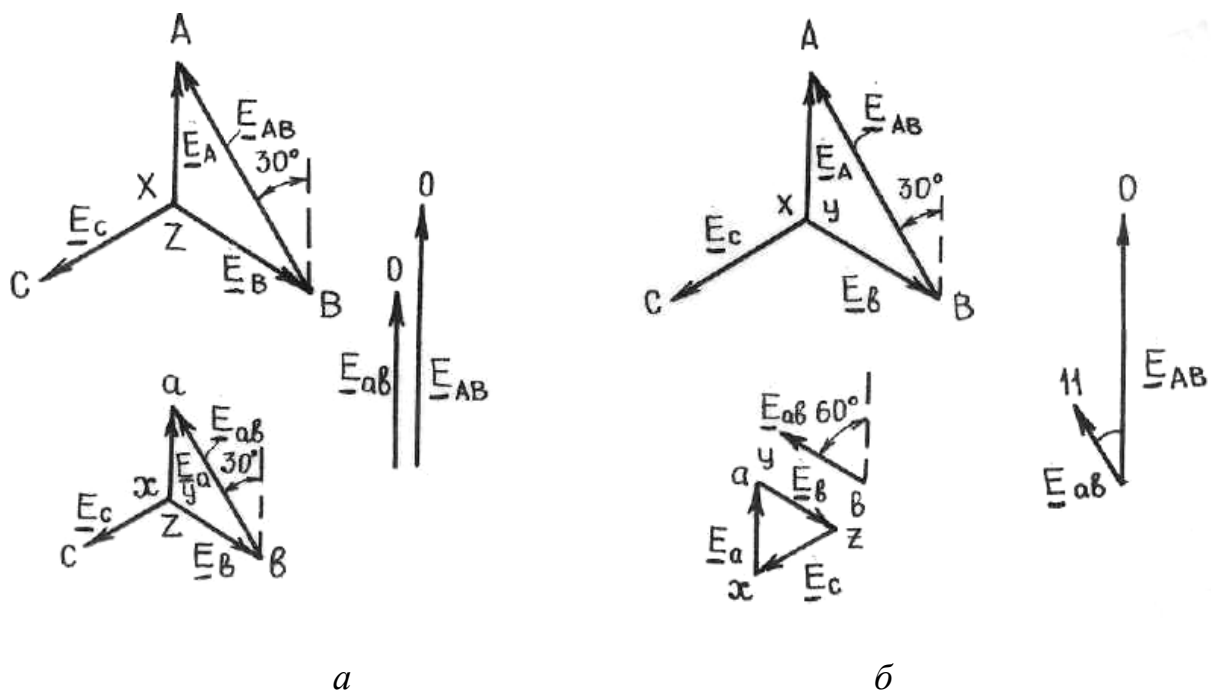


Рис. 2.19

Для параллельной работы используют трехфазные трансформаторы, имеющие одинаковые группы соединения.

Вопросы для самоконтроля

1. Объясните физическую природу потерь мощности в ферромагнитном сердечнике при намагничивании его переменным током.
2. Напишите формулу зависимости амплитуды магнитного потока от действующего значения приложенного синусоидального напряжения питания для катушки с ферромагнитным сердечником.
3. Объясните причину несинусоидальности тока в катушке с ферромагнитным сердечником при синусоидальном напряжении на ее зажимах.
4. Объясните принцип работы трансформатора.
5. Поясните, какую роль играет ЭДС в первичной и вторичной обмотке трансформатора.
6. Укажите, какую мощность можно определить из опыта холостого хода трансформатора.
7. Укажите, какую мощность можно определить из опыта короткого замыкания.
8. Объясните поведение трансформатора при включении его в цепь постоянного тока.
9. Поясните процесс саморегулирования результирующего магнитного потока трансформатора при изменении его нагрузки.
10. Объясните, что называется группой соединения обмоток трансформатора.

ГЛАВА 3

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

3.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

3.1.1. Общие сведения

Электрические машины переменного тока служат для преобразования механической энергии в электрическую (генераторы), либо электрической в механическую (двигатели). Машины переменного тока делятся на: синхронные и асинхронные. Такое деление связано с характером вращения магнитного потока и ротора в генераторах и двигателях переменного тока. У синхронных машин частота вращения ротора находится в строго постоянном отношении к частоте сети. Частота ЭДС синхронных генераторов определяется частотой вращения ротора, а у синхронных двигателей частота вращения ротора зависит только от частоты сети. Для асинхронных машин однозначной зависимости между частотой вращения и частотой сети не существует. Синхронные машины возбуждаются постоянным током, который через щетки и контактные кольца подводится к обмоткам возбуждения. Асинхронные машины возбуждаются реактивной составляющей переменного тока сети, к которой подключена обмотка статора, т.к. для создания основного магнитного потока асинхронная машина специальной обмотки возбуждения не имеет. Как синхронные, так и асинхронные машины обладают принципом обратимости. В отличие от машин постоянного тока, в которых магнитное поле в пространстве неподвижно и при заданном режиме неизменно по величине, в синхронных и асинхронных машинах магнитные поля являются вращающимися и пульсирующими. Наличие вращающихся и пульсирующих магнитных полей определяет принцип действия, свойства и особенности машин переменного тока.

3.1.2. Методические указания

Перед изучением данной главы целесообразно повторить материал по трехфазным цепям. Это связано с тем, что в основе принципа действия машин переменного тока лежит образование в трехфазной сети вращающегося магнитного поля.

Принцип действия машин переменного тока рекомендуется изучать по условно-логическим схемам, обращая внимание на функциональные различия в работе отдельных элементов машин в различных режимах. Важно выделить отличия синхронных машин от асинхронных. Одновременно при изучении принципа действия синхронных генераторов и асинхронных двигателей необходимо понять, с каким законом связано появление электродвижущей силы и вращающего момента.

При изучении материала главы необходимо знать основные формулы, определяющие частоту вращения поля, скольжение, электродвижущую силу, частоту вращения ротора, вращающий момент. Для лучшего запоминания формул следует выписать их в отдельную таблицу.

С точки зрения применения и эксплуатации машин переменного тока, важно знать их рабочие характеристики, особенности пуска в ход, регулирования напряжения и частоты вращения ротора.

Кроме того, необходимо не только изучить электрические схемы и способы регулирования, но и разобраться в физических процессах, протекающих в генераторе или двигателе, уяснить преимущества и недостатки каждого способа.

При объяснении конструкции машин, явлений и характеристик целесообразно пользоваться временными и векторными диаграммами, что облегчит понимание многих их особенностей.

После усвоения материала важно ответить на вопросы самоконтроля, самостоятельно проработать задачи.

3.2. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

3.2.1. Общие понятия о синхронных машинах

Синхронная машина – это машина переменного тока, у которой в установившемся режиме магнитное поле, участвующее в основном процессе преобразования энергии, и ротор имеют одинаковую частоту вращения

$$f = \frac{pn_0}{60} \text{ для генератора,} \quad (3.1)$$

$$n_0 = \frac{60 f_1}{p} \text{ для двигателя,} \quad (3.2)$$

где p – число пар полюсов;
 n_o – частота вращения ротора, об/мин;
 f – частота сети на выходе генератора;
 f_1 – частота сети на входе двигателя.

Из формулы (3.1) видно, что частота сети на выходе генератора находится в строгом постоянном отношении к частоте вращения ротора.

Таким образом, при постоянной частоте вращения ротора генератора последней вырабатывается ЭДС постоянной частоты, а при питании двигателя напряжением постоянной частоты частота вращения его ротора будет постоянной.

Синхронная машина обратима и может работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя. В качестве генераторов и двигателей наиболее широкое применение в технике получили трехфазные синхронные машины.

Трехфазный синхронный генератор является основным типом генератора переменного тока, применяемым в процессе производства электроэнергии. Синхронный двигатель при данной частоте сети имеет строго постоянную частоту вращения, независимую от нагрузки.

Преимущественно синхронные генераторы выпускаются на частоту 50 и 400 Гц. Для получения ЭДС такой частоты необходима частота вращения ротора, величины которой указаны в табл. 3.1 для различных значений p .

Таблица 3.1

n_o , об/мин	$p = 1$	$p = 2$	$p = 3$	$p = 4$	$p = 5$	$p = 6$
n_o , об/мин при $f_1 = 50 \text{ Гц}$	3000	1500	1000	750	600	500
n_o , об/мин при $f_1 = 400 \text{ Гц}$	24000	12000	8000	6000	4800	4000

Для синхронной машины принципиально безразлично, будет ли движущийся проводник пересекать неподвижное магнитное поле, или наоборот, подвижное поле будет пересекать неподвижный проводник (явление электромагнитной индукции), поэтому конструктивно синхронные генераторы могут быть изготовлены двух видов. В первом из них магнитные полюсы можно поместить на статоре и питать их обмотку постоянным током, а проводники расположить на роторе и снимать с них при помощи колец и щеток переменный ток.

Часто ту часть машины, которая создает магнитное поле, называют индуктором, а ту часть машины, где располагается обмотка, в которой индуцируется ЭДС, называют якорем.

Следовательно, в первом типе генератора индуктор неподвижен, а якорь вращается.

При больших мощностях якоря габариты токоъемов получились бы весьма значительными. Этим объясняется то, что в современных генераторах обмотку якоря располагают на неподвижной части машины – статоре, а магнитные полюсы (обмотку возбуждения) – на роторе.

Для вращения ротора синхронного генератора устанавливают первичный двигатель (дизель, бензиновый, электродвигатель).

Синхронные двигатели, имеющие постоянную частоту вращения, используются в электрооборудовании, где нет необходимости в регулировании частоты или где она должна быть постоянной, например, электродвигатели гироскопических стабилизаторов. Мощность таких двигателей может составлять от единиц до нескольких десятков ватт.

3.2.2. Устройство синхронных машин

Синхронные машины независимо от режима работы (двигатель или генератор) состоят из двух основных частей: неподвижного статора и ротора, вращающегося внутри статора.

Статор (рис. 3.1, *а*) состоит из корпуса 1, цилиндрического сердечника 2 (рис. 3.1, *б*), набранного из отдельных пластин электротехнической стали (рис. 3.1, *в*) и трехфазной якорной обмотки 3, уложенной в пазы 4 сердечника.

Если на статоре расположить обмотку индуктора (возбуждения), то его конструкция будет отличаться от предыдущей. Такой статор состоит (рис. 3.2) из корпуса 1, который является магнитопроводом и полюсов 2 с обмотками возбуждения 3. Из-за ряда серьезных недостатков такая конструкция статора широкого применения не получила.

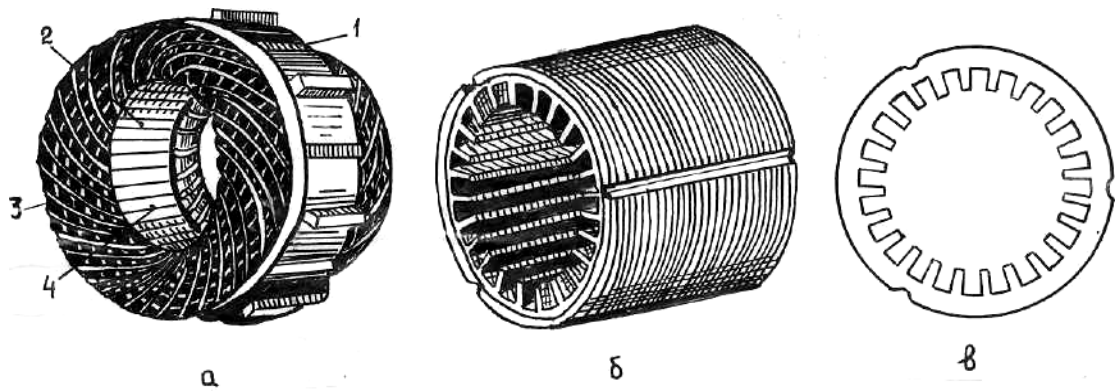


Рис. 3.1

Ротор синхронной машины представляет собой электромагнит постоянного тока, который создает магнитное поле, вращающееся вместе с ротором. Питание к обмотке электромагнита подводится через два изолированных контактных кольца.

Существуют две различные конструкции ротора синхронной машины – явнополюсный и неявнополюсный. На рис. 3.3, а, б схематично изображен внешний вид явнополюсного ротора. Роторы этого типа изготавливают из листовой стали. Они состоят из вала 1, полюсов 2, укрепляемых в шлицах ступицы 3, полюсных катушек (обмоток возбуждения) 4.

Поверхность полюсного наконечника 6 полюсов 2 имеет такой профиль, что магнитная индукция в воздушном зазоре машины распределяется примерно по синусоидальному закону.

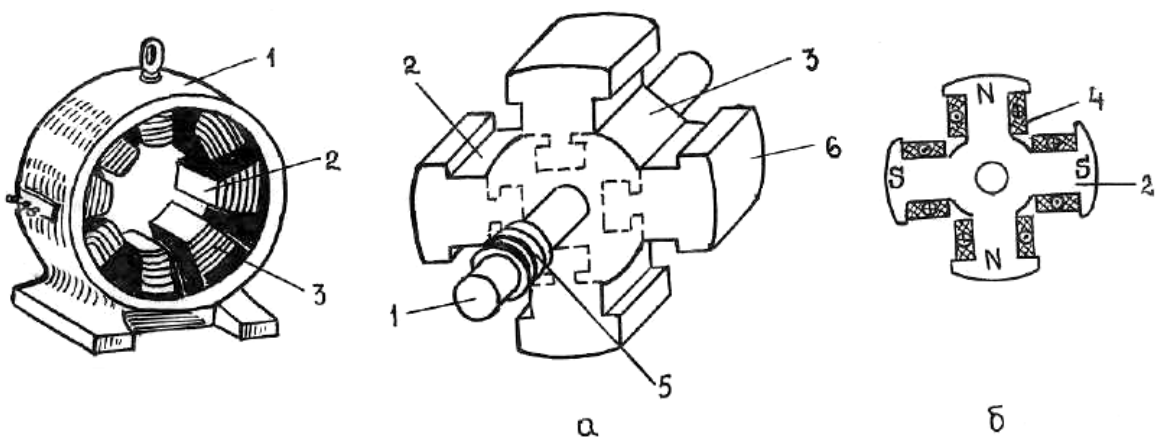


Рис. 3.2

Рис. 3.3

Полюсные катушки через специальные контактные кольца 5 питаются постоянным током от выпрямителя или относительно небольшого генератора постоянного тока, называемого возбудителем.

На рис. 3.3 показан явнополусный ротор с четырьмя полюсами. Для получения нужной частоты переменного тока явнополусный ротор может выполняться с десятками полюсов.

Явнополусный ротор, имеющий выступающие полюсы, применяется для тихоходных машин с частотами вращения до 1000–1500 об/мин. Для быстроходных машин с частотами 1500–3000 об/мин явнополусный ротор практически не применяется из-за сложности надежного крепления полюсов при больших центробежных силах.

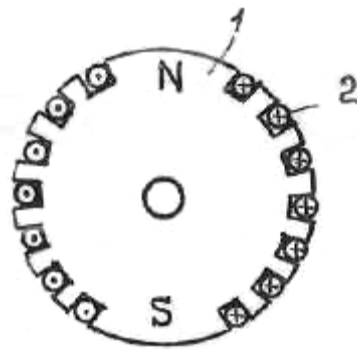


Рис. 3.4

Поэтому для быстроходных машин применяется неявнополусный ротор, обладающий большей механической прочностью. Он состоит (рис. 3.4) из сердечника 1 и обмотки возбуждения 2. Сердечник изготавливается из стальной поковки цилиндрической формы. Обмотку возбуждения закладывают в выфрезерованные пазы, и она создает два полюса ротора ($p = 1$). Пазы занимают около $2/3$ окружности ротора.

Неявнополусные роторы изготавливаются обычно двухполюсными или четырехполюсными.

В последние годы получили распространение синхронные машины с «бесщеточным» возбуждением. Обмотка ротора таких машин питается от выпрямителя, вращающегося вместе с ротором.

3.3. СИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР

3.3.1. Принцип действия и ЭДС

Принцип действия синхронного генератора основан на явлении электромагнитной индукции – во всяком проводнике, пересекаемом силовыми линиями магнитного поля, индуцируется ЭДС.

На рис. 3.5 изображена простейшая модель однофазного генератора переменного тока. Щетки *A* и *B* наложены на сплошные контактные кольца, соединенные с кольцами якорной обмотки генератора (обмотка показана в виде рамки).

Работа простейшего генератора переменного тока поясняется с помощью рис. 3.6. При вращении рамки со сторонами *a* и *б* в магнитном поле в ней индуцируется ЭДС переменной величины и направления. В момент нахождения рамки в горизонтальном положении (сторона *a* – слева) индуцируемая ЭДС равна нулю. При повороте рамки по часовой стрелке на 90° (сторона *a* переходит в верхнее положение, рис. 3.6, *a*) индуцируемая ЭДС растет до амплитудного значения. Направление ЭДС определяется по правилу правой руки: в стороне *a* – от нас «+», в стороне *б* – к нам «–». Когда рамка повернется еще на 180° (сторона *a* переходит в нижнее положение, рис. 3.6, *б*), направление ЭДС в сторонах изменится: в стороне *a* – к нам «–», в стороне – от нас «+». Следовательно, в щетках *A* и *B* меняются полярность индуцируемой ЭДС и ее величина (от E_m до $-E_m$ с переходом через нулевое значение).

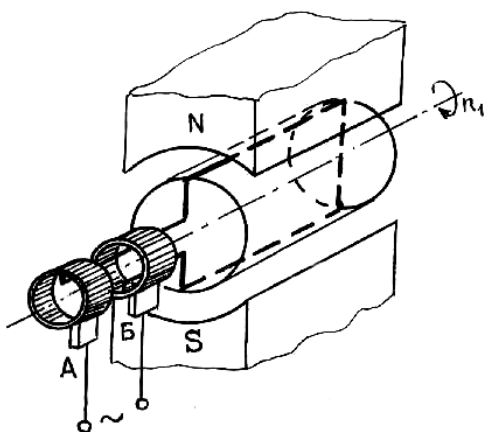


Рис. 3.5

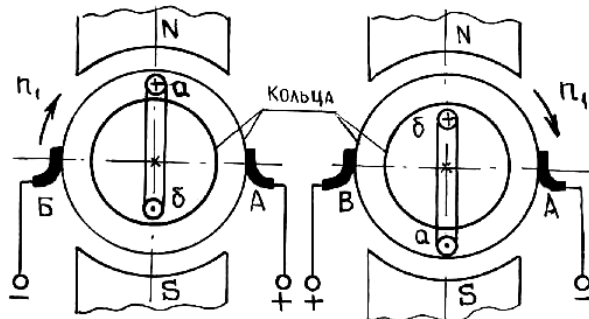


Рис. 3.6

Таким образом, в якорной обмотке индуцируется ЭДС ($e = Blv$), которая при синусоидальном распределении магнитной индукции ($B = B_m \sin \alpha$) в воздушном зазоре также является синусоидальной

$$e = B_m l v \sin \alpha, \quad (3.3)$$

где B – магнитная индукция в воздушном зазоре между статором и ротором;

l – активная длина проводника;

v – линейная скорость пересечения проводников магнитным полем.

На рис. 3.7, а показана схема трехфазного синхронного генератора. Обмотка статора 1 генератора состоит из трех однофазных обмоток, смещенных в пространстве под углом 120° электрических градусов относительно друг друга и соединенных звездой (треугольником). На роторе расположена обмотка возбуждения (рис. 3.7, а, б, в), при подключении которой к источнику постоянного тока возникает магнитное поле возбуждения. Ток возбуждения I_b поступает в цепь ротора от источника постоянного тока через щетки и кольца.

Посредством первичного двигателя ПД ротор генератора приводят во вращение с постоянной частотой n_0 . При этом магнитное поле ротора также вращается и пересекает проводники фазных обмоток статора AX, BY, CZ (рис. 3.7а, б), наводит в них ЭДС. Так как параметры каждой фазной обмотки статора одинаковы, а взаимное смещение их в пространстве равно 120° электрическим градусам, то индуцируемые ЭДС имеют вид

$$\begin{aligned} i_A &= E_M \sin \omega t; \\ i_B &= E_m \sin(\omega t - 120^\circ); \\ i_C &= E_m \sin(\omega t - 240^\circ) = E_m \sin(\omega t + 120^\circ). \end{aligned} \quad (3.4)$$

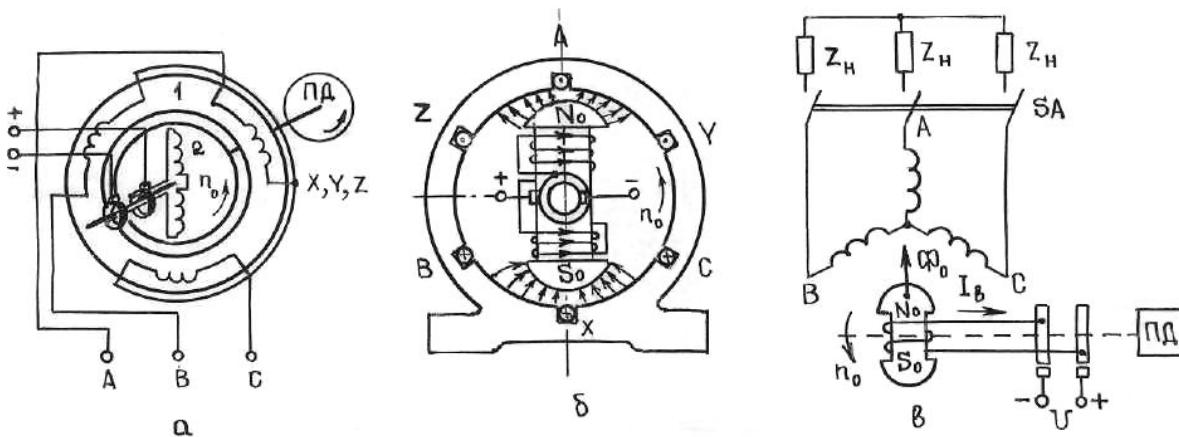


Рис. 3.7

Действующее значение каждой фазной ЭДС при разомкнутом выключателе SA (рис. 3.7, в) равно

$$E_o = 4,44 k_{обм} f_1 W \Phi_{от}, \quad (3.5)$$

где $k_{обм}$ – обмоточный коэффициент;

W – число витков одной фазы обмотки статора;
 $\Phi_{от}$ – максимальный магнитный поток полюса ротора;
 $f = pn_0 / 60$ – частота индуцируемых ЭДС.

3.3.2. Магнитное поле синхронного генератора

Если синхронный генератор в режиме холостого хода (выключатель разомкнут, рис. 3.7, в), магнитный поток в воздушном зазоре создается лишь одной намагничивающей силой полюсов ротора. Этот поток называется основным потоком Φ_0 . Он вращается вместе с ротором с частотой n_0 и индуцирует в трехфазной обмотке статора систему симметричных ЭДС.

При включении выключателя по фазным обмоткам статора потекут токи. При симметричной нагрузке система трехфазного тока также является симметричной системой (рис. 3.8). Ток каждой фазы обмотки создает намагничивающую силу. Совокупные действия намагничивающих сил трехфазных токов создают магнитный поток Φ_a трехфазной обмотки, вектор которого вращается относительно статора и имеет величину, равную $3/2 \Phi_m$, где Φ_m – амплитуда пульсирующего потока одной фазы.

Рассматривая процесс создания магнитного поля переменным током, текущим по обмотке статора, мы предполагали, что весь магнитный поток является полезным, т.е. весь магнитный поток проходит через воздушный зазор в ротор и выступает с ним во взаимодействии. В действительности, часть магнитного потока образует поток рассеяния, линии которого сцепляются только с обмоткой статора. Поток рассеяния Φ_p изменяется так же, как и ток в обмотке статора.

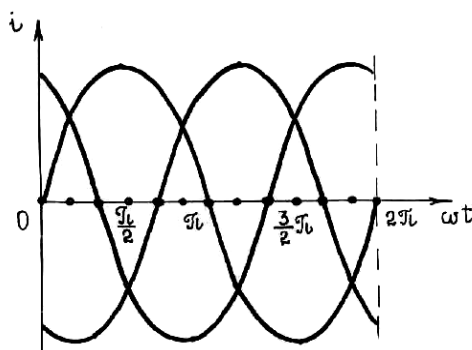


Рис. 3.8

На рис. 3.9 изображена картина магнитного поля, созданного намагничивающей силой обмотки статора. Из рис. 3.9 видно, что намагничи-

вающая сила обмотки статора создает два потока: поток якоря Φ_a , который проходит по сердечнику статора и замыкается через сердечник ротора, и поток рассеяния Φ_{p1} , который охватывает проводники обмотки статора и замыкается в воздушном зазоре машины, не проникая в сердечник ротора.

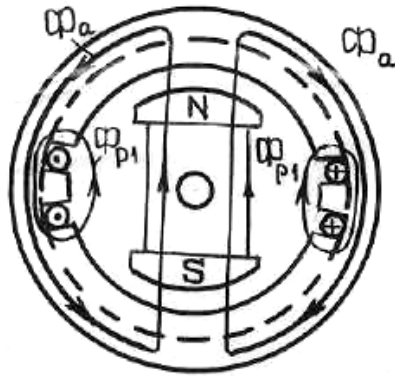


Рис. 3.9

3.3.3. Противодействующий момент

При работе генератора, когда выключатель замкнут (рис. 3.7, в), по обмоткам статора и нагрузки протекает ток. Электрическая мощность, отдаваемая синхронным генератором при симметричной нагрузке, определяется по формуле

$$P = 3 U I \cos \varphi, \quad (3.6)$$

где U и I – действующие фазные напряжение и ток;
 $\cos \varphi$ – угол сдвига фаз между напряжением и током.

Механическая мощность, сообщаемая генератору первичным двигателем:

$$P_{mx} = \omega_p M, \quad (3.7)$$

где M – момент сопротивления вращению ротора;
 ω_p – угловая частота вращения ротора.

Эта мощность преобразуется в электрическую мощность за вычетом потерь в генераторе.

Пренебрегая потерями в машине и приравнявая электрическую и механическую мощности, получим из (3.6) и (3.7) момент, преодолеваемый двигателем:

$$M = \frac{3U I \cos\varphi}{\omega_p}. \quad (3.8)$$

В рассматриваемом случае, когда машина работает генератором, развиваемый ею момент противодействует вращению ротора, т.е. является тормозящим.

3.3.4. Реакция якоря

Магнитная система синхронного генератора в режиме холостого хода (выключатель SA разомкнут, рис. 3.7, *в*) имеет магнитный поток полюсов, который индуцирует ЭДС в обмотке статора. Однако после включения выключателя SA в трехфазной обмотке статора возникает ток, который создает свое вращающееся поле. Частота вращения этого поля равна частоте вращения поля полюсов. Следовательно, полный магнитный поток машины при нагрузке складывается из потоков ротора и статора, но отсюда следует, что магнитное поле статора всегда усиливает поле полюсов. Результат взаимодействия этих полей определяется величиной и характером нагрузки.

Воздействие поля статора на поле полюсной системы возбуждения (ротора) называется реакцией якоря.

Рассмотрим реакцию якоря на примере двухполюсного синхронного генератора с неявно выраженными полюсами ротора, работающего на различную по характеру нагрузку (R , X_L и X_C), пренебрегая незначительным влиянием реактивного сопротивления обмотки якоря.

В случае активной нагрузки, при которой ток совпадает по фазе с ЭДС, максимум тока наступит в тот момент, когда оси полюсов будут находиться против обмоток фаз (рис. 3.10, *а*). Это так называемая поперечная реакция якоря: потоки статора Φ_a и ротора Φ_o взаимно перпендикулярны. В результате сложения этих потоков общий магнитный поток генератора несколько увеличивается и смещается в пространстве на угол θ в направлении, противоположном направлению вращения ротора, следовательно, ЭДС генератора возрастает.

В случае чисто индуктивной нагрузки ток отстает от ЭДС по фазе на $\pi/2$. К рассматриваемому моменту максимального значения тока в обмотках ротор повернут на 90° по часовой стрелке (рис. 3.10, *б*). Магнитные потоки Φ_a и Φ_o направлены встречно, общий магнитный поток генератора равен их разности. Реакция якоря размагничивает машину и уменьшает ее ЭДС.

При емкостной нагрузке генератора ток нагрузки опережает по фазе ЭДС на $\pi/2$, следовательно, ротор генератора еще не дошел на 90° до вертикального положения, а ток в обмотке Ax уже имеет максимальное значение (рис. 3.10, в). Поток Φ_a и Φ_o имеют одинаковое направление, увеличивают общий магнитный поток Φ_c , а это приводит к увеличению ЭДС.

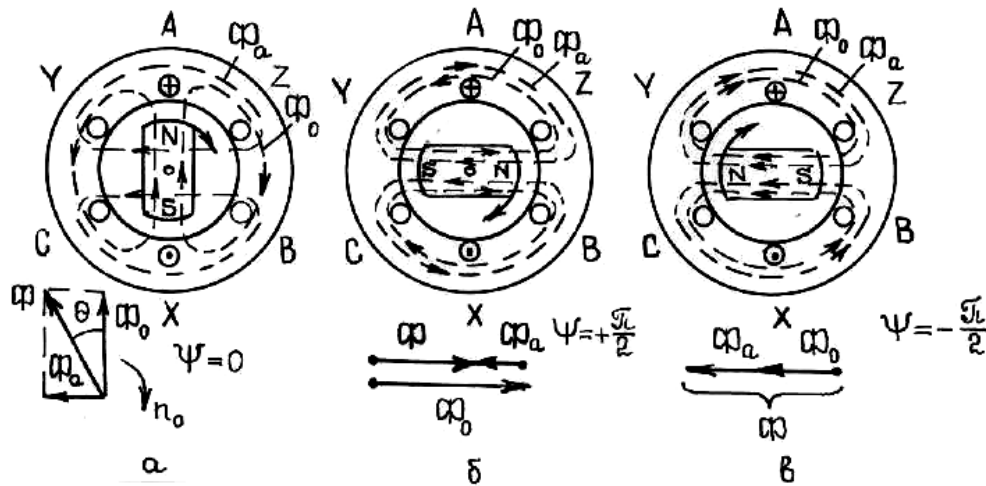


Рис. 3.10

При смешанной активно-индуктивной (рис. 3.11, а) или активно-емкостной (рис. 3.11, б) нагрузке ток и ЭДС сдвинуты по фазе на некоторый угол. Поток от обмотки статора Φ_a может быть представлен в виде двух взаимно перпендикулярных составляющих:

Φ_{a1} — поперечной (активной) и Φ_{a2} — продольной (реактивной). В результате реакции якоря результирующий магнитный поток смещается от вертикали и изменяется по значению в зависимости от характера нагрузки.

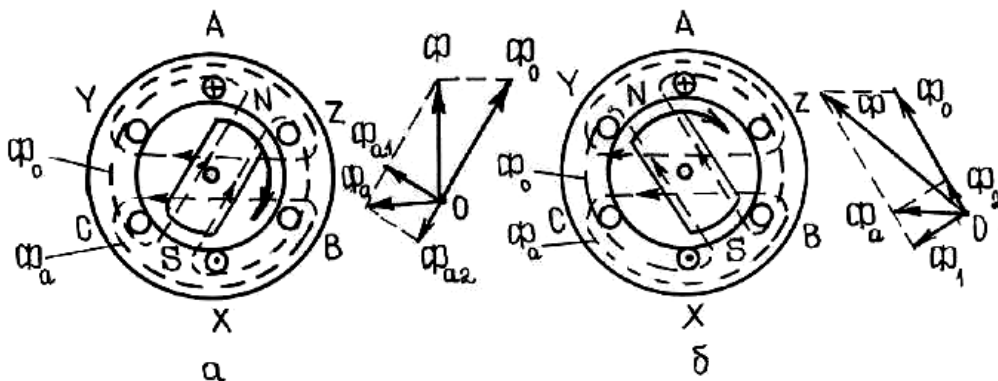


Рис. 3.11

Во всех рассмотренных случаях не учитывались изменения нагрузки. Очевидно, что реакция якоря будет тем значительнее, чем больше ток нагрузки, так как при этом поле якоря усиливается вместе с ростом нагрузки.

Таким образом, реакция якоря в синхронном генераторе приводит к изменению магнитного потока и ЭДС, что является крайне нежелательным, так как изменение значения и характера нагрузки приведет к изменению напряжения на зажимах генератора.

На практике при всяком изменении нагрузки с помощью автоматических устройств изменяют ток возбуждения; этим ослабляют влияние реакции якоря.

3.3.5. Условно-логическая схема нагруженного синхронного генератора

С помощью условно-логической схемы (рис. 3.12) представляется возможным наглядно отразить работу синхронного генератора под нагрузкой.

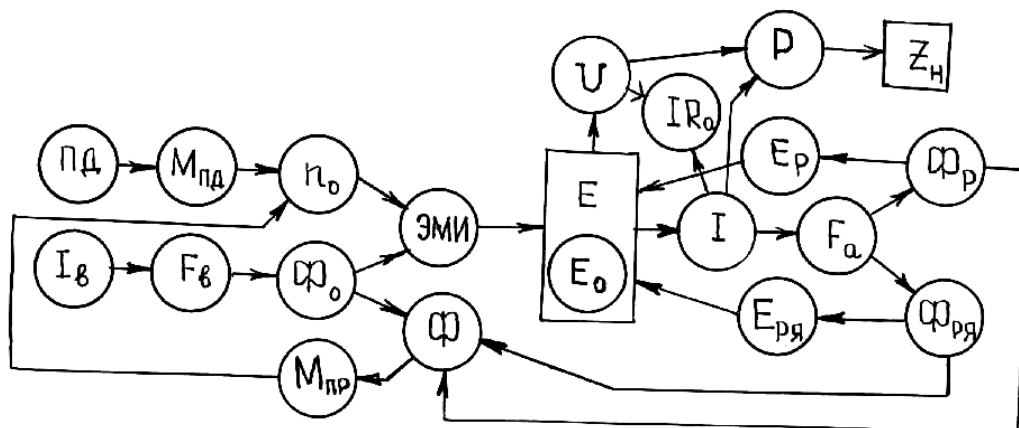


Рис. 3.12

Первичный двигатель ПД, развивая момент $M_{ПД}$, вращает ротор генератора с частотой n_0 . Под действием ЭДС источника постоянного тока по обмотке ротора течет ток возбуждения I_b , создающий намагничивающую силу $F_b = I_b W$ и магнитный поток ротора Φ_0 .

При вращении ротора n_0 и магнитного потока Φ_0 за счет электромагнитной индукции в каждой фазе обмотки статора индуцируется ЭДС E_0 . При включении нагрузки по обмоткам статора течет ток нагрузки I , который образует намагничивающую силу F_a статора, которая, в свою

очередь, создает магнитный поток реакции якоря $\Phi_{ря}$ и магнитный поток рассеяния Φ_p , который замыкается поперек пазов статора и вокруг лобовых частей обмотки статора. Потоки $\Phi_{ря}$ и Φ_p наводят в обмотке статора соответственно ЭДС $E_{ря}$ и E_p .

Векторная сумма ЭДС $E = E_0 + E_{ря} + E_p$ и падение напряжения на активном сопротивлении обмотки статора $R_a I$ равно напряжению на выводах генератора U . Магнитные потоки $\Phi_{ря}$ и Φ_p складываются с магнитным потоком ротора генератора Φ_0 , который, взаимодействуя с током статора I , образует тормозной момент ($M_{ПР}$), противодействующий вращающему моменту первичного двигателя. Вырабатываемая статором генератора активная мощность P поступает в электрическую нагрузку.

3.3.6. Уравнение напряжений обмотки статора генератора

Из рис. 3.12 видно, что $U = E - IR_a$, где $E = E_0 + E_{ря} + E_p$. Поскольку магнитные потоки $\Phi_{ря}$ и Φ_p пропорциональны току и индуцируют ЭДС $E_{ря}$ и E_p , последние могут быть выражены через постоянные индуктивные сопротивления $X_{ря}$ и X_p , т.е. $E_{ря} = -jX_{ря}I$ и $E_p = -jIX_h$ (рис. 3.13).

Тогда $U = E_0 + E_{ря} + E_p - IR_a = E_0 - j[X_{ря} + X_p]I$

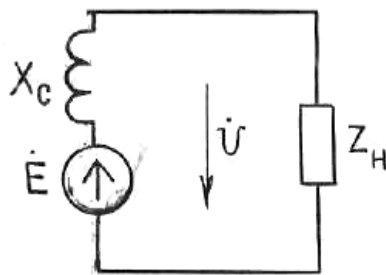


Рис. 3.13

Обозначим $X_{ря} + X_p = X_c$ (синхронное сопротивление) и получим уравнение напряжений обмотки статора синхронного генератора.

$$U = E_0 - jIX_c. \quad (3.9)$$

Полагая, что магнитный поток изменяется синусоидально с частотой $f = pn_0 / 60$, зависящей от частоты вращения n_0 ротора при определенном числе пар полюсов p и, учитывая, что $\omega = 2\pi a$, и переходя к действующему значению ЭДС, из уравнения (3.5) можно получить:

$$E_0 = C n_0 \Phi_0, \quad (3.10)$$

где C_e – постоянный коэффициент, учитывающий конструктивные особенности данной машины.

Таким образом, ЭДС генератора пропорциональна основному магнитному потоку машины, при этом напряжение на зажимах генератора меньше ЭДС на величину внутреннего падения напряжения IX_C .

3.3.7. Векторная диаграмма синхронного генератора

Зависимость изменения напряжения от нагрузки генератора удобно выяснить с помощью векторных диаграмм при различных нагрузках. Рассмотрим случай, наиболее часто встречающийся на практике – случай активно – индуктивной нагрузки.

При указанной нагрузке вектор тока I отстает по фазе на угол φ от вектора напряжения U , а вектор индуктивного падения напряжения jIX_C опережает вектор тока на угол 90° (рис. 3.14, а). Сумма векторов U и jIX_C дает вектор ЭДС E_0 . Угол θ между векторами и называется углом нагрузки, а угол между векторами E_0 и ψ обозначается ψ .

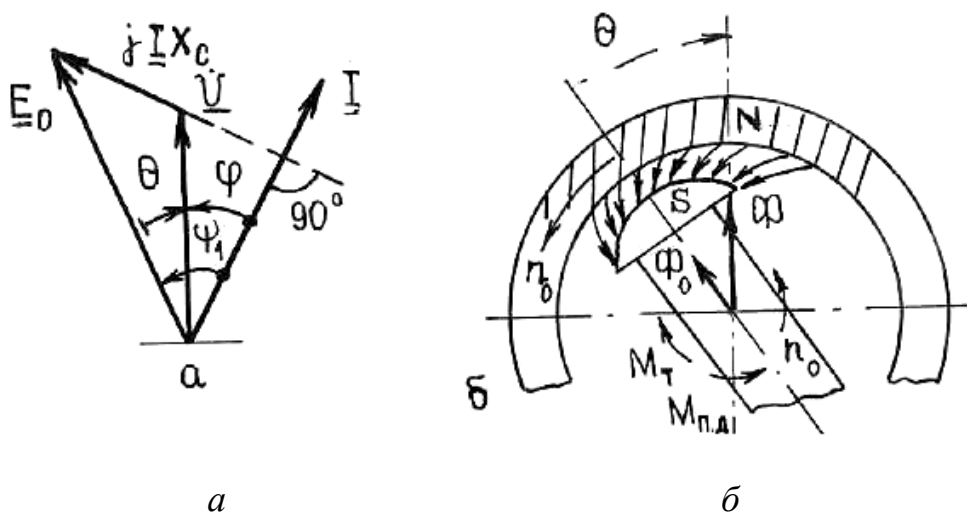


Рис. 3.14

ЭДС соответствует магнитный поток ротора, а напряжению U_0 – результирующий магнитный поток машины (рис. 3.14, б). Из рис. 3.14, б видно, что поток Φ_0 опережает поток Φ на угол θ , чему соответствует сдвиг на такой же угол полюса ротора S относительно полюса N результирующего поля машины. В результате взаимодействия полюсов S и N образуется противодействующий момент $M_{\text{пр}}$.

3.3.8. Основные характеристики синхронного генератора

К числу основных характеристик синхронного генератора относится характеристика холостого хода, внешняя и регулировочная характеристики.

Характеристика холостого хода представляет собой график зависимости ЭДС генератора E_0 на холостом ходу от тока возбуждения $I_{\text{в}}$ (рис. 3.15, а). Характеристика напоминает собой кривую намагничивания стали (см. генератор постоянного тока). Эту характеристику можно получить опытным путем, изменяя ток возбуждения при номинальной частоте вращения ротора $E_0 = f(I_{\text{в}})$, $n_0 = \text{const}$, $\cos \psi = \text{const}$.

Номинальный режим возбуждения генератора выбирают в области перегиба кривой (точка А). Использование области большего магнитного насыщения для увеличения ЭДС приводит к неоправданному увеличению тока возбуждения, а следовательно, и размеров обмотки возбуждения.

Внешняя характеристика – это зависимость напряжения U на зажимах генератора от тока его нагрузки I при постоянных значениях $\cos \varphi$, n_0 и $I_{\text{в}}$ (рис. 3.15, б). В зависимости от характера нагрузки внешние характеристики имеют спад (кривая 2, $\cos \varphi < 1$, $\varphi > 0$), либо некоторый подъем (кривая 3, $\cos \varphi < 1$, $\varphi < 0$). Номинальный режим нагрузки ($I_{\text{н}}$) выбирают таким образом, чтобы при $\cos \varphi = 0,8$ изменения напряжения не превышали 35–45 % от номинального (кривая 1).

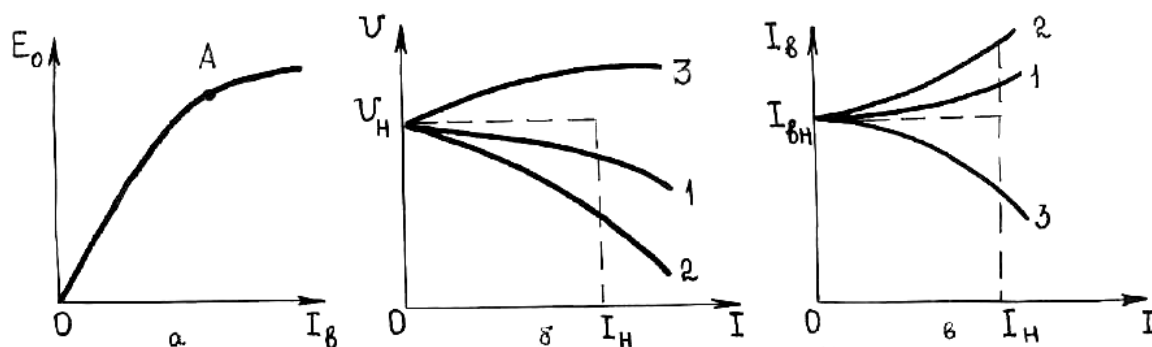


Рис. 3.15

Регулировочная характеристика представляет собой график зависимости тока возбуждения $I_{\text{в}}$ от тока нагрузки I при $n_0 = \text{const}$ и $\cos\varphi = \text{const}$ (рис. 3.15, в). Такая характеристика показывает, как выбрать ток возбуждения, при котором напряжение на зажимах генератора оставалось бы постоянным при изменениях нагрузки. Из рис. 3.15, в видно, что для разных значений $\cos\varphi$, в частности, когда $\varphi > 0$ (кривая 2), ток следует увеличивать, а при $\varphi < 0$ (кривая 3) – уменьшать. Кривая 1 соответствует наиболее рациональному режиму.

Вопросы для самоконтроля

1. Объясните принцип работы синхронного генератора.
2. Поясните устройство и назначение основных частей синхронного генератора.
3. Напишите выражение для действующего значения ЭДС синхронного генератора при холостом ходе.
4. Напишите выражение для противодействующего момента.
5. В чем заключается явление реакции якоря в синхронном генераторе?
6. Объясните условно-логическую схему синхронного генератора.
7. Напишите уравнение напряжений обмотки статора генератора.
8. Перечислите и поясните основные характеристики синхронного генератора.

3.4. СИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

3.4.1. Принцип действия

По своему устройству синхронные двигатели ничем не отличаются от синхронных генераторов. Трехфазная обмотка статора получает питание от сети напряжением и частотой f и создает круговое вращающееся поле. Обмотка возбуждения получает питание от источника постоянного тока и создает поле ротора (число пар полюсов статора и ротора одинаково). В результате взаимодействия полей ротор получает вращение в сторону вращения поля статора. Особенностью синхронного двигателя является то, что частота вращения ротора равна частоте вращения поля статора.

Однако рассмотренный принцип действия синхронного двигателя соответствует случаю, когда ротор двигателя предварительно раскручен

до частоты, близкой к частоте вращения поля статора. Если ротор предварительно не раскрутить, а на обмотку статора подать трехфазный ток, то ротор останется неподвижным. Это объясняется следующим. При частоте питающего тока $f = 50$ Гц и числе пар полюсов $p = 1$, вращающееся поле статора начнет вращаться вокруг неподвижного ротора с частотой 3000 об/мин. В течение секунды мимо каждого полюса ротора будет проходить по 50 раз полюс N и полюс S рис. 3.16 вращающегося поля статора, т.е. на ротор действует сила, изменяющая свое направление 50 раз в секунду. По этой причине ввиду инерционности ротор не трогается с места.

Таким образом, синхронный двигатель не имеет начального пускового момента ($M_H = 0$). Поэтому для пуска синхронного двигателя приходится применять специальные способы, сущность которых состоит в предварительном приведении ротора во вращение до синхронной или близкой к ней частоте, при которой между статором и ротором устанавливается магнитная связь (рис. 3.16, а, б).

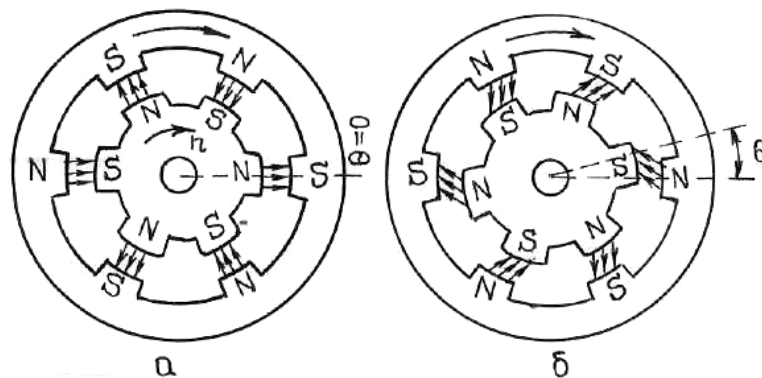


Рис. 3.16

3.4.2. Пуск в ход и остановка синхронного двигателя

Подавая питание постоянного тока на обмотку ротора, возбуждают двигатель. Затем ротор приводится во вращение до синхронной частоты с помощью вспомогательного двигателя и далее специальным устройством обмотки статора подключается к сети трехфазного тока. Вспомогательный двигатель отключают и отсоединяют от вала синхронного двигателя.

Мощность вспомогательного двигателя обычно составляет 5–15 % от мощности синхронного двигателя.

Описанный способ пуска в настоящее время применяется только для мощных синхронных двигателей.

Схема синхронного пуска в ход синхронного двигателя приведена на рис. 3.17. Отличительной особенностью является то, что в полюсные наконечники ротора синхронного генератора укладываются металлические стержни (МС), соединенные с боков накоротко кольцами (К). Получается своеобразная пусковая обмотка.

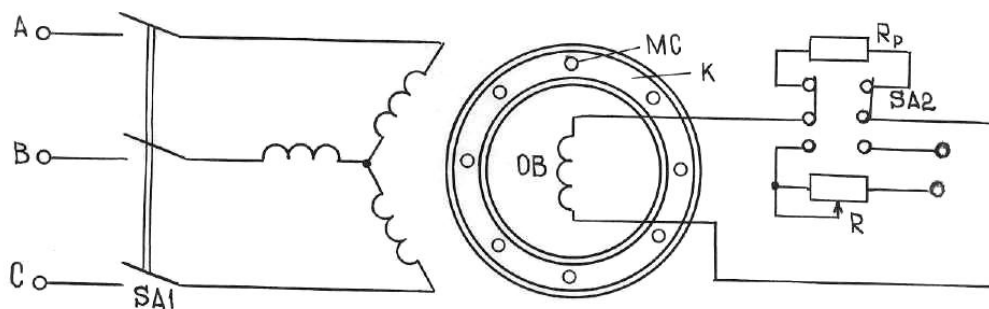


Рис. 3.17

При пуске двигателя обмотку возбуждения (ОВ) закорачивают через разрядный резистор R_p , а обмотку статора включают в сеть, при этом в пусковой обмотке ротора наводится ЭДС. Под действием ЭДС в короткозамкнутой обмотке ротора протекает ток. Этот ток, взаимодействуя с вращающимся магнитным полем статора согласно закону электромагнитной индукции, создает вращающий момент ротора. При достижении частоты вращения ротора 95 % синхронной обмотки возбуждения (ОВ) подключают выключателем SA2 к источнику постоянного тока. Двигатель автоматически входит в синхронизм, а дополнительная обмотка в полюсных наконечниках автоматически отключается, так как ЭДС индукции в стержнях при одинаковых частотах вращения поля статора и ротора равна нулю.

Закорачивание ОВ необходимо, так как в момент пуска в ней наводится ЭДС. Вследствие большого числа витков ЭДС достигает 3000–4000 В и более, что представляет опасность для обслуживания и целостности обмотки.

Для остановки синхронного двигателя сначала уменьшают ток возбуждения до значения, соответствующего минимальному току статора, затем отключают выключателем SA1 статор и лишь после этого размыкают цепь возбуждения. Такой порядок остановки синхронного двигателя исключает опасность пробоя изоляции перенапряжением в разомкнутой ОВ.

3.4.3. Рабочие характеристики синхронных двигателей

Рабочие характеристики синхронного двигателя представляют собой зависимости частоты вращения ротора n_0 , тока в обмотке статора I , потребляемой мощности P_1 , полезного момента M_2 и коэффициента мощности $\cos \varphi$ от полезной мощности на валу двигателя P_2 :

$$n_0, I, P_1, M_2, \cos \varphi = f(P_2),$$

при $f = \text{const}$, $U = \text{const}$, $I_g = \text{const}$ (рис. 3.18).

Так как частота вращения ротора n_0 не зависит от нагрузки и равна синхронной частоте $n_0 = 60 f / p$, то зависимость $n_0 = f(P_2)$ – прямая линия, параллельная оси абсцисс.

Полезный момент на валу двигателя M_2 от полезной мощности P_2 находится в зависимости

$$M_2 = \frac{P_2}{\omega} = \frac{30P_2}{\pi n_0}. \quad (3.11)$$

Так как $n_0 = \text{const}$, то M_2 зависит только от P_2 и представляет собой прямую линию, проведенную через начало координат.

Потребляемая из сети мощность P_1 зависит от P_2 и суммарных потерь $\sum P$ (т.е. $P_1 = P_2 + \sum P$). С увеличением P_2 потери в электродвигателе увеличиваются и поэтому мощность P_1 растет относительно быстрее, чем мощность P_2 , а график $P_1 = f(P_2)$ имеет незначительную криволинейность.

Кривая $\cos \varphi = f(P_2)$ зависит от характера возбуждения двигателя в режиме холостого хода. Если при холостом ходе $\cos \varphi = 1$, то при увеличении P_2 он уменьшается.

Ток, потребляемый двигателем из сети $I = P_1 / mU \cos \varphi$ (m – число фаз), зависит от P_1 и $\cos \varphi$. Так как с увеличением уменьшается, то ток I растет быстрее, чем мощность P_1 .

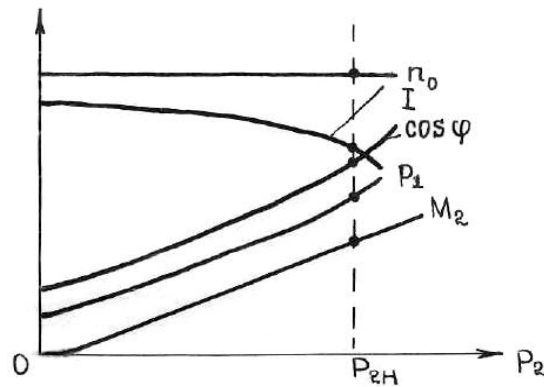


Рис. 3.18

Вопросы для самоконтроля

1. Изложите принцип работы синхронного двигателя.
2. Начертите схему пуска синхронного двигателя и объясните, как происходит такой пуск.
3. Начертите и поясните рабочие характеристики синхронного двигателя.
4. Перечислите достоинства и недостатки синхронных машин.

3.5. ТРЕХФАЗНЫЕ АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

3.5.1. Устройство трехфазного асинхронного двигателя

Основными частями трехфазного асинхронного двигателя являются статор и ротор.

Статор трехфазного асинхронного двигателя аналогичен статору трехфазного синхронного генератора (рис. 3.1, а) и состоит из корпуса, сердечника и обмотки. Обмотки статора могут соединяться звездой или треугольником. Концы фазных обмоток выводятся на зажимы коробки выводов и обозначаются С1, С2, С3 – начало фаз, С4, С5, С6 – концы фаз. На рис. 3.19 показаны схемы расположения этих выводов и способы соединения их между собой.

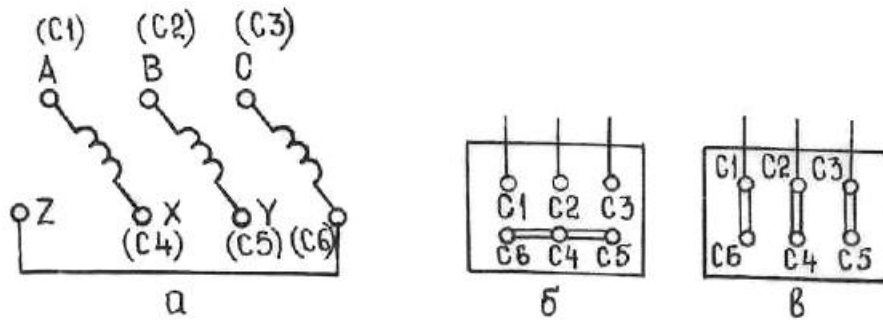


Рис. 3.19

Схема соединений обмоток статора зависит от расчетного напряжения двигателя и номинального напряжения сети. Например, в паспорте двигателя указано 380/220 В. Первое число соответствует схеме соединений обмоток в звезду при линейном напряжении в сети 380 В, а второе – в схеме соединения в треугольник при линейном напряжении сети 220 В.

Ротор асинхронного двигателя состоит из вала, сердечника и обмотки.

Сердечник ротора 1 (рис. 3.20) имеет цилиндрическую форму и так же, как сердечник статора, собирается шихтованным из отдельных листов электротехнической стали. По окружности сердечника расположены пазы 2 (отверстия) овальной или круглой формы.

Обмотка ротора бывает двух типов: короткозамкнутая и фазная, соответственно роторы называются короткозамкнутыми и фазными. Короткозамкнутая обмотка (рис. 3.21) состоит из ряда медных или алюминиевых стержней, запрессованных в пазы сердечника и замкнутых с обеих сторон (по торцам) кольцами. Такая обмотка получила название беличьей клетки. Короткозамкнутая обмотка может быть получена также путем заливки пазов сердечника ротора расплавленным алюминием под давлением (рис. 3.22).

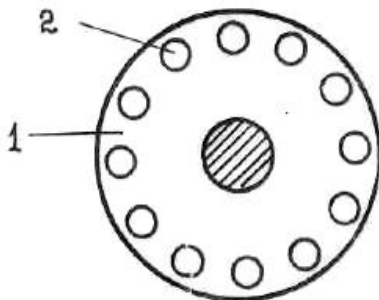


Рис. 3.20

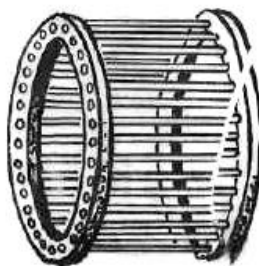


Рис. 3.21

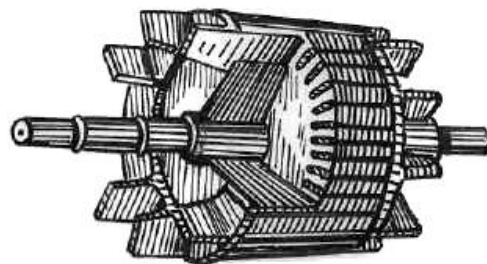


Рис. 3.22

Фазный ротор (рис. 3.23) имеет три обмотки 1, соединенные в звезду. Выводы обмоток подсоединены к кольцам 2, закрепленным на валу 3. К кольцам при пуске прижимаются неподвижные щетки 4, которые подсоединяются к реостату 5.

3.5.2. Принцип действия асинхронного двигателя

При включении трехфазной обмотки статора в сеть возникает вращающееся магнитное поле. Частота вращения этого поля $n_1 = 60 f / P$.

В расточке статора расположен короткозамкнутый ротор.

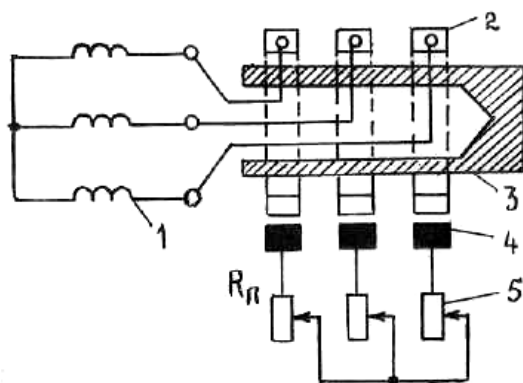


Рис. 3.23

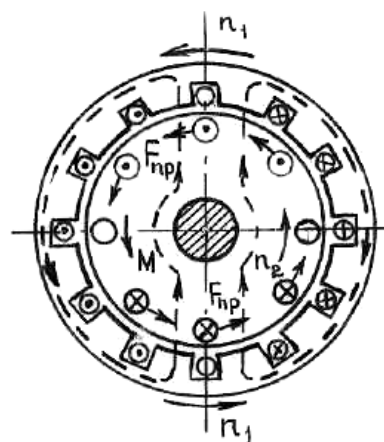


Рис. 3.24

Вращающееся поле статора пересекает короткозамкнутые проводники (стержни) обмотки ротора, расположенного в расточке статора (рис. 3.24), и наводит в них ЭДС. Но так как обмотки ротора замкнуты, то в них возникают токи. Взаимодействие этих токов с полем статора создает в проводниках обмотки ротора электромагнитные силы $F_{пр}$, направление которых определяется по правилу левой руки. Как видно из рис. 3.24, силы $F_{пр}$ стремятся повернуть ротор в направлении вращения магнитного поля статора. Совокупность сил $F_{пр}$, приложенных к отдельным проводникам, создает на роторе электромагнитный момент M , приводящий его во вращение с частотой n . Вращение ротора через вал передается исполнительному механизму.

3.6. ВРАЩАЮЩЕЕСЯ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

3.6.1. Создание вращающегося магнитного поля

Проделаем следующий опыт. Разместим по окружности три катушки так, чтобы между плоскостями любых двух катушек был угол 120° . В центре окружности поместим на оси магнитную стрелку. Если катушки включить в трехфазную сеть, то магнитная стрелка придет во вращение. Так как магнитная стрелка в этом опыте может вращаться только под действием магнитных сил, то совокупность магнитных полей, созданных токами трех катушек, включенных в трехфазную сеть, является вращающимся магнитным полем. Разберем причину этого явления.

Изобразим графически изменения токов в обмотках статора (рис. 3.25) и выберем произвольные моменты времени: t_1, t_2, t_3, t_4 . Для каждого из этих моментов последовательно изобразим результирующие магнитные потоки внутри статора трехфазной машины, условно имеющей три обмотки, состоящие каждая из одного витка (рис. 3.26).

Обозначим начала обмоток буквами A, B, C , а концы – X, Y и Z соответственно. Для момента t_1 имеем: обмотка AX потока не создает ($i_A = 0$); в начале обмотки B ток направлен от нас ($i_B < 0$), а в ее конце Y – к нам; в начале обмотки C ток направлен к нам ($i_C > 0$), а в ее конце Z – от нас.

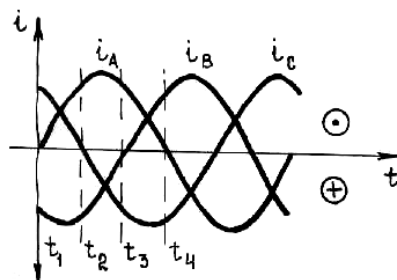


Рис. 3.25

Таким образом, в двух расположенных рядом проводниках CY , перпендикулярных к плоскости чертежа, токи направлены одинаково в момент t_1 и создают магнитный поток, направленный по правилу буравчика против часовой стрелки, а токи в проводниках BZ создают поток, направленный по часовой стрелке. Оба потока внутри статора машины имеют одинаковое направление (вверх). Направление оси общего магнитного потока отметим стрелкой.

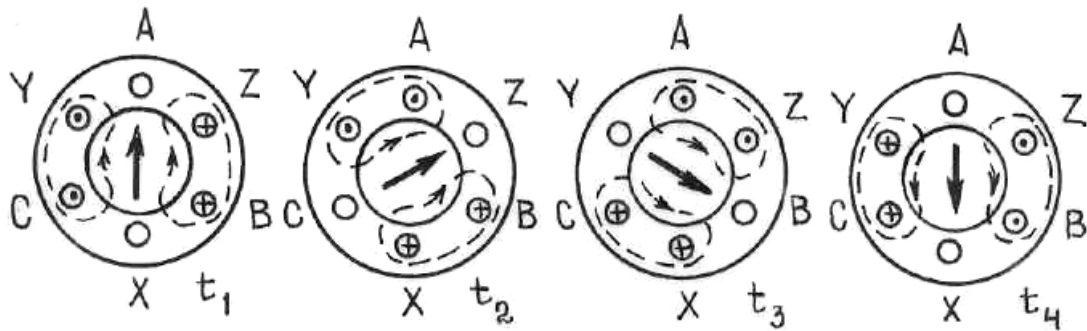


Рис. 3.26

Рассматривая, таким образом, положение магнитного потока для каждого из указанных моментов, приходим к выводу, что направление магнитного потока изменится на 180° за полпериода. Легко убедиться, что за период ось магнитного потока сделает один оборот, и очевидно, что частота ее вращения пропорциональна частоте тока.

На рис. 3.26 рассмотрены положения магнитного потока для фиксированных моментов времени. Учитывая, что ток в обмотках статора изменяется непрерывно, можно заключить, что вектор магнитного потока будет вращаться также непрерывно и с постоянной частотой.

Рассмотрим количественную сторону вопроса создания вращающегося магнитного поля. Для этого примем, что на статоре трехфазной машины расположены три обмотки, включенные в трехфазную сеть (рис. 3.27). Магнитная индукция в точке 0, создаваемая каждой обмоткой, изменяется по синусоидальному закону

$$B_1 = B_m \sin \omega t;$$

$$B_2 = B_m \sin (\omega t - 120^\circ);$$

$$B_3 = B_m \sin (\omega t - 240^\circ).$$

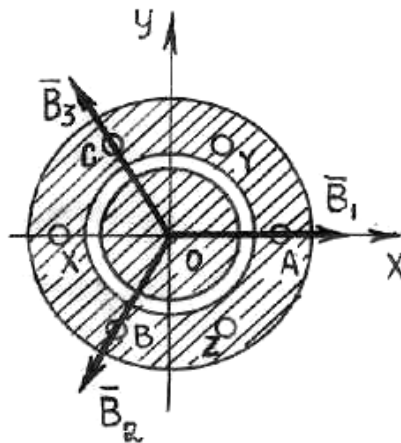


Рис. 3.27

Для того чтобы найти длину и положение результирующего вектора индукции в точке 0, необходимо найти сумму проекций векторов B_1 , B_2 , B_3 на ось координат ОХ:

$$\begin{aligned} B_{1x} &= Bm \sin \omega t; \\ B_{2x} &= B_2 \cos 60^\circ = -\frac{1}{2} Bm \sin (\omega t - 120^\circ); \\ B_{3x} &= -B_3 \cos 60^\circ = -\frac{1}{2} Bm \sin (\omega t - 240^\circ). \end{aligned}$$

Сумма проекций этих векторов дает проекцию результирующего вектора индукции:

$$\begin{aligned} B_x &= B_{1x} + B_{2x} + B_{3x}; \\ B_{2x} + B_{3x} &= \frac{1}{2} Bm \left[\sin (\omega t - 120^\circ) + \sin (\omega t - 240^\circ) \right] = \frac{1}{2} Bm \sin \omega t; \quad (3.12) \\ B_x &= \frac{3}{2} Bm \sin \omega t. \end{aligned}$$

Точно так же находится проекция результирующего вектора индукции на ось ОУ

$$\begin{aligned} B_y &= B_{1y} + B_{2y} + B_{3y}; \\ B_y &= \frac{3}{2} Bm \cos \omega t. \end{aligned} \quad (3.13)$$

Таким образом, в результате преобразований получены две составляющие общего результирующего вектора магнитной индукции B , по которым можно найти значение суммарной индукции (рис. 3.28):

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} = \frac{3}{2} Bm \sqrt{\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t} = \frac{3}{2} Bm. \quad (3.14)$$

Из (3.14) видно, что длина вектора магнитной индукции B не зависит от времени. При $t = 0$ составляющая вектора индукции $B_x = 0$ (вектор занимает вертикальное положение). С увеличением t вертикальная проекция B_x уменьшается, а горизонтальная B_y увеличивается, в результате чего вектор B будет поворачиваться по часовой стрелке.

Для определения угловой частоты вращения вектора магнитной индукции B положим, что в некоторый произвольный момент времени t он образует с осью OY угол α , для которого можно записать:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{B_x}{B_y} = \frac{3/2 B_m \sin \omega t}{3/2 B_m \cos \omega t} = \operatorname{tg} \omega t.$$

Откуда

$$\alpha = \omega t. \quad (3.15)$$

Из (3.15) следует, что вектор индукции B вращается с постоянной угловой частотой в направлении часовой стрелки. Следовательно, получается постоянное по значению равномерно вращающееся магнитное поле.

Если изменить очередность фаз (изменится и последовательность токов), то, проведя аналогичные преобразования, получим:

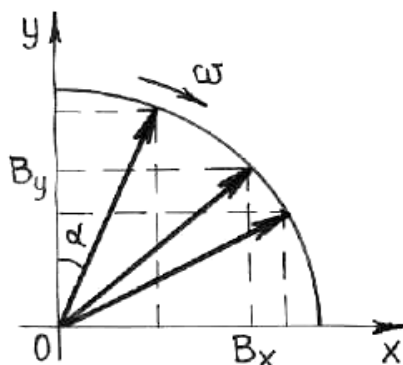


Рис. 3.28

$$B_x = \frac{3}{2} B_m \cos \omega t \quad \text{и} \quad B_y = \frac{3}{2} B_m \sin \omega t.$$

Отсюда следует, что вектор B будет вращаться против часовой стрелки, так как при $t = 0$, $B_y = 0$ вектор B займет горизонтальное положение. С увеличением t горизонтальная проекция B_x уменьшится, а вертикальная B_y увеличится, т.е. вектор B повернется против часовой стрелки.

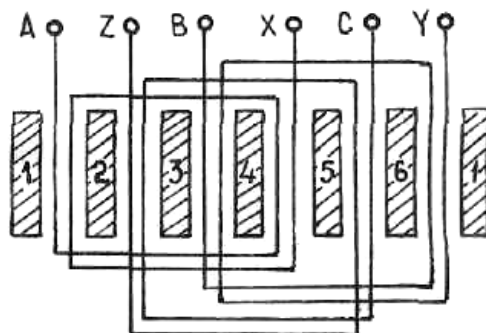


Рис. 3.29

Изменением последовательности фаз пользуются для изменения направления вращения роторов трехфазных двигателей, т.е. реверсирования двигателей.

3.6.2. Частота вращения магнитного поля

На рис. 3.29 показано, что при размещении трехфазной обмотки двигателя (трех катушек) в шести пазах (A, Z, B, X, C, Y) на внутренней поверхности статора ось магнитного потока повернется за половину периода переменного тока на полюборота, а за полный период – на один оборот. Тогда частоту вращения магнитного потока n_1 можно представить так:

$$n_1 = 60 \frac{1}{T} = 60 f = 3000 \text{ об/мин.}$$

В этом случае обмотка статора создает магнитное поле с одной парой полюсов. Такая обмотка называется двухполюсной.

Если обмотка статора состоит из шести катушек, уложенных в двенадцати пазах, то в результате построений, аналогичных для двухполюсной обмотки, можно получить, что ось магнитного потока за полпериода повернется на четверть оборота, а за полный период – на полюборота. Вместо двух полюсов при трех обмотках поле статора теперь имеет четыре полюса (две пары полюсов). Частота вращения магнитного поля статора в этом случае равна

$$\frac{0,5}{T} 60 = \frac{60 f}{2} = 1500 \text{ об/мин.}$$

Увеличивая число пазов и обмоток и производя аналогичные рассуждения, можно сделать вывод, что частота вращения магнитного поля в общем случае при p парах полюсов равна

$$n = \frac{60 f}{p} \text{ (об/мин).}$$

Из данной формулы видно, что с увеличением числа пар полюсов частота вращения поля статора уменьшается (табл. 3.1).

Вопросы для самоконтроля

1. Поясните устройство и назначение основных частей трехфазного асинхронного двигателя.
2. Объясните принцип работы асинхронного двигателя.
3. Изобразите графики изменения токов и магнитного потока в трехфазной обмотке статора асинхронного двигателя.
4. В каком случае и почему изменяется направление вращения поля статора?

3.7. СКОЛЬЖЕНИЕ

3.7.1. Основные сведения и определения

Из принципа действия асинхронного двигателя следует, что ротор двигателя вращается в ту же сторону, что и магнитное поле, с частотой, несколько меньшей частоты вращения поля, так как только при этом условии в обмотке ротора будут индуцироваться ЭДС и токи, и на ротор будет действовать вращающий момент.

Обозначим частоту вращения поля через n_1 , а частоту вращения ротора через n_2 . Тогда разность $n_1 - n_2$, называемая частотой скольжения, будет представлять собой частоту ротора относительно поля, а отношение частоты скольжения к частоте поля, выраженное в процентах, называют скольжением S :

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} 100 \%. \quad (3.16)$$

Для асинхронного двигателя справедливо, что $0 < S \leq 1$. Характерными значениями скольжения являются:

1. Режим короткого замыкания, когда скольжение $S = 1$ при $n_2 = 0$. Этот режим возникает всякий раз при пуске двигателя или когда ротор двигателя останавливается из-за чрезмерно большого момента сопротивления на его валу ($M_c > M$).

2. Номинальный режим, когда $S = (2-10 \%)$. Со скольжением $S = 0$ двигатель не работает, так как при этом частота вращения ротора равна частоте вращения поля статора, а магнитное поле статора не пересекает обмотку ротора и ток в ней равен нулю.

Чтобы преодолеть момент сопротивления, ротор двигателя должен вращаться с некоторым скольжением, при котором создается необходимый вращающий момент.

Если ротор вращается относительно поля статора с частотой скольжения n_s , то частота тока в обмотке ротора f_2 будет

$$f_2 = \frac{P n_s}{60} = \frac{P(n_1 - n_2)}{60} \frac{n_1}{n_1} = \frac{P n_1}{60} \frac{n_1 - n_2}{n_1} = f_1 S. \quad (3.17)$$

Например, если $f_1 = 50$ Гц, $S = 0,05$, то $f_2 = 2,5$ Гц. Отсюда видно, что частота тока в обмотке ротора мала. Следовательно, частота вращения поля ротора относительно ротора также мала и определяется выражением

$$n_s = \frac{60 f_2}{P}. \quad (3.18)$$

Частота вращения ротора асинхронного двигателя в об/мин согласно (3.17)

$$n_2 = n_1(1 - S) = [(f_1 60) / P](1 - S). \quad (3.19)$$

При изменениях нагрузки на валу двигателя частота вращения изменится пропорционально $(1 - S)$.

3.7.2. ЭДС обмоток статора и ротора

ЭДС обмотки статора E_1 наводится вращающимся магнитным потоком. По аналогии с трансформатором можно написать, что ЭДС фазы обмотки статора определяется формулой

$$E_1 = 4,44 k_{обм1} W_1 f_1 \Phi_m,$$

где W — число витков обмотки статора;
 $k_{обм1}$ — обмоточный коэффициент.

Так же по аналогии с трансформатором можно написать выражение для ЭДС неподвижного ротора

$$E_2 = 4,44 k_{обм2} W_2 f_2 \Phi_m.$$

Учитывая, что в подвижном роторе $f_2 = f_1 S$, получаем:

$$E_{2S} = 4,44 k_{обм2} W_2 S f_1 \Phi_m. \quad (3.21)$$

Пропорциональной скольжению S оказывается и ЭДС в цепи ротора. Тогда, используя равенство (3.17), находим связь между ЭДС вращающегося и неподвижного роторов:

$$E_{2S} = S E_2. \quad (3.22)$$

Легко показать, что связь между индуктивными сопротивлениями неподвижного ротора X_2 и вращающегося ротора X_{2S} аналогична (3.22): для вращающегося ротора $X_{2S} = \omega_2 L_2 = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi S f_1 L_2$, а для неподвижного $X_2 = 2\pi f_1 L_2$, т.е.

$$X_{2S} = S X_2. \quad (3.23)$$

3.7.3. Уравнение электрического состояния

По аналогии с трансформатором запишем уравнения по второму закону Кирхгофа для обмоток статора и ротора. Для статора

$$U_1 = E_1 + R_1 I_1 + j X_1 I_1 \quad (3.24)$$

и для вращающегося ротора

$$\begin{aligned} S E_2' &= R_2' I_2' + j S X_2' I_2'; \\ E_2' &= I_2' \frac{R_2'}{S} + j X_2' I_2', \end{aligned} \quad (3.25)$$

где E_2', I_2', R_2' и X_2' – параметры ротора, приведенные к числу витков статора; $S E_2'$ и $j S X_2' I_2'$ – соответственно ЭДС ротора и напряжение рассеяния у вращающегося ротора.

Сравнивая между собой уравнение для вторичной обмотки трансформатора $E'_2 = Z'_H I'_2 + R'_2 I'_2 + jX'_2 I'_2$ с уравнением (3.25), можно видеть несоответствие между ними по количеству слагаемых. Преобразуем выражение R'_2 / S :

$$\frac{R'_2}{S} = R'_2 + R'_2 \frac{1-S}{S}. \quad (3.26)$$

Тогда уравнение (3.25) примет вид

$$E'_2 = R'_2 \frac{1-S}{S} I'_2 + R'_2 I'_2 + jX'_2 I'_2. \quad (3.27)$$

Из сравнения уравнений трансформатора и (3.27) видно, что слагаемое $(I'_2)^2 R'_2 (1-S) / S$ будет выражать механическую мощность на валу двигателя.

3.8. СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ И ТОК РОТОРА

Схема замещения двигателя будет иметь вид, аналогичный схеме замещения трансформатора, в которой Z_H – сопротивление $R'_2 (1-S) / S$.

В этой схеме рассеиваемая электрическая мощность $(I'_2)^2 R'_2 (1-S) / S$ равна мощности на валу двигателя, т. е. $P_{\text{мех}} = M \omega_p = R'_2 \frac{1-S}{S} (I'_2)^2$,

где ω_p – угловая частота ротора.

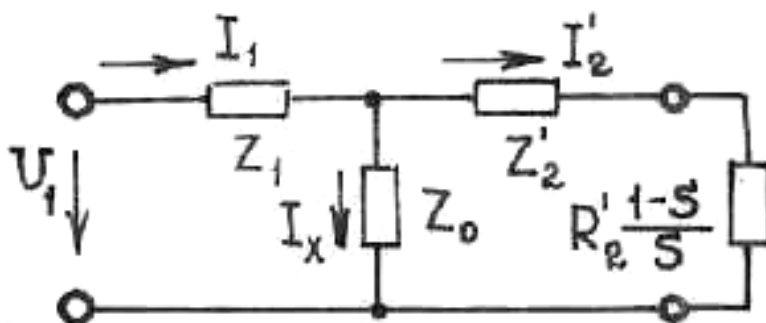


Рис. 3.30

Векторная диаграмма фазы двигателя будет аналогична векторной диаграмме фазы трансформатора.

По схеме замещения (рис. 3.30), если пренебречь током холостого хода, можно определить ток I_1' , потребляемый двигателем, а, следовательно, и приведенный ток ротора

$$I_1 = I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + \frac{R_2'}{S})^2 + (X_1 + X_2')^2}} = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + \frac{R_2'}{S})^2 + (X_1 + X_2')^2}}.$$

Учитывая, что токи ротора и статора связаны между собой, можно сделать вывод: ток статора I_1 также зависит от скольжения и имеет максимальное значение в момент пуска. По этой причине у короткозамкнутых двигателей пусковой ток в 5–7 раз больше номинального, что затрудняет их включение в маломощные сети.

От скольжения зависит и коэффициент мощности цепи ротора двигателя $\cos \psi_2$:

$$\cos \psi_2 = \frac{R_2'}{Z_2} = \frac{R_2'}{\sqrt{(R_2')^2 + (SX_2')^2}} = \frac{R_2'}{\sqrt{(R_2'/S)^2 + (X_2')^2}}.$$

3.9. ПОТЕРИ И КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Рассмотрим асинхронный двигатель, на валу которого имеется нагрузка и обмотка статора которого потребляет из сети электроэнергию мощностью $P_1 = m_1 U_1 \cos \phi_1$. На рис. 3.31 изображена полоса, ширина которой численно соответствует этой мощности. При токе статора I_1 происходит потеря мощности в проводах обмотки статора (нагрев) – электрические потери

$$P_{\text{ппр.1}} = m_1 I_1^2 R_1.$$

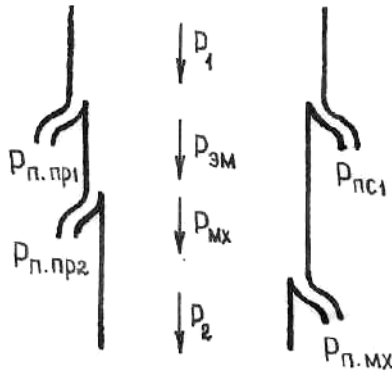


Рис. 3.31

Созданный ток магнитный поток обуславливает потери мощности в стали статора P_{nc1} – магнитные потери. Все эти потери компенсируются источником электроэнергии за счет мощности P_1 .

Оставшаяся часть электрической мощности посредством вращающегося магнитного потока передается со статора на ротор:

$$P_{эм} = P_1 - P_{п.пр1} - P_{nc1}.$$

Электромагнитная мощность $P_{эм}$ определяется током и ЭДС ротора. Ток в роторе обуславливает также потери мощности на нагрев его обмоток

$$P_{п.пр2} = m_1 (I_2')^2 R_2' \quad (3.30)$$

Так как частота вращения n_2 мало отличается от n_1 , потери в стали ротора будут незначительными и ими можно пренебречь.

Оставшаяся часть электромагнитной мощности преобразуется в механическую мощность $P_{мех}$, под действием которой ротор двигателя вращается. При вращении ротора возникают механические потери $P_{п.мех}$ (трение в подшипниках, потери на вентиляцию).

Таким образом, полезная механическая мощность на валу двигателя

$$P_2 = P_1 - P_n = P_1 - (P_{п.пр1} + P_{пс1} + P_{п.пр2} + P_{п.мех}).$$

Коэффициент полезного действия (КПД) двигателя

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - P_n}{P_1}. \quad (3.31)$$

Максимального значения КПД двигателя достигает при нагрузке, близкой к номинальной.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое скольжение? Запишите формулу, определяющую скольжение.
2. Какая связь между частотой тока статора и ротора?
3. Определите частоту вращения ротора, если $S = 0,03$, $n_1 = 3000$ об/мин.
4. Запишите формулу ЭДС, наводимую в обмотке статора.
5. То же для неподвижного ротора.
6. То же для подвижного ротора.
7. Нарисуйте и поясните схему замещения асинхронного двигателя.
8. Перечислите и поясните потери в асинхронном двигателе.
9. Запишите формулу для определения КПД асинхронного двигателя.

3.10. ВРАЩАЮЩИЙ МОМЕНТ

3.10.1. Электромагнитный момент

Момент, развиваемый двигателем, можно определить из формулы

$$M = P_{\text{эм}} / \omega_1 = 60 P_{\text{эм}} / (2\pi n_1) = p P_{\text{эм}} / (2\pi f_1),$$

где $\omega_1 = 2\pi n_1 / 60 = 2\pi f_1 / p$.

Электромагнитная мощность, поступающая на ротор:

$$P_{\text{эм}} = m_2 E_2 I_2 \cos \psi_2 = m_1 E_2' I_2' \cos \psi_2.$$

Так как $E_2' = E_1 = 4,44 k_{\text{обм}} W_1 f_1 \Phi$, получим, что

$$P_{\text{эм}} = m_1 4,44 k_{\text{обм}} W_1 f_1 \Phi I_2' \cos \psi_2;$$

$$M = [4,44 k_{\text{обм}} m_1 p W_1 / (2\pi)] \Phi I_2' \cos \psi_2.$$

Обозначив $4,44 k_{\text{обм}} m_1 p W_1 / (2\pi) = C_M$, (где C_M – постоянный коэффициент, зависящий от конструктивных данных машины), найдем,

что электромагнитный момент зависит от магнитного потока и активной составляющей тока в роторе:

$$M = C_M \Phi I_2' \cos \psi_2. \quad (3.32)$$

Поясним физический смысл формулы (3.32) на примере асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. На рис. 3.32 изображена развертка ротора, где кружками показаны поперечные сечения стержней. Вращающийся магнитный поток (кривая $B_{рез}$), пересекая проводники обмотки ротора, индуцирует в них переменную синусоидальную ЭДС, мгновенное значение которой $e = B_{рез} l v$. Следовательно, кривая распределения индукции $B_{рез}$ вдоль окружности ротора представляет собой в другом масштабе кривую распределения мгновенных значений ЭДС в стержнях. Направление этих ЭДС, определенное по правилу правой руки, показано крестиками и точками ниже сечений стержней. Мгновенное значение тока i в стержнях также изображается синусоидой, сдвинутой относительно кривой ЭДС e на угол ψ_2 . Направление тока в них отмечено крестиками и точками внутри поперечного сечения стержней.

Ток ротора, взаимодействуя с магнитным потоком, вызывает появление электромагнитных сил. При этом на каждый проводник действует усилие $f = B_{рез} l i$. Распределение этих усилий по стержням представлено кривой f .

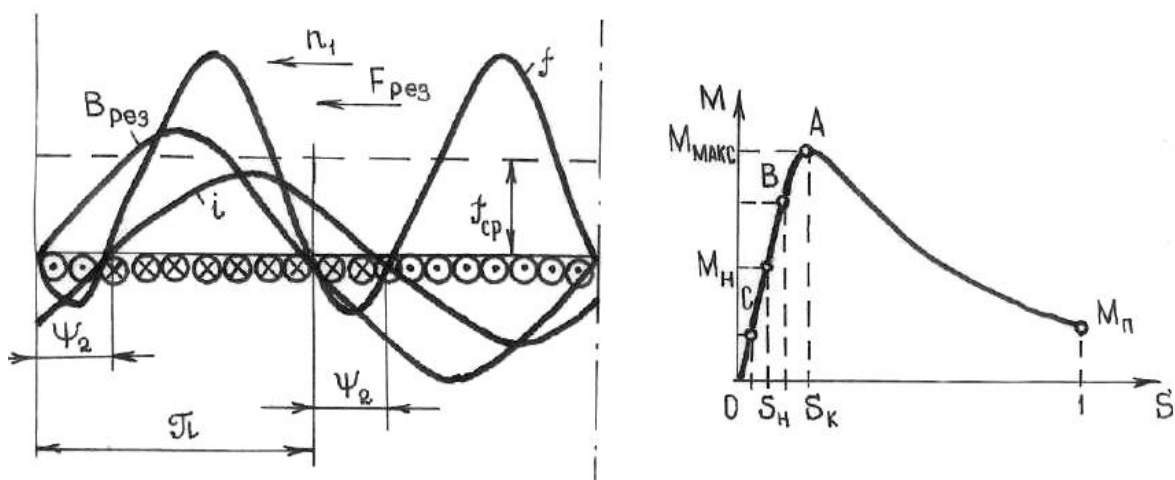


Рис. 3.32

Легко заметить, что к проводникам, лежащим на дуге $\pi - \psi_2$, приложены силы, увлекающие ротор за вращающимся магнитным потоком, а на дуге ψ_2 – тормозящие силы. Поэтому при неизменной величине тока I_2 , величина результирующего усилия $F_{рез}$, а следовательно, и вращающий момент M будет тем меньше, чем больше угол ψ_2 . В пределе при $\psi_2 = 90^\circ$ моменты $M = 0$, так как на половину проводников действует усилие, направленное в одну сторону, а на другую половину – такое же усилие, направленное в противоположную сторону. Формулой (3.32) удобно пользоваться при качественном анализе режимов работы двигателя. Однако входящие в формулу (3.32) величины (I_2' , Φ и $\cos\psi_2$) не связаны непосредственно с напряжением сети и режимом работы двигателя. Поэтому далее будет получена другая формула для момента M , позволяющая определить влияние на него различных параметров асинхронного двигателя.

3.10.2. Зависимость вращающего момента от скольжения

Для получения прямой зависимости электромагнитного момента от скольжения воспользуемся рис. 4.31. Из этого рисунка видно, что мощность, затраченная на нагрев обмотки ротора, есть разность электромагнитной $P_{эм}$ и механической $P_{мех}$ мощностей:

$$P_{п.пр2} = P_{эм} - P_{мех} = M(\omega_1 - \omega_2) = M\omega_1(\omega_1 - \omega_2)/\omega_1. \quad (3.33)$$

Учитывая (3.30), получим:

$$M = \frac{P_{п.пр2}}{(\omega_1 - \omega_2)\omega_1/\omega_2} = \frac{m_1 I_2' R_2' / S}{\omega_1}, \quad (3.34)$$

где $S = (\omega_1 - \omega_2)/\omega_2$.

Зная, что $\omega_1 = 2\pi f_1 / p$ и подставляя в формулу (3.34) значение тока I_2' по формуле (3.28), получим:

$$M = \frac{m_1 P \frac{R_2'}{S} U_1^2}{2\pi f_1 \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{S} \right)^2 + (X_1 + X_2')^2 \right]}. \quad (3.35)$$

3.10.3. Механическая характеристика асинхронного двигателя

Выражение момента (3.35) дает возможность построить график зависимости $M = f(S)$, называемый механической характеристикой двигателя (рис. 3.32, б). При построении графика $M = f(S)$ исходят из положения, что все величины, входящие в формулу (3.35), за исключением скольжения S , являются постоянными.

В момент пуска двигателя в ход $n_2 = 0$ и $S = 1$.

Развиваемый при этом пусковой момент

$$M_{\Pi} = \frac{m_1 p U_1^2 R_2'}{2\pi f_1 [(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2]}. \quad (3.36)$$

Под действием пускового момента ротор двигателя приводится во вращение, при этом скольжение S уменьшается до критического значения $S_{кр}$, а момент M увеличивается. При скольжении $S_{кр}$ момент M достигает максимального значения. Величину критического скольжения $S_{кр}$ можно определить, взяв для этого производную от выражения момента (3.35) по S и приравняв ее к нулю, т.е. $dM / dS = 0$. Тогда получим искомое выражение

$$S_{к} = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}. \quad (3.37)$$

Подставим (4.37) в выражение (4.35), получим формулу максимального электромагнитного момента асинхронного двигателя

$$M_{\max} = \frac{m_1 p U_1^2}{4\pi f_1 \left[R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \right]}. \quad (3.38)$$

После достижения моментом максимального значения (3.38) при критическом $S_{кр}$ (3.37) частота вращения ротора продолжает увеличиваться, а момент M начинает уменьшаться. Так будет продолжаться до тех пор, пока M не станет равным сумме противодействующих моментов

$$M = M_0 + M_2, \quad (3.39)$$

где M_0 – момент холостого хода, а M_2 – полезный момент на валу двигателя. Установившийся режим работы двигателя определится точкой на механической характеристике, где M и S будут номинальными, т.е. $M = M_H$ и $S = S_H$. Устойчивая же работа двигателя возможна только при $S < S_H$ (участок ОА). Дело в том, что на этом участке изменение нагрузки на валу двигателя сопровождается соответствующим изменением электромагнитного момента. Например, если двигатель работал в номинальном режиме (M_H, S_H) и произошло увеличение нагрузки M_2 на валу двигателя, то равенство моментов (3.39) нарушится, т.е. $M_H < (M_0 + M_2)$. Частота вращения ротора начнет уменьшаться, а скольжение увеличиваться. Это приведет к увеличению электромагнитного момента M . Момент M будет увеличиваться до тех пор, пока не наступит новое равенство моментов $M'_H = M_0 + M_2$. Режим работы снова будет установившимся, но уже при других значениях момента M и скольжения S (точка В).

При уменьшении M_2 произойдет аналогичный процесс, только при этом частота вращения ротора увеличится, а скольжение S и момент M уменьшатся (точка С).

Работа двигателя будет неустойчивой, если $S \geq S_{кр}$. Например, если $M = M_{\max}$, $S = S_k$ то даже незначительное увеличение M_2 вызовет увеличение S , а, следовательно, уменьшение электромагнитного момента M . Это приведет к дальнейшему увеличению скольжения и т.д. до тех пор, пока скольжение S не станет равным единице. Ротор при $S = 1$ остановится.

Таким образом, для устойчивой работы двигателя необходимо, чтобы номинальный момент был меньше максимального.

3.10.4. Влияние напряжения сети и активного сопротивления обмотки ротора на механическую характеристику

Из формул (3.35), (3.36), (3.38) следует, что электромагнитный момент асинхронного двигателя пропорционален квадрату напряжения сети U_1 , подводимого к обмотке фазы статора ($M \sim U_1^2$). Анализ (3.37) показывает, что критическое скольжение не зависит от напряжения U_1 . Все это позволяет построить механические характеристики асинхронного двигателя $M = f(S)$ для различных значений напряжения $U = U_H, U'_1 < U_H, U''_1 > U_H$ (рис. 3.33), из которых видно, что колебания

напряжения U_1 относительно его номинального значения сопровождаются изменениями максимального $M_{\max}, M'_{\max}, M''_{\max}$ и пускового M_n, M'_n, M''_n моментов, а также скольжения S, S', S'' и частоты вращения ротора. Следовательно, перегрузочная способность двигателя очень чувствительна к колебаниям напряжения сети.

Рассмотрим влияние активного сопротивления обмотки ротора R'_2 на форму механической характеристики асинхронного двигателя. Из (3.38) следует, что максимальный момент $M_{\max}$ не зависит от активного сопротивления R'_2 , критическое скольжение $S_{кр}$ пропорционально R'_2 (3.37). На рис 3.34 изображено несколько механических характеристик $M = f(S)$ асинхронного двигателя для ряда нарастающих значений активного сопротивления ротора $R'_{21} < R'_{22} < R'_{23} < R'_{24}$. Все характеристики имеют одинаковую амплитуду ($M_{\max} = \text{const}$), но разные $S_{кр}$. С увеличением R'_2 до определенного значения (R'_{23}) начальный пусковой момент возрастает до максимального значения $M_{n3} = M_{\max}$; при $R'_2 > R'_{23}$ пусковой момент уменьшается: $M_{n4} < M_{\max}$. При этом скольжение S , соответствующее заданному нагрузочному моменту M_2 , возрастает ($S_1 < S_2 < S_3 < S_4$), а частота вращения ротора уменьшается (3.19).

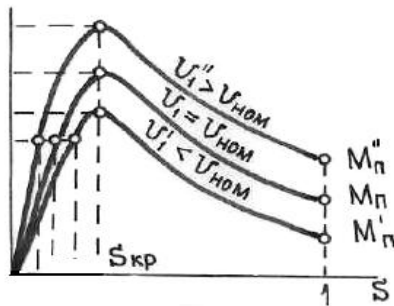


Рис. 3.33

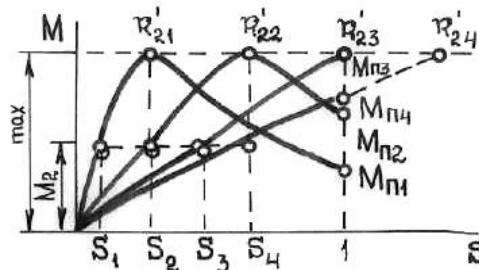


Рис. 3.34

Таким образом, изменяя активное сопротивление в цепи ротора, можно влиять на основные свойства асинхронного двигателя – частоту вращения и начальный пусковой момент.

В асинхронных двигателях с фазным ротором регулирование сопротивления цепи ротора осуществляется введением в цепь ротора добавочного активного сопротивления (рис. 3.23).

3.11. РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Рабочие характеристики асинхронного двигателя представляют собой зависимость частоты вращения ротора n_2 , полезного (нагрузочного) момента на валу M_2 , тока статора I_1 , коэффициента мощности $\cos\varphi_1$ и КПД от полезной мощности двигателя P_2 .

В качестве примера на рис. 3.35 приведены рабочие характеристики трехфазного асинхронного двигателя типа АОЛ12–4: $P_H = 180$ Вт, $U_1 = 220/127$ В, $n_H = 1400$ об/мин.

Зависимость частоты вращения $n_2 = f(P_2)$ имеет вид кривой, слабо наклоненной к оси абсцисс. Это объясняется тем, что трехфазные асинхронные двигатели работают с небольшим скольжением, которое даже при номинальной нагрузке не превышает 0,02–0,08. При этом частота вращения ротора с ростом нагрузки уменьшается пропорционально величине $(1-s)$.

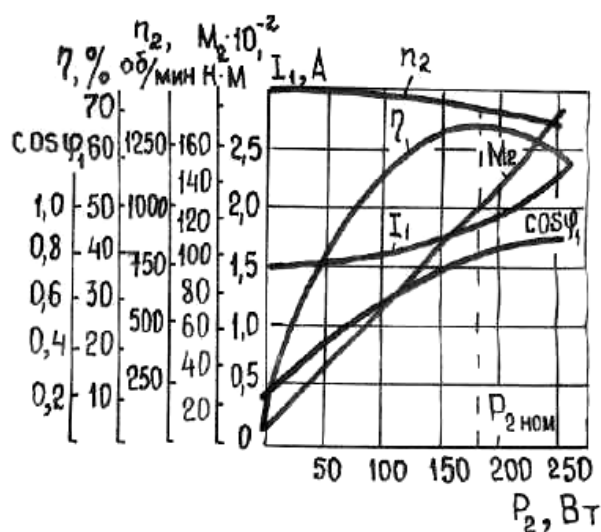


Рис. 3.35

Зависимость полезного момента $M_2 = f(P_2)$ определяется выражением

$$M_2 = P_2 / \omega_2 = 30P_2 / (\pi n_2), \quad \omega_2 = \frac{2\pi n_2}{60}.$$

Так как с ростом P_2 частота вращения n_2 уменьшается, график зависимости $M_2 = f(P_2)$ несколько отклоняется от прямой линии.

Зависимость тока статора $I_1 = f(P_2)$ представляет собой график, не выходящий из начала осей координат, так как двигатель в режиме холостого хода ($P_2 = 0$) потребляет из сети ток холостого хода $I_1 = I_0$. Зависимость коэффициента мощности $\cos\varphi = f(P_2)$ показывает, что $\cos\varphi_2$ изменяется в широком диапазоне. Это можно объяснить тем, что при небольших нагрузках потребляемый из сети ток I_1 имеет значительную реактивную составляющую, и это является причиной низкого коэффициента $\cos\varphi_1 = (0,2-0,3)$. С возрастанием нагрузки увеличивается активная составляющая тока I_1 и $\cos\varphi_1$ повышается до значений $0,6-0,85$. При перегрузках повышается скольжение S и $\cos\varphi_1$ уменьшается. Связано это с тем, что с ростом скольжения S увеличивается частота f_2 и соответственно индуктивное сопротивление рассеяния.

Зависимость КПД $\eta = f(P_2)$ имеет вид, характерный для электрических машин и трансформаторов: при малых нагрузках КПД небольшой, а затем с ростом нагрузки до $P_2 = (0,7-1,0) P_n$ достигает максимального значения. При перегрузках значительно увеличиваются потери (рис. 3.33), что заметно снижает КПД двигателя.

Вопросы для самоконтроля

1. Напишите формулу, отражающую зависимость вращающего момента от активной составляющей тока и объясните ее.
2. Поясните физический смысл зависимости.
3. Что называется механической характеристикой?
4. Поясните особенности режимов работы асинхронного двигателя по механической характеристике.
5. Нарисуйте и поясните рабочие характеристики асинхронного двигателя.

3.12. ПУСК В ХОД АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

3.12.1. Пусковые свойства двигателей

Пусковые свойства асинхронного двигателя оцениваются по:

- 1) величине пускового тока I (или его кратности $I_n / I_{1н}$);
- 2) величине пускового момента (или его кратности M_n / M_n);
- 3) продолжительности и плавности пуска двигателя в ход;
- 4) сложности пусковой операции;
- 5) экономичности и надежности пусковой аппаратуры.

У трехфазных асинхронных двигателей пусковой ток $I_n = (4-7)$, а пусковой момент $M_n = (1-2)$. При пуске двигателей целесообразно уменьшить величину пускового тока и обеспечить возможно больший пусковой момент.

3.12.2. Прямой пуск

Пуск двигателя непосредственным включением на напряжение сети обмотки статора называется прямым пуском. Схема прямого пуска приведена на рис. 3.36.

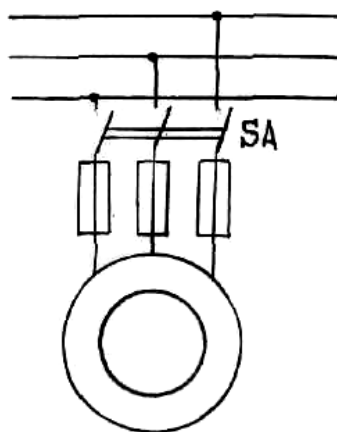


Рис. 3.36

При включении выключателя SA в первый момент скольжение $s = 1$, а ток в роторе (статоре) будет максимальным (3.28) при $s = 1$.

$$I'_{2П} = I_{1П} = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2}}. \quad (3.40)$$

По мере разгона ротора скольжение уменьшается, и поэтому в конце пуска ток значительно меньше, чем в первый момент. Значение пускового момента находится из (3.35) при $S = 1$:

$$M_{\Pi} = \frac{m_1 p U_1^2 R_2^1}{2\pi f_1 [(R_1 + R_2') + (X_1 + X_2')^2]}. \quad (3.41)$$

Приведенные данные показывают, что при прямом пуске в сети, питающей двигатель, возникает бросок тока, который может вызвать временное понижение напряжения, что вредно отражается на работе некоторых приемников энергии, включенных в эту сеть.

Относительно небольшой пусковой момент может привести к тому, что при пуске двигателя под нагрузкой он не сможет преодолеть момент сопротивления и не тронется с места. Поэтому прямой пуск можно применять только в мощных сетях и у двигателей малой и средней мощности (до 50 кВА).

3.12.3. Пуск двигателей с улучшенными пусковыми свойствами

Для улучшения пусковых свойств асинхронных двигателей применяют две обмотки (рис. 3.37): наружную A с малым поперечным сечением и внутреннюю B с большим поперечным сечением. Ток в обеих обмотках распределяется согласно их полному сопротивлению. В момент пуска ротор неподвижен, $S = 1$ и $f_2 = f_1$, поэтому индуктивное сопротивление обмотки B будет большим. Основной ток будет проходить по обмотке A и иметь большое преобладание активной составляющей, что способствует повышению пускового момента.



Рис. 3.37

После разгона S и $f_2 = f_1$ — близки к нулю, полное сопротивление на этот раз будет меньше в обмотке B . В номинальном режиме будет работать в основном обмотка B . Из-за большого сечения потери в ней

будут незначительные. Обмотка *A* называется пусковой, обмотка *B* – рабочей. Однако следует иметь в виду, что стоимость двигателей такой конструкции выше.

3.12.4. Автотрансформаторный пуск

Перед пуском выключатель SA2 (рис. 3.38, *a*) выключается, а затем включается выключатель SA1. При этом в цепь статора включается автотрансформатор, статор питается пониженным напряжением $U_{1П}$. Двигатель разгоняется при пониженном напряжении. В конце разгона включается выключатель SA2 и статор питается номинальным напряжением $U_{1П}$. Если коэффициент трансформации понижающего трансформатора n_1 , тогда ток I на его входе будет в n раз меньше. Кроме того, пусковой ток будет также в n раз меньше.

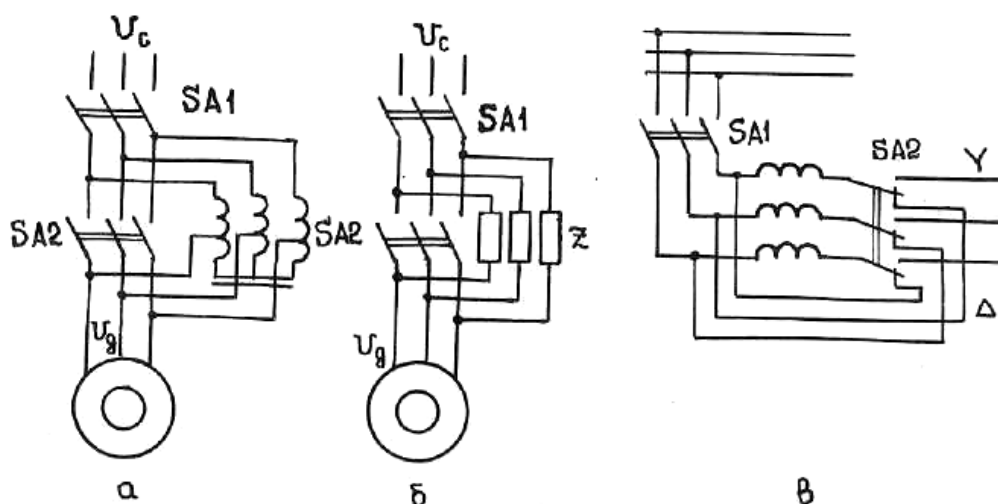


Рис. 3.38

3.12.5. Пуск при включении добавочных резисторов в цепь статор

Пуск двигателя по этой схеме является ступенчатым и осуществляется включением выключателя SA1 при выключенном выключателе SA2. Поэтому на пусковых сопротивлениях Z падает часть напряжения сети и величина пускового тока уменьшается. После разгона двигателя выключается выключатель SA2, который шунтирует пусковые сопротивления, и двигатель выходит на рабочий режим, при котором к обмотке статора приложено все напряжение сети (рис. 3.38, *б*).

3.12.6. Пуск двигателя переключением фазных обмоток статора со звезды на треугольник

Способ применим для двигателей, у которых в рабочем режиме обмотки соединены по схеме треугольника. Перед пуском вначале выключателем SA2 обмотки соединяются по схеме звезда (рис. 3.38, в). При подключении двигателя к сети (включается выключатель SA1) напряжение, приходящееся на каждую фазную обмотку, будет в $\sqrt{3}$ раз меньше, чем при соединении фазных обмоток по схеме треугольника. Пусковой ток и момент двигателя при этом будут уменьшены в три раза.

Действительно, пусковые токи при соединении обмоток статора звездой и треугольником определяются соответственно из выражений

$$\begin{aligned} I_{\Lambda Y} &= I_{\Phi Y} = \frac{U_{\Lambda}}{\sqrt{3} Z_{\Phi}}; \\ I_{\Lambda \Delta} &= \sqrt{3} I_{\Phi \Delta} = \sqrt{3} \frac{U_{\Lambda}}{Z_{\Phi}} \end{aligned} \quad (3.42)$$

Из сопоставления этих выражений

$$I_{\Lambda Y} = \frac{I_{\Lambda \Delta}}{3}. \quad (3.43)$$

После разгона двигателя выключатель SA2 переключается в положение «треугольник».

3.12.7. Пуск двигателя с фазным ротором

Пуск асинхронного двигателя с фазным ротором производится следующим образом. Сопротивление пускового реостата полностью вводится в цепь ротора, обмотка статора двигателя рубильником подключается к сети (рис. 3.23). По мере того как частота вращения двигателя возрастает, ЭДС, индуцируемая в обмотке ротора, уменьшается ввиду уменьшения скорости пересечения проводников этой обмотки полем статора. Поэтому ток в обмотке ротора, а также зависящий от него ток, потребляемый двигателем из сети, уменьшаются. Поэтому сопротивление реостата R_{Π} постепенно можно выводить, но с таким расчетом, чтобы ток двигателя не превышал $(1,5-2) I_H$. Контроль над величиной тока

осуществляется по показаниям амперметра, включаемого в цепь обмотки статора. После того, как пусковой реостат будет полностью выведен и пуск двигателя окончен, кольца ротора с помощью специального приспособления, если оно имеется у двигателя, замыкаются накоротко и щетки поднимаются с колец.

Данный способ пуска связан со значительными потерями в пусковом реостате. Кроме того, двигатель с фазным ротором дороже двигателя с короткозамкнутым ротором.

3.13. РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ

3.13.1. Общие сведения

Частота вращения ротора трехфазного асинхронного двигателя, как известно, определяется выражением

$$n_2 = n_1(1 - S) = \frac{60 f_1}{P}(1 - S).$$

Из этого выражения следует, что частоту асинхронного двигателя можно регулировать (изменять ее величину) тремя способами:

- 1) изменением частоты f_1 напряжения сети;
- 2) изменением величины скольжения S ;
- 3) изменением числа пар полюсов p .

3.13.2. Регулирование изменением частоты

Основано на изменении частоты вращения магнитного поля статора за счет изменения частоты питающего напряжения

$$n_1 = \frac{60 f_1}{P}.$$

Для изменения частоты f_1 могут применяться машинные и полупроводниковые преобразователи.

Недостатками способа являются высокая стоимость преобразователя, низкий КПД установки из-за многократного преобразования энергии.

Следует отметить, что на основе внедрения тиристорных преобразователей в последние годы способ регулирования за счет изменения частоты питающего напряжения получает широкое практическое применение.

3.13.3. Регулирование изменением числа полюсов

Число полюсов асинхронного двигателя зависит от схемы соединения катушек в обмотках каждой фазы статора. Такой способ дает ступенчатую регулировку, так как, например при $f_1 = 50$ Гц и различном p можно получить следующие значения синхронной частоты $n_1 = 60 f_1 / P$: 3000, 1500, 750, 600, 500 об/мин и т.д. и, следовательно, соответствующую частоту вращения ротора $n_1 = n_1(1 - S)$.

Изменение числа пар полюсов достигается применением на статоре нескольких независимых обмоток, каждая из которых характеризуется своим числом p .

3.13.4. Регулирование частоты вращения изменением подводимого напряжения

При уменьшении напряжения U момент двигателя уменьшается пропорционально U^2 . В связи с этим изменяются механические характеристики, уменьшается электромагнитный момент при постоянном моменте сопротивления, увеличивается скольжение и уменьшается частота вращения.

Уменьшить напряжение U можно включением в цепь статора реостатов, автотрансформаторов или регулируемых дросселей.

Данный метод из-за низкого КПД и небольшого диапазона регулирования применяется редко, в основном у двигателей малой мощности.

3.13.5. Регулирование изменением скольжения

Этот способ применим для двигателей с фазным ротором и применяется крайне редко из-за ряда недостатков: дополнительные потери энергии в реостате, малый диапазон регулирования.

Вопросы для самоконтроля

1. Назовите основные пусковые свойства асинхронного двигателя.
2. Поясните понятие «прямой пуск».
3. Поясните устройство ротора асинхронного двигателя с двумя обмотками.
4. В чем заключаются особенности автотрансформаторного пуска?
5. В чем заключаются особенности при включении добавочных резисторов?
6. В чем заключаются особенности при переключении фазных обмоток статора со звезды на треугольник?
7. Поясните особенности пуска двигателя с фазным ротором.

ГЛАВА 4

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

4.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

4.1.1. Общие сведения

Начало практического применения электрических машин было положено русским академиком Б.С. Якоби, который в 1834 г. создал конструкцию электрической машины, явившуюся прототипом современного электродвигателя постоянного тока. С развитием электротехники переменного тока (70–80 гг. XIX в.) удельный вес электрических машин постоянного тока в общем выпуске электрических машин постепенно уменьшается, и в настоящее время преобладающими являются машины переменного тока. Это объясняется более сложной конструкцией машины постоянного тока за счет коллекторно-щеточного узла и, как следствие, их более высокой стоимостью и меньшей надежностью. Вместе с тем у машин постоянного тока есть преимущества и специфические качества, обуславливающие их применение в современной технике. Преимуществом генераторов постоянного тока является простота параллельного включения нескольких генераторов, а также возможность работы генератора совместно с аккумуляторной батареей, что повышает надежность электроснабжения всей системы в целом. Генераторы постоянного тока применяют для питания двигателей постоянного тока, электролитических ванн, зарядки аккумуляторных батарей, в качестве сварочных агрегатов и др.

Важным преимуществом двигателей постоянного тока является то, что они допускают плавное регулирование частоты вращения в широких пределах простыми способами и обладают лучшими пусковыми качествами – развивают большой пусковой момент при относительно небольшом токе. Поэтому их широко используют в качестве тяговых двигателей на электротранспорте, для привода различных установок и механизмов и др. Машины постоянного тока входят в состав авто – мобильного, судового, самолетного электрооборудования. Диапазон мощностей машин постоянного тока достаточно широк: от единиц ватт (микромашин) до 9000 кВт (крупные двигатели для гребных винтов кораблей, прокатных станков). Электрические машины постоянного тока широко применяются в объектах ракетно-артиллерийской техники

в качестве источников электроэнергии, а также для привода различных механизмов. Поэтому изучение принципа действия и устройства, а также рабочих свойств, возможностей применения и основ эксплуатации электрических машин постоянного тока имеет важное значение в общетехнической и профессиональной подготовке квалифицированных специалистов.

4.1.2. Методические указания

При изучении главы основное внимание вначале следует уделить принципу действия генератора и двигателя постоянного тока, предварительно повторив из курса физики закон электромагнитной индукции и закон Ампера. Следует уяснить принцип обратимости применительно к машинам постоянного тока, обратив внимание на роль противодействующего и вращающего моментов, действующей и противодействующей ЭДС.

При изучении устройства машины важно уяснить назначение каждой части машины, особенно коллектора (связав его устройство с принципом действия). Формулы, определяющие ЭДС машины (4.6) и электромагнитный момент (4.7), надо знать на память.

Явление реакции якоря и коммутацию рекомендуется рассматривать совместно, уделив основное внимание роли дополнительных полюсов и места расположения щеток в улучшении коммутации.

В параграфах, относящихся к генераторам постоянного тока (4.15–4.19), важно, используя формулы (4.6) и (4.8), понять зависимость свойств генераторов и внешней характеристики от схемы включения обмотки возбуждения. Изучение процесса самовозбуждения генератора следует увязать с условиями самовозбуждения – возможными причинами невозбуждения генератора.

При изучении двигателей постоянного тока (п. 4.21–4.23) важно, используя формулы (4.7), (4.15) и (4.17), понять особенности пуска двигателя в ход, зависимость свойств двигателей и механических характеристик от схемы включения обмотки возбуждения. Следует иметь в виду, что физику работы двигателя при изменении режима работы (нагрузки, магнитного потока, напряжения и др.) можно понять, только уяснив роль противодействующей ЭДС как автоматического регулятора тока в обмотке якоря двигателя. Следует четко уяснить причины «разноса» двигателя. При изучении электрических машин постоянного тока следует обратить внимание на особенности их эксплуатации.

4.2. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

Электрическая машина служит для преобразования подводимой к ней механической энергии в электрическую или обратно электрической энергии в механическую. В соответствии с этим электрическая машина работает: в первом случае – генератором, во втором – электродвигателем. Принцип действия электрической машины базируется на двух основных законах электрических и магнитных явлений, действующих в ней одновременно: законе электромагнитной индукции и законе электромагнитного взаимодействия тока и магнитного поля.

В процессе работы электрической машины в режиме генератора происходит преобразование механической энергии в электрическую. Природа этого процесса объясняется законом электромагнитной индукции: если внешней силой F воздействовать на помещенный в магнитное поле проводник и перемещать его (рис. 4.1, а), например, слева направо перпендикулярно вектору магнитной индукции B магнитного поля, то в проводнике будет наводиться электродвижущая сила (ЭДС):

$$e = B\ell v, \quad (4.1)$$

где B – магнитная индукция, Тл;

ℓ – активная длина проводника, т.е. его части, находящиеся в магнитном поле, м;

v – скорость движения проводника, м/с.

Направление ЭДС можно определить по правилу «правой руки» (рис. 4.2, б). Если концы проводника замкнуты на внешнее сопротивление (потребитель), то под действием ЭДС в проводнике возникнет ток такого же направления. Таким образом, проводник в магнитном поле можно рассматривать в этом случае как элементарный генератор.

При этом в результате взаимодействия тока I с магнитным полем возникает действующая на проводник электромагнитная сила

$$F_{\text{ЭМ}} = B\ell I. \quad (4.2)$$

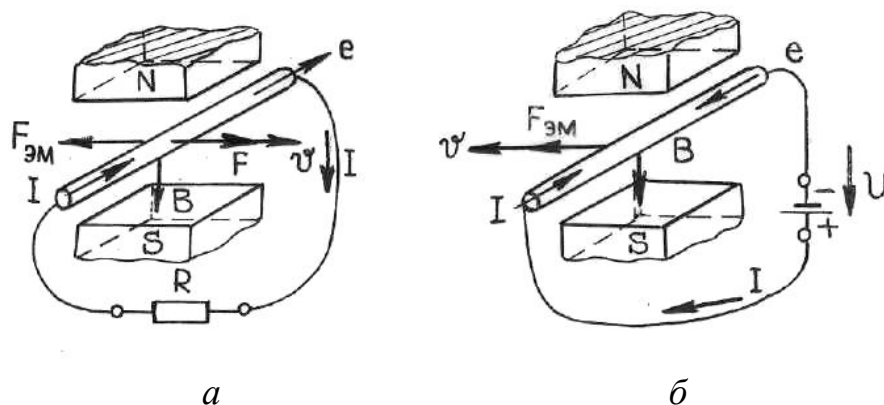


Рис. 4.1

Направление силы $F_{ЭМ}$ можно определить по правилу «левой руки» (рис. 4.2, а). В рассматриваемом случае эта сила направлена справа налево, т.е. противоположно движению проводника. Таким образом, в рассматриваемом элементарном генераторе наводимая ЭДС является действующей, (под ее действием возникает ток в проводнике), а возникающая электро-магнитная сила $F_{ЭМ}$ – противодействующей (тормозящей по отношению к движущей силе F).

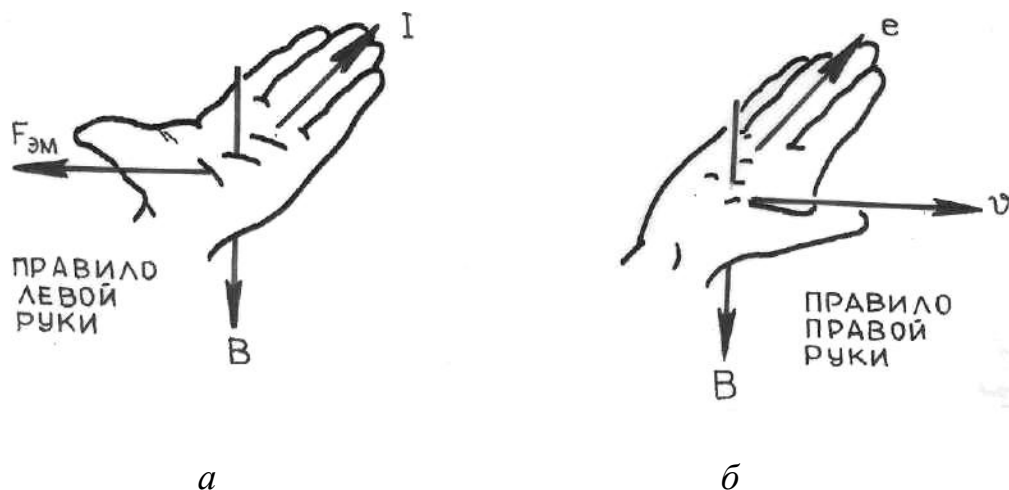


Рис. 4.2

В процессе работы электрической машины в режиме двигателя происходит преобразование электрической энергии в механическую. Природа этого процесса объясняется законом электромагнитного взаимодействия тока и магнитного поля.

Если внешнюю силу F к проводнику не прикладывать, а от внешнего источника электроэнергии подвести к нему напряжение U так, чтобы, ток I в проводнике имел направление, указанное на рис. 4.1, б, то на проводник

будет действовать только электромагнитная сила $F_{ЭМ} = B\ell I$, направление которой определяется правилом «левой руки». Под действием этой силы проводник начнет двигаться в магнитном поле со скоростью v . Следовательно, проводник с током, помещенный в магнитном поле, можно рассматривать как элементарный электродвигатель. В то же время, при движении проводника в магнитном поле в проводнике наводится ЭДС $\mathcal{E} = B\ell v$. В соответствии с правилом «правой руки» эта ЭДС направлена навстречу току проводника, а, следовательно, и навстречу приложенному напряжению U , поэтому ее называют противодействующей ЭДС. Таким образом, возникающая в электродвигателе электромагнитная сила $F_{ЭМ}$ является действующей, а ЭДС – противодействующей.

Рассмотренные явления позволяют сделать выводы: а) для любой электрической машины обязательно наличие электропроводящей среды (проводников) и магнитного поля, имеющих возможность взаимного перемещения; б) при работе электрической машины как в режиме генератора, так и в режиме двигателя одновременно наблюдается наведение ЭДС в проводнике, пересекающем магнитное поле, и возникновение электромагнитной силы, действующей, на проводник, находящийся в магнитном поле, при протекании по нему электрического тока; в) в силу общности явлений электромагнитной индукции и электромагнитных сил любая электрическая машина может работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя. Это свойство электрических машин называется обратимостью. Принцип обратимости электрических машин был впервые открыт русским ученым Э.Х. Ленцем.

Рассмотренные «элементарные» электрические генератор и двигатель отражают лишь принцип использования в них законов электрических и магнитных явлений. Что же касается конструктивного исполнения, то большинство электрических машин построено на принципе вращательного движения их подвижной части.

4.3. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Электрические машины классифицируются по назначению, роду тока, устройству, принципу действия, числу фаз и т.п.

По назначению все электрические машины подразделяются на генераторы и двигатели. Генераторы преобразуют механическую энергию, подводимую к их валу от первичного двигателя, в электрическую энергию. Двигатели осуществляют обратное преобразование: электрическую

энергию преобразуют в механическую энергию, снимаемую с их вала. Применение электрических машин в различных отраслях техники может иметь и другие цели, например, для получения электрических сигналов, пропорциональных частоте вращения (тахогенераторы), углу поворота вала (сельсины). Электрические машины данного предназначения образуют широкий класс специальных электрических машин.

По роду тока электрические машины подразделяются на машины постоянного тока и машины переменного тока. Род тока в этом случае определяется родом тока сети, к которой подключена электрическая машина.

В зависимости от устройства электрические машины могут быть коллекторными и бесколлекторными. Коллекторные машины применяются главным образом для работы на постоянном токе, но ряд коллекторных машин небольшой мощности используется для работы в качестве двигателей переменного тока, и называются они универсальными электрическими машинами.

Бесколлекторные машины в зависимости от принципа действия делят на асинхронные и синхронные. Эти машины работают исключительно на переменном токе. Они могут быть как однофазными, так и многофазными.

4.4. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

4.4.1. Принцип действия генератора

Простейший генератор можно представить в виде токопроводящего витка, вращающегося в магнитном поле (рис. 4.3). Концы витка выведены на две пластины коллектора (медные полукольца). К коллекторным пластинам прижимаются щетки, к которым подключается внешняя цепь.

Принцип работы генератора основан на явлении электромагнитной индукции. Пусть виток приводится во вращение от внешнего приводного двигателя ПД. Проводники активной части витка пересекают магнитное поле и в них по закону электромагнитной индукции наводятся ЭДС e_1 и e_2 , направление которых определяется по правилу «правой руки» (рис. 4.3, б), а их мгновенное значение по формуле

$$e_1 = e_2 = B\ell v, \quad (4.3)$$

где B – магнитная индукция, Тл;

ℓ – длина активной части витка, м;

v – линейная скорость пересечения магнитного поля активной частью витка, м/с.

При вращении витка по направлению движения часовой стрелки в верхнем проводнике, находящемся под северным полюсом, ЭДС направлена от нас, в нижнем, находящемся под южным полюсом, – к нам. По ходу витка ЭДС складываются, результирующая ЭДС $e = e_1 + e_2$. Если внешняя цепь замкнута, то по ней потечет ток, направленный от нижней щетки к потребителю и от него – к верхней щетке. Нижняя щетка оказывается положительным выводом генератора, а верхняя – отрицательным. При повороте витка на 180° проводники из зоны одного полюса переходят в зону другого полюса и направление ЭДС в них изменяется на обратное. Одновременно верхняя коллекторная пластина входит в контакт с нижней щеткой, а нижняя – с верхней, направление тока во внешней цепи не изменится.

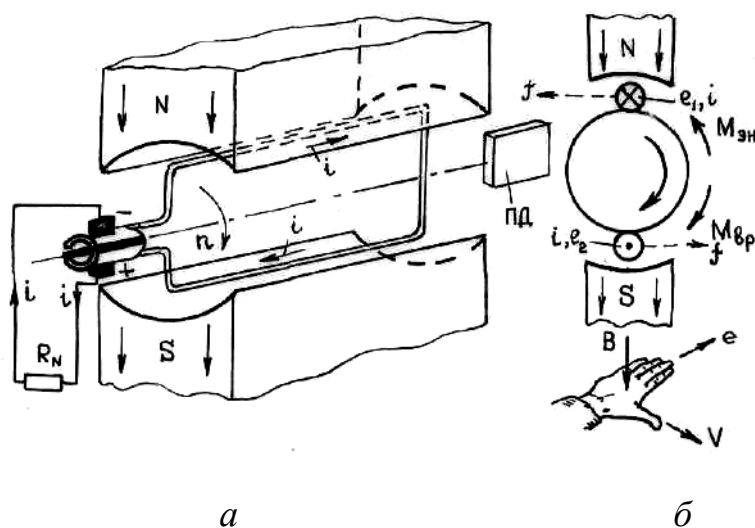


Рис. 4.3

Таким образом, коллекторные пластины не только обеспечивают соединение вращающего витка с внешней цепью, но и выполняют роль переключающего устройства, т.е. являются простейшим механическим выпрямителем. Благодаря такому устройству при переменной ЭДС в витке (рис. 4.4, а) направление тока во внешней цепи остается неизменным, хотя его значение изменяется (рис. 4.4, б).

Пульсацию тока во внешней цепи можно уменьшить, применяя несколько витков, каждый из которых присоединен к соответствующей паре коллекторных пластин. Так, например, при расположении двух витков, сдвинутых в пространстве под углом 90° (рис. 4.5), пульсации ЭДС на щетках, а, следовательно, и тока i во внешней цепи заметно уменьшаются (рис. 4.4, в). При большем количестве витков и соответственно коллекторных пластин пульсации ЭДС на щетках и тока

во внешней цепи становятся еще меньше. Практически уже при 16 витках пульсации становятся незаметными и ток во внешней цепи генератора можно считать постоянным не только по направлению, но и по величине.

4.4.2. Принцип действия двигателя

То же устройство работает в режиме электрического двигателя (рис. 4.6), если к щеткам подвести постоянное напряжение. Под действием напряжения U через щетки, коллекторные пластины и виток потечет ток i . По закону электромагнитной силы (закон Ампера) взаимодействие тока и магнитного поля создает электромагнитную силу. Направление силы определяется правилом «левой руки» (рис. 4.6, б): на верхний проводник действует сила вправо, на нижний – влево. Величина электромагнитных сил определяется по формуле

$$f = Bli. \quad (4.4)$$

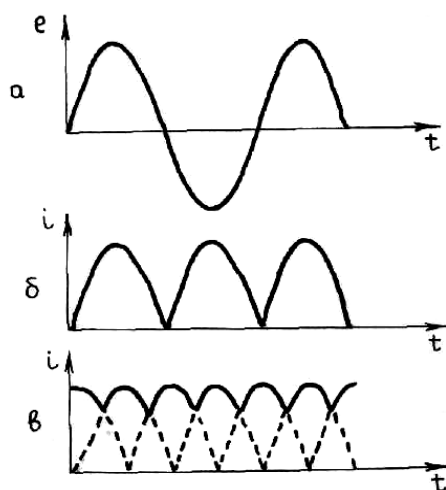


Рис. 4.4

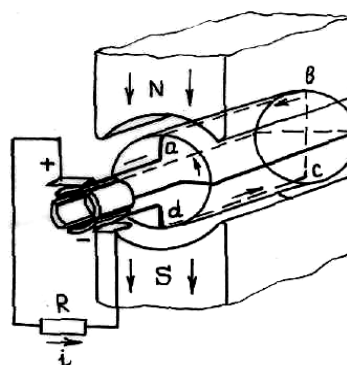


Рис. 4.5

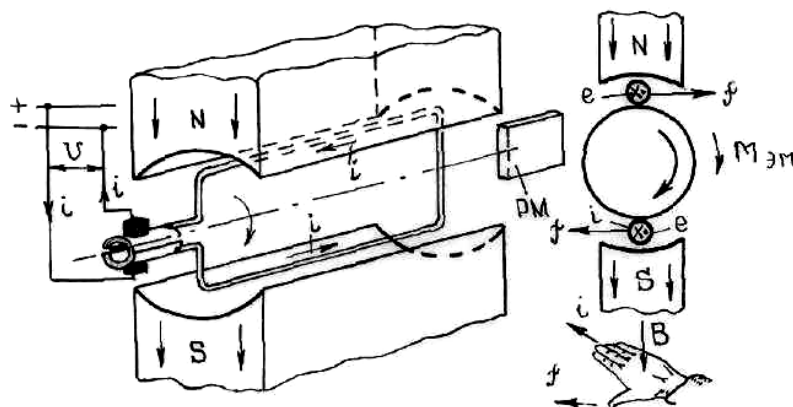


Рис. 4.6

Эта пара сил создает вращающийся электромагнитный момент поворачивающий виток по часовой стрелке. При переходе верхнего проводника в зону южного полюса, а нижнего – в зону северного полюса концы проводников и соединенные с ними коллекторные пластины вступают в контакт со щетками другой полярности. Направление тока в проводниках витка изменяется на противоположное, а направление сил f , момента $M_{ЭМ}$ и тока во внешней цепи не изменяется. Виток непрерывно будет вращаться в магнитном поле и может приводить во вращение вал рабочего механизма (РМ).

Таким образом, коллектор в режиме двигателя не только обеспечивает контакт внешней цепи с витком, но и выполняет функцию механического инвертора, т.е. преобразует постоянный ток во внешней цепи в переменный ток в витке. Для уменьшения пульсации вращающего момента двигателя требуется увеличение числа витков и коллекторных пластин.

Из рассмотренных принципов действия генератора и двигателя постоянного тока можно сделать следующие выводы:

- устройство генератора и двигателя одинаково;
- одна и та же электрическая машина может работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя, т.е. обладает свойством обратимости;
- отличительным конструктивным признаком электрических машин постоянного тока является наличие у них коллектора – механического преобразователя переменного тока в постоянный (в генераторе) и наоборот (в двигателе). Необходимость в таком преобразователе объясняется тем, что в активных проводниках вращающегося витка должен протекать переменный ток, так как только в этом случае в машине происходит непрерывный процесс электромеханического преобразования энергии.

4.4.3. Противодействующий электромагнитный момент и противодействующая ЭДС

При работе машины в режиме генератора по замкнутой внешней цепи и витку протекает ток i , направление которого совпадает с направлением ЭДС e (рис. 4.3, б). Как сказано в п. 4.4.2, ток взаимодействует с магнитным полем полюсов и создает электромагнитный момент $M_{ЭМ}$, направленный в рассматриваемом случае против часовой стрелки.

Так как приложенный к витку вращающий момент приводного двигателя $M_{\text{вр}}$ направлен по часовой стрелке, то возникающий при работе генератора электромагнитный момент называется противодействующим электромагнитным моментом. По существу, возникновение противодействующего электромагнитного момента $M_{\text{ЭМ}}$ в генераторе – это реакция генератора на воздействие внешнего момента $M_{\text{вр}}$, а физическая природа противодействующего электромагнитного момента у генератора та же, что и вращающего электромагнитного момента у двигателя. В установившемся режиме работы генератора между $M_{\text{вр}}$ и $M_{\text{ЭМ}}$ устанавливается равновесие $M_{\text{вр}} = M_{\text{ЭМ}}$.

При работе машины в режиме двигателя проводники витка пересекают магнитное поле и в них наводится ЭДС e (рис. 4.6, б). Ее направление определяется по правилу «правой руки». В рассматриваемом случае она направлена против тока i и, следовательно, навстречу приложенному напряжению сети U и поэтому называется противодействующей ЭДС. Физическая природа противодействующей ЭДС двигателя та же, что и ЭДС генератора. В установившемся режиме работы двигателя между противодействующей ЭДС и устанавливается равновесие и можно считать, что $E \approx U$.

Таким образом, при работе машины постоянного тока в любом режиме во вращающихся проводниках наводится ЭДС E и возникает электромагнитный момент $M_{\text{ЭМ}}$, но роль их в разных режимах различна.

4.5. УСТРОЙСТВО МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

С точки зрения происходящих электромагнитных процессов принято выделять в машине две части: 1) часть, обеспечивающую создание магнитного потока – индуктор и 2) часть, в которой наводится ЭДС – якорь.

С конструкционной точки зрения в машине можно выделить две основные части: 1) неподвижная часть – статор и 2) вращающаяся часть – ротор. В машинах постоянного тока статор является индуктором, а ротор – якорем.

Эскиз машины постоянного тока показан на рис. 4.7, а общий вид с разрезом – на рис. 4.8.

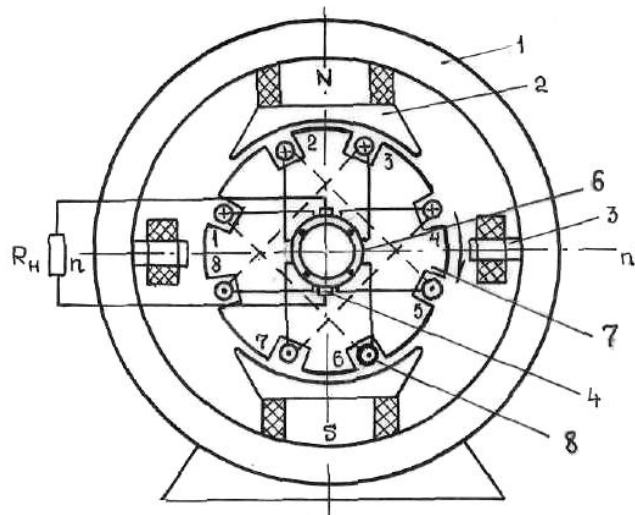


Рис. 4.7

Статор состоит из станины 1, главных полюсов 2, добавочных полюсов 3, щеточного узла 4 и подшипниковых щитов 5. Станина является остовом машины и выполняется обычно в виде цельного полого цилиндра из стали, обладающей большой магнитной проницаемостью. Станина является частью магнитопровода, так как через нее замыкается магнитный поток машины.

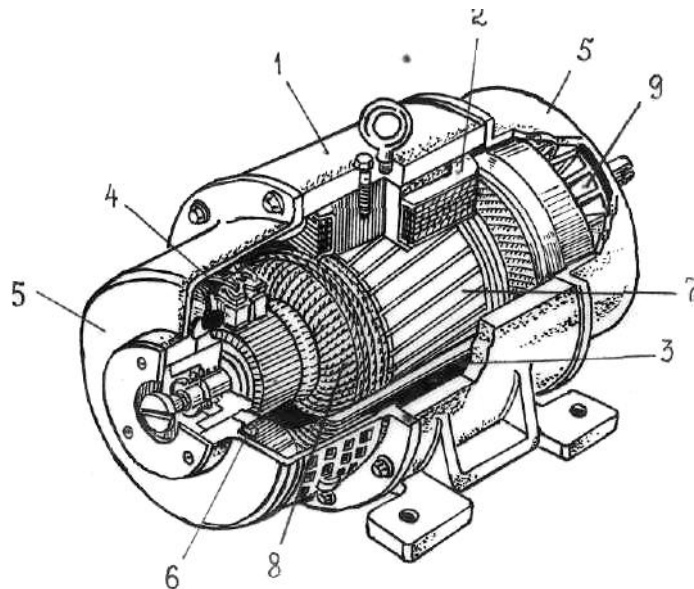


Рис. 4.8. 1 – станина, 2 – главный полюс, 3 – добавочный полюс, 4 – щеточный узел, 5 – подшипниковый щит, 6 – коллектор, 7 – сердечник якоря, 8 – обмотка якоря, 9 – вентилятор

Главные полюсы предназначены для создания в машине основного магнитного потока. Главный полюс (рис. 4.9) состоит из сердечника 1, полюсного наконечника 2 и полюсной катушки 3. Сердечники набирают

из отдельных листов электротехнической стали. При помощи полюсного наконечника достигается необходимое распределение магнитного поля в зазоре между полюсами и якорем. Полюсная катушка изготавливается из медного или алюминиевого обмоточного провода. Между собой полюсные катушки соединяются последовательно. В совокупности полюсные катушки представляют собой обмотку возбуждения машины. При протекании по ней тока возбуждения в машине возникает основное магнитное поле. Число главных полюсов всегда четное, причем северные и южные полюсы чередуются, что достигается соответствующим подключением полюсных катушек. В маломощных машинах главные полюсы могут изготавливаться из постоянных магнитов.

Кроме главных полюсов в машинах мощностью свыше 1 кВт с целью уменьшения искрения в контакте между щетками и коллектором применяют добавочные полюсы (рис. 4.10). Добавочный полюс состоит из сердечника 1, выполненного из цельной стальной поковки, и полюсной катушки 2, выполненной медным проводом, сечение которого рассчитано на рабочий ток машины, так как катушки добавочных полюсов включаются последовательно с обмоткой якоря. Добавочные полюсы располагают между главными полюсами. Главные и добавочные полюсы крепятся к станине.

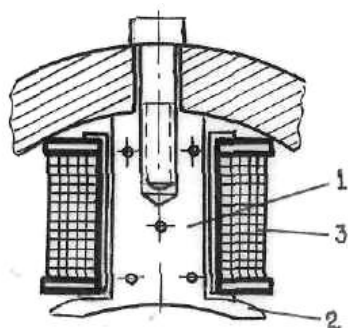


Рис. 4.9

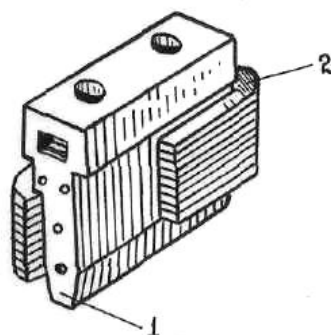


Рис. 4.10

Щеточный узел предназначен для обеспечения скользящего электрического контакта с коллектором и состоит из щеточной траверсы и установленных на ней щеткодержателей. Щеткодержатель (рис. 4.11) состоит из обоймы 4, в которую помещают щетку 3, нажимной пластины 1, передающей давление пружины 2 на щетку. Щетки изготавливают из графита или смеси графита с медью. Щеткодержатель крепят на траверсе зажимом 5. Траверса выполнена из изоляционного материала и крепится к подшипниковому щиту. Для уменьшения искрения щеток траверса вместе со щеткодержателями может проворачиваться относительно поверхности коллектора.

Подшипниковые щиты: передний (со стороны коллектора) и задний. Передний щит имеет окна для доступа к щеточному узлу и коллектору.

Для присоединения машины к внешней электрической сети на ее статоре имеется коробка выводов, где на изоляционной панели сделаны выводы обмоток.

Ротор (якорь) (рис. 4.12, *а*) состоит из сердечника 1, обмотки якоря, коллектора 2 и вала 3.

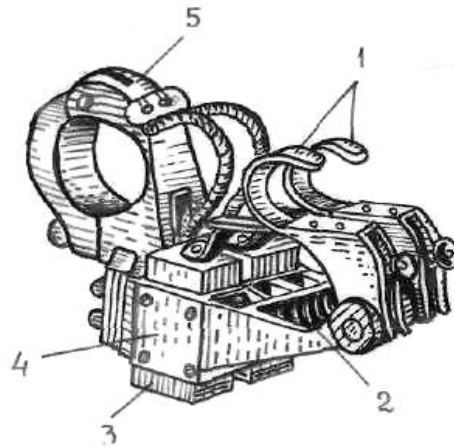


Рис. 4.11

Сердечник якоря собирают из изолированных друг от друга пластин электротехнической стали (рис. 4.12, *б*). Такая конструкция сердечника якоря позволяет уменьшить потери от действия вихревых токов. На внешней поверхности пластин выштампованы пазы. В собранном сердечнике якоря все пазы отдельных листов совпадают и в них укладывается обмотка якоря.

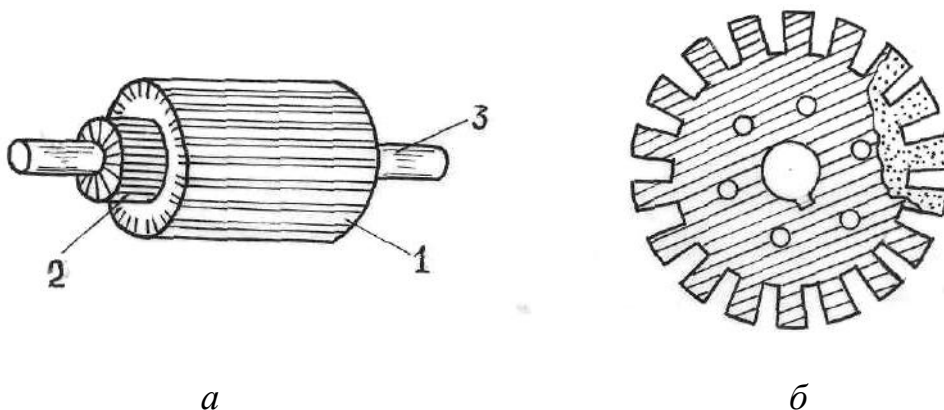


Рис. 4.12

Обмотка якоря. В обмотке якоря генератора наводится ЭДС, необходимая для обеспечения протекания тока во внешней цепи. В обмотке якоря двигателя течет ток, потребляемый им из сети, а в результате

воздействия этого тока с магнитным полем индуктора возникает вращающий момент двигателя. Обмотка якоря выполняется из медного провода в виде отдельных секций, которые укладываются в пазы сердечника якоря. Концы секций припаиваются к пластинам коллектора и образуют замкнутую обмотку якоря.

Коллектор (рис. 4.13) состоит из отдельных изолированных друг от друга и вала якоря клинообразных пластин 1. Для обеспечения прочности крепления нижней части коллекторной пластины придается форма «ласточкина хвоста». Набор коллекторных пластин и изоляционных миканитовых прокладок между ними скрепляется пластмассой 2. Верхняя часть коллекторной пластины имеет выступ 3, называемый петушком, к которому припаивают концы секций обмотки якоря.

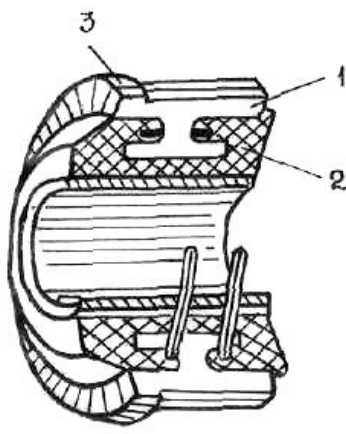


Рис. 4.13

Вал якоря предназначен для установки на нем сердечника с обмоткой якоря и коллектора, а при необходимости и вентилятора 7 (рис. 4.8). Якорь вращается в подшипниках, впрессованных в подшипниковые узлы.

4.6. МАГНИТНАЯ ЦЕПЬ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

На рис. 4.14 в поперечном разрезе машины показаны линии магнитного потока, созданного магнитодвижущей силой обмотки возбуждения главных полюсов.

Весь поток Φ_{Π} полюса делится на две неравные части. Большая часть потока $\Phi_{\text{О}}$ – **основной магнитный поток** – проникает через воздушный зазор в якорь, пронизывает обмотку и наводит в ней ЭДС. Меньшая часть потока Φ_{δ} – **поток рассеяния** – замыкается между полюсами и не участвует

в наведении ЭДС. Поток рассеяния учитывается коэффициентом рассеяния основных полюсов k_δ :

$$k_\delta = \frac{\Phi_{\Pi}}{\Phi_0}. \quad (4.5)$$

Для машины постоянного тока $k_\delta = 1,12 \div 1,25$.

Путь, по которому проходят линии основного магнитного потока Φ_0 , образует **магнитную цепь** машины. В зависимости от числа главных полюсов магнитная система может быть двух – (рис. 4.7), четырех – (рис. 4.14), шестиполюсной и т.д.

Вследствие магнитной симметрии отдельные магнитные цепи многополюсной машины одинаковы и магнитные потоки равны между собой. Поэтому при расчете магнитной цепи машины достаточно рассмотреть магнитную цепь одной пары полюсов. В зависимости от магнитной проводимости всю магнитную цепь можно разделить на пять участков: воздушный зазор, зубцовый слой сердечника якоря, сердечник якоря, сердечник полюсов, станина индуктора. Расчет магнитной цепи машины заключается в определении магнитодвижущей силы обмотки возбуждения, необходимой для создания в воздушном зазоре такого магнитного потока, который может навести в обмотке якоря заданную ЭДС.

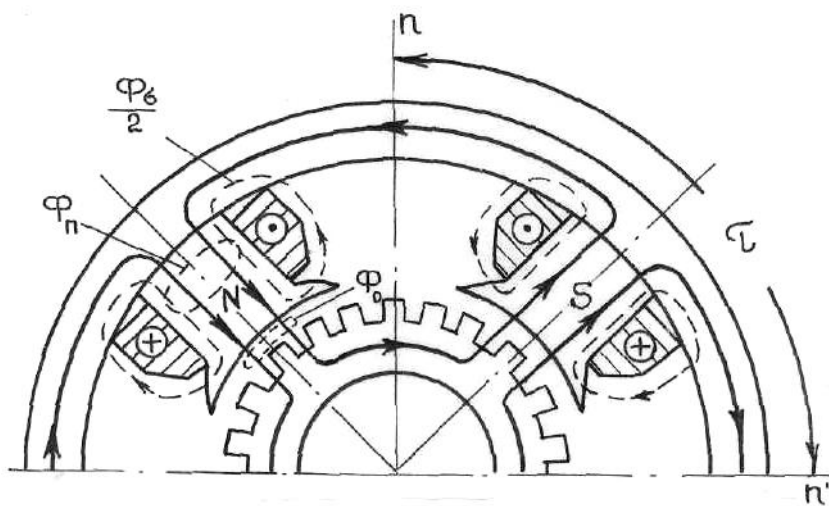


Рис. 4.14

Для увеличения магнитной проводимости магнитную цепь выполняют из электротехнической стали, а воздушный зазор между полюсами и якорем делают минимальным. Для уменьшения потерь от гистерезиса и вихревых токов переманичиваемые части магнитной цепи изготавливаются набором из пластин листовой электротехнической стали.

Линии, проходящие посередине между соседними разноименными полюсами, называют геометрическими нейтралями (рис. 4.7 и 4.14). В точках воздушного зазора, расположенных на линии геометрической нейтрали, при холостом ходе машины индукция магнитного поля B равна нулю. Следовательно, в проводниках обмотки якоря в момент прохождения ими линии геометрической нейтрали в режиме холостого хода машины ЭДС не наводится. Это важное свойство линии геометрической нейтрали. Дуга между соседними линиями геометрических нейтралей называется полюсным делением и обозначается τ (рис. 4.14). Оно выражается в метрах, градусах, радианах, числе пазов якоря и в других удобных для расчета единицах. Линии, проходящие между соседними полюсами через точки воздушного зазора, где индукция магнитного поля равна нулю $B = 0$, называются линиями физической нейтрали. Очевидно, что в режиме холостого хода линии геометрической нейтрали и физической нейтрали совпадают.

4.7. ПОНЯТИЯ ОБ ОБМОТКАХ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

4.7.1. Обмотки возбуждения

Для работы машины постоянного тока необходимо наличие в ней двух обмоток: обмотки возбуждения и обмотки якоря. Первая служит для создания в машине магнитного поля, т.е. для возбуждения, а посредством второй происходит преобразование энергии. Исключение составляют магнитоэлектрические машины постоянного тока, в которых имеется лишь одна якорная обмотка, так как магнитное поле (возбуждение) в этих машинах создается постоянными магнитами.

Обмотки возбуждения состоят из последовательно соединенных между собой полюсных катышек 1, насаженных на сердечники главных полюсов 2 (рис. 4.15). Полюсная катушка изготавливается из медного или алюминиевого обмоточного провода. Обмотки возбуждения подразделяются на параллельные, последовательные и независимые (п. 4.8).

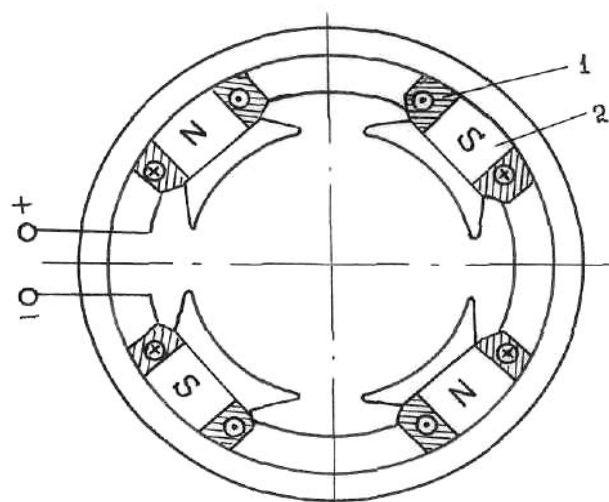


Рис. 4.15

4.7.2. Обмотка якоря

Обмотка якоря машины постоянного тока представляет собой замкнутую систему медных проводников, определенным образом уложенных в пазах на верхней поверхности якоря и присоединенных к пластинам коллектора.

Элементом обмотки якоря является секция, присоединенная к двум коллекторным пластинам (рис. 4.16). Секция состоит из активных сторон (1) и лобовых частей: передней (2) и задней (3), соединяющих эти стороны. Секции обмоток якоря могут быть одновитковыми (рис. 4.16, а) и многовитковыми (рис. 4.16, б). Активные стороны секции укладываются в пазы сердечника якоря. При вращении якоря в каждой из активных сторон секции наводятся ЭДС. В лобовых частях секции ЭДС не наводятся, так как они находятся вне пазов сердечника якоря и не пересекают при вращении якоря линий магнитной индукции. Для того, чтобы ЭДС, наводимые в активных сторонах секции складывались, их располагают в пазах сердечника якоря под соседними полюсами разной полярности (рис. 4.16). Ширина секции при этом должна быть примерно равна полюсному делению. Очевидно, результирующая ЭДС многовитковой секции больше, чем одновитковой. Как указывалось, секции, соединяясь передними лобовыми частями с коллекторными пластинами, образуют замкнутую цепь – обмотку якоря. На рис. 4.7 цифрами 1–8 пронумерованы активные стороны четырех секций, уложенные в пазы сердечника якоря 7. Передние лобовые части секций подсоединены к коллекторным пластинам 6 и изображены на рисунке сплошными линиями. Задние лобовые части секций соединяют активные стороны

соответствующих секций и изображены на рисунке пунктирными линиями. Обмотка якоря, коллектор и щетки образуют главную электрическую цепь машины.

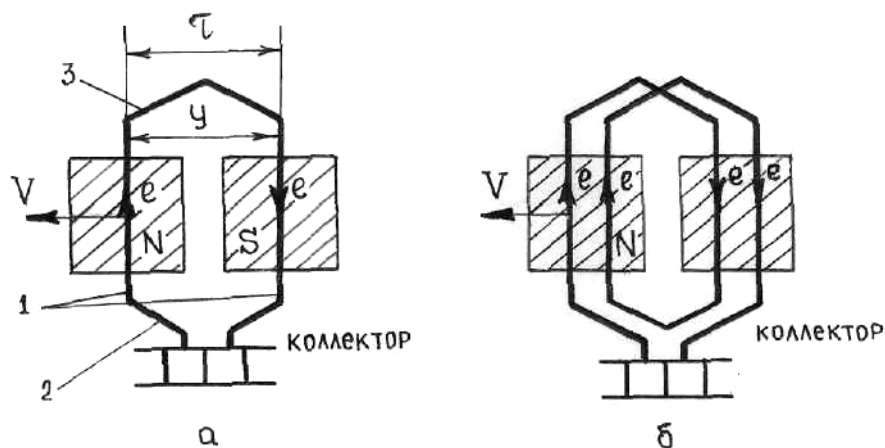


Рис. 4.16

При вращении якоря по часовой стрелке (рис. 4.7) проводники обмотки якоря (активные стороны секций) пересекают магнитное поле полюсов и в них наводится переменная ЭДС: в верхней половине обмотки ЭДС направлены от нас (направление указано крестиком), в нижней – к нам (направление указано точкой). В обмотке якоря ЭДС отдельных проводников алгебраически суммируются. Если двигаться от проводника 1 к проводнику 6 и далее по ходу обмотки, то в проводниках 1–6–3–8 ЭДС имеют одно направление, а в проводниках 5–2–7–4 – противоположное. Таким образом, видно, что обмотка якоря состоит из двух участков, включающих проводники 1–6–3–8 и 5–2–7–4, соединенных параллельно друг другу и называемых параллельными ветвями. Каждая параллельная ветвь содержит равное количество последовательно соединенных секций с одинаковым направлением ЭДС в них. Параллельные ветви якорной обмотки образуют замкнутый контур (рис. 4.17). Поскольку обмотка якоря симметрична, ЭДС одной параллельной ветви равна ЭДС другой ветви и равна сумме ЭДС секций параллельной ветви. Так как ветви соединены параллельно, то ЭДС всей обмотки якоря определяется величиной ЭДС одной параллельной ветви, тогда как величина тока якорной обмотки равна сумме токов всех параллельных ветвей обмотки, т.е. $I_a = i_{a1} + i_{a2}$. Результирующая ЭДС внутри контура замкнутой на себя обмотки якоря равна нулю, так как в этом контуре ЭДС параллельных ветвей равны и действуют навстречу друг другу. Поэтому в контуре обмотки якоря, несмотря на то, что она замкнута, уравнительный ток не возникает.

С обмоткой якоря через коллекторные пластины соединяются щетки, к которым подключается внешняя цепь. Щетки располагаются на коллекторе таким образом, чтобы снимаемая ими ЭДС в режиме холостого хода была максимальной. Это возможно при расположении щеток на коллекторных пластинах, к которым подсоединены проводники обмотки якоря, расположенные на линии физической нейтрали машины, т.е. те проводники, в которых в данный момент времени ЭДС не наводится.

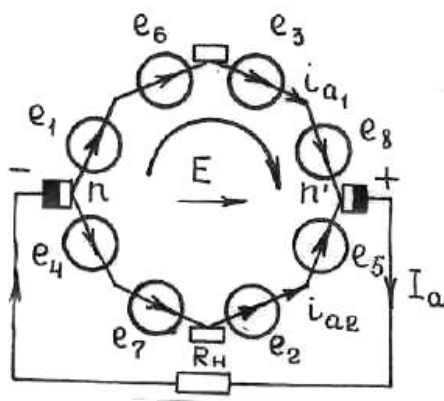


Рис. 4.17

В режиме холостого хода машины физическая нейтраль совпадает с геометрической нейтралью $n - n'$ (рис. 4.6 и 4.17). Кроме того, такое расположение щеток оправдано еще и тем, что при вращении якоря щетки замыкают накоротко через пластины коллектора лишь те секции обмотки якоря, активные части которых проходят в момент замыкания нейтральную зону между полюсами, где магнитная индукция равна нулю, т.е. зону геометрической нейтрали. Следовательно, в секциях обмотки якоря, проходящих линию геометрической нейтрали, в режиме холостого хода ЭДС не наводится. Поэтому замыкание их накоротко в этот момент допустимо. При такой установке щеток говорят, что щетки установлены на линии геометрической нейтрали.

Таким образом, в рассматриваемой машине устанавливаются две щетки (плюсовая и минусовая), которые выводятся на зажимы машины. В обмотке якоря относительно внешней цепи образуются две параллельные ветви, ЭДС которых равны и которые во внешней цепи действуют согласно. При вращении якоря картина распределения ЭДС (рис. 4.17) не изменяется, меняются только номера проводников, входящих в параллельные ветви, т.е. секции как бы перетекают из одной параллельной ветви в другую с одновременным изменением в них направления ЭДС. Разность потенциалов между щетками остается практически постоянной (если пренебречь небольшими пульсациями) и равной ЭДС машины E .

Замкнутую обмотку якоря можно получить двумя способами: соединять на коллекторе проводники обмотки, двигаясь вперед-назад, т.е. возвращаясь назад к соседнему проводнику (рис. 4.18, *а*), или только вперед, обходя проводники якоря, двигаясь все время одним направлением (рис. 4.18, *б*). Очевидно, что в любом случае каждый следующий проводник должен находиться под полюсом противоположной полярности. Это означает, что шаг обмотки близок к полюсному делению τ . В первом случае получаем так называемую петлевую обмотку, во втором – волновую обмотку. В петлевых обмотках при числе полюсов больше двух (4, 6, 8 и т.д.) число параллельных ветвей и щеток равно числу полюсов. В волновых обмотках число параллельных ветвей и щеток вне зависимости от числа полюсов равно двум.

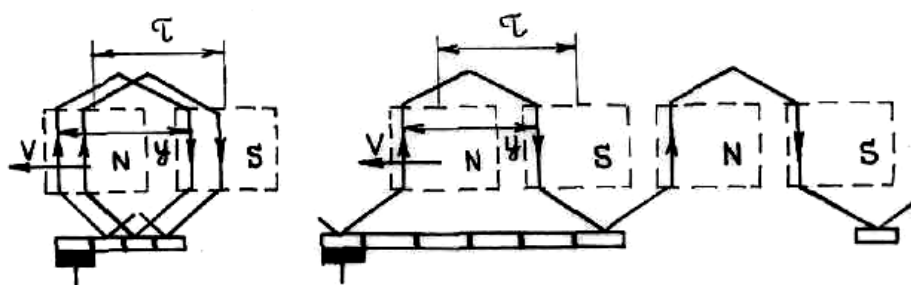


Рис. 4.18

Следует отметить, что число параллельных ветвей в обмотке якоря определяет значение основных параметров машины тока и напряжения. Петлевая обмотка применяется в низковольтных машинах средней и большей мощности, где при малых напряжениях большой ток, а волновая обмотка используется в машинах повышенного напряжения.

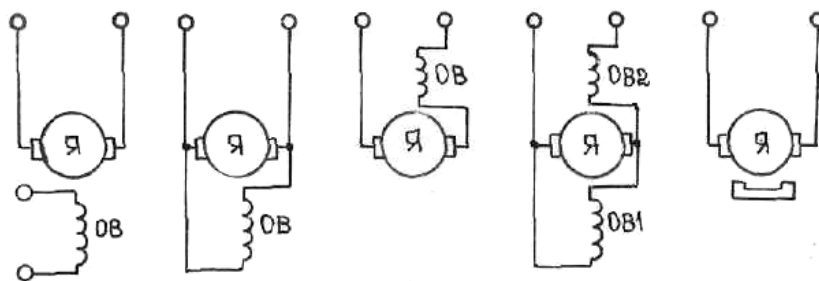


Рис. 4.19

На принципиальных схемах машины постоянного тока обозначаются, как показано на рис. 4.19, где выделяются цепь обмотки якоря с условным изображением щеток и цепь возбуждения.

4.8. СПОСОБЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Для работы электрической машины необходимо наличие магнитного поля. В большинстве машин постоянного тока это поле создается обмоткой возбуждения, питаемой постоянным током. Свойства машин постоянного тока в значительной степени определяются способом включения обмотки возбуждения, т.е. способом возбуждения.

По способам возбуждения машины постоянного тока можно классифицировать следующим образом:

- машины независимого возбуждения, в которых обмотка возбуждения ОВ питается постоянным током от источника, электрически не связанного с обмоткой (рис. 4.19, а);

- машины параллельного (шунтового) возбуждения, в которых обмотка возбуждения и обмотка якоря соединены параллельно (рис. 4.19, б);

- машины последовательного (серийного) возбуждения, в которых обмотка возбуждения и обмотка якоря соединены последовательно (рис. 4.19, в);

- машины смешанного (компаундного) возбуждения, в которых имеются две обмотки возбуждения – параллельная ОВ₁ и ОВ₂ последовательная (рис. 4.19, г). Обе обмотки располагаются на главных полюсах машины; машины с возбуждением постоянными магнитами (рис. 4.19, д).

Все указанные машины (кроме последних) относятся к машинам с электромагнитным возбуждением, так как магнитное поле в них создается электрическим током, проходящим в обмотке возбуждения. Независимые и параллельные обмотки возбуждения выполняются относительно тонким проводом со значительным числом витков. Последовательные обмотки возбуждения выполняются толстым проводом с малым числом витков, так как обтекаются током якоря.

4.9. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

При работе электрической машины (как генератором, так и двигателем) в обмотке ее якоря наводится ЭДС вследствие пересечения активными сторонами обмотки основного магнитного потока машины. Ранее было показано, что ЭДС обмотки якоря определяется ЭДС проводников одной параллельной ветви обмотки якоря (п. 4.7).

Величина этой ЭДС определяется формулой (приводится без вывода)

$$E = C_E \cdot n \cdot \Phi, \quad (4.6)$$

где E – ЭДС, В;

n – частота вращения якоря, об/мин;

Φ – основной магнитный поток, Вб;

$C_E = p \cdot N / 60a$ – постоянная для данной машины величина, определяемая конструктивными параметрами машины и независимая от режима работы (p – число пар главных полюсов; N – число всех проводников обмотки якоря, уложенных в пазы; a – число пар параллельных ветвей обмотки якоря).

Таким образом, ЭДС обмотки якоря машин постоянного тока определяется магнитным потоком главных полюсов и частотой вращения якоря. Следовательно, изменение величины ЭДС можно производить либо путем изменения магнитного потока (тока возбуждения), либо путем изменения частоты вращения.

На величину ЭДС машины влияет положение щеток: при нахождении щеток на геометрической нейтрали ЭДС наибольшая, так как в этом случае в каждой параллельной ветви обмотки якоря все секции имеют одинаковое направление ЭДС (рис. 4.20, а); если же щетки сместить с нейтрали, то в параллельных ветвях окажутся секции с противоположным направлением ЭДС, в результате ЭДС обмотки якоря будет уменьшена (рис. 4.20, б).

Под действием ЭДС генератора E в цепи потребителя электрической энергии протекает ток I (рис. 4.21, а). Этот же ток течет и по обмотке якоря генератора, причем в обмотке якоря ток I_a совпадает по направлению с ЭДС E . Поэтому ЭДС в генераторе называют действующей.

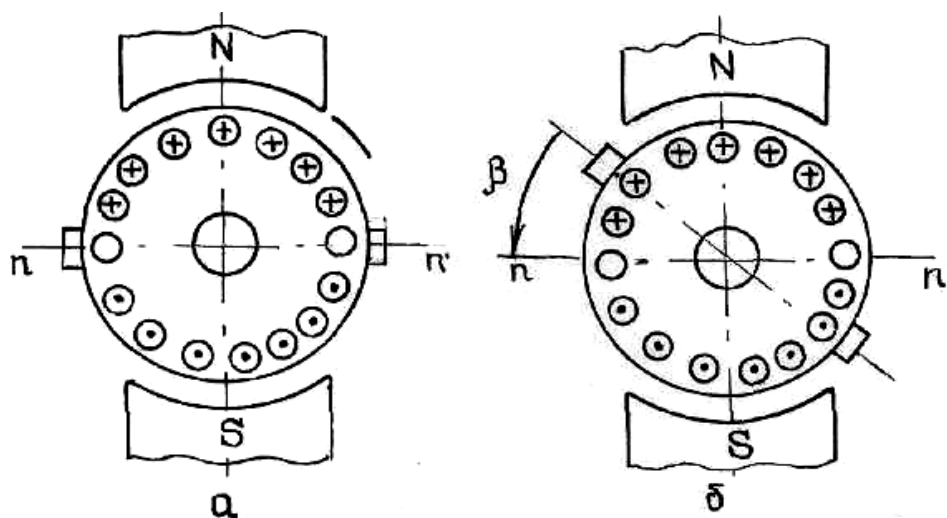


Рис. 4.20

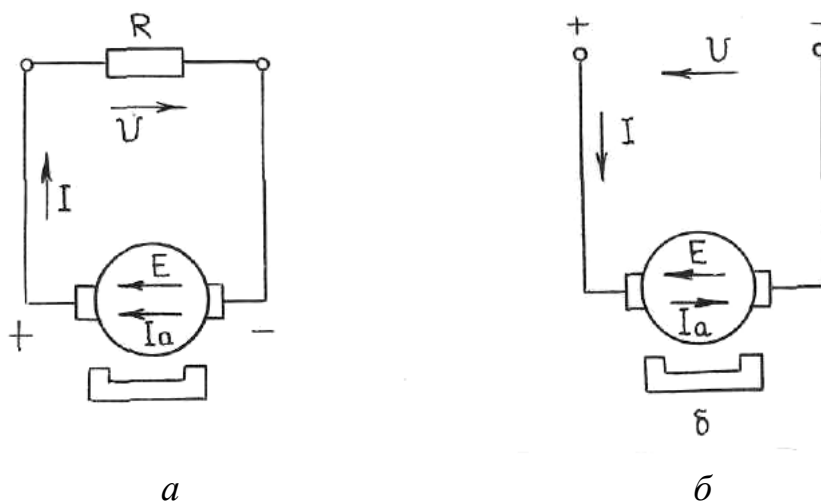


Рис. 4.21

Двигатель в отличие от генератора потребляет из сети ток (рис. 5.21, б). Его величина в общем случае определяется разностью напряжения сети U и наведенной в обмотке якоря ЭДС E , так как она направлена навстречу напряжению сети и $U > E$. Поэтому ток в обмотке якоря I_a и ЭДС E имеют противоположные направления, ввиду чего ЭДС E в двигателе называют противодействующей.

4.10. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОМЕНТ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Электромагнитным моментом машины постоянного тока называется момент, получающийся при взаимодействии тока, проходящего по обмотке якоря, и магнитного потока главных полюсов.

Величина электромагнитного момента машины постоянного тока определяется по формуле (приводится без вывода)

$$M_{ЭМ} = C_M I_a \Phi, \quad (4.7)$$

Где $M_{ЭМ}$ – электромагнитный момент, Н·м;

I_a – ток в обмотке якоря, А;

Φ – основной магнитный поток, Вб;

$C_M = p \cdot N / 2\pi a$ – величина, постоянная для данной машины.

Электромагнитный момент машины при ее работе в двигательном режиме является вращающим, а при генераторном режиме **тормозящим** по отношению к вращающему моменту приводного двигателя.

4.11. РЕАКЦИЯ ЯКОРЯ

В машинах постоянного тока при холостом ходе существует только основной магнитный поток, создаваемый магнитодвижущей силой (МДС) главных полюсов F_0 . Магнитное поле симметрично по отношению к оси сердечников полюсов и под полюсами почти равномерно (рис. 4.22, *а*). Геометрическая нейтраль $n-n'$ – линия, перпендикулярная оси главных полюсов, разделяющая на дуге якоря области северного и южного полюсов, является в этих условиях и физической нейтралью $m-m'$ – линией, проходящей через точки окружности якоря, где и магнитная индукция равна нулю.

Щетки условно показаны опирающимися на якорь (хотя фактически они установлены на коллекторе). Они поставлены на геометрической нейтрали. В данном случае можно сделать вывод о том, что: *а*) при вращении якоря щетки будут замыкать некоторые секции, в которых в момент замыкания отсутствует ЭДС, так как активные стороны этих секций в этот момент расположены на геометрической нейтрали, совпадающей с физической нейтралью; *б*) между щетками расположены секции с одинаковыми направлениями ЭДС, в результате чего суммарная ЭДС машины максимальна.

Если в обмотке якоря имеется ток, то якорь становится электромагнитом, ось которого всегда направлена по оси щеток (рис. 4.22, *б*). По отношению к МДС главных полюсов МДС обмотки якоря F_a направлена перпендикулярно, пока щетки стоят на геометрической нейтрали; в этих условиях магнитное поле якоря является поперечным полем. Следует отметить, что хотя якорь вращается, но пространственное направление МДС обмотки якоря F_a остается неизменным, так как зависит исключительно от положения щеток.

В нагруженной машине постоянного тока действуют две МДС: МДС главных полюсов F_0 и МДС обмотки якоря F_a . Магнитное поле якоря накладывается на магнитное поле главных полюсов, в результате чего образуется результирующее магнитное поле машины (рис. 4.22, *в*), которое будет отличным от магнитного поля машины в режиме холостого хода, показанного на рис. 4.22, *а*.

Воздействие магнитного поля якоря на магнитное поле главных полюсов называется реакцией якоря. Магнитный поток смещается по направлению вращения якоря в генераторном режиме или против направления вращения якоря в двигательном режиме. При этом магнитный поток распределяется несимметрично по отношению к оси главных

полюсов: ослабляется под одним краем и усиливается под другим. Вместе с тем в результате реакции якоря физическая нейтраль $m-m'$ смещается по отношению к геометрической $n-n'$ на угол β и щетки оказываются вне физической нейтрали. Так как магнитное поле якоря перпендикулярно оси главных полюсов, то такая реакция якоря называется поперечной.

Поперечная реакция якоря приводит к следующим нежелательным последствиям:

1. Сдвиг физической нейтрали относительно геометрической приводит к более тяжелым условиям работы щеточного контакта. Это обусловлено тем, что щетки (если они установлены в геометрической нейтрали) будут замыкать накоротко секции со значительной ЭДС (рис. 4.22, в), в результате чего под щетками возникает искрение.

2. Вследствие смещения физической нейтрали в каждой параллельной ветви обмотки якоря между щетками окажутся несколько секций, направление ЭДС которых будет противоположно направлению ЭДС всех остальных секций (рис. 4.22, в), в результате чего суммарная ЭДС машины уменьшается.

3. Искажение магнитного поля под полюсами сопровождается значительным местным повышением магнитной индукции. Мгновенные значения ЭДС, наводимые в секции обмотки якоря при его вращении, пропорциональны этой индукции. Следовательно, искажение магнитного поля может вызвать такое повышение напряжения между соседними пластинами коллектора (свыше 30–50 В), при котором между этими пластинами возможно возникновение весьма опасных устойчивых дуговых разрядов (кругового огня по коллектору).

4. Если магнитная цепь машины насыщена, то ослабление основного магнитного потока под одним краем полюса не компенсируется усилением этого поля под другим краем полюса. В результате ослабляется общее магнитное поле и уменьшается ЭДС обмотки якоря.

5. Часть проводников параллельной ветви, расположенных между щеткой и физической нейтралью, будет находиться в зоне полюса противоположной полярности и создавать тормозной момент, что уменьшает вращающий электромагнитный момент двигателя.

В некоторых машинах щетки сдвигаются вслед за физической нейтралью $m-m'$ (рис. 4.22, г). При этом вместе со щетками смещается и вектор МДС обмотки якоря F_a , так как линия щеток является токоразделом в проводниках обмотки якоря. При этом МДС обмотки якоря помимо поперечной составляющей F_{aq} приобретает и продольную составляющую F_{ad} . Поперечная составляющая F_{aq} создает поперечную

реакцию якоря, действие и последствия которой были рассмотрены выше. Продольная составляющая F_{ad} действует против МДС главных полюсов и, следовательно, ослабляет основной магнитный поток, что приводит к уменьшению ЭДС и напряжения генератора. Такая реакция называется продольной размагничивающей.

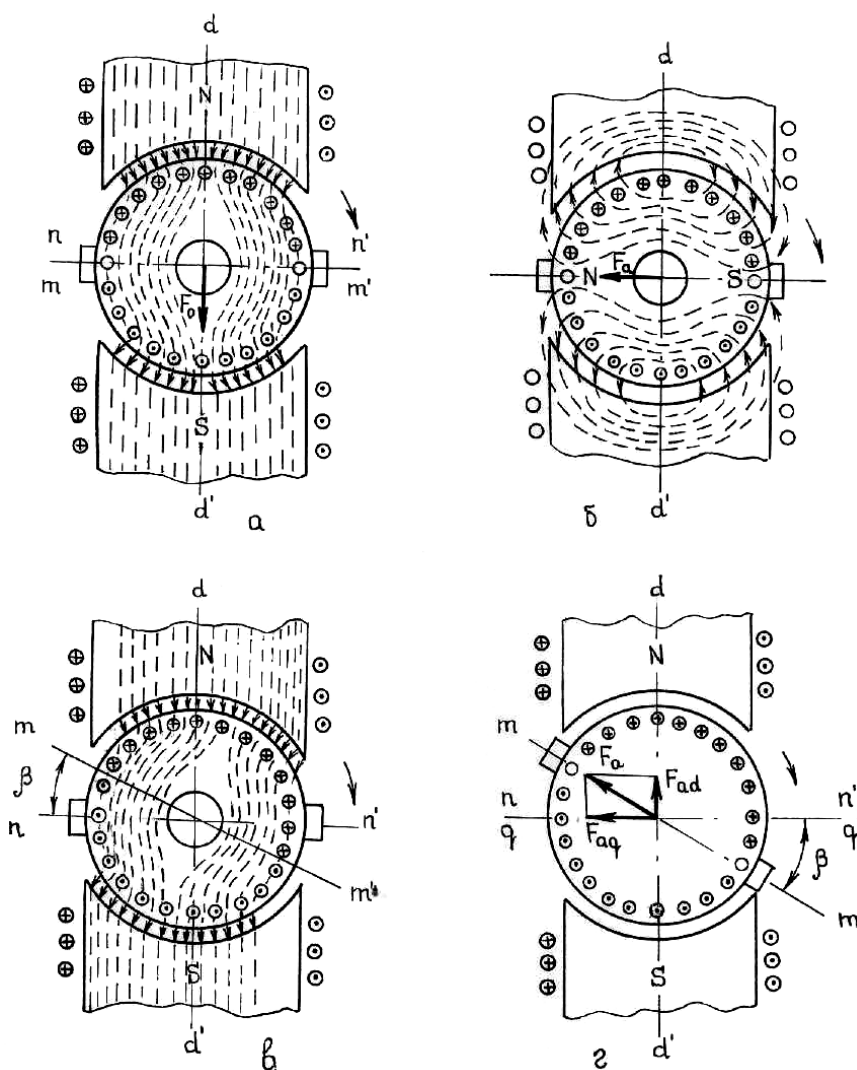


Рис. 4.22

Таким образом, реакция якоря – явление нежелательное, ухудшающее условия работы щеточно-коллекторного узла. При работе машины в генераторном режиме она вызывает понижение напряжения, при работе в двигательном режиме – изменение вращающего момента и частоты вращения.

Наиболее вредным является искажение магнитного поля главных полюсов, обусловленное действием поперечной реакции якоря, ухудшающее работу щеточно – коллекторного узла. Для борьбы с поперечной реакцией якоря применяются несколько способов.

Один из способов – это сдвиг щеток машины в физическую нейтраль (в генераторе по направлению вращения якоря, в двигателе – против). В этом случае поперечная составляющая реакции уменьшается (рис. 4.22, з). Такой способ используется в машинах, работающих в режиме неизменной нагрузки. В режиме переменной нагрузки физическая нейтраль меняет свое положение (так как изменяется ток обмотки якоря, а следовательно, и величина МДС обмотки якоря F_a), поэтому при каждом изменении нагрузки необходимо менять положение щеток, что усложняет конструкцию щеткодержателей. Кроме того, при смещении щеток с геометрической нейтрали усиливается продольное размагничивающее действие реакции якоря F_{ad} (рис. 4.22, з). Для машин, работающих с изменением направления вращения (с реверсом), смещение щеток с геометрической нейтрали недопустимо, так как направление смещения физической нейтрали меняется с изменением направления вращения.

Более совершенным средством для борьбы с поперечной реакцией якоря является применение добавочных полюсов. Они устанавливаются на станине машины между главными полюсами на линии геометрической нейтрали (рис. 4.23). Щетки в этом случае располагаются на линии геометрической нейтрали. Обмотки добавочных полюсов соединяются последовательно с обмоткой якоря так, чтобы направление МДС дополнительных полюсов F_q было противоположно направлению МДС поперечной реакции якоря F_a .

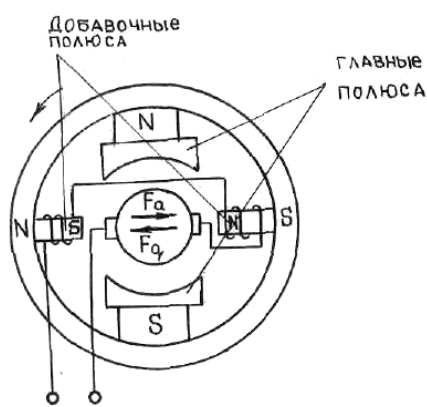


Рис. 4.23

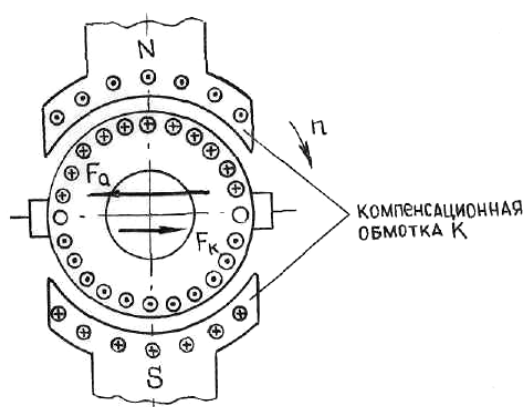


Рис. 4.24

Добавочные полюса устраняют действие поперечной реакции якоря в относительно узкой зоне геометрической нейтрали (в зоне коммутации секций). Однако они не устраняют создаваемые реакцией якоря неравномерное распределение индукции под главными полюсами и уменьшение основного магнитного потока. Для компенсации реакции якоря в зоне главных полюсов применяется компенсационная обмотка.

Провода компенсационной обмотки размещаются в пазах полюсных наконечников главных полюсов (рис. 4.24). Компенсационная обмотка соединяется последовательно с обмоткой якоря. Таким образом, каждый из проводов компенсационной обмотки создает магнитный поток, противоположный магнитному потоку находящегося под ним проводника обмотки якоря. Т.е., каждый проводник компенсационной обмотки как бы образует с находящимися под ним проводником обмотки якоря бифилярную систему, магнитное поле у которой почти отсутствует. Компенсационная обмотка дополняет действие добавочных полюсов, вместе они полностью компенсируют реакцию якоря.

Включение обмоток добавочных полюсов и компенсационной обмотки последовательно в цепь обмотки якоря обеспечивает автоматичность компенсации реакции якоря при любых нагрузках машины.

4.12. КОММУТАЦИЯ В МАШИНАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

При работе машины постоянного тока щетки и коллектор образуют скользящий контакт, обеспечивающий связь между вращающейся обмоткой якоря и неподвижной внешней электрической цепью машины. В процессе эксплуатации машины под щетками (на коллекторе) может возникнуть искрение, которое разрушает щеточно-коллекторный узел, а в некоторых случаях оно вызывает аварийное состояние машины. Искрение создает радиопомехи, оно не допустимо при работе машин во взрывоопасных средах. Причины этого искрения разделяют на механические, потенциальные и коммутационные. К механическим причинам относятся: слабое давление щеток на коллектор, износ или загрязнение поверхности коллектора, плохое закрепление щеткодержателей и другие причины нарушения контакта щетки с коллектором.

Потенциальные причины искрения связаны с перенапряжением между соседними коллекторными пластинами, сопровождаемым появлением на коллекторе электрических дуг (кругового огня по коллектору).

Однако главными и наиболее опасными причинами искрения под щетками на коллекторе машины являются коммутационные.

Коммутационные причины искрения создаются физическими процессами, происходящими в машине при переходе секций обмотки якоря из одной параллельной ветви в другую.

Иногда искрение вызывается целым комплексом причин. Выяснение причин искрения следует начать с механических, так как их обнаруживают осмотром коллектора и щеточных устройств. Труднее обнаружить и устранить коммутационные причины искрения, которые будут рассматриваться дальше.

При вращении якоря щетки переходят с одной коллекторной пластины (сбегающей) на другую (набегающую). При этом происходит непрерывное переключение секций обмотки якоря из параллельной ветви с одним направлением тока в параллельную ветвь с другим направлением тока (рис. 4.17). При этом ток переключаемой секции изменяет свое направление на обратное, а секция оказывается во время переключения замкнутой накоротко через коллекторные пластины и щетки. Процесс переключения секции из одной параллельной ветви в другую и сопровождающие его явления называются коммутацией. Секция, в которой происходит коммутация, называется коммутируемой, а продолжительность процесса коммутации – периодом коммутации.

Рассмотрим процесс коммутации при условии, что щетки расположены на геометрической нейтрали и в коммутируемой секции в течение всего периода коммутации никаких ЭДС, влияющих на процесс коммутации, нет. На рис. 4.25 в стадии коммутации находится секция 2. В начальный момент коммутации (рис. 4.25, а) щетка касается только коллекторной пластины 1, а коммутируемая секция относится к правой параллельной ветви обмотки якоря и ток в ней равен $+i_a$. При вращении якоря в направлении вектора $\mathbf{v}$ пластина 1 постепенно сбегаёт со щетки и на смену ей набегают пластина 2. В результате коммутируемая секция 2 оказывается замкнутой щеткой и ток в ней постепенно уменьшается. В середине процесса коммутации $t = 0,5T_k$ щетка равномерно перекрывает обе коллекторные пластины (рис. 4.25, б), коммутируемая секция 2 замкнута щеткой накоротко, ток в ней равен нулю.

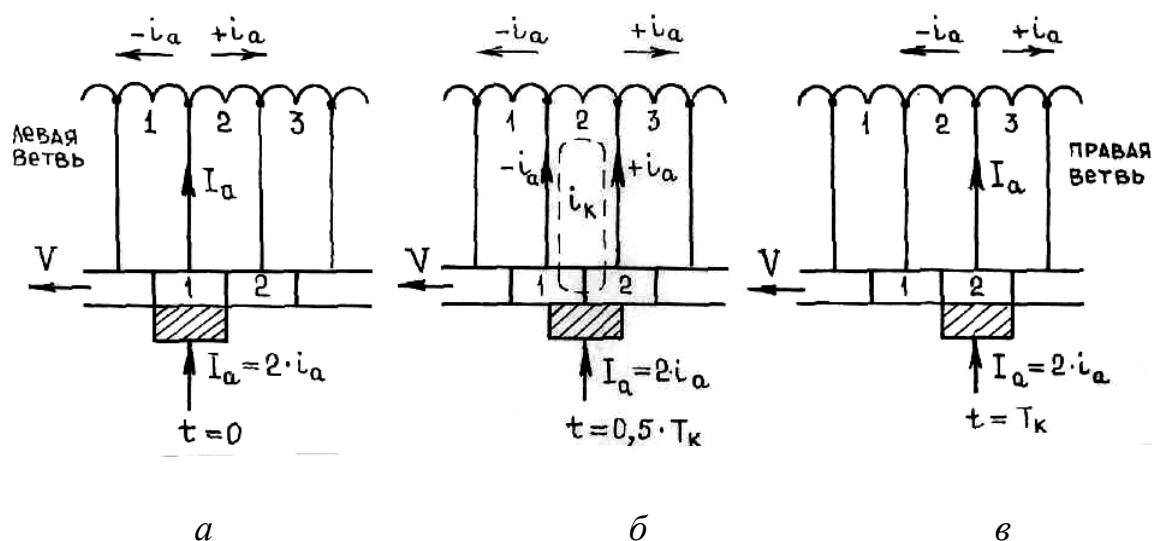


Рис. 4.25

В конце коммутации $t = T_k$ щетка полностью переходит на пластину 2 и теряет контакт с пластиной 1 (рис. 4.25, в), а ток в коммутируемой секции 2 становится равным $-i_a$, т.е. по значению таким же, что и в начале коммутации, а по направлению противоположным. При этом коммутируемая секция оказалась в левой параллельной ветви обмотки якоря. Видно, что при отсутствии каких-либо ЭДС в коммутируемой секции 2 ток в ней изменяется линейно от $+i_a$ при $t = 0$ до $-i_a$ при $t = T_k$. Объясняется это тем, что в данном случае величина тока в контакте щетка-коллекторная пластина изменяется пропорционально изменению площади этого контакта. При этом плотность тока под щеткой остается во время коммутации постоянной и одинаковой для набегающей 2 и сбегающей 1 пластин. Такую коммутацию называют прямолинейной или идеальной. Прямолинейная коммутация является наиболее желательным видом коммутации, так как она не сопровождается искрением под щетками.

Так как в коммутируемой секции ток изменяется достаточно быстро по величине и направлению (период коммутации $T_k = 0,001 \div 0,0003$ с), то в ней индуцируется ЭДС самоиндукции e_L , которая препятствует изменению тока в коммутируемой секции. Кроме того, в коммутируемой секции возникает ЭДС e_k при пересечении ее сторонами линий магнитного поля, которое практически всегда существует в зоне коммутации (на геометрической нейтрали). Такое поле может создаваться реакцией якоря, но чаще всего создается с помощью добавочных полюсов. Обе эти ЭДС вызывают в коммутируемой секции 2 ток коммутации i_k , который замыкается по цепи: секция 2, коллекторная пластина 1, щетка, коллекторная пластина 2, секция 2 (штрихованная линия на рис. 4.25, б). От сопротивления этой цепи, а также от значений и направления e_L и e_k зависит значение и направление тока коммутации i_k . Ток i_k алгебраически складывается с частями тока якоря, протекающими между коллекторными пластинами 1, 2 и щеткой. В результате плотность тока под набегающим и сбегающим краями щетки не одинакова и под тем или иным (в зависимости от направления и соотношения между собой ЭДС e_L и e_k) краем щетки может достигать больших значений. В результате под одним из краев щетки возникает искрение.

Способы улучшения коммутации (а, следовательно, уменьшения искрения) вытекают из следующего факта. В противоположность ЭДС e_L , ЭДС e_k может иметь тот или иной знак в зависимости от полярности магнитного поля, в котором находится коммутируемая секция. Следовательно, если создать в зоне коммутации магнитное поле такого

значения и направления, чтобы наводимая этим полем ЭДС e_k была равна и противоположна по направлению ЭДС e_L , то суммарная ЭДС в коммутируемой секции будет равна нулю ($e_L - e_k = 0$) и коммутация станет прямолинейной (идеальной).

Главным средством улучшения коммутации являются добавочные полюсы, устанавливаемые между главными полюсами в зоне коммутируемой секции (рис. 4.23). Магнитное поле добавочных полюсов подбирается таким образом, чтобы $e_L - e_k = 0$. Добавочные полюсы устанавливаются у всех машин постоянного тока мощностью 1 кВт и более.

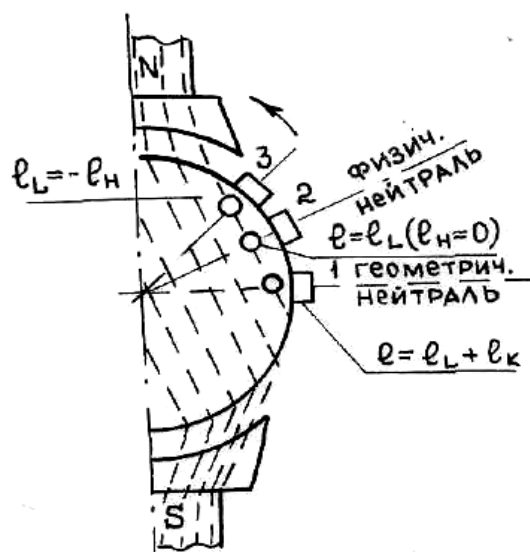


Рис. 4.26

В машинах малой мощности (менее 1 кВт) для получения того же эффекта щетки у генераторов поворачивают по направлению вращения, а у двигателей – против направления вращения за положение физической нейтрали (рис. 4.26). Практически это положение определяется на глаз по наименьшему искрению под щетками. Улучшение коммутации поворотом щеток малоэффективный метод, так как при изменении нагрузки положение физической нейтрали изменяется, а положение щеток остается фиксированным.

Улучшение коммутации достигается увеличением сопротивления короткозамкнутой цепи секции в целях уменьшения тока короткого замыкания i_k . Это достигается применением твердых графитовых щеток с повышенным переходным сопротивлением (мягкие медно – графитовые щетки с малым переходным сопротивлением применяются только в тихоходных машинах на напряжение до 30 В).

Эксплуатационным мероприятием улучшения коммутации является тщательный контроль за состоянием коллектора и щеток.

4.13. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ И КПД МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

4.13.1. Мощность и потери

Характер подводимой к машине мощности зависит от ее режима работы: у генератора – это механическая мощность $P_1 = k_1 M_n$, у двигателя – электрическая мощность $P_1 = UI$. Характер снимаемой с машины полезной мощности – противоположный: у генератора – это электрическая мощность $P_2 = k_2 M_n$, у двигателя – механическая $P_2 = k_2 M_n$.

Преобразование энергии в любом случае связано с некоторыми ее потерями. Поэтому в машине всегда есть мощность потерь ΔP , которая складывается из мощности электрических потерь (потери в меди) $\Delta P_{\text{ЭЛ}}$ идущих на нагревание обмоток, мощности магнитных потерь (потери в стали) $\Delta P_{\text{МАГ}}$, мощности механических потерь (потери на трение) $\Delta P_{\text{МЕХ}}$ и мощности добавочных потерь (трудно учитываемые потери) $\Delta P_{\text{ДОБ}} \approx 0,01 P_{\text{НОМ}}$, где $P_{\text{НОМ}}$ – номинальная мощность. Таким образом, $\Delta P = \Delta P_{\text{ЭЛ}} + \Delta P_{\text{МАГ}} + \Delta P_{\text{МЕХ}} + \Delta P_{\text{ДОБ}}$, $P_1 = P_2 + \Delta P$.

4.13.2. КПД машины

КПД машины можно рассчитать по формуле $\eta = P_2/P_1$. КПД машин постоянного тока растет с увеличением мощности машин. Так у микромашин мощностью до 10 Вт он составляет всего 30–40 %, у машин мощностью 10 кВт – 83 % и у машин мощностью 1000 кВт – 96 %.

КПД меняется также в зависимости от нагрузки (рис. 4.27). Из графика следует, что при малых нагрузках КПД резко падает, поэтому недогруженную машину невыгодно эксплуатировать, максимальное значение КПД достигается при номинальной нагрузке машины.

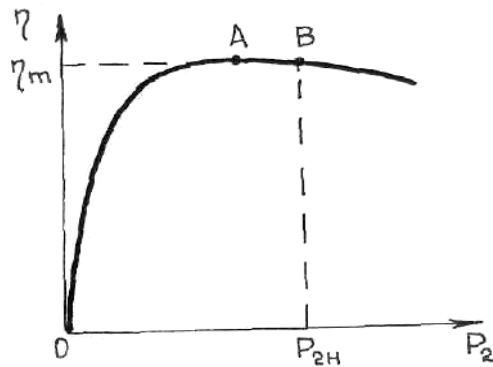


Рис. 4.27

4.14. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ГЕНЕРАТОРАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

4.14.1. Условно-логическая схема генератора

Схема представлена на рис. 3.28. Приводной двигатель развивает вращающий момент $M_{вп}$, приводя ротор во вращение с частотой n . Если к обмотке возбуждения подведено напряжение U_b , то по ней протекает ток I_b , создающий МДС $F_b = I_b w_b$, МДС F_b создает в машине магнитный поток возбуждения. При вращении проводников якоря в магнитном поле машины, в них по закону электромагнитной индукции (ЭМИ) наводится ЭДС E , под действием которой по цепи якоря и нагрузки, если она замкнута, потечет ток I_a , создающий в цепи якоря падение напряжения $I_a R_a$. Величины E , U и $I_a R_a$ связаны между собой соотношением $U = E - I_a R_a$. Ток якоря создает МДС $F_a = I_a w_a$, которая вызывает появление в генераторе магнитного потока реакции якоря Φ_a . Результирующий магнитный поток $\Phi_{рез} = \Phi_b - \Phi_a$.

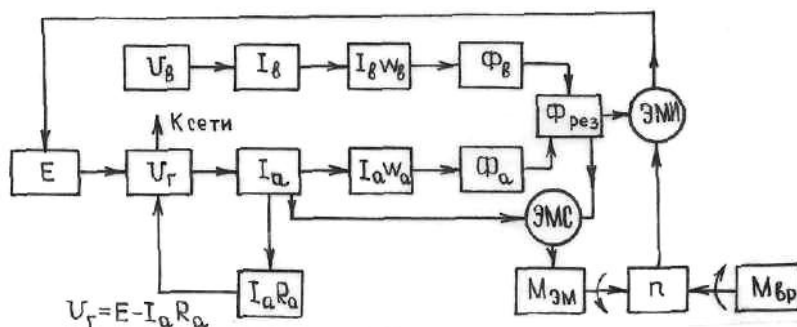


Рис. 4.28

В соответствии с законом электромагнитной силы (закон Ампера) взаимодействие тока I_a и магнитного потока $\Phi_{рез}$ создает силу и противодействующий тормозящий электромагнитный момент $M_{ЭМ}$. В установленном режиме $M_{вр} = M_{ЭМ}$.

4.14.2. Уравнение напряжения генератора

При работе генератора в его обмотке наводится ЭДС E . При подключении к генератору нагрузки в цепи возникает ток, а на выводах генератора устанавливается напряжение U , величина которого на основании второго закона Кирхгофа определяется уравнением (рис. 4.21, а)

$$U = E - I_a R_a = C_e n \Phi - I_a R_a, \quad (4.8)$$

где R_a – сумма сопротивлений всех участков цепи якоря (обмотки якоря, обмотки добавочных полюсов, компенсационной обмотки, последовательной обмотки возбуждения, переходного щеточного контакта).

Уравнение напряжения генератора (4.8) показывает, что напряжение генератора U меньше его ЭДС E на величину падения напряжения в цепи якоря $I_a R_a$. В переходных режимах работы генератора необходимо учитывать падение напряжения на индуктивном сопротивлении цепи якоря. Направление ЭДС и ток в якоре генератора совпадают.

4.14.3. Уравнение моментов генератора

Якорь генератора приводится во вращение приводным двигателем, который создает на валу генератора вращающий момент M . Если генератор работает в режиме холостого хода $I_a = 0$, то для вращения его якоря нужен сравнительно небольшой момент M_0 холостого хода. Этот момент обусловлен тормозными моментами возникающими в генераторе при его работе в режиме холостого хода: моментами от сил трения и вихревых токов в якоре.

При работе нагруженного генератора в проводах обмотки якоря появляется ток, который взаимодействует с магнитным полем возбуждения, создает на якоре **тормозящий электромагнитный момент $M_{ЭМ}$** , величина которого определяется по формуле $M_{ЭМ} = C_M I_a \Phi$. Таким образом, если генератор нагружен и частота вращения якоря неизменна, то приводной двигатель должен развивать момент

$$M_{вр} = M_0 + M_{ЭМ}. \quad (4.9)$$

Данное выражение является уравнением моментов генератора в установившемся режиме. В переходных режимах работы генератора в уравнении моментов должны учитываться динамические моменты.

4.14.4. Основные характеристики генераторов

Эксплуатационные свойства генераторов определяются графически выраженными зависимостями, называемыми характеристиками. Основными характеристиками являются:

1. **Характеристика холостого хода**, представляющая собой зависимость ЭДС E на зажимах генератора от тока возбуждения I_B при отключенной внешней цепи, когда ток нагрузки $I = 0$, и постоянной частоте вращения якоря n : $E_0 = f(I_B)$ при $I = 0$ и $n = const$.

2. **Внешняя характеристика**, представляющая собой зависимость напряжения на зажимах генератора U от тока нагрузки I при постоянном сопротивлении цепи возбуждения R_B и неизменной частоте вращения якоря n : при $U = f(I_B)$ при $R_B = const$ и $n = const$.

3. **Регулировочная характеристика**, представляющая собой зависимость тока возбуждения I_B от тока нагрузки I при постоянном напряжении на зажимах генератора U и неизменной частоте вращения якоря n : $I_B = f(I)$ при $U = const$ и $n = const$.

Ниже рассматриваются характеристики генераторов в зависимости от способа возбуждения (п. 4.8) как основного фактора, определяющего свойства генераторов постоянного тока.

4.15. ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРА С НЕЗАВИСИМЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Схема включения генератора независимого возбуждения с включением измерительных приборов, позволяющих снять его характеристики, приведена на рис. 4.29. Сопротивление нагрузки R_H подключается к генератору с помощью выключателя P . Вольтметром V измеряется ЭДС E_0 и напряжение на зажимах генератора U , а амперметром A_1 , ток нагрузки генератора $I = I_a$.

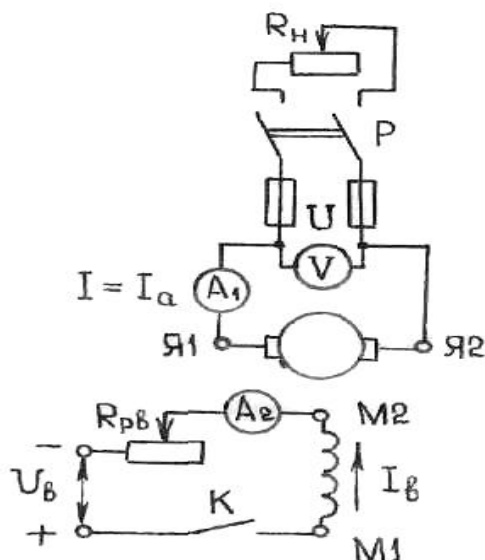


Рис. 4.29

Обмотка возбуждения **ОВ** питается от источника электроэнергии напряжением U_n через регулировочный реостат $R_{рв}$. Ток возбуждения I_b при замкнутом ключе **К** измеряется амперметром A_2 .

1. Характеристика холостого хода. $E_0 = f(I_b)$ при $I = 0$ и $n = \text{const}$ снимается при выключенном выключателе **Р** (выполняется условие $I = 0$) и номинальной частоте вращения генератора $n = n_{ном}$, которая в процессе снятия характеристики поддерживается неизменной.

Величина ЭДС, наводимая в обмотке якоря, определяется формулой $E_0 = C_e n \Phi$.

Первая точка характеристики холостого хода (рис. 4.30) снимается при $I_b = 0$ (ключ **К** разомкнут). В этом случае в обмотке якоря наводится так называемая **остаточная** ЭДС $E_{ост}$, что объясняется действием небольшого магнитного потока остаточного магнетизма, сохранившегося в магнитной цепи от предыдущего намагничивания машины. При увеличении тока возбуждения (после замыкания **К**) изменение ЭДС происходит по кривой 1, которая называется **восходящей ветвью характеристики**. При уменьшении тока возбуждения изменение ЭДС происходит по кривой 2, которая называется нисходящей ветвью характеристики. Несовпадение кривых 1 и 2 объясняется тем, что в процессе снятия кривой 1 произошло увеличение остаточного магнетизма.

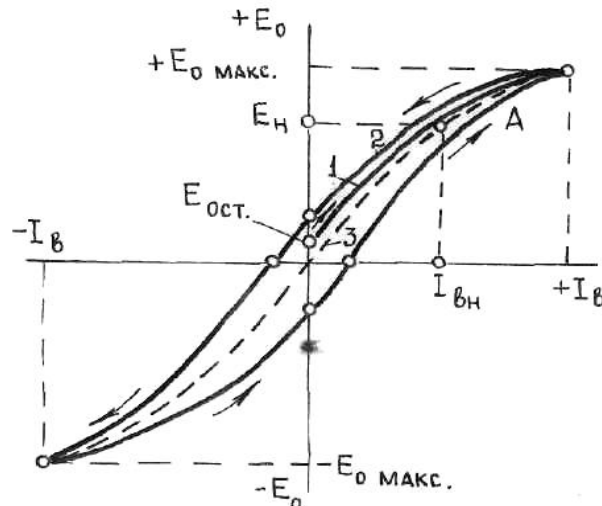


Рис. 4.30

Характеристика холостого хода представляет собой гистерезисную петлю и дает возможность судить о магнитных свойствах машины. Прямолинейная часть характеристики холостого хода соответствует ненасыщенной магнитной системе генератора. При дальнейшем увеличении тока возбуждения (a , следовательно, и магнитного потока Φ) сталь машины насыщается и характеристика приобретает криволинейный характер. Средняя линия 3 называется расчетной характеристикой холостого хода. Рабочая точка (точка А), определяющая собой номинальные значения ЭДС E_H и тока возбуждения I_{BH} , обычно выбирается в области перегиба кривой 3.

2. **Внешняя характеристика $U = f(I)$** при и снимается при $R_B = const$ и $n = n_{ном}$ включенном выключателе P . Ток нагрузки изменяется нагрузочным реостатом R_H . Примерный вид внешней характеристики изображен на рис. 4.31, из которого видно, что при увеличении тока нагрузки I напряжение на зажимах генератора падает. Внешняя характеристика имеет большое практическое значение: она показывает, как изменяется напряжение на зажимах генератора при изменении тока нагрузки.

Согласно уравнению (4.8) напряжение генератора при нагрузке

$$U = E - I_a R_a = C_e n \Phi - I_a R_a.$$

Уменьшение напряжения при увеличении нагрузки генератора вызвано следующими причинами:

1. Увеличением падения напряжения на внутренних сопротивлениях цепи якоря ($I_a R_a$).

2. Уменьшением ЭДС E из-за размагничивающего влияния реакции якоря, приводящей к некоторому уменьшению основного магнитного потока Φ .

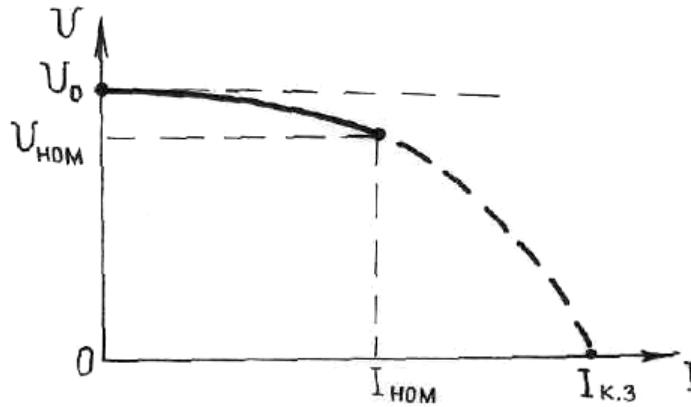


Рис. 4.31

Изменение напряжения выражается в процентах от номинального напряжения, т.е.

$$\Delta U_{\text{ном}} = \frac{U_0 - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} 100\% \quad (4.10)$$

Обычно для генератора независимого возбуждения $\Delta U_{\text{ном}} - 5-10 \%$, т.е. внешняя характеристика является жесткой.

При коротком замыкании напряжение на зажимах генератора равно нулю, а ток в цепи якоря равен току короткого замыкания $I_{\text{кз}}$. Режим короткого замыкания для генератора с независимым возбуждением является аварийным, так как ток короткого замыкания $I_{\text{кз}}$ превышает номинальный ток $I_{\text{ном}}$ более чем в десять раз. Значительная величина тока $I_{\text{кз}} = E/R_a$ объясняется тем, что ЭДС незначительно уменьшается в режиме короткого замыкания по сравнению с ЭДС холостого хода E_0 , а сопротивление цепи якоря R_a мало (порядка сотых долей ома).

3. Регулировочная характеристика $I_{\text{в}} = f(I)$ при $U_{\text{ном}} = \text{const}$ и $n = \text{const}$ показывает, как следует менять ток в цепи возбуждения, чтобы при изменениях нагрузки напряжение на его зажимах осталось неизменным, равным номинальному. При этом частота вращения генератора $n = n_{\text{ном}}$.

Внешняя характеристика показывает, что с ростом тока нагрузки I напряжение на зажимах генератора U уменьшается. Поэтому, чтобы оно оставалось величиной постоянной, необходимо одновременно с ростом тока I увеличивать в определенной мере ток возбуждения генератора I_B для компенсации размагничивающего действия реакции якоря и падения напряжения в цепи якоря (рис. 4.32).

Основной недостаток генераторов независимого возбуждения – это необходимость в постороннем источнике энергии постоянного тока – возбудителе. Однако возможность регулирования напряжения в широких пределах, а также сравнительно жесткая внешняя характеристика этого генератора являются его достоинствами.

4.16. САМОВОЗБУЖДЕНИЕ ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Самовозбуждение генераторов может возникать в случае, если их обмотка возбуждения подключена к зажимам якоря (рис. 4.33). В этом случае ток возбуждения I_B является частью тока якоря. Самовозбуждение представляет собой самопроизвольный рост ЭДС генератора до некоторого установившегося значения.

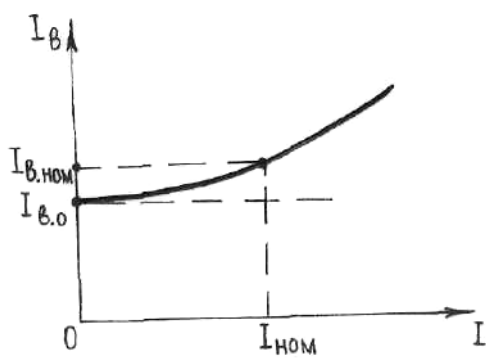


Рис. 4.32

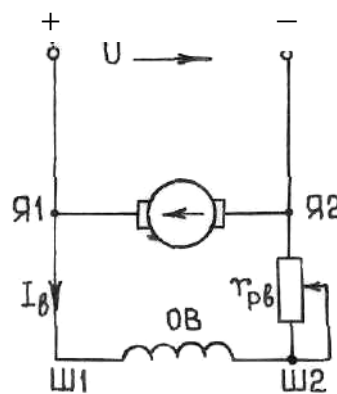


Рис. 4.33

Сущность процесса самовозбуждения генератора заключается в следующем. При пуске в ход генератора сначала ток в яоре, а следовательно, и в обмотке возбуждения отсутствует, но в массивной станине всегда сохраняется небольшой магнитный поток $\Phi_{ост}$ остаточного намагничивания, равный 1–3 % нормального рабочего магнитного потока машины. При вращении якоря поток наводит в якорной

обмотке небольшую, так называемую остаточную ЭДС $E_{ост}$, под действием которой в обмотке возбуждения возникает небольшой ток. Если магнитодвижущая сила обмотки возбуждения имеет такое же направление, как и поток $\Phi_{ост}$, то она увеличит поток основных полюсов. Это, в свою очередь, вызовет увеличение ЭДС генератора, от чего ток возбуждения вновь увеличится. Так будет продолжаться до тех пор, пока напряжение генератора не будет уравновешено падением напряжения в цепи возбуждения. Процесс нарастания магнитного потока и ЭДС происходит лавинообразно. При самовозбуждении генератора рабочая точка A из точки, соответствующей $E_{ост}$, перемещается вверх по характеристике холостого хода. Самовозбуждение закончится тогда, когда рабочая точка A на характеристике холостого хода займет устойчивое положение, определяемое точкой пересечения характеристики холостого хода (кривая 1) и вольт – амперной характеристики цепи возбуждения (прямая 2) (рис. 4.34).

Для самовозбуждения генератора должны быть выполнены следующие четыре условия:

1. В магнитной системе генератора должен быть поток остаточного магнетизма $\Phi_{ост}$.
2. Магнитный поток, создаваемый магнитодвижущей силой обмотки возбуждения $\Phi_{ов}$, должен быть направлен согласно с потоком остаточного магнетизма $\Phi_{ост}$, в противном случае произойдет размагничивание генератора из-за взаимной компенсации потоков. Второе условие выполняется путем правильного подключения концов обмотки возбуждения к обмотке якоря генератора.

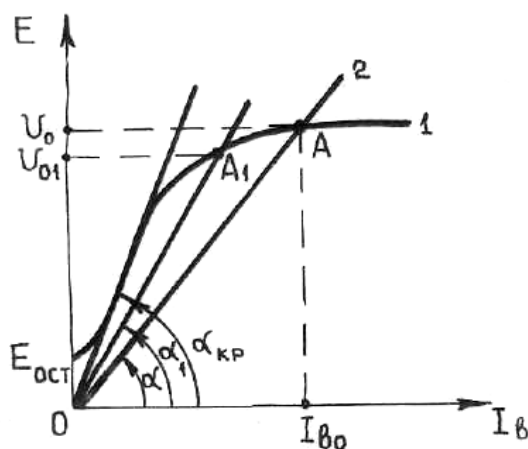


Рис. 4.34

3. Сопротивление цепи возбуждения должно быть меньше критического.

4. Частота вращения якоря должна быть больше критической. Критическая частота вращения якоря зависит от сопротивления цепи возбуждения и с ростом последнего увеличивается.

Для уяснения понятия критического сопротивления рассмотрим характеристику холостого хода генератора (кривая 1) и вольт–амперную характеристику цепи возбуждения (прямая 2, рис. 4.34). Точка их пересечения соответствует окончанию процесса самовозбуждения, так как именно в ней $U_0 = I_B R_B$, где – U_0 напряжение на зажимах генератора; $I_B R_B$ – падение напряжения в цепи возбуждения. Здесь представляет собой сопротивление обмотки возбуждения и регулировочного реостата $R_{pв}$. Угол наклона прямой 2 к оси абсцисс (угол α) определяется величиной сопротивления цепи возбуждения R_B . При увеличении сопротивления R_B угол увеличивается, а рабочая точка А на характеристике холостого хода располагается ниже точки А, т.е. генератор возбуждается до меньшего значения ЭДС U_{01} . При некотором значении сопротивления реостата сопротивление $R_{pв}$ достигнет величины, при которой прямая 2 становится касательной к прямолинейной части характеристики холостого хода ($\alpha = \alpha_{кр}$). В этих условиях генератор не самовозбуждается. Сопротивление цепи возбуждения, при котором прекращается самовозбуждение генератора, называется критическим $R_{B.кр}$.

4.17. ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРА С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Генератор с параллельным возбуждением является машиной с самовозбуждением, у которой ток возбуждения берется от якоря машины (п. 4.8). В данном случае обмотка возбуждения генератора присоединяется параллельно обмотке якоря. Схема включения генератора параллельного возбуждения с включением измерительных приборов, позволяющих снять его характеристики, приведена на рис. 4.35.

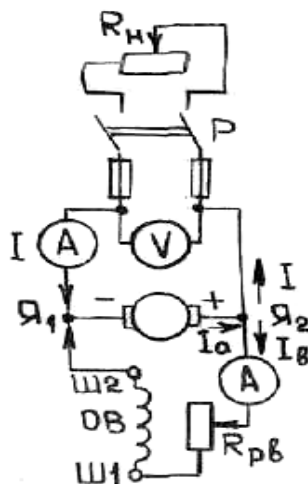


Рис. 4.35

1. Характеристика холостого хода $E_0 = f(I_B)$ при $I = 0$ и $n = \text{const}$ снимается таким же образом, как и у генератора с независимым возбуждением. Так как генератор параллельного возбуждения самовозбуждается только при одном направлении тока возбуждения, то и характеристика холостого хода может быть снята только для одного квадрата осей координат (рис. 4.36). Характеристика холостого хода генератора параллельного возбуждения имеет такой же физический смысл, что и аналогичная характеристика генератора с независимым возбуждением. Однако при прочих одинаковых условиях она располагается несколько ниже, чем у генератора с независимым возбуждением, на величину падения напряжения в цепи якоря $I_B R_a$.

2. Внешняя характеристика $U = f(I)$ при $R_B = \text{const}$ и $n = \text{const}$ генератора параллельного возбуждения (рис. 4.37, кривая 1) менее жесткая, чем у генератора независимого возбуждения (кривая 2).

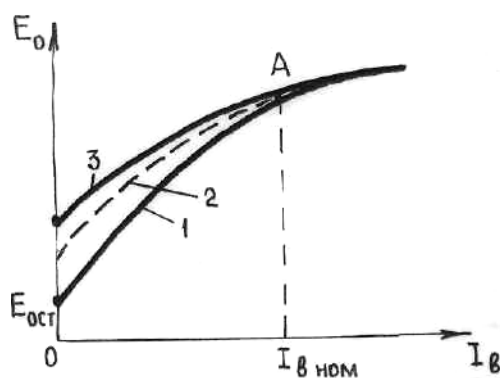


Рис. 4.36

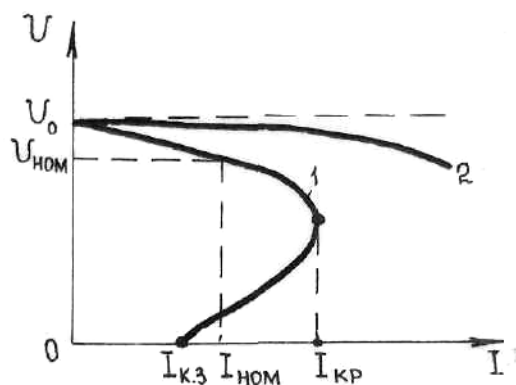


Рис. 4.37

Объясняется это тем, что в генераторе параллельного возбуждения, помимо причин, вызывающих уменьшение напряжения в генераторе независимого возбуждения (реакция якоря и падение напряжения в цепи якоря), действует еще и третья причина – уменьшение тока возбуждения, вызванное снижением напряжения на зажимах генератора от действия первых двух причин, так как $I_B = U/R_B$. Этим же объясняется и то, что при постепенном уменьшении сопротивления нагрузки R_H ток I увеличивается лишь до критического значения $I_{КР}$, а затем при дальнейшем уменьшении сопротивления нагрузки ток I начинает уменьшаться, так как резкое падение напряжения сказывается более значительно, чем уменьшение сопротивления нагрузки. Наконец, ток нагрузки при коротком замыкании $I_{КЗ} < I_{КР}$ и обусловлен только ЭДС от остаточного магнетизма $I_{КЗ} = E_{ост}/R_a$. Этот ток меньше номинального тока генератора. Таким образом, короткое замыкание, вызванное постепенным уменьшением сопротивления нагрузки, не опасно для генератора параллельного возбуждения. Но при внезапном коротком замыкании магнитная система генератора не успевает сразу размагничиваться, и ток $I_{КЗ}$ достигает опасных для машин значений. Номинальное изменение напряжения генератора параллельного возбуждения (5.10) составляет 10–30 %.

3. **Регулировочная характеристика $I_B = f(I)$ при $U_{ном} = const$ и $n = const$** генератора параллельного возбуждения (рис. 4.38, кривая 1) располагается несколько выше аналогичной характеристики генератора независимого возбуждения (кривая 2). Это объясняется тем, что при одинаковых токах нагрузки в ядре генератора параллельного возбуждения течет ток, больший на величину тока в обмотке возбуждения. Поэтому в генераторе в большей степени проявляется реакция якоря и падение напряжения в цепи якоря. Но так как ток возбуждения значительно меньше тока нагрузки, то разница между регулировочными характеристиками незначительная.

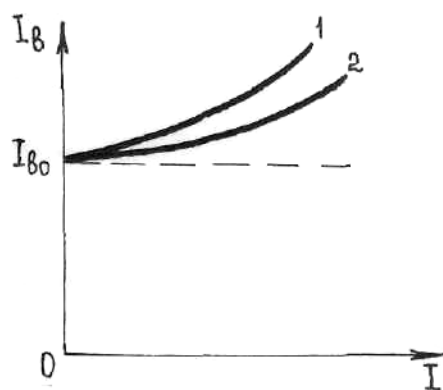


Рис. 4.38

Генераторы параллельного возбуждения широко используют в установках постоянного тока, так как отсутствие возбудителя выгодно отличает их от генераторов независимого возбуждения.

4.18. ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

У генератора последовательного возбуждения (рис. 4.39) обмотка возбуждения соединена последовательно с обмоткой якоря, поэтому ток возбуждения равен току нагрузки ($I_B = I$). Следовательно, свойство этого генератора определяется лишь внешней характеристикой. Все остальные характеристики могут быть сняты только при включении генератора на независимое возбуждение.

Внешняя характеристика генератора $U = f(I)$ при $n = \text{const}$ снимается в процессе уменьшения сопротивления нагрузки R_H после включения выключателя P и имеет вид, приведенный на рис. 4.40. При холостом ходе ЭДС генератора невелика ($E_0 = E_{\text{ост}}$), так как при разомкнутой цепи якоря ток в обмотке возбуждения отсутствует. Вначале (с увеличением тока нагрузки) возрастает ток возбуждения и напряжение генератора увеличивается. При дальнейшем увеличении тока нагрузки напряжение генератора уменьшается, так как увеличение тока нагрузки вызывает падение напряжения в цепи якоря и усиление размагничивающего действия реакции якоря, а увеличение тока возбуждения почти не вызывает увеличения магнитного потока в связи с насыщением магнитной цепи генератора.

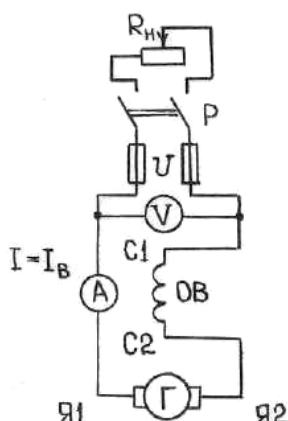


Рис. 4.39

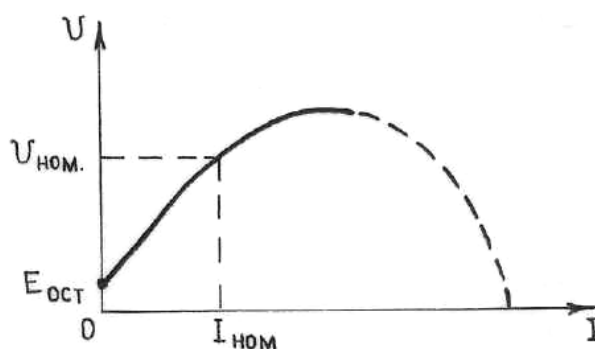


Рис. 4.40

Из-за непостоянства напряжения генераторы с последовательным возбуждением применяются лишь в немногих специальных случаях.

4.19. ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРА СО СМЕШАННЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Генератор смешанного возбуждения (рис. 4.41) имеет две обмотки возбуждения: параллельную **ОВ1** и последовательную **ОВ2** (п. 4.8). С целью получения жесткой внешней характеристики $U = f(I)$ (т.е. чтобы напряжение на зажимах генератора при увеличении нагрузки в определенных пределах оставалось почти неизменным), обмотки возбуждения генератора включают **согласно**. При этом главную роль играет параллельная обмотка возбуждения, а последовательная обмотка возбуждения служит для компенсации размагничивающего действия реакции якоря и падения напряжения в цепи якоря. В этом случае напряжение на зажимах генератора определяется формулой

$$U = E - I_a R_a = C_e n (\Phi_{ОВ1} + \Phi_{ОВ2}) - I_a R_a, \quad (4.11)$$

где $\Phi_{ОВ1}$ – магнитный поток, создаваемый параллельной обмоткой возбуждения;

$\Phi_{ОВ2}$ – магнитный поток, создаваемый последовательной обмоткой возбуждения.

При встречном включении обмоток возбуждения напряжение генератора с ростом тока нагрузки резко уменьшается, что объясняется размагничивающим действием последовательной обмотки возбуждения, магнитный поток которой направлен против магнитного потока параллельной обмотки возбуждения. В этом случае напряжение на зажимах генератора определяется формулой

$$U = E - I_a R_a = C_e n (\Phi_{ОВ1} - \Phi_{ОВ2}) - I_a R_a. \quad (4.12)$$

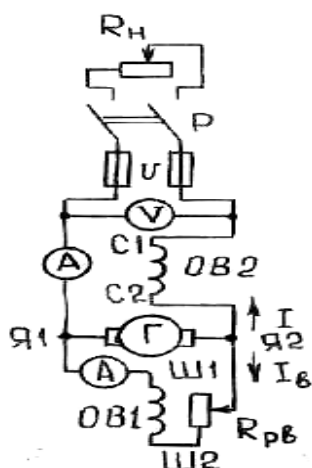


Рис. 4.41

В связи с этим вид характеристик генератора смешанного возбуждения существенно зависит от способа включения его обмоток возбуждения.

1. Характеристика холостого хода $E_0 = f(I)$ при $I = 0$ и $n = \text{const}$ генератора смешанного возбуждения не отличается от характеристики холостого хода генератора параллельного возбуждения, так как при холостом ходе генератора последовательная обмотка возбуждения не работает и генератор имеет только параллельное возбуждение.

2. Внешняя характеристика $U = f(I)$ при $R_b = \text{const}$ и $n = \text{const}$ при согласном включении обмоток возбуждения получается довольно жесткой (рис. 4.42, кривая 1), т.е. напряжение на зажимах генератора при увеличении тока нагрузки остается почти неизменным. Это объясняется тем, что последовательная обмотка возбуждения, действуя согласно с параллельной обмоткой возбуждения, подмагничивает машину и при этом полностью компенсирует размагничивающее действие реакции якоря и падение напряжения в цепи якоря.

При встречном включении обмоток возбуждения напряжение генератора с ростом тока нагрузки резко уменьшается (кривая 2), что объясняется размагничивающим действием последовательной обмотки возбуждения. Из сравнения внешних характеристик следует, что ток короткого замыкания при согласном включении обмоток возбуждения достигает опасных для машины значений, а при встречном включении обмоток ток короткого замыкания небольшой.

3. Регулировочная характеристика $I_b = f(I)$ при $U_{\text{ном}} = \text{const}$ и $n = \text{const}$ также зависит от способа включения обмоток возбуждения. При согласном включении характеристика имеет вид кривой 1 (рис. 4.43), а при встречном включении — вид кривой 2. Для регулирования напряжения на зажимах генератора в схеме генератора смешанного возбуждения используется реостат $R_{pв}$ (рис. 4.41).

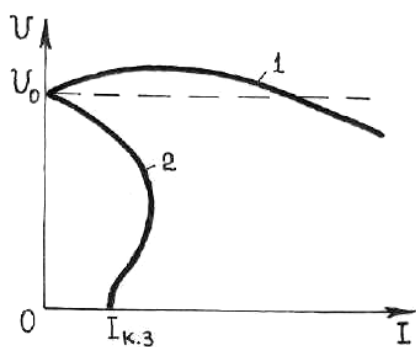


Рис. 4.42

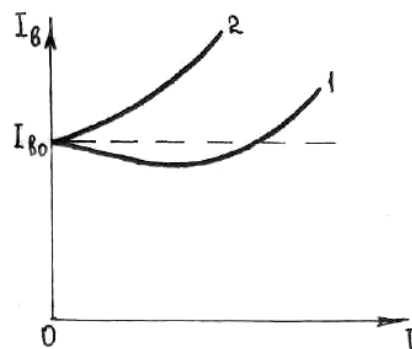


Рис. 4.43

Генераторы смешанного возбуждения с согласным включением обмоток возбуждения применяют для питания силовой нагрузки во всех случаях, когда требуется постоянство напряжения в линии, даже при резких изменениях тока нагрузки.

Встречное включение обмоток возбуждения применяется лишь в генераторах специального назначения, например, в сварочных генераторах, где необходимо получить круто падающую внешнюю характеристику.

4.20. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ДВИГАТЕЛЯХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

4.20.1. Условно-логическая схема двигателя

На примере двигателя параллельного возбуждения, показана на рис. 4.44. Если к двигателю подведено напряжение U то по цепи возбуждения протекает ток I_B , а по цепи якоря – ток I_a . Ток возбуждения создает МДС $F_B = I_B w_B$, которая возбуждает в машине магнитный поток Φ_B . Ток якоря, в свою очередь, создает магнитный поток реакции якоря Φ_a . Результирующий магнитный поток $\Phi_{рез} = \Phi_B + \Phi_a$. В цепи якоря ток I_a создает падение напряжения $I_a R_a$. В соответствии с законом электромагнитной силы ЭМС (закон Ампера) при взаимодействии тока I_a и магнитного потока $\Phi_{рез}$ создается электромагнитный момент $M_{ЭМ}$, вращающий ротор с частотой n . В установившемся режиме $M_{ЭМ} = M_{пр}$, где $M_{пр}$ – противодействующий момент со стороны нагрузки двигателя. Когда проводники якоря пересекают магнитное поле $\Phi_{рез}$, в них в соответствии с законом электромагнитной индукции ЭМИ наводится ЭДС E , которая направлена против напряжения сети, E, U, I_a, R_a связаны соотношением

$$U = E + I_a R_a.$$

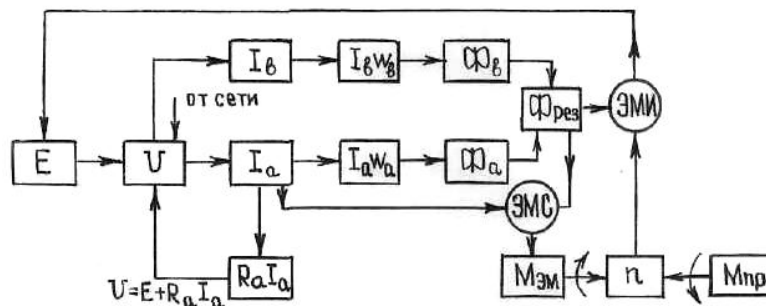


Рис. 4.44

4.20.2. Уравнение напряжения двигателя

В процессе работы двигателя в обмотке якоря наводится ЭДС $E_a = C_e n \Phi$ (п. 5.4). В отличие от генератора в двигателе ЭДС E_a направлена противоположно току в обмотке якоря I_a , а следовательно, и напряжению на щетках. Ввиду этого ее называют противо – ЭДС якоря.

Для контура «обмотка якоря и сеть» (рис. 4.45) в установившемся режиме можно согласно второму закону Кирхгофа написать уравнение

$$U = E_a + I_a R_a = C_e n \Phi + I_a R_a. \quad (4.13)$$

Выражение (4.13) является основным уравнением напряжения двигателя. Из него следует, что подведенное к двигателю напряжение U уравнивается противо – ЭДС якорной обмотки E_a и падением напряжения в цепи якоря $I_a R_a$. Обычно $I_a R_a$ мало и составляет 5÷10 % от напряжения сети U .

4.20.3. Уравнение моментов двигателя

В установившемся режиме вращающий электромагнитный момент двигателя $M_{ЭМ} = C_M I_a \Phi$ (сущность возникновения $M_{ЭМ}$ – п. 4.4) уравнивается полезным моментом на валу, т.е. противодействующим моментом исполнительного механизма, приводимого в действие данным двигателем, и моментом холостого хода M_0 , обусловленного наличием механических потерь (силы трения) и магнитных потерь (гистерезис и вихревые токи в двигателе). Поэтому

$$M_{ЭМ} = M_0 + M_2. \quad (4.14)$$

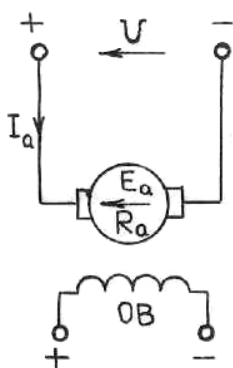


Рис. 4.45

Выражение (4.14) называется **уравнением моментов двигателя**. Величина M_0 не зависит от нагрузки и не превышает 2÷6 % от номинального значения вращающего момента. Поэтому можно считать, что $M_{\Sigma M} \approx M_2$. В переходных режимах в уравнении (4.14) необходимо учитывать динамический момент инерции всех вращающихся частей двигателя и приводимого им в действие механизма.

4.20.4. Основные характеристики двигателей

Целый ряд важных свойств двигателей постоянного тока определяется рабочими, механическими и регулировочными характеристиками.

Рабочие характеристики двигателя представляют собой зависимости частоты вращения n , вращающего момента $M_{\Sigma M}$, потребляемого тока I и коэффициента полезного действия η от полезной мощности на валу двигателя P_2 при постоянных значениях напряжения на зажимах двигателя $U = U_{ном}$ и сопротивления цепи якоря и возбуждения, т.е. $n, M_{\Sigma M}, I, \eta = f(P_2)$ при $U = U_{ном} = const, R_a = const, R_b = const$.

Зависимости $n = f(P_2)$ и $M_2 = f(P_2)$ называются соответственно **скоростной** и **моментной** характеристиками двигателя.

Механическая характеристика двигателя представляет зависимость частоты вращения n от вращающего момента M при постоянных значениях напряжения на зажимах двигателя $U = U_{ном}$ и сопротивлениях цепи якоря и возбуждения, т.е. $n = f(M)$ при $U = U_{ном} = const, R_a = const, R_b = const$.

Регулировочные характеристики показывают зависимость частоты вращения двигателя от изменения величины магнитного потока, напряжения сети и изменения сопротивления в цепи якоря.

4.20.5. Пуск двигателя в ход

Пусковой период двигателя характеризуется **пусковым током** $I_{ап}$, пусковым моментом $M_{п}$ и временем пуска $t_{п}$. При пуске двигателя целесообразно иметь возможно меньший пусковой ток и достаточный для трогания пусковой момент, определяющие собой, соответственно, токовую нагрузку сети и время пуска (разгона) двигателя.

В соответствии с выражением (4.13) величина тока якоря двигателя определяется формулой

$$I_a = \frac{U - E_a}{R_a} = \frac{U - C_e n \Phi}{R_a}. \quad (4.15)$$

При пуске двигателя, когда $n = 0$, противо-ЭДС отсутствует и, следовательно, ток якоря достигает максимального значения

$$I_{an} = \frac{U}{R_a}.$$

Так как сопротивление обмотки якоря мощных двигателей составляет десятые и сотые доли Ома, то кратность пускового тока двигателя по отношению к номинальному $I_{аном}$ в этом случае составляет $I_{ап} / I_{аном} = 10 \div 20$.

При трогании якоря в его обмотке возникает противо-ЭДС E_a , которая по мере увеличения частоты вращения возрастает и, следовательно, ток якоря будет уменьшаться до значения, определяемого нагрузкой на валу двигателя.

Такой большой пусковой ток, несмотря на его кратковременность, является опасным для коллектора и щеток, создает большой толчок пускового момента $M_{п} = C_M I_{ап} \Phi$, который оказывает ударное действие на вращающиеся части двигателя, исполнительного механизма и может механически их разрушить. И наконец, этот ток вызывает резкое падение напряжения в сети, что неблагоприятно отражается на работе других потребителей, включенных в эту сеть.

По этой причине пуск двигателя непосредственным включением в сеть (прямой пуск) применяется для двигателей малой мощности (до 1 кВт), у которых сопротивление обмотки якоря R_a относительно велико, а масса вращающихся частей небольшая и разгон происходит быстро. В результате пусковой ток не превышает $(3 \div 5) I_{аном}$, и существует кратковременно (менее 1 с).

Наибольшее распространение получил **реостатный пуск**. Для ограничения пускового тока в цепь якоря двигателя на момент пуска включают специальный пусковой реостат $R_{пр}$ (рис. 4.46), сопротивление которого выбирают с таким расчетом, чтобы пусковой ток не превышал $(2 \div 2,5) I_{а ном}$. По мере разгона двигателя возрастает его противо-ЭДС, уменьшается ток и момент, развиваемый двигателем. Пусковой реостат предназначен для кратковременной работы, поэтому по мере разгона двигателя пусковой реостат выводят.

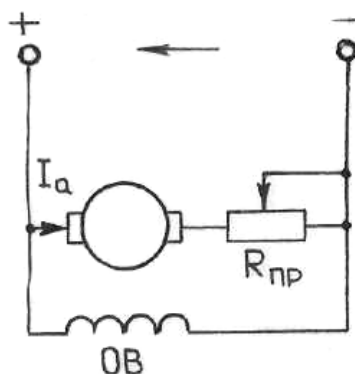


Рис. 4.46

Ограничение пускового тока достигается также в случае пуска при **пониженном напряжении U** , подводимом к якорю двигателя от источника с регулируемым напряжением.

4.20.6. Регулирование частоты вращения двигателя

В соответствии с выражением (4.13) частота вращения двигателя определяется формулой

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi}. \quad (4.16)$$

Видно, что регулировать частоту вращения двигателя можно тремя способами: 1) изменением сопротивления цепи обмотки R_a якоря путем включения регулируемого добавочного сопротивления в цепь обмотки якоря; 2) изменением магнитного потока Φ путем изменения тока в обмотке возбуждения регулируемым сопротивлением, включенным в цепь обмотки возбуждения; 3) изменением напряжения питающей сети U . В зависимости от способа возбуждения двигателя и выполняемых функций, в каждом конкретном случае преимущественно используется тот или иной способ регулирования.

4.20.7. Реверсирование двигателя

Для осуществления реверсирования (изменения направления вращения) двигателя необходимо изменить направление вращающего электромагнитного момента $M_{эм} = C_M I_a \Phi$. Это достигается путем изменения направления либо тока в обмотке якоря I_a , либо магнитного потока Φ за счет изменения направления тока в обмотке возбуждения.

Изменение направления тока достигается за счет переключения зажимов соответствующих обмоток двигателя. Следует иметь в виду, что переключение общих зажимов двигателя у рубильника не дает изменения направления вращения якоря, так как при этом одновременно изменяется направление тока и в обмотке якоря и в обмотке возбуждения.

4.20.8. Торможение двигателей

При необходимости быстрой остановки двигателя осуществляют торможение двигателя, которое выполняют посредством механических тормозов, или с использованием электромагнитного момента самого двигателя. В последнем случае торможение называют электрическим. Электрическое торможение может быть трех видов: рекуперативное, динамическое и противовключением.

Наиболее экономично **рекуперативное торможение**, так как оно основано на переводе двигателя в генераторный режим с отдачей энергии в сеть. Соответственно изменяется направление электромагнитного момента. Из вращающего он становится тормозящим и ограничивает скорость движения исполнительного механизма, приводимого двигателем в движение. Для генерирования энергии, отдаваемой двигателем в сеть, расходуется механическая энергия исполнительного механизма.

Динамическое торможение основано на том, что обмотка якоря двигателя отключается от сети и замыкается на нагрузочное сопротивление. При этом двигатель переходит в генераторный режим. Соответственно изменяется направление электромагнитного момента. Из вращающего он становится тормозящим. Таким образом, механическая энергия вращающихся масс преобразуется в электрическую, которая, в свою очередь, расходуется на нагрев нагрузочного сопротивления.

Торможение противовключением основано на том, что путем изменения направления тока в обмотке возбуждения либо в обмотке якоря меняют направление электромагнитного момента двигателя, который становится тормозящим.

4.21. ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Схема включения в сеть двигателя параллельного возбуждения показана на рис. 4.47. Характерной особенностью этого двигателя является то, что ток в обмотке возбуждения I_B , а следовательно, и магнитный поток Φ не зависят от величины полезной мощности на валу двигателя P_2 ,

то есть $\Phi \approx \text{const}$ (если пренебречь реакцией якоря).

1. Скоростная характеристика $n = f(P_2)$ при $U = U_{\text{ном}} = \text{const}$, $R_a = \text{const}$, $R_b = \text{const}$.

Из формулы

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi} \quad (4.17)$$

следует, что при постоянном напряжении U и токе возбуждения I_b (а следовательно, $\Phi = \text{const}$) на величину частоты вращения при изменении полезной мощности на валу двигателя P_2 оказывают влияние два фактора: падение напряжения в цепи якоря и размагничивающее действие реакции якоря. Причем первый фактор вызывает уменьшение частоты вращения n , а второй, в результате уменьшения магнитного потока Φ , ее увеличение. Обычно преобладает действие первого фактора. В итоге, частота вращения двигателя с ростом нагрузки уменьшается (рис. 4.48). Изменение частоты вращения двигателя при переходе от холостого хода к номинальной нагрузке, выраженное в процентах, называют номинальным изменением частоты вращения:

$$\Delta n_{\text{ном}} = \frac{n_0 - n_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}} \cdot 100 \%,$$

где n_0 – частота вращения двигателя в режиме холостого хода;

$n_{\text{ном}}$ – номинальная частота вращения двигателя.

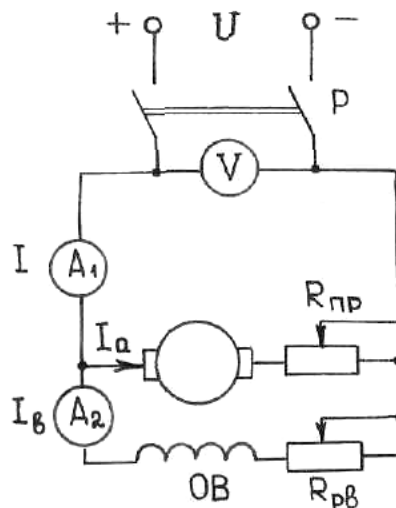


Рис. 4.47

Обычно для двигателей параллельного возбуждения $\Delta n_{\text{НОМ}} = 2 \div 8 \%$ (величина небольшая), поэтому скоростную характеристику этого двигателя называют «жесткой».

2. Моментная характеристика.

$M_{\text{ЭМ}} = f(P_2)$ при $U = U_{\text{НОМ}} = \text{const}$ и $R_a = \text{const}$, $R_b = \text{const}$.

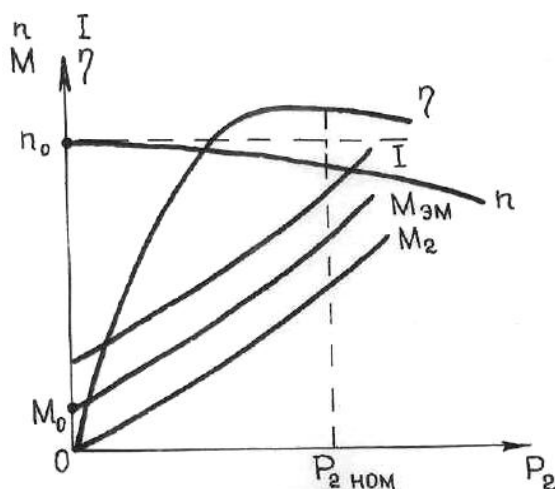


Рис. 4.48

Зависимость полезного момента M_2 от нагрузки установлена формулой $M_2 = 9,55 P_2 / n$. При $n = \text{const}$ график $M_2 = f(P_2)$ имел бы вид прямой. Однако с увеличением нагрузки частота вращения двигателя снижается, а поэтому зависимость $M_2 = f(P_2)$ криволинейна (рис. 4.48). Согласно выражению (5.14) график вращающего (электромагнитного) момента $M_2 = f(P_2)$ смещается вверх относительно кривой $M_2 = f(P_2)$ на постоянную величину момента холостого хода M_0 (рис. 4.48).

3. Выясним характер изменения тока $I = f(P_2)$. Если принять поток $\Phi = \text{const}$, то график $M_{\text{ЭМ}} = f(P_2)$ является в то же время выражением зависимости $I = f(P_2)$, так как $M_{\text{ЭМ}} = C_M \Phi I_a$, откуда $I_a = M_{\text{ЭМ}} / C_M \Phi$. Таким образом, ток, потребляемый двигателем из сети, практически растет пропорционально моменту нагрузки.

4. На рис. 4.48 представлена также кривая зависимости КПД от нагрузки $\eta = f(P_2)$. КПД быстро увеличивается в пределах от $P_2 = 0$ до $P_2 \approx 0,25 P_{2\text{НОМ}}$, достигает максимума примерно при $P_2 \approx 0,5 P_{2\text{НОМ}}$, а затем в пределах изменения нагрузки от $P_2 \approx 0,5 P_{2\text{НОМ}}$ до $P_2 = P_{2\text{НОМ}}$ остается почти постоянным и при дальнейшем увеличении нагрузки падает. Это обусловлено перераспределением преобладающего влияния

между переменными (зависящими от нагрузки) и постоянными (не зависящими от нагрузки) потерями в машине постоянного тока при изменении нагрузки. Из графика видно, что для работы электродвигателя с высоким КПД надо стремиться к его номинальной нагрузке. Обычно в двигателях при номинальной нагрузке $\eta = 0,75 \div 0,94$.

Механическая характеристика $n = f(M)$ при $U = U_{\text{ном}} = \text{const}$, $R_a = \text{const}$, $R_b = \text{const}$.

В общем случае в цепь якоря двигателя может быть включено добавочное регулировочное сопротивление R_q (например, сопротивление пускового реостата, рис. 5.47). С учетом этого

$$n = \frac{U - I_a(R_a + R_q)}{C_e \Phi}. \quad (4.18)$$

Подставив сюда значение тока $I_a = \frac{M_{\text{ЭМ}}}{C_e \Phi}$ (п. 4.10) с учетом

$M \approx M_{\text{ЭМ}}$, получим:

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a + R_q}{C_e C_M \Phi^2} M_{\text{ЭМ}} = n_0 - \beta M, \quad (4.19)$$

где $n_0 = \frac{U}{C_e \Phi}$ – частота вращения двигателя при $M = 0$ (частота вращения идеального холостого хода);

$\beta = \frac{R_a + R_q}{C_e C_M \Phi^2}$ – постоянный коэффициент ($\Phi \approx \text{const}$, так как $I_b = \text{const}$),

определяющий угол наклона характеристики $n = f(M)$ к оси моментов.

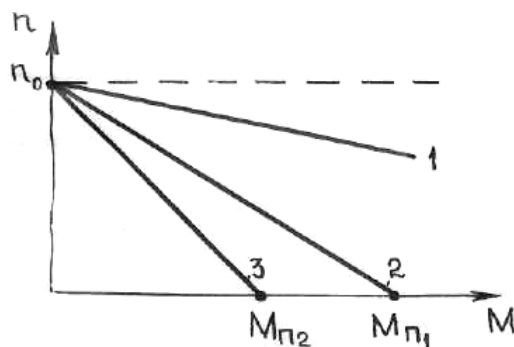


Рис. 4.49

Уравнение (4.19) является аналитическим выражением механической характеристики двигателя.

Механическая характеристика двигателя параллельного возбуждения представляет почти прямую линию, несколько наклоненную к оси моментов (рис. 4.49). Угол наклона характеристики тем больше, чем больше величина добавочного сопротивления, включенного в цепь якоря.

Механическую характеристику двигателя при отсутствии добавочного сопротивления в цепи якоря $R_q = 0$ называют **естественной** (прямая 1). Механические характеристики двигателя, полученные при введении добавочного сопротивления в цепь якоря, называют **искусственными** (прямые 2 и 3). Как и скоростная, механическая характеристика данного двигателя является **жесткой**.

Точка пересечения механической характеристики с осью моментов определяет собой **пусковой момент** двигателя $M_{п}$. Видно, что при увеличении добавочного сопротивления в цепи якоря пусковой момент уменьшается $M_{п2} < M_{п1}$. Если момент нагрузки на валу двигателя будет больше $M_{п2}$, то двигатель не запустится. Для пуска двигателя в этом случае необходимо уменьшить величину добавочного сопротивления в цепи якоря.

Регулировочная характеристика. Наиболее простым и экономичным способом регулирования частоты вращения двигателя с параллельным возбуждением является изменение основного магнитного потока Φ за счет изменения тока в обмотке возбуждения.

Зависимость частоты вращения от тока возбуждения выражается регулировочной характеристикой $n = f(I_v)$ при $U = U_{ном} = const$ и $P_2 = const$.

Если пренебречь падением напряжения в цепи якоря и насыщением магнитной цепи (т.е. считать $\Phi = kI_v$), то при принятых допущениях характеристика $n = f(I)$ представляет собой гиперболу (рис. 4.50).

При очень малом I_v , а тем более при обрыве цепи возбуждения $I_v = 0$, частота вращения двигателя неограниченно возрастает, что приводит к «разносу» двигателя, т.е. к его механическому разрушению.

Физически явление «разноса» объясняется тем, что вращающий электромагнитный момент (4.7) при уменьшении магнитного потока Φ должен уменьшаться, однако ток якоря увеличивается значительно, так как при уменьшении магнитного потока Φ уменьшается противодействующая ЭДС E двигателя (4.6) и разность $U - E$, вызывающая ток

в цепи якоря, увеличивается в большей степени (обычно $E \approx 0,9U$). Таким образом, противодействующая ЭДС в двигателе выступает как автоматический регулятор тока в цепи якоря.

4.22. ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Схема включения двигателя последовательного возбуждения приведена на рис. 4.51. В этом двигателе обмотка возбуждения включена последовательно в цепь якоря, поэтому магнитный поток Φ в нем зависит от тока нагрузки $I = I_a = I_b$. При малых и средних нагрузках магнитная цепь двигателя не насыщена и зависимость магнитного потока от нагрузки прямо пропорциональна, т.е. $\Phi = kI_a$. В этом случае выражение электромагнитного момента (5.7) можно записать в виде

$$M_{\text{ЭМ}} = C_M I_a \Phi = C_M I_a k I_a = C'_M I_a^2, \quad (4.20)$$

откуда ток, потребляемый двигателем:

$$I_a = \sqrt{\frac{M_{\text{ЭМ}}}{C'_M}}. \quad (4.21)$$

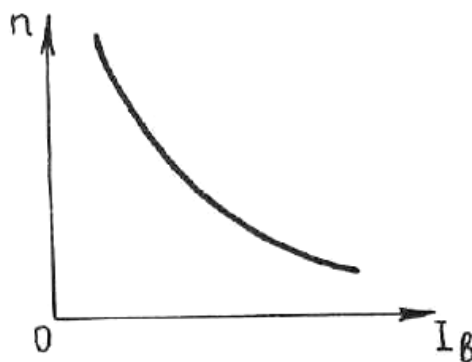


Рис. 4.50

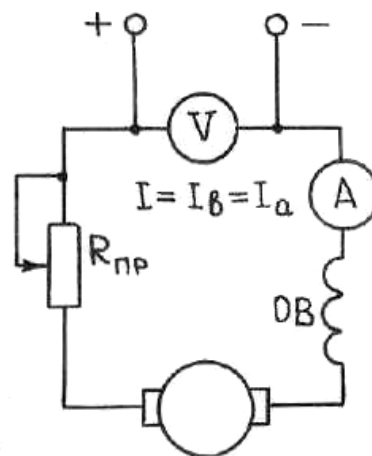


Рис. 4.51

Формула для частоты вращения (4.16) примет вид

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi} = \frac{U - I_a R_a}{C_e k I_a} = \frac{U - I_a R_a}{C_e' I_a}, \quad (4.22)$$

учитывая, что $U = \text{const}$, а величина $I_a R_a$ очень мала, и, если ею пренебречь, то

$$n \approx \frac{U}{C_e' I_a} = \frac{k'}{I_a}. \quad (4.23)$$

В выражениях (4.20), (4.21), (4.22), (4.23) k , C_M , C_e , k' – коэффициенты пропорциональности.

Таким образом, вращающий момент двигателя при ненасыщенной магнитной цепи пропорционален квадрату тока, частота вращения обратно пропорциональна току нагрузки, а следовательно, полезной мощности P_2 на валу двигателя, так как P_2 пропорциональна току двигателя $I = I_a$. Поэтому скоростная характеристика двигателя $n = f(P_2)$ представляет собой гиперболу, а моментная характеристика $M_{\Sigma M} = f(P_2)$ – параболу. Ток, потребляемый двигателем последовательного возбуждения (5.21), при увеличении нагрузки растет в меньшей степени, чем у двигателя параллельного возбуждения, где в отличие от (4.21) потребляемый из сети ток практически растет пропорционально моменту нагрузки $I_a = \frac{M_{\Sigma M}}{C_e'}$.

Это объясняется тем, что у двигателя последовательного возбуждения одновременно с ростом тока растет поток возбуждения Φ и вращающий момент становится равным моменту нагрузки при меньшем токе. Эта особенность двигателя последовательного возбуждения используется там, где возможны значительные механические перегрузки двигателя.

Рабочие характеристики двигателя последовательного возбуждения представлены на рис. 4.52, а. Зависимость КПД $\eta = f(P_2)$ имеет такой же вид, как и у двигателя параллельного возбуждения. Скоростная характеристика $n = f(P_2)$ очень мягкая, т.е. частота вращения резко изменяется при изменениях нагрузки. При значительном уменьшении нагрузки двигатель начинает развивать все большую частоту вращения. При холостом ходе частота вращения двигателя безгранично возрастает и двигатель идет «вразнос», что может привести к разрушению двигателя. Поэтому работа или пуск двигателя последовательного возбуждения без нагрузки на валу недопустимы. Механическая характеристика двигателя последовательного возбуждения $n = f(M)$ представлена на рис. 4.52, б. Резко падающая кривая механической характеристики обеспечивает

двигателю последовательного возбуждения устойчивую работу при любой механической нагрузке.

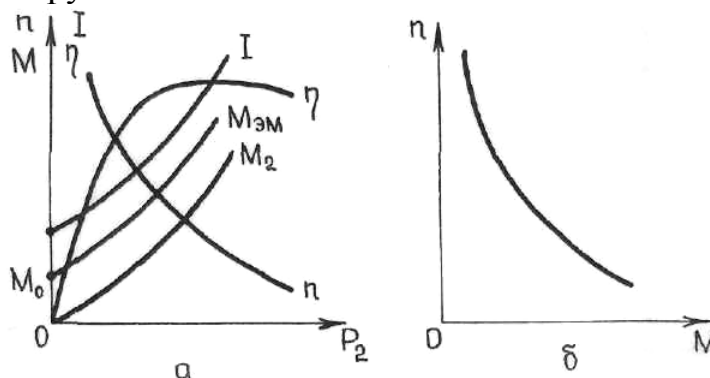


Рис. 4.52

Свойство этого двигателя развивать большой вращающий момент, пропорциональный квадрату тока нагрузки, имеет важное значение, особенно в тяжелых условиях пуска и при перегрузках. Благодаря этому ценному качеству такие двигатели оказались незаменимыми в электроприводах, где пуск производится под нагрузкой и где при небольших частотах вращения необходим значительный вращающий момент.

Частоту вращения двигателей последовательного возбуждения можно регулировать изменением либо величины напряжения питания, либо величины магнитного потока обмотки возбуждения. Регулировать частоту вращения двигателя изменением магнитного потока можно тремя способами: шунтированием обмотки возбуждения реостатом, секционированием обмотки возбуждения и шунтированием обмотки якоря реостатом.

4.23. ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ СО СМЕШАННЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Двигатели со смешанным возбуждением имеют две обмотки возбуждения – последовательную и параллельную, расположенные на общих полюсах (рис. 4.19, з). Такая схема возбуждения позволяет получить электродвигатели, обладающие заранее заданными свойствами. Обмотки возбуждения рассматриваемых двигателей могут быть включены согласно и встречно. При согласном включении магнитные потоки обеих обмоток направлены в одну и ту же сторону, а при встречном включении – навстречу друг другу. Вращающий электромагнитный момент и частота вращения этого двигателя определяются следующими выражениями:

$$M_{\Sigma M} = C_M I_a (\Phi_1 \pm \Phi_2), \quad n = \frac{U - I_a R_a}{C_e (\Phi_1 \pm \Phi_2)}.$$

где Φ_1 и Φ_2 – магнитные потоки параллельной и последовательной обмотки возбуждения.

Знак плюс соответствует согласному включению обмоток возбуждения, а знак минус – встречному.

В зависимости от соотношения величин магнитных потоков параллельной и последовательной обмоток возбуждения одна из них будет основной, а другая вспомогательной.

На практике обычно применяются двигатели смешанного возбуждения с согласным включением обмоток возбуждения. Характеристики таких двигателей принимают положение между аналогичными характеристиками двигателей параллельного и последовательного возбуждения. При этом возможны два варианта:

1) двигатели, у которых последовательная обмотка возбуждения является вспомогательной и предназначена для улучшения пусковых свойств двигателя, т.е. для увеличения его пускового момента;

2) двигатели, у которых вспомогательной обмоткой является параллельная обмотка возбуждения, предназначенная для ограничения частоты вращения двигателя при холостом ходе.

Встречное включение обмоток возбуждения применяется тогда, когда необходимо получить частоту вращения двигателя, не зависящую от нагрузки на его валу.

4.24. ВОПРОСЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Номинальные данные машины постоянного тока указаны в паспортной таблице машины: $P_{\text{ном}}$ – мощность, кВт (для генератора – это электрическая мощность, для двигателя – механическая мощность на валу), $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение, В, $n_{\text{ном}}$ – номинальная частота вращения, об/мин, $\eta_{\text{ном}}$ – КПД.

При включении машины в сеть все соединения в соответствии со схемой выполняются в клеммной коробке, куда выведены концы всех обмоток машины. По ГОСТ 183 – 74 они маркируются следующим образом: Я1, Я2 – выводы обмотки якоря, К1, К2 – выводы компенсационной обмотки, Д1, Д2 – выводы обмотки дополнительных полюсов, С1, С2 – выводы последовательной (сериесной) обмотки

возбуждения, Ш1, Ш2 – выводы параллельной (шунтовой) обмотки возбуждения.

У генератора постоянного тока с самовозбуждением необходимо соблюдать условия самовозбуждения (п. 4.16), иначе генератор может не возбудиться.

При сборке схемы двигателя параллельного возбуждения особенное внимание необходимо уделять надежности соединения цепи возбуждения, так как обрыв цепи возбуждения может привести к «разносу» двигателя.

Пуск двигателя большой мощности осуществляется с помощью пусковых реостатов.

Уход за электрическими машинами включает в себя уход за коллектором и щетками и смазку подшипников. При профилактических осмотрах и регламентных работах обязательно проверяется: состояние коллектора, щеток, смазка подшипников, состояние передачи между приводным двигателем и генератором и сцепления электродвигателя с исполнительным механизмом: частота вращения машины; степень нагревания станины, полюсов, обмоток возбуждения, якоря, коллектора и щеток. Проверяется также, нет ли искрения между коллектором и щетками, нет ли в машине ненормальных для нее шумов. Измеряется сопротивление изоляции обмоток машины и при пониженном сопротивлении изоляции производится просушка изоляции обмоток.

Вопросы для самоконтроля

1. Объясните принцип работы машины постоянного тока в режимах генератора и двигателя. Какова роль электромагнитного момента и ЭДС в этих режимах?

2. Поясните устройство и назначение основных частей машины постоянного тока.

3. Напишите формулу ЭДС и формулу электромагнитного момента машины постоянного тока.

4. Поясните физическую сущность явления реакции якоря.

5. Поясните физические процессы при коммутации.

6. Объясните влияние дополнительных полюсов на коммутацию.

7. Напишите уравнения напряжений и моментов для генератора постоянного тока.

8. Изобразите схемы генераторов независимого, параллельного и смешанного возбуждения, покажите на них токи, напряжения и ЭДС.

9. Сформулируйте условия и объясните процесс самовозбуждения

генераторов постоянного тока.

10. Сформулируйте определение и объясните вид характеристики холостого хода генератора с различным возбуждением.

11. Сравните внешние характеристики различных типов генераторов и объясните различия между ними.

12. Сформулируйте определение и объясните вид регулировочной характеристики генератора с различным возбуждением.

13. Как намагнитить магнитную цепь генератора?

14. Напишите уравнения напряжений и моментов для двигателя постоянного тока.

15. Изобразите схемы двигателей параллельного, последовательного и смешанного возбуждения. Покажите на них токи, напряжения и ЭДС.

16. На примере двигателя параллельного возбуждения поясните физические процессы и особенности пуска в ход двигателя постоянного тока.

17. В каком случае и почему возможен «разнос» двигателя параллельного и последовательного возбуждения?

18. Перечислите способы регулирования частоты вращения двигателей параллельного и последовательного возбуждения, их достоинства и недостатки.

19. Поясните способы реверсирования двигателя параллельного возбуждения.

ГЛАВА 5

КОЛЛЕКТОРНЫЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

5.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

5.1.1. Общие сведения

Коллекторные машины переменного тока подсоединяются к сети переменного тока. Неизменная частота сети преобразователем частоты преобразуется в изменяющуюся частоту $f = \text{var}$. За счет изменения частоты в коллекторных двигателях переменного тока обеспечивается регулирование частоты вращения в широких пределах.

Коллекторные машины переменного тока применяются в регулируемых приводах переменного тока для получения частоты вращения выше синхронной частоты вращения поля. В настоящее время коллекторные машины переменного тока находят наибольшее применение в однофазных сетях для привода бытовых приборов.

В некоторых западноевропейских странах коллекторные двигатели переменного тока используются в настоящее время в качестве тяговых двигателей. Трехфазные коллекторные двигатели переменного тока выпускаются в небольших количествах мощностью в десятки и сотни киловатт.

Основным недостатком коллекторных машин переменного тока является плохая коммутация.

5.1.2. Методические указания

Перед изучением данной главы целесообразно повторить материал по трехфазным цепям. Это связано с тем, что в основе принципа действия коллекторных машин переменного тока лежит образование в трехфазной сети вращающего магнитного поля.

При изучении материала главы необходимо знать основные формулы, определяющие частоту вращения поля, скольжение, электродвижущую силу, частоту вращения ротора, вращающий момент. Для лучшего запоминания формул следует выписать их в отдельную таблицу.

С точки зрения применения и эксплуатации коллекторных машин переменного тока, важно знать их рабочие характеристики, особенности пуска в ход, регулирования напряжения и частоты вращения ротора.

Необходимо не только изучить электрические схемы и способы регулирования, но и разобраться в физических процессах, протекающих в генераторе или двигателе, уяснить преимущества и недостатки каждого способа.

При объяснении конструкции машин, явлений и характеристик целесообразно пользоваться временными и векторными диаграммами, что облегчит понимание многих их особенностей.

После усвоения материала важно ответить на вопросы самоконтроля, самостоятельно проработать ряд задач.

5.2. ВИДЫ КОЛЛЕКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

5.2.1. Однофазные коллекторные двигатели

Однофазные коллекторные двигатели переменного тока, как правило, изготовляют с последовательным возбуждением. Их схема (рис. 5.1) и устройство не отличаются в основном от схемы и устройства.

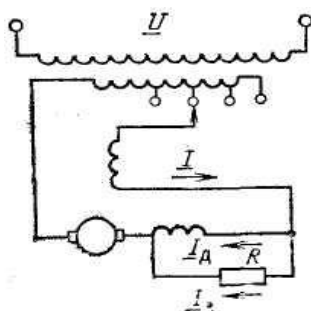


Рис. 5.1. Схема однофазного коллекторного двигателя последовательного возбуждения

В настоящее время однофазные коллекторные двигатели переменного тока выпускают на небольшие мощности. Их применяют в установках, где требуются высокие частоты вращения (3000–30 000 об/мин). К числу таких установок относятся ручные электроинструменты, шлифовальные станки, пылесосы, полотеры и т.д.

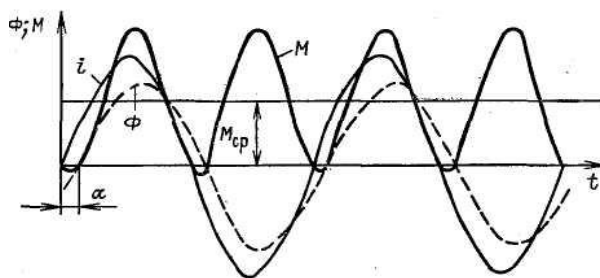


Рис. 5.2. Осциллограммы тока, потока и момента однофазного коллекторного двигателя последовательного возбуждения

Вращающий момент двигателя создается в результате взаимодействия тока якоря I с магнитным потоком Φ , созданным обмоткой возбуждения. Несмотря на то, что ток и магнитный поток переменные, результирующий вращающий момент будет всегда направлен в одну и ту же сторону, так как одновременно с изменением направления тока изменяется направление магнитного потока.

На рис. 5.2 показаны кривые тока, магнитного потока и момента однофазного коллекторного двигателя. Ток I , равный току возбуждения, опережает магнитный поток на угол α из-за наличия магнитных потерь. Как видно из рис. 5.2, момент носит пульсирующий характер. Он пульсирует с двойной частотой тока. Несмотря на это, из-за значительной механической инерции частота вращения двигателя при данных значениях I и Φ будет практически постоянной и будет определяться средним моментом. Из-за наличия сдвига между током и потоком мгновенное значение вращающего момента на протяжении угла α имеет отрицательное значение, что снижает средний момент. У двигателя последовательного возбуждения угол α невелик, поэтому снижение среднего момента будет незначительным. У двигателя параллельного возбуждения из-за большой индуктивности обмотки возбуждения угол сдвига между током возбуждения (потоком) и током якоря имел бы большое значение, что привело бы к сильному снижению среднего момента. По этой причине однофазные коллекторные двигатели переменного тока с параллельным возбуждением не изготавливают. Изменение направления вращения коллекторного двигателя переменного тока осуществляется так же, как и у двигателей постоянного тока. Регулирование частоты вращения двигателей производится путем изменения подводимого напряжения, для чего двигатель и сеть включается через трансформатор, у которого можно менять коэффициент трансформации. Механические характеристики однофазного коллекторного двигателя переменного тока имеют тот же характер, что и у двигателей постоянного тока последовательного возбуждения.

Однофазные коллекторные двигатели переменного тока имеют значительно худшие условия коммутации, чем двигатели постоянного тока. Связано это с тем, что у них в коммутируемых секциях кроме реактивной ЭДС E_r индуцируется трансформаторная ЭДС E_T . Трансформаторная ЭДС возникает вследствие изменения во времени потока возбуждения. Эту ЭДС трудно скомпенсировать, с помощью добавочных полюсов, так как она отстает от тока якоря на угол, примерно равный $\pi/2$, и не зависит от частоты вращения.

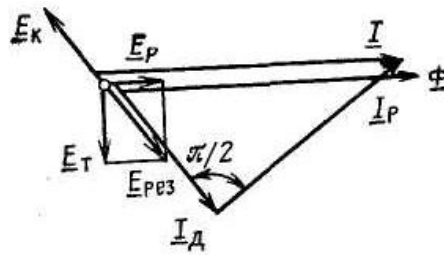


Рис. 5.3. Векторная диаграмма ЭДС в коммутуруемой секции однофазного коллекторного двигателя

На рис. 5.3 показана векторная диаграмма ЭДС, индуцируемых в коммутуруемой секции (принято $\alpha = 0$). Некоторое улучшение коммутации у однофазных коллекторных двигателей достигается шунтированием резистором R дополнительных полюсов (рис. 5.1). В этом случае ток в обмотке дополнительного полюса сдвигается по отношению к току якоря (рис. 5.3) и можно так подобрать его фазу, что наводимая потоком дополнительного полюса ЭДС в коммутуруемой секции e_k будет равна и направлена на встречу ЭДС $E_{рез} = (E_R + E_T)$, т.е. произойдет полная компенсация ЭДС, индуцируемых в коммутуруемой секции. Однако при данном значении сопротивления R этого можно достигнуть только для определенных значений тока и частоты вращения. При других значениях тока и частоты вращения полной компенсации происходить не будет. В целом коммутация этих двигателей значительно хуже, чем двигателей постоянного тока, что затрудняет их изготовление на большие мощности. Двигатели небольшой мощности (до 1 кВт) работают без дополнительных полюсов.

Уравнение напряжения для коллекторного однофазного двигателя переменного тока имеет вид

$$\underline{U} = \underline{E} + \underline{I}r + j\underline{I}x,$$

где E – ЭДС якоря, которая индуцируется при вращении его в магнитном поле полюсов и совпадает по фазе с потоком Φ ; r – сумма активных сопротивлений цепи якоря; x – сумма индуктивных сопротивлений якоря и обмотки возбуждения.

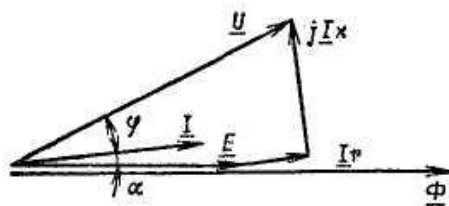


Рис. 5.4. Векторная диаграмма однофазного коллекторного двигателя последовательного возбуждения

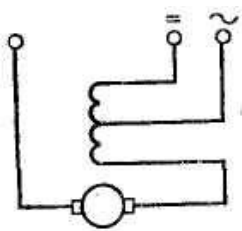


Рис. 5.5. Схема универсального однофазного двигателя последовательного возбуждения

В соответствии с этим уравнением на рис. 5.4 построена векторная диаграмма. Из-за индуктивного сопротивления x имеется сдвиг между током и напряжением. Обычно при номинальной нагрузке $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,7 \div 0,9$. Для улучшения $\cos\varphi_{\text{ном}}$ у двигателей мощностью более 10 кВт применяют компенсационную обмотку, которая, компенсируя реакцию якоря, уменьшает потокосцепление обмотки якоря и ее индуктивное сопротивление.

Иногда однофазные коллекторные двигатели небольшой мощности выпускаются такими, что они могут работать как от сети переменного, так и от сети постоянного тока. Такие двигатели называются универсальными. У этих двигателей из-за индуктивного сопротивления падение напряжения в якорной цепи при переменном токе будет больше, чем при постоянном. Поэтому и частота вращения якоря при переменном токе будет меньше, чем при постоянном. Для выравнивания частот вращения при питании двигателя от сети переменного тока уменьшают магнитный поток, для чего часть обмотки возбуждения отключают (рис. 5.5).

5.2.2. Трехфазные коллекторные двигатели

Трехфазные коллекторные машины переменного ТО являются разновидностью асинхронных машин, у которых можно получить более широкий диапазон регулирования скорости. Развитие их началось в начале XX века, когда были выявлены невысокие регулировочные возможности бесколлекторных асинхронных двигателей. В это время было предложено большое количество различных типов машин, но вследствие своей высокой стоимости, сложности их обслуживания, а также невысокой надежности широкого применения они не нашли. Из известных трехфазных коллекторных двигателей в настоящее время иногда находят применение трехфазный параллельный коллекторный двигатель с питанием со стороны ротора. Этот двигатель был предложен в 1910 г. почти одновременно немецкими электротехниками Х. Шраге и Р. Рихтером. Поэтому этот двигатель чаще называется двигателем Шраге–Рихтера. В настоящее время эти двигатели иногда применяются в полиграфической, текстильной и некоторых других отраслях промышленности.

В двигателях Шраге-Рихтера используется принцип регулирования скорости путем введением и цепь каждой фазы ротора асинхронного двигателя добавочной ЭДС имеющей частоту скольжения, что одновременно позволяет и регулировать и $\cos\phi$. Добавочная ЭДС в двигателе Шраге-Рихтера получается с помощью коллектора. В трехфазных двигателях коллектор является преобразователем ЭДС частоты сети в ЭДС частоты скольжения. На рис. 5.6 показана схема двигателя Шраге-Рихтера. По сравнению с обычным асинхронным двигателем он имеет обращенную конструкцию. Его трехфазная первичная обмотка 1 располагается на роторе и питается от сети через контактные кольца. Вторичная обмотка 2 располагается на статоре. Каждая фаза этой обмотки соединена со щетками передвигающимися по коллектору, расположенному на роторе. К коллектору подсоединяется обмотка 3, которая размещается в тех же пазах, что и обмотка 1 ротора. В обмотке 3 наводится трансформаторная ЭДС за счет индуктивной связи с обмоткой 1. Щетки каждой фазы статора могут, сдвигаться или раздвигаться, что осуществляется при помощи подвижных траверс.

Применив правила правой и левой руки, можно установить, что вследствие обращенной конструкции машины электромагнитный момент, приложенный к ротору, будет направлен в сторону, противоположную вращению поля, т.е. ротор и поле будут вращаться в разные стороны. Угловая скорость ротора ω в общем случае не будет равна угловой скорости поля ω_1 . Скольжение ротора относительно поля определяется известным выражением $s = (\omega_1 - \omega)/\omega_1$.

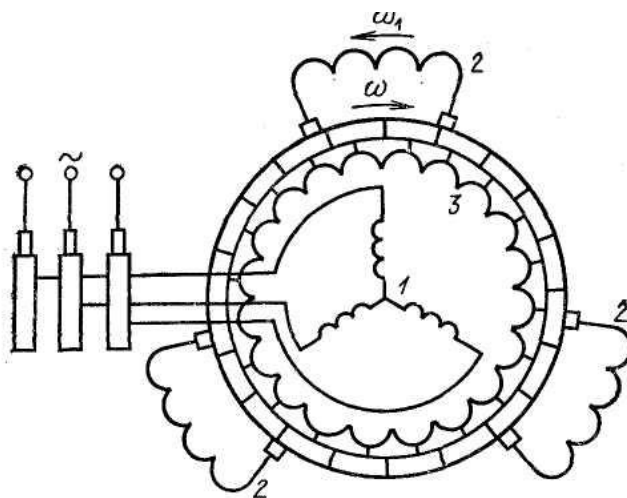


Рис. 5.6. Схема трехфазного коллекторного двигателя Шраге-Рихтера

В пространстве относительно неподвижных щеток магнитное поле машины будет перемещаться со скоростью скольжения $\omega_1 s$. Вследствие этого ЭДС на щетках, вводимая в цепь обмотки 2, будет иметь частоту скольжения $f\omega_1 s$. ЭДС и ее фаза будут зависеть от расстояния между щетками и направления их сдвига по отношению друг к другу. Эта ЭДС будет иметь ту же частоту, что и ЭДС в обмотке 2. На рис. 5.7 показаны три наиболее характерных положения щеток на коллекторе. В первом случае (рис. 5.7, а) обе щетки каждой фазы стоят на одной коллекторной пластине. В этом случае в цепь обмотки 2 никакая добавочная ЭДС не вводится и машина работает как обычный асинхронный двигатель. Так как линии вращающегося магнитного поля пересекают проводники обмоток статора и ротора в одном и том же направлении, то в любой момент времени ЭДС статора E_{2s} и ЭДС на щетках E_d (при положении их на коллекторе, показанном на рис. 5.7, б) будут направлены встречно, поэтому при таком положении щеток скорость будет ниже основной (синхронной).

При положении щеток, показанном на рис. 5.7, в, ЭДС будут суммироваться, скорость будет выше основной. У этого двигателя, сдвигая и раздвигая щетки, можно менять скорость. Обычно диапазон регулирования скорости у таких двигателей не превышает 3:1.

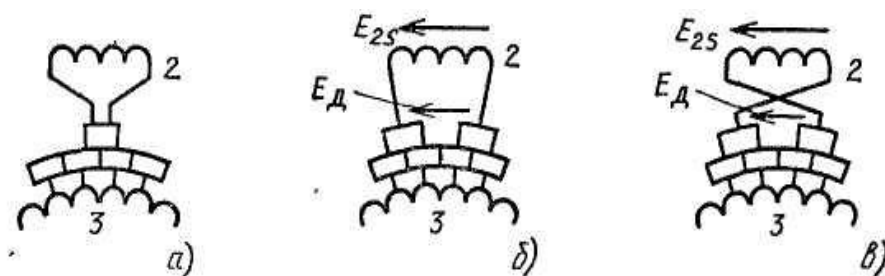


Рис. 5.7. Возможные случаи расположения щеток на коллекторе двигателя Шраге-Рихтера

Рассмотрим принцип регулирования скорости введением в цепь вторичной обмотки 2 добавочной ЭДС E_d . Учитывая, что при нормальной работе скольжение относительно невелико, пренебрегаем индуктивным сопротивлением этой обмотки ($r_2 > x_{2s}$). Предположим, что двигатель работает с нагрузочным моментом $M_2 = \text{const}$ и развивает электромагнитный момент $M \approx M_2 = c\Phi_m I_{2s}$. Если $U_1 = \text{const}$, то магнитный поток $\Phi_m = \text{const}$ и тогда электромагнитный момент M будет пропорционален току I_{2s} во вторичной обмотке ($M \sim I_{2s}$).

Примем, что обе группы щеток каждой фазы расположены на одной и той же коллекторной пластине (рис. 5.7, *а*). Тогда обмотка 2 через щетки оказывается замкнутой сама на себя. В этой обмотке вращающимся полем индуцируется ЭДС $E_{2s} = E_{2S}$ и протекает ток $I_{2s} = E_{2s}/r_2$, создающий необходимый вращающий момент.

Если теперь за счет раздвижки щеток в цепь обмотки 2 ввести добавочную ЭДС E_d ($E_d = \text{const}$), направленную навстречу ЭДС E_2 , (рис. 5.7, *б*), то ток в этой цепи в первый момент времени уменьшится $[(E_{2s} - E_d)/r_2]$. Вследствие этого вращающийся электромагнитный момент двигателя M станет меньше нагрузочного момента M_2 и ротор двигателя начнет замедлять свою скорость. С уменьшением скорости увеличивается скольжение s и ЭДС $E_{2s(1)} = E_{2S(1)}$. При этом ток в обмотке начинает увеличиваться. Увеличение тока в цепи обмотки 2 и снижение скорости ротора будет происходить до тех пор, пока этот ток при скольжении $s_{1(1)}$ не достигнет прежнего значения I_{2s} при котором выполняется равенство моментов $M = M_2$. С увеличением встречно направленной добавочной ЭДС скорость двигателя уменьшается. Аналогичным путем можно показать, что если в цепь ротора вводится добавочная ЭДС E_d , направленная согласно с ЭДС E_{2s} , то скорость ротора будет увеличиваться.

Если щетки перемещать несимметрично относительно осей фаз обмотки 2, то одновременно со скоростью можно регулировать $\cos\varphi$. При любом положении щеток механические характеристики двигателя имеют вид, аналогичный механическим характеристикам асинхронного двигателя.

Условия коммутации у двигателя Шраге-Рихтера значительно хуже, чем у двигателей постоянного тока. Двигатель Шраге-Рихтера не имеет дополнительных полюсов, и, кроме того, в коммутируемых секциях кроме реактивной ЭДС вращающимся магнитным полем индуцируется трансформаторная ЭДС E_T , которая не зависит от нагрузки машины, существует при неподвижном роторе и сдвинута по фазе относительно реактивной ЭДС.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие однофазные коллекторные двигатели применяются наиболее часто?
2. Какой принцип регулирования скорости используется в двигателях Шраге-Рихтера?

3. Имеет ли двигатель Шраге-Рихтера дополнительные полюса и почему?

4. Пояснить принцип регулирования скорости путем введения в цепь вторичной обмотки дополнительной ЭДС.

ГЛАВА 6

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

6.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

6.1.1. Общие сведения

Специальные электрические машины переменного и постоянного тока находят широкое применение в качестве исполнительных двигателей, в том числе и микродвигателей, информационных машин, преобразующих электрический сигнал (напряжение управления) в угол поворота (вращение) управляемого вала. Применяются информационные электрические машины, преобразующие угол поворота в выходное напряжение.

Исполнительными двигателями являются электродвигатели малой мощности (от долей до сотен ватт) – асинхронные, синхронные и постоянного тока.

Асинхронные исполнительные двигатели, применяются в устройствах автоматики объектов ракетной техники, служат для преобразования подводимого к ним электрического сигнала в механическое перемещение вала. При заданной нагрузке на вал двигателя частота его вращения должна строго соответствовать подводимому напряжению и меняться при изменении его величины или фазы.

Характерной особенностью синхронных двигателей является то, что их частота вращения $n_1 = n_2$ жестко связана с частотой питающей сети. Они применяются в часовых механизмах, навигационных системах, высокоточных гироскопических устройствах и др.

Исполнительные двигатели постоянного тока применяются для плавного и глубокого регулирования частоты вращения.

Для обеспечения высоких технико-эксплуатационных характеристик устройств автоматики, вычислительной, навигационной и другой техники многие исполнительные и информационные устройства питаются напряжением переменного тока повышенной частоты: 400, 500, 800, 1000 и более Гц. Ввиду сложности получения такого напряжения при помощи синхронных генераторов нормальной конструкции в объектах ракетной техники применяют генераторы особой конструкции: индукторные синхронные генераторы и синхронные генераторы с возбуждением от постоянных магнитов. Ниже будут рассматриваться основные типы специальных машин.

Конструктивные данные и характеристики специальных электрических машин отличаются от электрических машин обычного исполнения в силу малых мощностей и предъявляемых к ним специфических требований, как, например: широкий диапазон регулирования частоты вращения, линейность основных характеристик, малая инерционность, высокая надежность в работе, малые габариты, масса и др.

6.1.2. Методические указания

Для лучшего понимания и усвоения материала данной главы необходимо повторить материал по трансформаторам и электрическим машинам, а также основы теории электрических и магнитных цепей.

При изучении принципа действия исполнительных и информационных электромашин важно понять, как законы электромагнитной индукции и электромагнитной силы связаны с появлением вращающего момента.

После усвоения материала важно ответить на вопросы самоконтроля.

6.2. СИЛОВЫЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

6.2.1. Однофазный асинхронный двигатель

На статоре однофазного асинхронного двигателя располагается одна обмотка (рис. 6.1). Ротор двигателя имеет короткозамкнутую обмотку. Протекающий по обмотке статора переменный ток создает пульсирующий магнитный поток, изменяющий свое направление по осевой линии полюсов, и его значение во времени изменяется по синусоидальному закону.

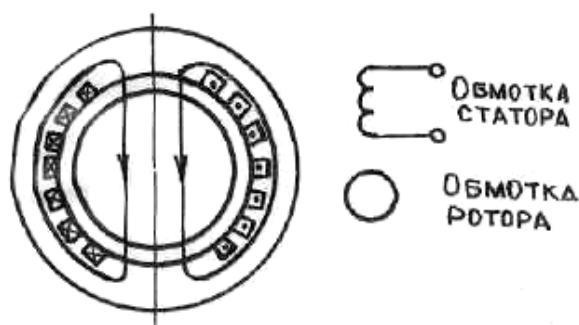


Рис. 6.1

Пульсирующий магнитный поток можно представить как результат сложения двух вращающихся с одинаковой частотой в противоположном направлении потоков, значение которых равны (рис. 6.2, а). Если пульсирующий поток изменяется по закону $\Phi = \Phi_m \cos \omega t$, то при $t = 0$ поток $\Phi = \Phi_m$ (рис. 6.2, б). Вращающиеся потоки Φ_I и Φ_{II} равны $0,5\Phi_m$ и при $t = 0$ совпадают по направлению. Сумма вращающихся потоков равна пульсирующему потоку при $t = 0$.

Через время $t = T/8$ пульсирующий поток $\Phi = \Phi_m \cos(\pi/4) = 0,707\Phi_m$ (рис. 6.2, в). За это время поток Φ_I , вращающийся по часовой стрелке с частотой n_I , повернется на угол $\pi/4$. На такой же угол, но в противоположном направлении, повернется вращающийся поток Φ_{II} , частота вращения которого n_{II} . Частоты вращения n_I и n_{II} равны между собой $n_I = n_{II} = \frac{60f}{P}$. При $t = T/8$ имеем $\Phi_I + \Phi_{II} = \Phi$.

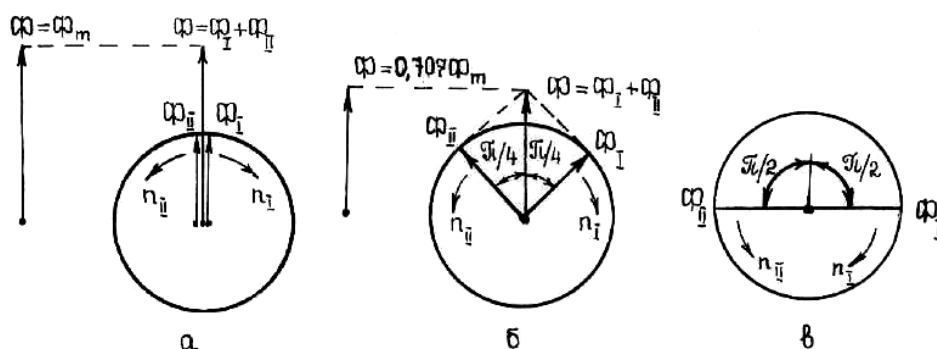


Рис. 6.2

На рис. 6.2 изображены магнитные потоки при $t = T/4$, когда $\Phi = 0$, а вращающиеся потоки повернулись на угол 90° . Таким образом, для каждого момента времени векторная сумма вращающихся потоков равна пульсирующему магнитному потоку. Это позволяет рассматривать однофазный асинхронный двигатель при условии существования двух вращающихся магнитных потоков Φ_I и Φ_{II} .

При неподвижном роторе эти потоки создают равные, но противоположные по направлению вращающие моменты, в результате чего ротор самостоятельно прийти во вращение не может, т.е. пусковой момент двигателя равен нулю.

Однако, если каким-либо образом ротор двигателя привести во вращение, то в дальнейшем он будет развивать вращающий момент.

Поле, вращающееся в одном направлении с ротором, называют прямым, а вращающееся в противоположную сторону – обратным.

Считая, что прямое и обратное поля действуют независимо друг от друга, работу однофазного двигателя можно рассматривать как совместную работу двух совершенно одинаковых трехфазных двигателей, магнитные поля которых вращаются в разные стороны, а роторы имеют общий вал (рис. 6.3), один из двигателей будет создавать момент равный моменту от прямого поля однофазного двигателя, а другой – равный моменту от обратного поля.

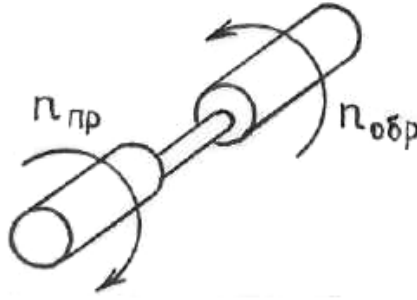


Рис. 6.3

Тогда в соответствии с формулами для момента получим:

$$M_I = C_M I'_I \Phi_I \cos \psi_I;$$

$$M_I = C'_M \frac{\frac{R'_2}{S_1} U_1^2}{\left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{S_1} \right)^2 + (X_1 + X'_2)^2 \right]}; \quad (6.1)$$

$$M_{II} = C_M I'_{II} \Phi_{II} \cos \psi_{II};$$

$$M_{II} = C'_M \frac{\frac{R'_2}{S_{II}} U_1^2}{\left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{S_{II}} \right)^2 + (X_1 + X'_2)^2 \right]}, \quad (6.2)$$

где $S_1 = (n_1 - n_2)/n_1 = S$, а частота тока ротора, наведенного этим полем, $f_{2I} = f_1 S_I$;

$$S_{II} = \frac{n_1 - (-n_2)}{n_1} = \frac{n_{II} + n_2}{n_{II}} = \frac{n_1 + n_1(1 - S_I)}{n_1} = 2 - S_I.$$

При частоте тока ротора $f_{2II} = fS_{II} = f_1(2 - S_I)$.

С учетом связи между S_I и S_{II} и того, что моменты M_I и M_{II} противоположны по направлению, на рис. 6.4. Построены зависимости $M_I(S_I)$, $M_{II}(S_{II})$ и суммарного момента $M(S)$. Рассматривая рис. 6.4 и анализируя формулы (6.1) и (6.2), можно сделать вывод.

Однофазный двигатель не имеет пускового момента. Он будет вращаться в ту сторону, в которую будет приведен внешней силой. При этом вращающий момент M_I будет велик, так как для тока небольшой частоты $f_{2I} = fS_I$ обмотка ротора оказывает почти чисто активное сопротивление. Поэтому поток Φ_I и индуцируемый им ток I_I почти совпадают по фазе, т.е. значение $\cos\psi_I$ велико, а значение тока I'_1 определяется активным сопротивлением обмотки.

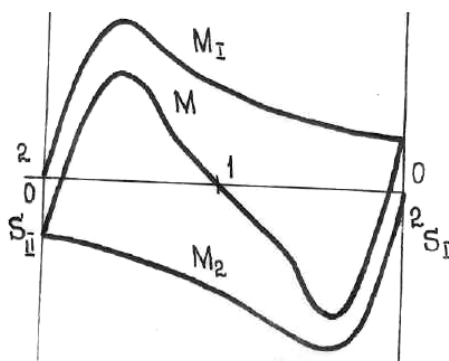


Рис. 6.4

Что касается обратного потока, то он индуцирует в обмотке ротора ток I'_{II} почти вдвое большей частоты питающего тока (например, при $S_I = 0,02$, $f_{2II} = (2 - S_I)f_1 = 99 \text{ Гц}$). Вращающий момент M_{II} мал, так как для тока большей частоты обмотка ротора обладает большим индуктивным сопротивлением ($X_L = \omega L$).

Поэтому между током I'_{II} и потоком Φ_{II} будет большой сдвиг по фазе, т.е. $\cos\psi_{II}$ мал, а ток I_{II} определяется активным и большим индуктивным сопротивлением обмотки.

6.2.2. Однофазный двигатель с пусковой обмоткой

На статоре такого двигателя дополнительно к рабочей обмотке РО добавляется пусковая обмотка ПО, сдвинутая в пространстве относительно РО на угол 90° (рис. 6.5). В момент пуска пусковая обмотка замыкается

выключателем SA накоротко, в результате трансформаторной связи в ней возникает ток, сдвинутый по фазе относительно питающего тока почти на $\pi/2$.

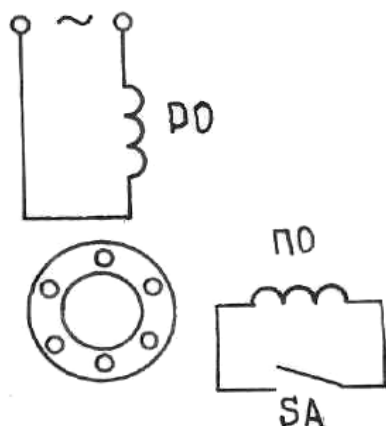


Рис. 6.5

Эти токи создают вращающее магнитное поле (рис. 6.6), которое и разгоняет ротор. После разгона ротора обмотка ПО отключается и в дальнейшей работе не участвует. Следовательно, двигатель по окончании процесса пуска работает с пульсирующим магнитным полем статора.

6.2.3. Конденсаторный двигатель

В этих двигателях, в отличие от рассмотренного однофазного двигателя, пусковая обмотка включается последовательно с конденсатором $C_{по}$ и остается включенной в течение всего процесса работы (рис. 6.7).

Емкость $C_{по}$ цепи обмотки ПО создает сдвиг по фазе между токами $I_{ро}$ и $I_{по}$.

При подключении такого двигателя к однофазной сети по обмоткам статора будут протекать сдвинутые по фазе токи, которые создают вращающееся магнитное поле в общем случае эллиптического вида. Это вращающееся магнитное поле статора пересекает короткозамкнутые витки ротора, наводит в них ЭДС, под действием которых в витках протекают токи. Взаимодействие токов ротора с вращающимся магнитным полем обмоток статора обуславливает появление вращающего электромагнитного момента, приводящего во вращение ротор двигателя.

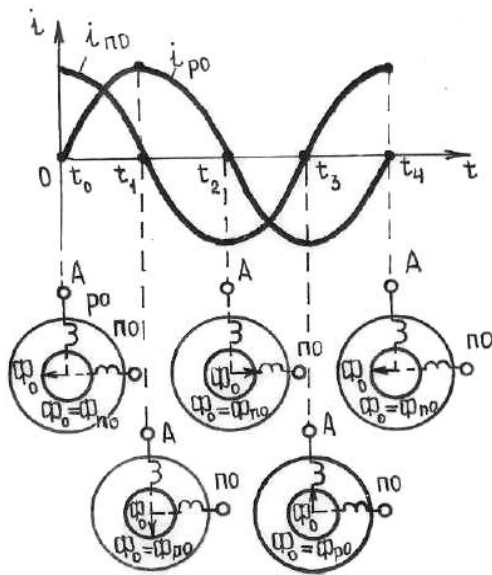


Рис. 6.6

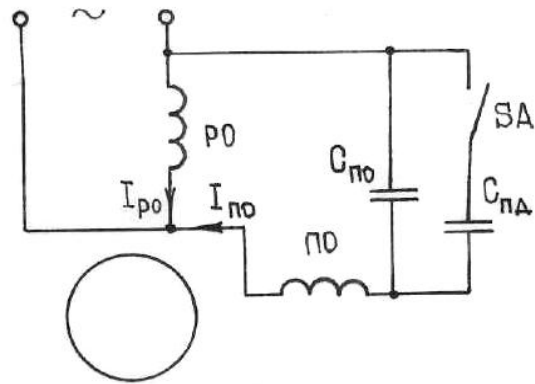


Рис. 6.7

Таким образом, если однофазный асинхронный двигатель по окончании процесса пуска работает с пульсирующим магнитным полем статора, то конденсаторный двигатель работает с вращающимся магнитным полем, близким к круговому.

При поле, близком к круговому, конденсаторный двигатель по своим рабочим свойствам приближается к трехфазному асинхронному двигателю.

Для повышения значения пускового момента выключателем SA включают параллельно рабочей емкости пусковую емкость $C_{пд}$, которая отключается при достижении ротором частоты вращения 60–70 % синхронной. После этого двигатель будет работать только с рабочей емкостью $C_{п0}$.

6.2.4. Гистерезисный двигатель

Гистерезисный двигатель находит широкое применение в устройствах автоматики ракетной техники и является наиболее распространенным синхронным гиродвигателем высокочастотных гироскопических устройств.

Статор гистерезисного двигателя выполняется так же как и статор синхронного двигателя. В пазах статора укладывается трехфазная (двухфазная) обмотка 2, создающая вращающееся магнитное поле.

Ротор двигателя (рис. 6.8) представляет собой стальной цилиндр из магнитотвердого материала, имеющего широкую петлю гистерезиса.

С целью экономии дорогих специальных сплавов роторы гистерезисных двигателей выполняют сборными в виде сплошного или шихтованного кольца 3 из магнитотвердого материала, насаженного на стальную или алюминиевую втулку 4.

Зазор по всей окружности между статором и ротором равномерный, так как ротор не имеет выступов и пазов.

Такой двигатель получил название гистерезисного потому, что в нем электромагнитный вращающий момент, в основном, создается за счет явления гистерезиса при намагничивании ферромагнитного материала ротора.

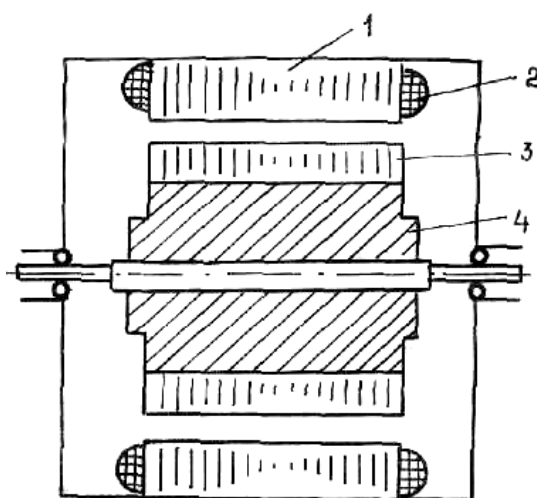


Рис. 6.8

Принцип действия гистерезисного двигателя состоит в следующем. Если трехфазную обмотку статора гистерезисного двигателя подключить к сети трехфазного переменного тока, то в двигателе возникает вращающееся магнитное поле статора. Под действием этого поля будет создан вращающийся электромагнитный момент M гистерезисного двигателя, который можно рассматривать как сумму двух моментов: момента от вихревых токов M_B и гистерезисного момента M_H :

$$M = M_B + M_H.$$

Момент от вихревых токов M_B по своей природе такой же, как и вращающий момент асинхронного двигателя. Он создается в результате взаимодействия вращающегося магнитного поля с вихревыми токами ротора, наводимыми в нем при наличии скольжения ($n_2 \neq n_1$).

При синхронном вращении ротора момент от вихревых токов равен нулю и электромагнитный момент гистерезисного двигателя определяется только гистерезисным моментом.

Чтобы выяснить физическую сущность гистерезисного момента, рассмотрим ротор, помещенный в поле постоянного магнита, имитирующего собой магнитное поле статора (рис. 6.9). Помещенный в это поле ферромагнитный ротор намагнитится, т.е. все его элементарные магнетики будут ориентированы по линиям поля. Для простоты на рис. 6.9 показаны только два элементарных магнита. Между элементарными магнитами и полюсами магнита $N - S$ возникают только радиальные силы F_r притяжения ротора к полюсам магнита, которые никакого вращающего момента не создадут (рис. 6.9, а).

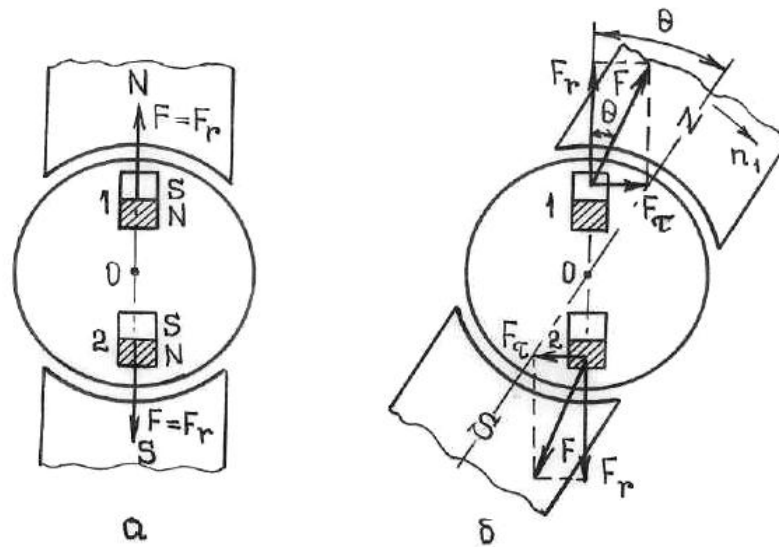


Рис. 6.9

При вращении поля статора (магнита $N - S$) вокруг ротора элементарные магниты будут поворачиваться в том же направлении вслед за магнитным полем полюсов. Однако, вследствие гистерезисного запаздывания (молекулярного трения) элементарные магниты 1 и 2 будут несколько отставать от магнитного поля полюсов N и S и между ними появится угол рассогласования θ (рис. 6.9, б). В этом случае, кроме радиальных сил F_r , возникнут и тангенциальные силы взаимодействия F_t , которые и создадут гистерезисный вращающий момент.

Явление магнитного запаздывания заключается в том, что частицы ферромагнитного материала, помещенного во внешнее магнитное поле, представляют собой элементарные магнетики, которые стремятся ориентироваться в соответствии с направлением внешнего поля. Если внешнее поле изменит свое направление, то элементарные частицы

меняют свою ориентацию. Однако повороту элементарных частиц препятствуют в магнитотвердых материалах внутренние силы молекулярного трения. Для изменения направления элементарных частиц необходима определенная намагничивающая сила, вследствие чего перемагничивание ротора несколько отстает от изменения направления внешнего поля. Это отставание (магнитное запаздывание) характеризуется углом гистерезисного сдвига θ между вектором потока ротора и вектором намагничивающей силы обмотки статора. Величина этого угла зависит только от магнитных свойств материала ротора.

Гистерезисный вращающий момент при синхронной скорости вращения уравнивает тормозной момент, который приложен к валу двигателя. При увеличении тормозного момента будет увеличиваться угол θ и гистерезисный момент M_{Γ} .

При некотором угле $\theta = \theta_m$, составляющем $30-50^\circ$, зависящем от материала гистерезисного слоя, гистерезисный момент становится максимальным $(M_{\Gamma} - M_{\Gamma m})$. Дальнейшее увеличение момента сопротивления на валу двигателя переводит гистерезисный двигатель в асинхронный режим, когда скорость вращения ротора становится меньше скорости вращения поля статора, т.е. $n_2 < n_1$.

При работе двигателя в асинхронном режиме электромагнитный момент гистерезисного двигателя состоит из гистерезисного момента и момента от вихревых токов $(M = M_{\Gamma} + M_B)$.

У гистерезисных двигателей с шихтованными роторами момент от вихревых токов практически равен нулю.

К положительным качествам гистерезисных двигателей относятся:

- простота конструкции, обуславливающая его надежность в эксплуатации;

- большой пусковой момент и момент входа в синхронное вращение, а также плавность этого входа (отсутствие рывка);

- практически почти неизменная величина тока при пуске и работе $(\frac{I_n}{I_n} = 1,3 - 1,4)$, что обеспечивает возможность работы гистерезисного

электродвигателя от маломощных источников питания, а также обеспечивает хорошие пусковые и рабочие характеристики в однофазном режиме с постоянно включенным конденсатором;

- бесшумность работы и сравнительно высокий КПД (до 60 %);

- возможность использования одного и того же ротора для статоров с различным числом полюсов, так как ротор не имеет конструктивных полюсов.

К недостаткам гистерезисных двигателей следует отнести низкий коэффициент мощности ($\cos \varphi = 0,3 - 0,45$) и сравнительно высокую стоимость.

6.2.5. Синхронный реактивный двигатель

Статор синхронного реактивного двигателя устроен аналогично статору обычного асинхронного двигателя.

Ротор двигателя явно полюсной, но без обмотки возбуждения. Возбуждение двигателя осуществляется со стороны статора за счет реактивной составляющей тока, поступающего из сети в обмотку статора. Реактивная составляющая создает продольный магнитный поток, который является потоком возбуждения двигателя, создающим реактивный вращающий момент. Поскольку поток возбуждения в таких машинах создается реакцией якоря, их принято называть реактивными.

Для выяснения физической сущности реактивного момента представим вращающееся магнитное поле двигателя в виде двух полюсов магнита и будем считать, что поле и ротор не вращаются (рис. 6.10). Когда продольная ось невозбужденного явно полюсного ротора совпадает с осью полюсов, т.е. когда угол между этими осями $\theta = 0$, магнитное поле, силовые линии которого всегда проходят по путям с наименьшим магнитным сопротивлением не деформируется (рис. 6.10, а). Реактивный момент при этом равен нулю, так как магнитные силовые линии распределены симметрично оси полюсов. Если ротор отстает на некоторый угол θ от оси магнитного поля (рис. 6.10, б), магнитные линии, стремясь по-прежнему пройти через ротор вдоль его продольной оси, искажаются.

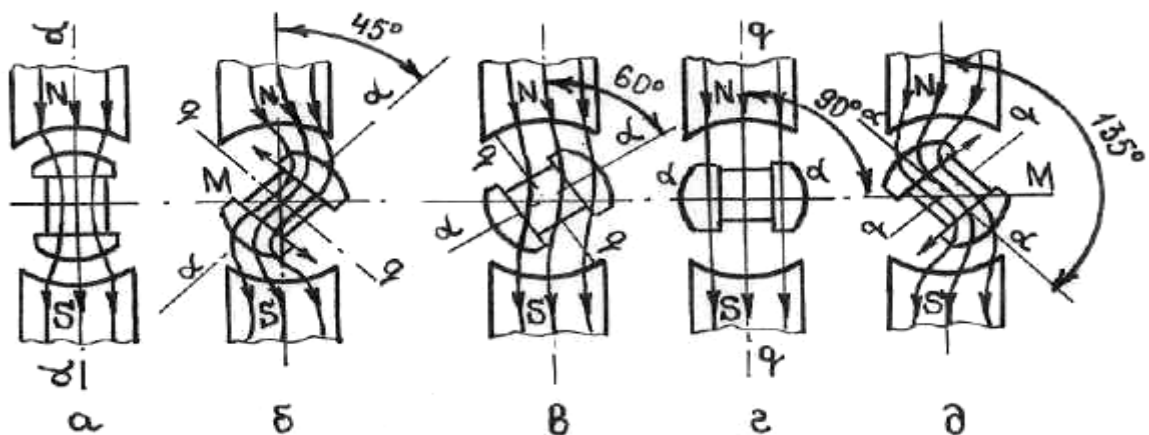


Рис. 6.10

Возникают силы поля, стремящиеся повернуть ротор в прежнее положение устойчивого равновесия, соответствующее максимальной проводимости воздушного зазора. Наибольшая деформация поля, а следовательно, и наибольший момент, действующий на ротор, наступает при угле $\theta = 45^\circ$.

При дальнейшем отставании ротора деформация магнитного поля будет уменьшаться, так как часть магнитных силовых линий начнет проходить непосредственно от одного полюса к другому по поперечной оси ротора (рис. 6.10, в). Вместе с этим реактивный момент уменьшается. При угле поворота $\theta = 90^\circ$ деформация поля отсутствует (рис. 6.10, г) и момент, приложенный к ротору со стороны поля, равен нулю. При $\theta > 90^\circ$ снова появится деформация поля и действующий на ротор момент, имеющий уже обратный знак.

Конструкции роторов синхронных реактивных двигателей весьма разнообразны, однако наибольшее распространение получил ротор, представленный на рис. 6.11. Он отличается от обычного коротко замкнутого асинхронного двигателя только тем, что имеет на своей поверхности междуполюсные впадины, с помощью которых образуются выраженные полюсы, необходимые для работы реактивного двигателя в синхронном режиме. Число полюсов ротора должно быть равно числу полюсов статора.

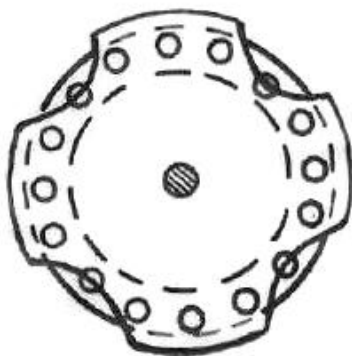


Рис. 6.11

«Беличья клетка» ротора изготавливается литой из алюминия или выполняется из медных стержней, соединенных по торцам коротко замкнутыми кольцами. В процессе пуска она служит для создания вращающего момента, как и в обычных асинхронных машинах с короткозамкнутым ротором. За счет асинхронного момента, возникающего в результате взаимодействия токов в «беличьей клетке»

с вращающимся полем статора, ротор реактивного двигателя разгоняется до скорости $n \approx (0,95 - 0,97)n_c$, после чего под действием реактивного момента он втягивается в синхронизм. По мере разгона ротора ток в беличьей клетке и асинхронный момент двигателя уменьшается, и при синхронной скорости вращения ротора двигатель развивает только реактивный момент.

Вопросы для самоконтроля

1. Изобразите схему однофазного асинхронного двигателя и объясните принцип его действия.
2. Объясните принцип действия асинхронного двигателя с пусковой обмоткой.
3. Объясните принцип действия конденсаторного двигателя.
4. Объясните принцип действия гистерезисного двигателя.
5. Поясните, как осуществляется возбуждение синхронного реактивного двигателя.
6. Нарисуйте роторы гистерезисного и реактивного двигателей и поясните их устройство.

6.3. ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ

6.3.1. Общие сведения о гироскопических двигателях

Гироскопические устройства получают все большее применение в различных приборах и устройствах и в том числе в ракетной технике. Главным элементом этих устройств является гироскоп.

Гироскоп представляет собой быстро вращающийся маховик, укрепленный в узле, обеспечивающем поворот оси вращения маховика относительно основания, на котором он установлен. Маховик вместе с двигателем, приводящим его во вращение, называется гиродвигателем.

Гиродвигатель – важнейший элемент гироскопического прибора, во многом определяющий такие его эксплуатационные характеристики, как точность, долговечность, время готовности, габариты и др. Он предназначен для разгона маховой массы в течение определенного промежутка времени до номинальной частоты и для обеспечения ее дальнейшего стабильного вращения.

Поскольку точность и чувствительность гироскопического прибора зависят от величины и стабильности кинетического момента $J\omega$ ротора гироскопа, то при проектировании гиродвигателей стремятся получить

в заданных габаритах максимально возможные моменты инерции J и угловую частоту вращения ротора ω , а также стабильность массы и постоянство частоты вращения.

Наиболее широкое применение получили электрические гиродвигатели, который существенно отличаются от электродвигателей общего применения. Их особенности сводятся к следующему:

1. Электродвигатель конструктивно объединен в одно целое с маховиком.

2. Для обеспечения при данных габаритах и массе наибольшего кинетического момента, маховая масса гиродвигателя размещается на максимальном расстоянии от оси вращения. Это достигается обращенной конструкцией электродвигателя – с вращающимся наружным ротором.

3. Для увеличения кинетического момента двигателя выполняются высокоскоростными. Их частота вращения чаще всего составляет $(10-30)10^3$ об/мин, и иногда доходит до 60000 об/мин. Число пар полюсов двигателя составляет 1–3.

4. На валу гиродвигателей нет полезной нагрузки. Они работают в режиме холостого хода и нагрузкой их являются собственные механические потери трения вращающегося маховика о среду, а также потери на трение в подшипниках. Поэтому КПД гиродвигателя равен нулю. Вся мощность, потребляемая гиродвигателем, идет на его нагрев.

5. Из-за большого момента инерции вращающихся частей гиродвигатели имеют относительно большое время разбега и остановки (выбега). Так, время разбега гиродвигателей при частоте сети 400–500 Гц обычно составляет 3–100 с и более. Принципиально любой тип электрического двигателя может быть применен в качестве гиродвигателя, однако они в разной степени удовлетворяют предъявляемым требованиям и получили неодинаковое распространение.

6.3.2. Асинхронные гиродвигатели с короткозамкнутой обмоткой

Такие гиродвигатели удовлетворяют большинству требований и получили весьма широкое применение. Общим их недостатком является зависимость частоты вращения не только от изменения параметров источника питания, но и от изменения момента холостого хода. Поэтому высокие требования к стабильности кинетического момента не могут быть удовлетворены с помощью асинхронных гиродвигателей. Однако простота и надежность конструкции, возможность выполнения на любую скорость вращения, высокие энергетические показатели, хорошие пусковые свойства и ряд других преимуществ обеспечили асинхронным

гиродвигателям широкое применение в гироскопических устройствах средней и низкой точности.

Большинство асинхронных гиродвигателей выпускаются трехфазными с короткозамкнутой обмоткой, обращенной несимметричной или симметричной конструкции с одним или двумя статорами.

Электрическая схема трехфазного асинхронного гиродвигателя представлена на рис. 6.12. Принцип действия трехфазного асинхронного гиродвигателя тот же, что и у обычного трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Конструкция симметричного асинхронного гиродвигателя с одним статором представлена на рис. 6.13. Данный гиродвигатель состоит из узла статора, узла ротора и подшипниковых узлов.

Пакет статора *I* собирается из штампованных пластин электротехнической стали на латунной втулке 2, конец которой развальцовывается. Пакет со втулкой напрессовывается на стальную ось 3, на свободный конец которой напрессовывается стальной фланец 4.

В пазах сердечника статора укладывается трехфазная обмотка 5. Обмотка статора подсоединяется к выводным проводам, проходящим через отверстия оси.

Ротор гиродвигателя состоит из обода 6 с коническими поверхностями у торцов. Обод имеет полированную внешнюю поверхность и внутренние расточки под сердечник ротора 7, фланец крышки 8.

Обод может изготавливаться из латуни или стали.

Сердечник ротора 7 представляет собой пакет, набранный из штампованных пластин электрической стали толщиной 0,35 мм, склеенных клеем БФ. Пазы сердечника заливаются алюминиевым сплавом АЛГ, образуя «белчью клетку».

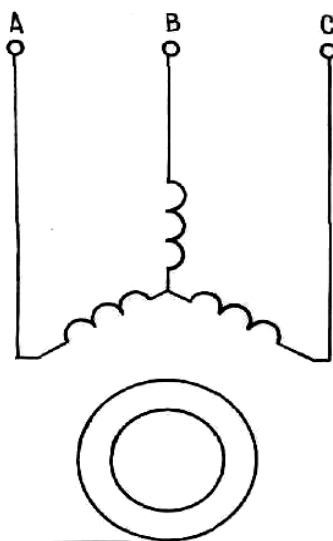


Рис. 6.12

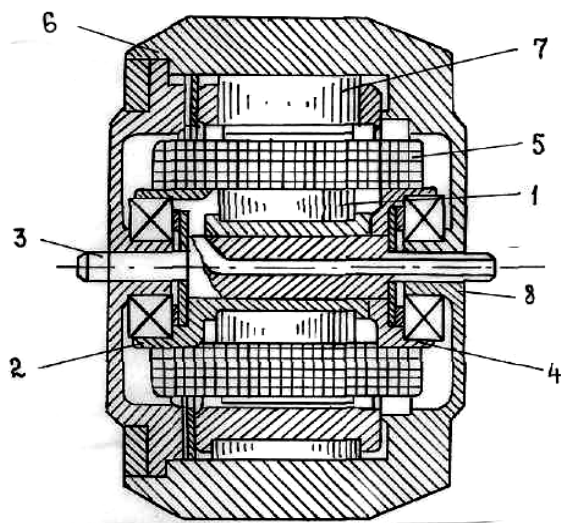


Рис. 6.13

Балансировка ротора производится высверливанием отверстий на поверхности обода 6.

В настоящее время получил применение двухстаторный гиродвигатель, который имеет два симметрично расположенных электродвигателя, короткозамкнутые обмотки которых расположены на общем ободе (маховике).

Преимущество двухстаторной конструкции состоит в монолитности ротора и в хорошем теплоотводе от статора к корпусу.

6.3.3. Синхронные гистерезисные гиродвигатели

В качестве синхронных гиromоторов могут применяться реактивные и гистерезисные двигатели без обмотки возбуждения на роторе.

Однако из-за низкого коэффициента мощности и склонности к колебаниям роторов в зависимости от нагрузки синхронные реактивные гиromоторы не нашли широкого применения

Также применяются синхронные гистерезисные гиromоторы, например, типа ГМС-005, ГС-4/30Б и др. (рис. 6.14).

Гистерезисный гиromотор отличается от асинхронного гиromотора тем, что его ротор 1 не имеет короткозамкнутой обмотки типа «беличья клетка», а имеет пакет шайб 2 из магнитотвердого материала, обладающего остаточным магнетизмом.

Трехфазная обмотка 3 такого двигателя укладывается в неподвижном статоре 4, сердечник которого набирается из пластин электротехнической стали.

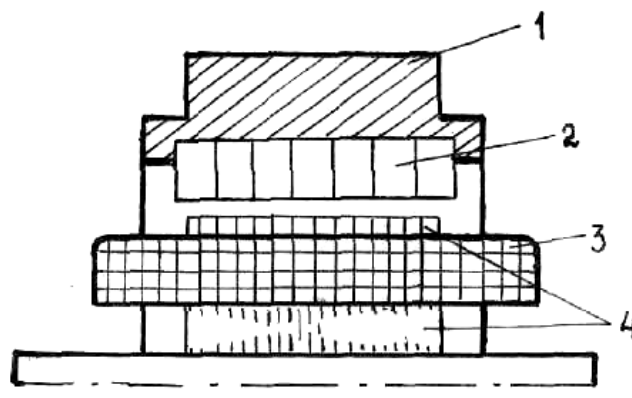


Рис. 6.14

Если поместить такой ротор в магнитное поле статора, то его можно представить состоящим из большого числа элементарных магнитов, полюсы которых точно располагаются под полюсами статора.

Принцип действия гиродвигателя аналогичен принципу действия гистерезисного двигателя, т.е. при вращении магнитного поля статора элементарные магниты на роторе поворачиваются в том же направлении вслед за магнитным полем полюсов. Однако вследствие гистерезисного запаздывания, обусловленного молекулярным трением, магниты несколько отстают от поля и между ними появляется угол рассогласования θ (рис. 6.9). В этом случае тангенциальные составляющие суммарных сил взаимодействия, образующие пару сил, создают гистерезисный вращающий момент, действующий на ротор в направлении вращения поля статора. Угол θ зависит от материала ротора, т.е. от формы петли гистерезиса. Следовательно гистерезисный момент зависит только от коэрцитивной силы материала ротора и не зависит от частоты его вращения. Для материалов, применяемых в гистерезисных гиromоторах, максимальное значение угла θ составляет $30\text{--}50^\circ$.

Пуск и синхронное вращение ротора гистерезисного гиromотора происходит практически под действием одного и того же гистерезисного момента. Величина тока в обмотке статора как при пуске, так и при работе гиromотора также остается практически неизменной.

По внешнему виду синхронные гистерезисные гиromоторы аналогичны асинхронным и, как и асинхронные, могут иметь разнообразное конструктивное оформление.

Достоинства синхронных гистерезисных гиromоторов:

- простота конструкции и высокая надежность работы;
- большой пусковой момент и момент входа в синхронизм, а также плавность входа в синхронизм (отсутствие рывка);
- практически неизменная величина тока при пуске и работе, что позволяет использовать для питания гиromоторов маломощные источники;
- бесшумность в работе;
- сравнительно высокий КПД.

Недостатком является низкий коэффициент мощности, не превышающий $0,3\text{--}0,45$.

Вопросы для самоконтроля

1. Назовите особенности электрических гиromоторов.
2. Объясните устройство асинхронного гиromотора.
3. Поясните принцип действия асинхронного гиromотора.
4. Поясните принцип действия и устройство синхронных гистерезисных гиromоторов.

6.4. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МИКРОДВИГАТЕЛИ

6.4.1. Исполнительные микродвигатели постоянного тока

Исполнительные двигатели постоянного тока выполняют по схеме с независимым возбуждением, при котором цепи якоря и возбуждения, при котором цепи якоря и возбуждения независимы. Двигатели постоянного тока обладают наилучшими регулировочными свойствами, позволяющим плавно и глубоко регулировать частоту вращения. Это достигается в основном изменением напряжения якорной обмотки (якорное управление, рис. 6.15, а) и изменением напряжения обмотки возбуждения – полюсное управление (рис. 6.15, б). Обе схемы предполагают независимое возбуждение, при котором одна обмотка включена на постоянное напряжение, а другая воспринимает сигнал управления.

В обычных схемах управления применяют якорное управление, когда обмотка возбуждения включена на постоянное напряжение и потребляет небольшую мощность, а управляющий сигнал значительной мощности (порядка мощности двигателя) подается на обмотку якоря. При малом сигнале управления к постоянному напряжению подключают обмотку якоря, а сигнал подают на цепь возбуждения; механические характеристики в этом варианте получаются более мягкими.

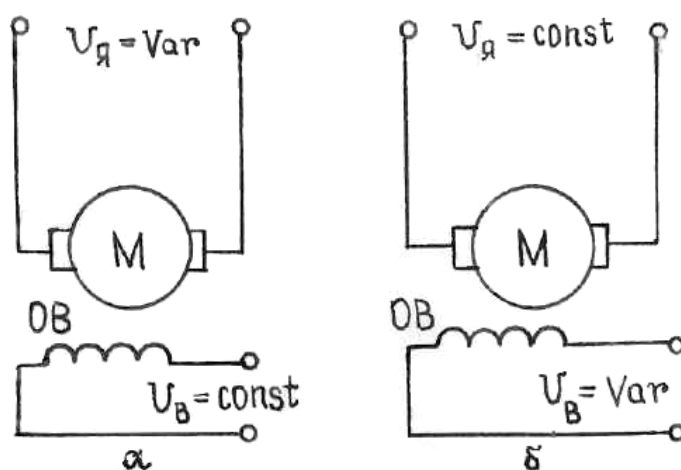


Рис. 6.15

Применение для возбуждения постоянных магнитов является более целесообразным в исполнительных двигателях, так как при малой мощности преимущества магнитоэлектрических двигателей (простота, надежность, меньше потери) сказываются сильнее, чем их недостатки (большее увеличение габаритов и массы с увеличением мощности), по сравнению с двигателями электромагнитного возбуждения.

Микродвигатели постоянного тока имеют относительно высокий КПД от 30 % (при мощности до 10 Вт) до 60 % (при мощности порядка 200–300 Вт); их габариты и масса меньше, чем у соответствующих по мощности двигателей переменного тока. Их главным недостатком являются скользящие контакты щеточно-коллекторного узла. В основном, они удовлетворяют тем специфическим требованиям, которые предъявляются к исполнительным двигателям, не имеют самохода, обеспечивают плавное и глубокое изменение частоты вращения и линейность основных характеристик.

Якорное управление исполнительными двигателями постоянного тока осуществляется с помощью различных схем включения якоря через управляемые вентили-тристоры к источнику переменного напряжения; посредством магнитных усилителей изменением входного управляющего тока I_y обмотки управления постоянного тока.

Рассмотренные здесь двигатели и устройства не исчерпывают всего их многообразия, соответствующего большому числу выполняемых ими задач, т.е. тому количеству разнообразных операций управления и регулирования, которые осуществляются на объектах современной ракетной техники.

6.4.2. Двухфазные управляемые асинхронные двигатели

Двухфазные управляемые асинхронные двигатели образуют отдельную группу исполнительных устройств автоматики и вычислительной техники, в которых одна обмотка (одна фаза) создает пульсирующий магнитный поток, как в однофазном двигателе, а другая обмотка (вторая фаза) является управляющей и работает от сигнала управления U_{oy} (рис. 6.16, а, б). Управление исполнительным двигателем осуществляют изменение напряжения U_{oy} с помощью блока смещения (БС) при постоянстве его фазы (амплитудное управление, рис. 6.16, а) или изменением фазы управляющего напряжения при постоянной его величине (фазовое управление, рис. 6.16, б).

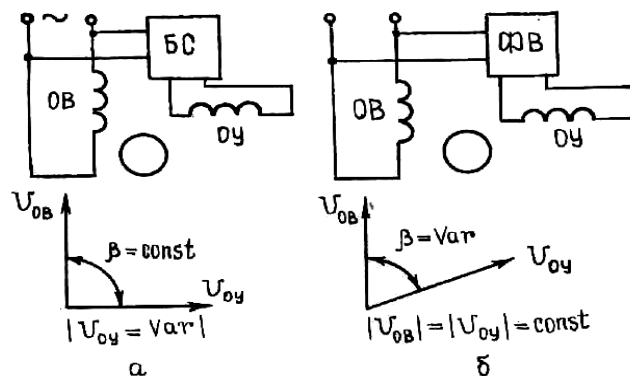


Рис. 6.16

На рис. 6.17 показано устройство двигателя. Статор такого двигателя состоит из двух частей: внешней 1 (как у обычного асинхронного двигателя) и внутренней 2 (для уменьшения магнитного сопротивления на пути основного магнитного потока). Конструкция ротора 3 определяется главными требованиями, предъявляемыми системой автоматики к исполнительному двигателю. Так, например, его малая инерционность обеспечивается применением полого немагнитного ротора 3, который позволяет уменьшить момент инерции и электрохимическую постоянную времени по сравнению с ротором типа беличьей клетки в десять раз и более.

Однако, большая величина немагнитного зазора, увеличиваемая стенками полого немагнитного ротора, вызывает большой намагничивающий (реактивный) ток двигателя (до 90 % $I_{\text{ном}}$), т.е. снижает $\cos \phi$ и КПД двигателя. Другие конструкции ротора позволяют выполнить другие важные в данном конкретном случае требования, но опять за счет ухудшения характеристик, что подтверждает необходимость согласования параметров исполнительных устройств и систем.

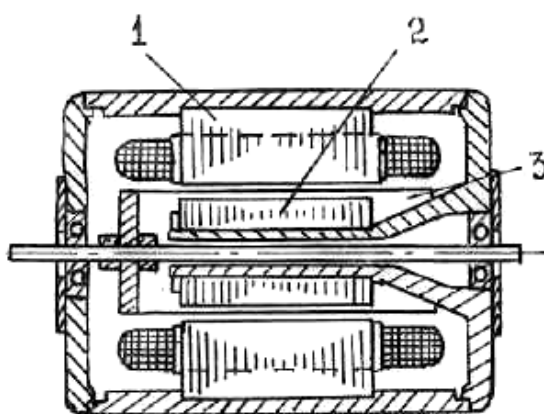


Рис. 6.17

При амплитудном управлении напряжение управления $U_{\text{оу}}$ независимо от его значения имеет фиксированный фазовый сдвиг на 90° относительно напряжения $U_{\text{ов}}$ (рис. 6.16, а). Управление выполняется путем изменения значения амплитуды напряжения управления. Изменение частоты вращения и электромагнитного момента вызвано тем, что при равенстве магнитодвижущих сил обмоток фазы статора ($F_{\text{оу}} = F_{\text{ов}}$) вращающееся поле в двигателе круговое, а при изменении напряжения $U_{\text{оу}}$ равенство нарушается, поле становится эллиптическим и на ротор двигателя действуют не только прямой (вращающий), но и обратный (тормозящий) момент. Реверс двигателя при амплитудном управлении достигается изменением фазы $U_{\text{оу}}$ на 180° .

При фазовом управлении напряжение управления имеет постоянное значение (амплитуду), управление двигателем выполняется путем изменения угла фазового сдвига (с помощью фазовращателя) этого напряжения относительно $U_{ов}$ в диапазоне $\beta = 0 \div 90^\circ$ (рис. 6.6, б). При фазовом сдвиге между напряжениями $U_{оу}$ и $U_{ов}$ на угол $\beta = 90^\circ$ вращающееся поле статора круговое, если $\beta < 90^\circ$, магнитное поле статора становится эллиптическим, если $\beta = 0$ – пульсирующим. Если $\beta < 0$, т.е. угол фазового сдвига отрицательный, то двигатель изменяет направление вращения ротора.

Регулирование частоты вращения ротора может еще осуществляться и амплитудным способом, где сочетается амплитудное и фазовое управления.

Двухфазные управляемые двигатели обладают всеми преимуществами и недостатками конденсаторного двигателя.

Вопросы для самоконтроля

1. Поясните особенности якорного и полюсного управления двигателями постоянного тока.
2. Назовите и поясните основные элементы конструкции двухфазного управляемого асинхронного двигателя.
3. Поясните принципы амплитудного и фазового управления двигателем.

6.5. ШАГОВЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

6.5.1. Общие сведения о шаговых двигателях

Шаговые (импульсные) двигатели представляют синхронные микродвигатели, роторы которых вращаются не непрерывно, а поворачиваются отдельными скачками (шагами). В этих двигателях питание обмотки статора осуществляется путем подачи импульсов напряжения от коммутатора. Под воздействием каждого импульса ротор двигателя совершает угловое перемещение. Коммутатор преобразует заданную последовательность управляющих импульсов в m -фазную систему однополярных или разнополярных прямоугольных импульсов напряжения.

В качестве шаговых двигателей обычно применяются синхронные микромашины без обмотки возбуждения на роторе: двигатели с постоянными магнитами, реактивные и индукторные. Имеются и специальные виды шаговых двигателей, сконструированные для выполнения специальных операций.

Шаговые двигатели применяются для привода механизмов лентопротяжных устройств, элементов ввода и вывода информации, счетчиков, различных программных устройств и т.д.

6.5.2. Электромагнитные шаговые двигатели (механизмы)

Эти двигатели находят широкое применение в счетчиках, временных механизмах и др. Основным элементом механизма является электромагнит, якорь которого воздействует на зубчатое колесо (рис. 6.18).

При подаче импульсов напряжения на обмотку электромагнита якорь притягивается к сердечнику, своим толкателем воздействует на зубчатое колесо и поворачивает его. С колесом жестко скреплен вал механизма, который также поворачивается. Механизм обеспечивает угловой поворот колеса (вала), соответственно шагу зубчатого колеса. После каждого ступенчатого поворота зубчатое колесо фиксируется фиксатором.

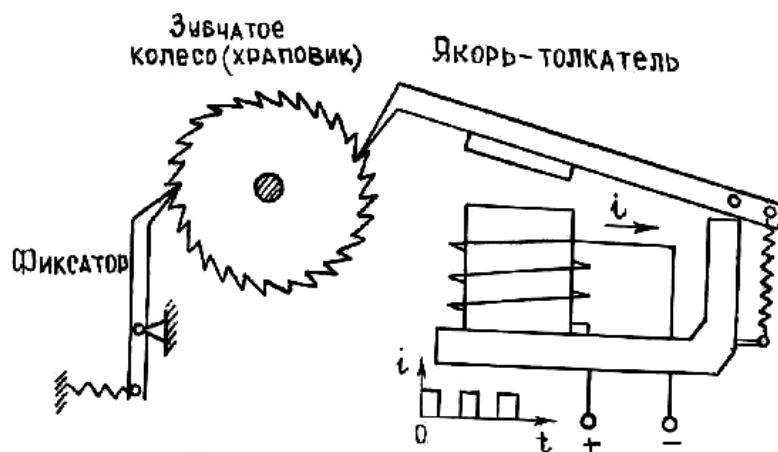


Рис. 6.18

6.5.3. Шаговые двигатели с постоянными магнитами

Ротор двигателя (рис. 6.19, а–в) выполняется в виде постоянного магнита (звездочки) литой или составной конструкции без полюсных наконечников. Шихтованный статор имеет явно выраженные полюса

вокруг которых в полузакрытых пазах размещаются катушки обмотки возбуждения. Обмотка возбуждения может быть двух-, трех- или четырехфазной. Шаговые двигатели этого типа называют также магнитоэлектрическими.

В двигателе, показанном на (рис. 6.19), имеется двухфазная обмотка возбуждения, расположенная на четырех полюсах. Поэтому при последовательной подаче импульсов напряжения на катушки этих полюсов происходит скачкообразное перемещение направления магнитного потока на 90° . В результате, под действием синхронизирующего момента (между полюсами статора и ротора устанавливается магнитная связь: разноименные полюсы притягиваются) при каждом импульсе ротор поворачивается на 90° , т.е. делает шаг, равный 90° .

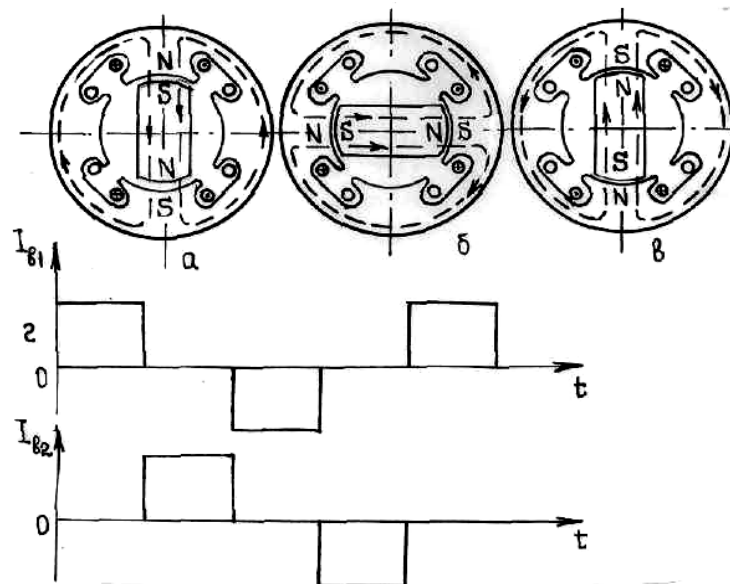


Рис. 6.19

Порядок переключения (коммутация фаз 1 и 2 обмотки возбуждения) представлен на (рис. 6.19, з) в виде временной диаграммы изменения токов I_{B1} и I_{B2} в этих фазах. Каждому импульсу тока соответствует определенное положение ротора двигателя (рис. 6.19, а, б и в – соответствует первому, второму и третьему импульсам токов I_{B1} и I_{B2}). Рассмотренная схема переключения фаз первой и второй обмотки возбуждения называется схемой четырехконтактной разнополярной коммутации.

6.6. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

6.6.1. Тахогенераторы постоянного тока

Тахогенераторы представляют собой электрические генераторы небольшой мощности, служащие для преобразования частоты вращения в электрический сигнал. Как правило, тахогенераторы выполняют с электромагнитным (рис. 6.20, а) или магнитоэлектрическим (рис. 6.20, б) возбуждением.

Основными требованиями, предъявляемыми к тахогенераторам, являются: а) линейность выходной характеристики; б) большая крутизна выходной характеристики; в) малое влияние на выходную характеристику изменения температуры окружающей среды и нагрузки; г) минимум пульсаций напряжений на коллекторе.

Выходная характеристика тахогенератора представляет собой зависимость $U = f(n)$. Для обеспечения линейности характеристики должна быть сохранена строгая пропорциональность между выходным напряжением U и частотой вращения: $n:U = C_1 n$ или

$$U = k\omega = k \frac{d\alpha}{dt}, \quad (6.3)$$

где k – статический коэффициент усиления;

$\omega = \frac{d\alpha}{dt} = \frac{\pi n}{30}$ – угловая частота вращения.

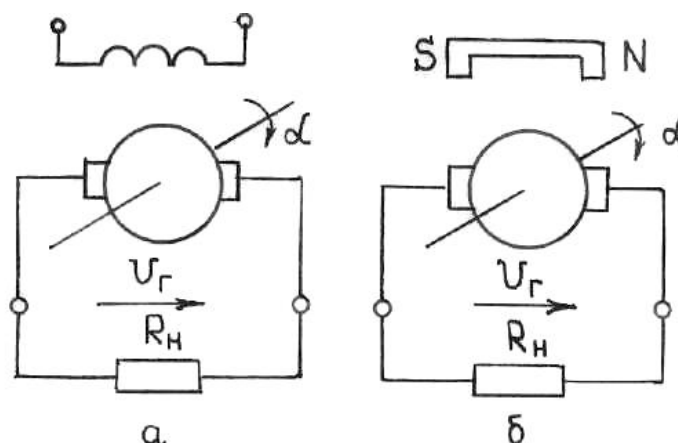


Рис. 6.20

Крутизна выходной характеристики представляет собой отношение приращения напряжения к приращению частоты вращения:

$$C_1 = \Delta U / \Delta n. \quad (6.4)$$

При холостом ходе ЭДС якоря пропорциональная частота вращения:
 $E_{\text{я}} = Cn\Phi_{\text{в}} = C'n$, где $C' = C\Phi_{\text{в}}$; $\Phi_{\text{в}}$ – магнитный поток возбуждения.

При нагрузке напряжение на зажимах тахогенератора уменьшается на падение напряжения:

$$U = E_{\text{я}} - I_{\text{я}}R_{\text{я}}, \quad (6.5)$$

где $I_{\text{я}} = U / R_{\text{н}}$; $R_{\text{н}}$ – сопротивление нагрузки.

Подставляя значение $I_{\text{я}}$ в уравнение (6.5), получим

$$U = E_{\text{я}} - U(R_{\text{я}} / R_{\text{н}}),$$

Откуда

$$U = \frac{E_{\text{я}}}{1 + R_{\text{я}} / R_{\text{н}}} \approx \frac{C'}{1 + R_{\text{я}} / R_{\text{н}}} n. \quad (6.6)$$

При постоянстве $R_{\text{я}}$, $R_{\text{н}}$ и $\Phi_{\text{в}}$

$$U = C_1 n, \quad (6.7)$$

где

$$C_1 = \frac{C'}{1 + R_{\text{я}} / R_{\text{н}}} = \frac{C\Phi_{\text{в}}R_{\text{н}}}{R_{\text{я}} + R_{\text{н}}}. \quad (6.8)$$

Чем больше $C, \Phi, R_{\text{н}}$ и меньше $R_{\text{я}}$, тем больше крутизна C_1 .
 Тахогенераторы с электромагнитным возбуждением имеют большую крутизну выходной характеристики, чем магнитоэлектрические.

Из полученных уравнений следует, что выходное напряжение и при нагрузке является линейной функцией частоты вращения.

6.6.2. Синхронные тахогенераторы

Синхронный тахогенератор является простейшим тахогенератором переменного тока. На рис. 6.21 показана конструктивная схема четырехполюсного тахогенератора.

В пазах статора 3, набранного из листовой электротехнической стали, уложена однофазная распределительная обмотка 2. Внутри статора находится ротор 1, представляющий собой дискообразный постоянный магнит с полюсами чередующейся полярности. При вращении ротора в статорной обмотке наводится ЭДС.

$$E_o = 4,44k_{\text{обм}}Wf\Phi_o = 4/44k_{\text{обм}}W\frac{pn}{60}\Phi_o = C_1n;$$

$$E_o = k_T\omega,$$

где $C_1 = 4,44\frac{k_{\text{обм}}}{60}Wp\Phi_o$; $k_T = 4,44k_{\text{обм}}W\frac{P}{2\pi}\Phi_o$ – передаточный коэффициент тахогенератора, рассматриваемого как усилительное звено с передаточной функцией $W(p) = E_o(p)/\omega(p) = k_T$.

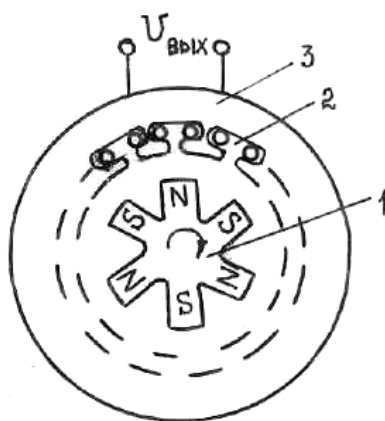


Рис. 6.21

Таким образом, при холостом ходе тахогенератора выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}} = E_o$ и пропорционально его частоте вращения. Однако частота тахогенератора – функция частоты вращения. Следовательно, в нагруженном тахогенераторе реактивная (индуктивная и емкостная) составляющая Z_H и индуктивное сопротивление X_{S1} обмотки машины изменяются с изменением частоты, поэтому выходная характеристика $U_{\text{ВЫХ}} = f(n)$ нелинейна.

Зависимость частоты выходного напряжения от частоты вращения и нелинейность выходной характеристики снижают точность работы синхронных тахогенераторов. Поэтому, несмотря на простоту устройства и отсутствие скользящих контактов, эти тахогенераторы в автоматических системах применяют редко. Используют их, в основном, для измерения

частоты вращения различных механизмов и машин, подключая непосредственно к вольтметру со шкалой, отградуированной в об/мин.

6.6.3. Асинхронные тахогенераторы

Своим устройством асинхронный тахогенератор не отличается от асинхронного исполнительного двигателя с полым немагнитным ротором. Принцип действия асинхронного тахогенератора поясняется схемой (рис. 6.22). На статоре расположены две обмотки: возбуждения и генераторная. Обмотка возбуждения питается переменным напряжением $U_{\text{в}}$ частотой f . С генераторной обмоткой снимается напряжение, пропорциональное частоте вращения ротора. Генераторная обмотка сдвинута в пространстве на 90° относительно обмотки возбуждения.

Если ротор тахогенератора вращать с частотой n , то в результате пересечения стенками полого ротора силовых линий потока $\Phi_{\text{в}}$ в роторе наводится ЭДС вращения. ЭДС вращения прямо пропорциональна частоте вращения ротора, а частота этой ЭДС зависит от частоты пульсаций магнитного потока обмотки возбуждения. Так как поток возбуждения $\Phi_{\text{в}}$ изменяется по синусоиде, то все величины: ЭДС $E_{\text{я}}$, ток $I_{\text{я}}$ и поток $\Phi_{\text{Г}}$ – переменные. В результате поток $\Phi_{\text{Г}}$ наводит в генераторной обмотке синусоидальную ЭДС $\mathcal{E}_{\text{Г}}$. Его действующее значение

$$E_{\text{Г}} = 4,44k_{\text{обм}} f W_{\text{мГ}},$$

где $W_{\text{Г}}$ – число витков генераторной обмотки;

f – частота напряжения, питающего обмотку возбуждения;

$\Phi_{\text{мГ}}$ – амплитуда магнитного потока, пронизывающего генераторную обмотку.

Амплитуда потока $\Phi_{\text{мГ}}$, как это следует из принципа работы тахогенератора, пропорциональна частоте вращения тахогенератора и амплитуде потока обмотки возбуждения, которая постоянна. Так как амплитуда потока возбуждения $\Phi_{\text{мв}} = \text{const}$, то $E_{\text{мГ}} = c n \Phi_{\text{мв}}$: $I_{\text{мГ}}$, $\Phi_{\text{мГ}}$, $E_{\text{мГ}}$ и $U_{\text{мГ}}$ пропорциональны частоте вращения ротора n .

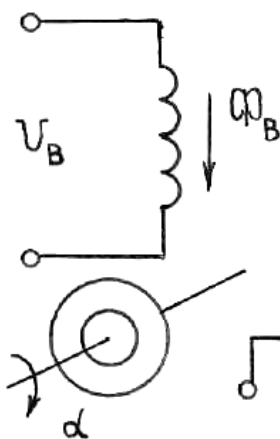


Рис. 6.22

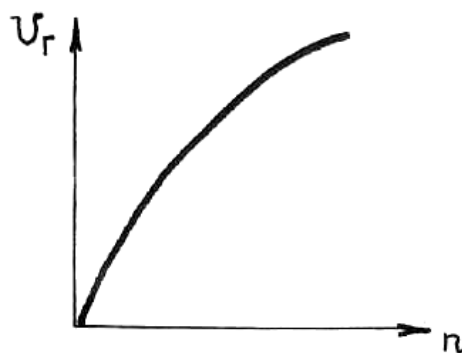


Рис. 6.23

Кроме ЭДС вращения, в роторе наводится трансформаторная ЭДС. Действительно, при $n = 0$ переменный ток возбуждения наводит в полем роторе, как и во вторичной обмотке трансформатора, ЭДС e_T называемую трансформаторной. ЭДС e_T , создает в полем роторе ток ротора и магнитный поток, направленный, как и у вторичной обмотки трансформатора, против потока возбуждения. На генераторную обмотку ЭДС e_T влияние не оказывает, так как она расположена перпендикулярно магнитному потоку возбуждения.

Основным недостатком асинхронных тахогенераторов является нелинейность выходной характеристики (рис. 6.23).

Вопросы для самоконтроля

1. Поясните устройство и принцип действия электромагнитного шагового двигателя.
2. Поясните устройство и принцип действия шагового двигателя с постоянными магнитами.
3. Для чего служат тахогенераторы и где они применяются?
4. Перечислите требования, предъявляемые к тахогенераторам.
5. Объясните устройство и принцип действия тахогенератора постоянного тока.
6. Объясните устройство и принцип действия синхронного тахогенератора.
7. Объясните устройство и принцип действия асинхронного тахогенератора.

6.7. СЕЛЬСИНЫ

6.7.1. Общие сведения о сельсинах

Сельсины представляют собой микромашины, выполняемые по типу синхронных или асинхронных для измерения или синхронной передач на расстояние угловых перемещений двух валов, не связанных между собой механически. В системе синхронной связи они играют роль датчика – задающего устройства, где преобразуется угловое перемещение ведущего вала в электрический сигнал, и приемников, вырабатывающих электрический сигнал в соответствии с углом поворота ведущего вала или преобразующих электрический сигнал датчика в угловое перемещение ведомого вала.

6.7.2. Конструкция и принцип действия

Сельсины индукционных систем синхронной связи являются обычно однофазными. Такой сельсин (рис. 6.24, а, б) имеет одну обмотку возбуждения I (ОВ), присоединяемую к питающей сети для создания переменного магнитного поля, и три обмотки синхронизации 2 (ОС), соединенные по схеме «звезда» (рассматривается вариант расположения ОВ на статоре и ОС – на роторе). При включении обмотки возбуждения на переменное напряжение в ней возникает пульсирующее магнитное поле, которое в обмотках синхронизации наводит ЭДС, являющиеся синусоидальными функциями угла поворота ротора (временного сдвига при одной обмотке возбуждения нет): $E_1 = E_m \cos \alpha$;

$$E_2 = E_m \cos(\alpha - 120^\circ); \quad E_3 = E_m \cos(\alpha - 240^\circ),$$

где E_m – амплитуда ЭДС фазы обмотки синхронизации, ось которой совпадает с осью обмотки возбуждения;

α – угол поворота оси первой фазы относительно оси возбуждения.

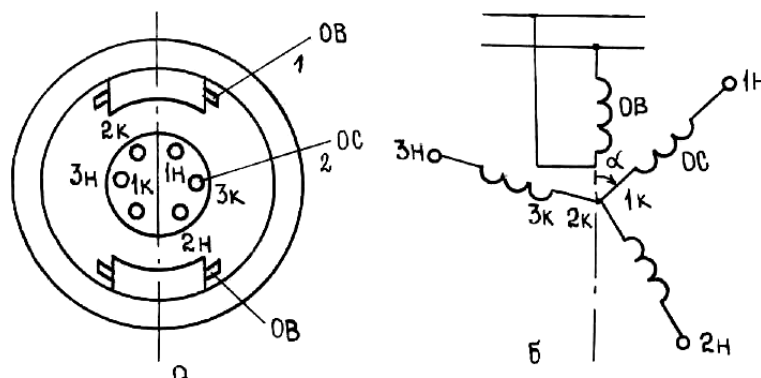


Рис. 6.24

Сельсины работают в паре, состоящей из сельсина-датчика СД (связан с ведущим валом) и сельсина-приемника СП (связан с ведомым валом), в одном из двух основных режимов – индикаторном и трансформаторном.

6.7.3. Индикаторный режим работы сельсинов

Такой режим работы (рис. 6.25) имеет дистанционную передачу углового перемещения в условиях, когда ведомая ось создает незначительный тормозящий момент, например, в стрелочном указателе. При этом обмотки возбуждения сельсинов СД и СП включены в сеть переменного напряжения; обмотки синхронизации соединены проводами линии связи встречно. Если валы расположены одинаково ($\alpha_d = \alpha_n$) по отношению к оси возбуждения, то ЭДС соответствующих фаз обмоток синхронизации равны по величине и противоположны по направлению и токи в проводах линии связи не возникают. Если ведущий вал повернуть на некоторый угол, закрепив его в положении, когда $\alpha_d \neq \alpha_n$, то ЭДС фаз обмоток синхронизации СД и СП станут различными и в проводах линии связи появятся токи; в результате их взаимодействия с потоками возбуждения на роторы будут действовать вращающие моменты, и ротор сельсина-приемника повернется примерно на такой же угол, т.е. установится в положение α_n , близкое положению α_d . В силу не идентичности обмоток синхронизации сельсинов и наличия трения в осях сельсина-приемника имеет место угол рассогласования (ошибка в повороте) $\Delta\alpha = \alpha_d - \alpha_n$, который характеризует точность индикаторной системы.

6.7.4. Трансформаторный режим работы сельсинов

Такой режим работы (рис. 6.26) широко применяется в следящих системах автоматики для дистанционной передачи угла поворота (вращения) вала при управлении сравнительно мощными механизмами. В этом режиме питающее переменное напряжение $U_{вх}$ подают только на обмотку возбуждения сельсины-датчика; обмотки синхронизации соединены также проводами линии связи. Если ведомый вал затормозить в некотором положении, то ЭДС фаз обмотки синхронизации СД вызовут в фазах обмотки синхронизации СП различные по величине (в зависимости от фазы и угла рассогласования) переменные токи; эти токи создают МДС, под действием которых возникает магнитный поток, он пронизывает обмотку возбуждения сельсина-приемника (здесь она является выходной)

и наводит в ней ЭДС, пропорциональную углу α_d поворота сельсина-датчика согласно гармоническому закону. Таким образом, поворот ротора датчика на угол α_d «трансформируется» в напряжение выходной обмотки заторможенного сельсина-приемника. $U_{\text{ВЫХ}} = U_0 \sin \alpha_d$.

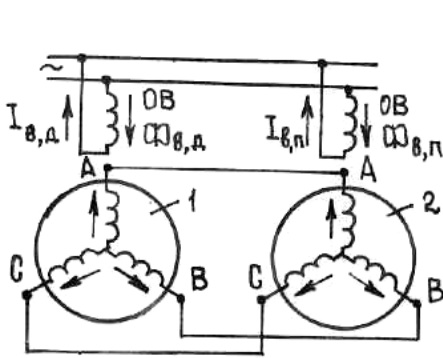


Рис. 6.25

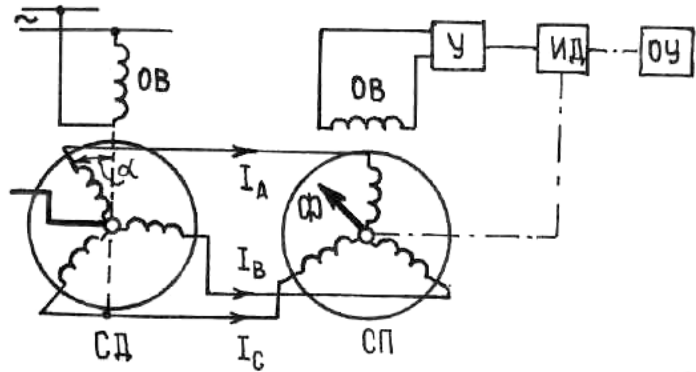


Рис. 6.26

Поскольку получаемый на выходе электрический сигнал имеет небольшую мощность, его усиливают с помощью усилителя и направляют к исполнительному двигателю, который осуществляет поворот ведомого вала.

В зависимости от расположения обмотки возбуждения (на статоре или на роторе) в контактных сельсинах имеется соответственно три или два скользящих контакта, снижающих точность и надежность работы системы. Устранение этих недостатков достигается в бесконтактных сельсинах с электромагнитным возбуждением и магнесинах — магнитоэлектрических бесконтактных сельсинах с ротором в виде постоянного магнита (в качестве обмотки возбуждения).

Сельсины различных типов получили распространение в устройствах вычислительной техники, радиолокации, телеизмерении, телеуправлении и др.

6.8.1. ПОВОРОТНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

6.8.1. Общие сведения о поворотных трансформаторах

Поворотные трансформаторы основаны на трансформации ЭДС первичной цепи (обмотки ротора или статора) в ЭДС вторичной цепи (обмотки статора или ротора) подобно тому, как это происходит в асинхронном двигателе с заторможенным ротором. Однако, если в обычном трансформаторе или в заторможенном асинхронном двигателе изменение величины вторичного (выходного) напряжения получают путем

изменения первичного (входного) напряжения или коэффициента трансформации, то в поворотном трансформаторе выходное напряжение можно изменять по величине и фазе относительно входного напряжения также углом поворота α ротора. Это позволяет преобразовать угол поворота в выходное напряжение, пропорционально синусу или косинусу угла α (синусно-косинусный поворотный трансформатор), угла α (линейный поворотный трансформатор), а также использовать поворотный трансформатор в других режимах – преобразователя координат, построителя векторов, фазовращателя и т.п.

Конструкция поворотного трансформатора такая же, как и у двухфазного асинхронного двигателя с фазным ротором. На статоре размещены две обмотки, сдвинутые между собой на 90° . Две обмотки имеют одинаковое число витков и одинаковое сечение провода. Однако из обмоток, питающаяся от сети однофазного напряжения, называется главной (обмотка S), вторая – вспомогательная или квадратурная K (рис. 6.27). Ротор также имеет обмотки A и B , расположенные перпендикулярно относительно друг друга и имеющие одинаковое число витков и площади сечения обмоточного провода. Обмотки статора и ротора размещены в пазах. Статор и ротор набираются из листов электротехнической стали.

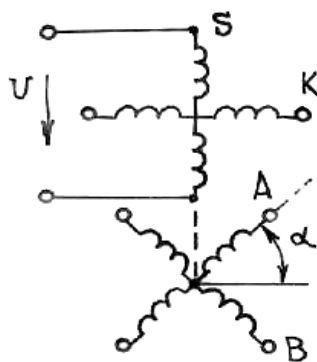


Рис. 6.27

6.8.2. Синусно-косинусные поворотные трансформаторы (СКПТ)

В этом режиме главная обмотка статора питается от источника синусоидального напряжения. Под влиянием пульсирующего магнитного поля статора в обмотках A и B ротора наводится ЭДС, которые зависят от угла α (рис. 6.27). Если обмотки A и B разомкнуты, то в обмотке ротора A будет наводиться ЭДС E_{pa} , пропорциональная синусу угла поворота, т.е.

$$E_{pa} = kE_c \sin \alpha \quad (6.9)$$

где E_c – ЭДС статорной обмотки $S(E_c \approx U)$;

k – коэффициент пропорциональности.

Если рабочей обмоткой ротора считать обмотку B , то выходное напряжение ротора определяется величиной $E_{рв}$. При холостом ходе ЭДС $E_{рв}$ пропорциональна косинусу угла поворота и может быть представлена формулой:

$$E_{рв} = kE_c \cos \alpha. \quad (6.10)$$

Если рабочую обмотку $A(B)$ ротора нагрузить сопротивлением $Z_A(Z_B)$, то по ней потечет ток, появится реакция ротора, которая искажает зависимость $E_{ра} = f(\sin \alpha)[E_{рв} = f(\cos \alpha)]$ и вносит погрешности. Эти погрешности можно уменьшить путем первичного или вторичного симметрирования. При первичном симметрировании необходимо вспомогательную обмотку статора K включать на нагрузку Z_K такой величины, чтобы $Z_K = Z_{вс}$, где $Z_{вс}$ – сопротивление обмотки статора S . Для осуществления вторичного симметрирования необходимо также обеспечить равенство $Z_{ан} = Z_{вн}$.

Вопросы для самоконтроля

1. Для чего предназначены сельсины и поворотные трансформаторы?
2. Объясните принцип действия сельсина.
3. Изобразите схему индикаторного режима и объясните принцип действия сельсина в этом режиме.
4. Изобразите схему трансформаторного режима и объясните принцип его действия.
5. Объясните принцип работы синусно-косинусного поворотного трансформатора.

6.9. СПЕЦИАЛЬНЫЕ СИНХРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

6.9.1. Общие сведения и принцип действия индукторных синхронных генераторов

Индукторные генераторы – это бесконтактные синхронные генераторы, принцип действия которых основан на периодическом изменении магнитной проводимости рабочего зазора при вращении ротора. При этом обмотка возбуждения и обмотка якоря сохраняют

неизменное положение друг относительно друга и расположены на статоре. Отличие таких генераторов заключается в том, что магнитная индукция в любой точке воздушного зазора активной зоны изменяется только по величине, не меняя знака, как показано на рис. 6.28. Во всех других типах синхронных машин магнитная индукция и магнитный поток являются знакопеременными.

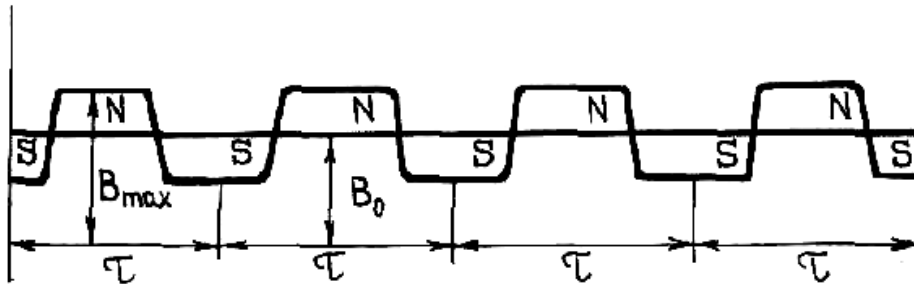


Рис. 6.28

На (рис. 6.29, а, б) представлена наиболее распространенная одноименно полюсная конструктивная схема индукторного синхронного генератора.

Кольцевая обмотка возбуждения 1, расположенная на статоре, создает в магнитной системе магнитный поток Φ_0 , направленный по оси машины в ярме ротора и статора. В активной зубцевой зоне ротора 4 и статора 2 поток принимает радиальное направление в каждой точке воздушного зазора, а также в зубцах статора 2, на которых расположена якорная обмотка 3, периодически изменяется от $\Phi_{\max}$ до $\Phi_{\min}$ не изменяя знака. Это происходит в результате периодического изменения магнитной проводимости зубцевой зоны статора и ротора при вращении последнего.

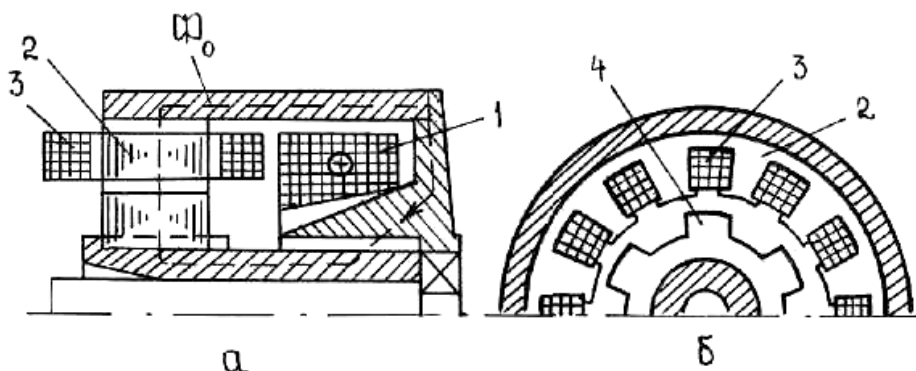


Рис. 6.29

Зубцы ротора 4 – индуктора в индукторных машинах играют роль полюсов. При этом если в синхронных машинах со знакопеременным магнитным потоком полный период изменения ЭДС соответствует

повороту ротора на два полюсных деления (2τ), то в индукторных машинах период изменения ЭДС соответствует повороту ротора на одно зубцовое деление. Вследствие этого взаимная индуктивность между обмоткой возбуждения и фазной обмоткой якоря при вращении изменяется с двойной угловой частотой по отношению к частоте вращения. Таким образом, генерируемая частота индукторного синхронного генератора в 2 раза больше, чем в синхронных генераторах со знакопеременным магнитным потоком при одинаковом числе зубцов ротора, если каждый полюс классического синхронного генератора поставить в соответствие зубцу ротора индукторного синхронного генератора.

Индукторные генераторы могут быть выполнены на высокие частоты, порядка нескольких тысяч герц. При этом, по сравнению с классическими синхронными генераторами они имеют преимущество с точки зрения простоты конструкции, меньших потерь в стали и более высоких окружных скоростей, что приводит к снижению размеров и массы. Эти преимущества существенно проявляются при генерировании частот более 400 Гц.

Для случаев, когда необходимо получить одно – или трехфазные генераторы на две частоты, могут применяться схемы комбинированных индукторных генераторов на разные частоты и разные числа фаз ($m = 1$ или $m = 3$). Конструкция таких схемных решений представлена на рис. 6.30.

Здесь:

а) двухпакетный индукторный генератор, где каждый пакет выполнен на заданную частоту f_1 и f_2 соответственно однофазного ($m = 1$) и трехфазного ($m = 3$) напряжения;

б) трехпакетный индукторный генератор на две частоты (первые два пакета выполнены на частоты f_1 , а третий на f_2);

в) двухпакетный индукторный генератор на две частоты с двумя обмотками возбуждения с отдельным регулированием напряжения;

г) двухпакетный индукторный генератор на две частоты с двумя обмотками возбуждения и отдельным независимым регулированием напряжения.

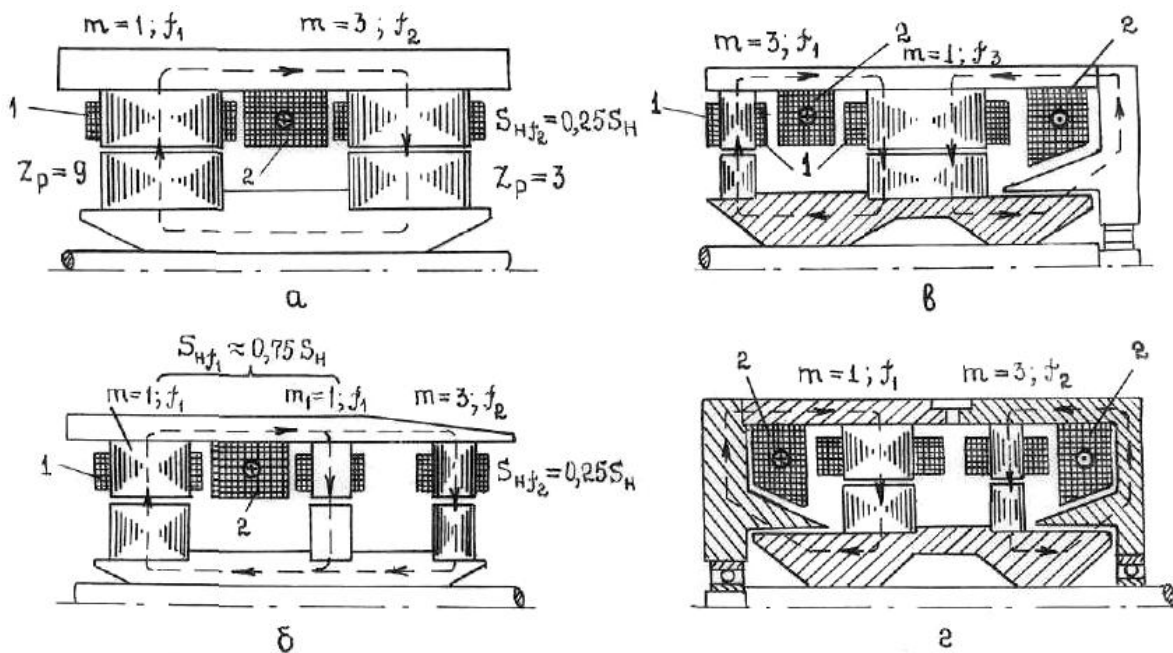


Рис. 6.30

Наибольшее применение индукторные генераторы нашли в электромашиных преобразователях двигатель генераторного типа. Они предназначены для преобразования постоянного тока в переменный.

Кроме того, индукторные генераторы входят в состав преобразователя АЛА-1,5 м предназначенного для преобразования переменного тока частоты 50 Гц в однофазный переменный ток частоты 427 Гц.

6.9.2. Синхронные генераторы с постоянными магнитами

Синхронные генераторы с постоянными магнитами (магнитоэлектрические генераторы переменного тока) относятся к классу бесконтактных генераторов. В таких генераторах роль индуктора выполняют постоянные магниты.

Устройство статора генераторов с постоянными магнитами не отличается от устройства статоров синхронных генераторов нормального исполнения. В пазах статора, набранного из отдельных листов электротехнической стали, укладывается трехфазная якорная обмотка. Конструктивно постоянные магниты размещаются на роторе. По исполнению роторы можно разделить на следующие группы: ротор с цилиндрическим магнитом в виде кольца, намагниченного в радиальном направлении (рис. 6.31, а); ротор в виде звездочки с выраженными полюсами без полюсных наконечников или с полюсными наконечниками (рис. 6.31, б); ротор когтеобразного типа (рис. 6.31, в). В зависимости от мощности и частоты напряжения на валу генератора могут быть

установлены или один магнит-звездочка, или система, состоящая из нескольких магнитов, равномерно расположенных по окружности ротора (рис. 6.31, а). Постоянные магниты устанавливаются в стальной втулке 1 (рис. 6.31, б). Промежутки 2 между магнитами заливают алюминием, благодаря чему обеспечивается монолитность конструкции ротора. Иногда полюсы 3 имеют полюсные наконечники 4 из магнитомягкой стали.

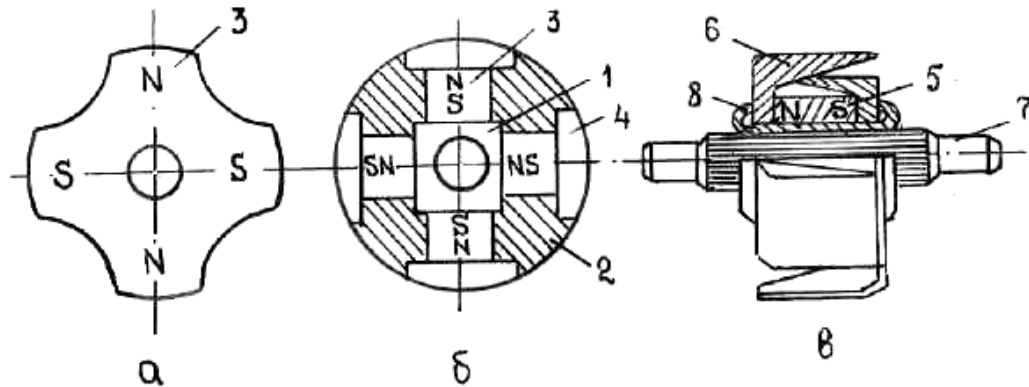


Рис. 6.31

В генераторах значительной мощности применяются роторы с магнитной системой когтеобразного типа (рис. 6.31, в). При когтеобразной форме магнит представляет собой цилиндр 5 или полый цилиндр, намагниченный в аксиальном направлении. Магнит расположен между полюсами 6, снабженными полюсными выступами когтями. Все выступы одного полюса являются северными, а другого – южными. Магнит 5 и полюсы 6 с выступами крепятся на валу 7 при помощи немагнитной втулки 8.

Принцип действия синхронного генератора состоит в том, что при вращении ротора магнитное поле постоянных магнитов пересекает витки якорной обмотки и наводит в ней ЭДС. Действующее значение индуктируемой ЭДС определяется уже известным выражением

$$E_0 = 4,44 f_1 W k_{\text{обм}} \Phi_{\text{ом.}}$$

Поскольку в генераторе отсутствует обмотка возбуждения, то отсутствует и возможность регулирования ЭДС и напряжения, как это делается в синхронных генераторах нормального исполнения. Поэтому синхронные генераторы с постоянными магнитами имеют всего лишь одну характеристику – внешнюю. Внешние характеристики такие же, как и у синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением.

Преимуществом таких генераторов является высокая надежность в работе, простота конструкции и эксплуатация, возможность получения повышенной частоты генерируемого тока.

Недостатки проявляются в невозможности применения обычных средств регулирования напряжения через возбуждение и в зависимости их характеристик от характеристик магнитов.

6.9.3. Вентильные генераторы

В настоящее время в технике питания потребителей постоянного тока напряжением 24–30 В широкое применение находят синхронные генераторы с выпрямителем, так называемые вентильные генераторы. Они просты по конструкции, более надежны, имеют большой срок службы и требуют меньшего ухода в эксплуатации по сравнению с коллекторными генераторами постоянного тока.

Важнейшее специальное требование к вентильным генераторам: уровень пульсации выпрямленного напряжения должен быть не выше 8 %.

Для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения применяются различные многофазовые схемы выпрямления: трехфазные мостовые двухполупериодные (схема А.Н. Ларионова), пятифазные двухполупериодные, шестифазные однополупериодные или их комбинации.

Трехфазные двухполупериодные схемы выпрямления нашли наибольшее применение. Например, вентильный генератор представляет собой, как правило, трехфазный синхронный генератор с электромагнитным возбуждением и выпрямителем, собранным по трехфазной мостовой двухполупериодной схеме.

Особенностью трехфазного синхронного генератора является применение когтеобразных полюсов и кольцевой обмотки возбуждения, состоящей из одной катушки ОБ.

Трехфазная обмотка (ОЯ) размещается на статоре. Ключообразные полюсы, между которыми располагается обмотка возбуждения, закрепляются на роторе. Концы обмотки возбуждения ОБ выводят к контактными кольцами на валу ротора.

Вентильный генератор состоит из трехфазного двухпакетного одноименнополюсного индукторного генератора и блока силовых выпрямителей (VD1–VD2).

На статоре закреплены два пакета сердечника с обмотками переменного тока и кольцевая обмотка возбуждения, расположенная между пакетами. В пазы пакетов статора заложены две обмотки – силовая

и дополнительная. Силовая обмотка – трехфазная, соединена в звезду без выведенной нулевой точки. Дополнительная обмотка ОД – однофазная, с выведенной средней точкой, предназначена для питания элементов схемы регулирования напряжения.

Ротор генератора состоит из вала с напрессованными на него двумя пакетами сердечника с зубцами.

Блок силовых выпрямителей собран в двух радиаторах, укрепленных на стеклотекстолитовых основаниях, которые закреплены на подшипниковом щите генератора. Блок силовых выпрямителей закрывается кожухом, имеющим отверстия для входа охлаждающего воздуха.

Охлаждение блока выпрямителей и генератора осуществляется воздухом, который нагнетается центробежным вентилятором, установленным на валу двигателя.

Вопросы для самоконтроля

1. Чем достигается большая частота пульсаций магнитного потока в индукторном генераторе?
2. Почему ротор индукторного генератора может иметь монолитную или шихтованную конструкцию?
3. Назовите назначение встроенного выпрямителя вентильного трехфазного синхронного генератора.
4. Какая обмотка располагается на роторе вентильного синхронного генератора?
5. Какой элемент конструкции обеспечивает электрическую связь обмотки возбуждения и неподвижной части вентильного генератора?

ГЛАВА 7

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДСТАНЦИЙ 35-110 кВ

7.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

7.1.1. Общие сведения

1. Указанное не распространяется на требования, связанные с техникой безопасности, пожаробезопасностью и экологией, отступление от которых согласовывается в установленном порядке. При проектировании электрических подстанций (ПС) и понижающих подстанций (ПП) следует руководствоваться ПУЭ, СНиП, ГОСТ, РД, РУМ, СП, требованиями, связанные с техникой безопасности, пожаробезопасностью, экологией и иными нормативными документами.

2. При проектировании подстанций должно быть обеспечено:

- надежное электроснабжение потребителей;
- внедрение передовых проектных решений;
- экономическая эффективность, обусловленная оптимальным объемом привлекаемых инвестиций и ресурсов, используемой земли и снижением эксплуатационных затрат;
- соблюдение требований экологической безопасности и охраны окружающей среды;
- ремонтпригодность применяемого оборудования и конструкций;
- передовые методы эксплуатации, безопасные и удобные условия труда эксплуатационного персонала.

3. Проект на строительство ПС разрабатывается с учетом технико-экономического обоснования (ТЭО), на основании утвержденного в установленном порядке задания на проектирование.

4. Проектирование ПС должно выполняться с учетом схем:

- развития энергосистемы;
- развития электрических сетей района, города;
- внешнего электроснабжения объекта.

5. Из схем развития энергосистемы, а также схем внешнего электроснабжения объекта принимаются следующие исходные данные:

- место размещения ПС;
- нагрузки на расчетный период и их рост на перспективу с указанием распределения их по напряжениям и категориям;

- число, мощность и номинальные напряжения трансформаторов;
- уровни и пределы регулирования напряжения на шинах ПС и необходимость дополнительных регулирующих устройств с учетом требований к качеству электроэнергии;
- число присоединяемых линий напряжением 110 кВ и выше и их нагрузки (число линий 6, 10, 35 кВ и их нагрузки);
- рекомендации по схемам электрических соединений ПС;
- режимы заземления нейтралей трансформаторов;
- места установки, число и мощность шунтирующих реакторов, конденсаторных батарей, управляемых средств реактивной мощности и других средств ограничения перенапряжения в сетях 110 кВ и выше;
- места установки, число и мощность дугогасящих реакторов для компенсации емкостных токов в сетях 35 кВ и ниже);
- расчетные значения токов однофазного и трехфазного КЗ с учетом развития сетей и генерирующих источников на срок до 10 лет, считают предполагаемого срока ввода ПС в эксплуатацию, а также мероприятия по ограничению токов КЗ.

6. При отсутствии каких-либо данных, перечисленных в п.п. 5–9, или при наличии устаревших данных соответствующие вопросы следует разработать при выполнении обоснований инвестиций или уточнить в составе проекта (рабочего проекта) ПС в виде самостоятельных разделов.

7. Проект (учебный проект) ПС должен выполняться на расчетный период (5 лет после ввода в эксплуатацию) с учетом перспективы ее развития на последующие не менее 5 лет.

8. При решении вопросов присоединения проектируемой (реконструируемой, расширяемой) ПС к сети энергосистемы изучается:

- экономическая эффективность принимаемых решений;
- важность рассматриваемого объекта электрической сети для энергосистемы. При этом следует учитывать влияние рассматриваемого объекта на условия работы других электрических объектов;
- финансовых возможностей, обеспечивающих проведение работ по реконструкции и техническому перевооружению.

9. В распределительной сети строительство новой ПС или техническое перевооружение существующей сети должно быть направлено на обеспечение:

- необходимой надежности, построения схем электрической сети, при которой обеспечиваются требования ПУЭ, а также отраслевых норм;
- требований нормативных документов и инструкций, касающихся внешнего электроснабжения отдельных потребителей (групп потребителей);

- оптимизации работы электрической сети путем обеспечения условий регулирования напряжения (установка трансформаторов с РПН и др.), при которых достигается надлежащее качество напряжения у потребителей в соответствии с требованиями «Методических рекомендаций по проектированию развития энергосистем» в нормальных и расчетных послеаварийных режимах работы электрической сети;
- исключения перегруженных участков электрической сети с целью снижения потерь электроэнергии (ликвидация «очагов» потерь).

7.1.2. Методические указания

Перед изучением данной главы целесообразно повторить материал по дисциплине электрические и электронные аппараты. Это связано с тем, что в основе принципа действия электрооборудования лежит принцип преобразование механической энергии в электрическую энергию и наоборот.

Принцип проектирования подстанций рекомендуется изучать по условно-логическим схемам, обращая внимание на функциональные различия в работе отдельных элементов машин в различных режимах. Важно разобраться в отличии различных типов машин. Причем при изучении принципа действия генераторов и двигателей необходимо понять, с каким законом связано появление электродвижущей силы и вращающего момента.

При изучении материала главы необходимо знать основные формулы, определяющие частоту вращения поля, электродвижущую силу, частоту вращения ротора, вращающий момент. Для лучшего запоминания формул следует выписать их в отдельную таблицу.

7. 2. ПЛОЩАДКА ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ПОДСТАНЦИИ

Выбор площадки для строительства ПС должен производиться в соответствии с требованиями земельного, водного законодательства РФ и законодательными актами по охране природы и использованию природных ресурсов на основании:

- схемы развития электрических сетей района или схемы электро-снабжения конкретного объекта;
- материалов проектов районной планировки и проектов планировки объекта;
- технико-экономического сравнения вариантов;

– методических указаний по выбору и согласованию площадок ПС 35 кВ и выше.

Площадка ПС, по возможности размещается вблизи:

- центра электрических нагрузок;
- автомобильных дорог, по которым возможно передвижение трейлеров необходимой грузоподъемности;
- железнодорожных станций или подъездных железнодорожных путей промышленных предприятий, на которых возможна разгрузка тяжелого оборудования, строительных конструкций и материалов, а также примыкание подъездного пути ПС.

При этом должны соблюдаться минимально допустимые расстояния по условиям шума от силового оборудования согласно санитарным нормам:

- существующих инженерных сетей (водопровода, канализации, тепло- и газоснабжения, связи), а также проектируемых сетей при условии их опережающего ввода.

Размещение ПС должно производиться с учетом наиболее рационального использования земель, как на расчетный период, так и с учетом последующего расширения ПС. При этом должны учитываться коридоры подходов ВЛ и КЛ всех напряжений.

При реконструкции ПС и сооружении ОРУ других напряжений должен рассматриваться вариант размещения их на существующей ПС. При этом результаты технико-экономического сравнения отражаются в акте выбора площадки.

При проектировании ПС следует предусматривать возможное кооперирование с соседними предприятиями и населенными пунктами по строительству дорог, инженерных сетей, подготовки территории, жилых домов.

7.3. СХЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Схемы электрические распределительных устройств выбираются по типовой работе «Схемы принципиальные электрические распределительных устройств подстанций напряжением 35–750 кВ. Типовые решения» (10) с учетом «Общих технических требований к подстанциям 330–750 кВ нового поколения» (71).

Для РУ 110–220 кВ в зависимости от надежности и резервирования сети следует применять схемы:

- с одинарной системой шин, секционированной выключателем или двумя развилками из двух выключателей, включенными, как правило, в цепи питающих присоединений;

- с двойными секционированными системами шин.

Схемы с обходной системой шин, а также с количеством выключателей на цепь более одного, должны приниматься только при специальном обосновании.

В схемах, при подключении ВЛ через два выключателя, допускается установка трансформаторов тока в цепи ВЛ, для целей коммерческого учета электроэнергии.

Отступления от типовой сетки схем допускаются при технико-экономическом обосновании.

Число трансформаторов, устанавливаемых на ПС, принимается, как правило, два. Установка более двух трансформаторов принимаются на основе технико-экономических расчетов, а также в тех случаях, когда на ПС требуется два средних напряжения.

Допускается применение одно трансформаторных ПС при обеспечении требуемой надежности электроснабжения потребителей.

На стороне НН 6, 10 и 35 кВ должна предусматриваться отдельная работа трансформаторов.

При необходимости ограничения токов КЗ на стороне 6 и 10 кВ предусматриваются следующие основные мероприятия:

- применение трансформаторов с расщепленными обмотками 6 и 10 кВ;
- применение токоограничивающих реакторов в цепях вводов от трансформаторов, причем отходящие линии выполняются, как правило, нереактивными.

Выбор варианта ограничения токов КЗ следует обосновывать технико-экономическим сравнением с учетом обеспечения качества электроэнергии.

Степень ограничения токов КЗ в РУ 6 и 10 кВ определяется необходимостью применения более легкого оборудования, кабелей и ошиновки.

При необходимости компенсации емкостных токов в сетях 35, 10, 6 кВ на ПС должны устанавливаться дугогасящие заземляющие реакторы с плавным и (или) ступенчатым регулированием индуктивности. На напряжении 35 кВ дугогасящие реакторы присоединяются, как правило, к нулевым выводам соответствующих обмоток трансформаторов через развилку из разъединителей, позволяющую подключать их к любому из трансформаторов. На напряжении 6 и 10 кВ

дугогасящие реакторы подключаются к нейтральному выводу отдельного трансформатора, подключаемого к сборным шинам через выключатель. Количество, мощность и диапазон регулирования дугогасящих реакторов определяются в проекте ПС.

7.4. ВЫБОР ОСНОВНОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

При проектировании ПС должно применяться оборудование и материалы соответствующее Российским стандартам и сертифицированные в установленном порядке.

Мощность трансформаторов выбирается так, чтобы при отключении наиболее мощного из них на время ремонта или замены, оставшиеся в работе, с учетом их допустимой, по техническим условиям на трансформаторы, перегрузки и резерва по сетям НН, обеспечивали питание нагрузки.

При росте нагрузок сверх расчетного уровня увеличение мощности ПС производится, как правило, путем замены трансформаторов на более мощные, установка дополнительных трансформаторов должна быть технически и экономически обоснована.

Должны применяться современные автотрансформаторы и трансформаторы, оборудованные устройствами автоматического регулирования напряжения под нагрузкой (РПН), имеющие необходимую динамическую стойкость, высоконадежные вводы и сниженные потери.

При выборе типов выключателей следует руководствоваться следующим:

- в ОРУ 110 кВ следует предусматривать элегазовые выключатели, которые должны обеспечивать работоспособность во всем требуемом диапазоне температур;

- в цепях шунтирующих реакторов и батарей статических конденсаторов должны применяться элегазовые выключатели, как правило, снабженные устройствами синхронизированной коммутации, обеспечивающими надежную работу выключателей.

В ОРУ 35 кВ должны предусматриваться элегазовые или вакуумные выключатели.

В РУ 6, 10 кВ должны предусматриваться шкафы КРУ с вакуумными или элегазовыми выключателями.

При выборе оборудования и ошиновки по номинальному току необходимо учитывать нормальные эксплуатационные, послеаварийные и ремонтные режимы, а также перегрузочную способность оборудования.

Оборудование и ошиновка в цепи трансформаторов должны выбираться, как правило, с учетом установки в перспективе трансформатора следующего по шкале мощности. Для трехобмоточных трансформаторов в цепях СН и НН выбор оборудования и ошиновки следует производить по току перспективной нагрузки с учетом отключения второго трансформатора.

При выборе оборудования и ошиновки ячеек ВЛ 35 кВ и выше следует принимать максимальный ток ВЛ по условиям нагрева проводов в аварийном режиме, при этом количество типоразмеров ошиновки должно быть минимальным.

Новые подстанции напряжением 110 кВ и выше рекомендуется оснащать системами диагностики и мониторинга состояния силовых трансформаторов, шунтирующих реакторов, элегазовых распределительных устройств, маслонаполненных вводов и др.

В качестве управляемых средств компенсации реактивной мощности (СКРМ) применяются:

- управляемые шунтирующие реакторы (УШР) напряжением 110, подключаемые к шинам ВН подстанции или к линии;
- дискретно-управляемые вакуумно-реакторные группы (ВРГ), подключаемые к обмоткам НН (10–35 кВ) имеющихся на подстанциях трансформаторов и автотрансформаторов или шинам подстанций через вакуумные выключатели;
- статические тиристорные компенсаторы (СТК) реактивной мощности и СТАТКОМы, подключаемые к обмоткам НН автотрансформаторов, шинам подстанций или через специальный трансформатор к линиям электропередач;
- синхронные компенсаторы (СК), подключаемые к обмоткам НН трансформаторов или автотрансформаторов подстанций.

Дугогасящие реакторы с плавным регулированием индуктивности должны оснащаться системой автоматического регулирования емкостного тока замыкания на землю.

В целях улучшения обслуживания и повышения автоматизированности ПС разъединители 110 кВ и выше должны предусматриваться с электродвигательными приводами на главных и заземляющих ножах. Допускается указанное требование, при соответствующем обосновании, распространять и на разъединители 35 кВ.

В ОРУ110 в обоснованных случаях применяются компактные ячейки заводского изготовления на базе колонковых или баковых элегазовых выключателей.

7.5. ЗАЩИТА ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ, ЗАЗЕМЛЕНИЕ

7.5.1. Защита от грозовых перенапряжений

Защита от грозовых перенапряжений РУ и ПС осуществляется:

- от прямых ударов молнии – стержневыми и тросовыми молниеотводами в соответствии с ПУЭ;

- от набегающих волн – защитными аппаратами, устанавливаемыми на подходах и в РУ в соответствии с ПУЭ. В качестве защитных аппаратов должны применяться, как правило, ограничители перенапряжений (ОПН).

Защита ВЛ 35 кВ и выше от прямых ударов молнии на подходах к РУ должна быть осуществлена в соответствии с ПУЭ. В РУ 35 кВ и выше, к которым присоединены ВЛ, должны быть установлены ОПН. Защитные характеристики ОПН должны быть скоординированы с изоляцией защищаемого оборудования и ВЛ. Защитные характеристики ОПН, установленных в одном РУ, не должны отличаться друг от друга. Для защиты трансформаторного оборудования от грозовых перенапряжений на стороне 6–10 кВ так же устанавливаются ОПН.

При применении КРУЭ 110 кВ или кабельных линий и вставок для их защиты от грозовых перенапряжений применяют ОПН. Выбор параметров ОПН определяется на основании расчетов.

7.5.2. Защита от внутренних перенапряжений

Электрические сети 3–35 кВ должны работать с изолированной или заземленной через резистор или дугогасящий реактор нейтралью. Число и расстановка средств компенсации емкостного тока определяется расчетом в соответствии с требованиями ПУЭ. При использовании ДГК предпочтение должно отдаваться реакторам плунжерного типа с плавным регулированием. При применении кабельных линий и вставок 35 кВ и выше необходимо проводить расчетом проверку необходимости установки ОПН для защиты остального оборудования от коммутационных перенапряжений. Для РУ 110 кВ должны предусматриваться технические решения, исключающие появление феррорезонансных перенапряжений, возникающих при последовательных включениях электромагнитных трансформаторов напряжения и емкостных делителей напряжения выключателей. К этим решениям относятся:

- применение выключателей без емкостных делителей напряжения;
- применение антирезонансных трансформаторов напряжения;

– увеличение в 1,5–2 раза емкости ошиновки РУ путем установки на шинах дополнительных конденсаторов, например связи.

– Разработка мероприятий по ограничению высокочастотных перенапряжений и защите от них электротехнического оборудования РУ 110 кВ и выше должны осуществляться в соответствии с Методическими указаниями по ограничению в.ч. коммутационных перенапряжений (14).

7.5.3. Заземление

Проектирование заземляющих устройств, следует выполнять в соответствии с требованиями ПУЭ и нормированием по допустимому напряжению прикосновения или по допустимому сопротивлению, а также с учетом требований по снижению импульсных помех для обеспечения работы релейной защиты, автоматики, телемеханики и связи.

7.5.4. Режим заземления нейтрали трансформаторов

Режим заземления нейтрали обмоток 110 кВ трансформаторов выбирается с учетом класса изоляции нейтрали, обеспечения в допустимых пределах коэффициента заземления, допустимых значений токов однофазного КЗ по условиям выбора оборудования, действия релейной защиты и влияния на линии связи, а также с учетом требований к заземлению нейтрали по условиям установки фиксирующих приборов.

Постоянное заземление нейтрали должны иметь все автотрансформаторы и обмотки 220–330 кВ трансформаторов. Нейтрали обмоток ПО кВ трансформаторов, которые в процессе эксплуатации могут быть изолированы от земли, должны быть защищены ограничителями перенапряжений типа ОПНН или ОПН-110 с уровнем ограничения, скоординированным с уровнем изоляции защищаемой нейтрали.

7.6. СОБСТВЕННЫЕ НУЖДЫ, КАБЕЛЬНОЕ ХОЗЯЙСТВО

7.6.1. Собственные нужды

На всех ПС необходимо устанавливать не менее двух трансформаторов собственных нужд. Для одно трансформаторных ПС (в том числе комплектных ПС заводского изготовления) питание второго трансформатора собственных нужд обеспечивается от местных электрических сетей, а при их отсутствии второй трансформатор собственных нужд включается аналогично первому. От сети собственных нужд ПС питание

сторонних потребителей не допускается. Схемы собственных нужд ПС должны предусматривать присоединение трансформаторов собственных нужд к разным источникам питания (вводам разных трансформаторов, различным секциям РУ и др.) На стороне НН трансформаторы собственных нужд должны работать отдельно с АВР.

Мощность трансформаторов собственных нужд, питающих шины 0,4 кВ, должна выбираться в соответствии с нагрузками в разных режимах работы ПС с учетом коэффициентов одновременности их загрузки, а также перегрузочной способности. Мощность каждого трансформатора собственных нужд с НН 0,4 кВ, должна быть не более 630 кВА для ПС 110–220 кВ и не более 1000 кВА.

При подключении одного из трансформаторов собственных нужд к внешнему независимому источнику питания необходимо выполнять проверку на предмет отсутствия сдвига фаз.

На ПС с постоянным оперативным током трансформаторы собственных нужд должны присоединяться через предохранители или выключатели к шинам РУ 6–35 кВ, а при отсутствии этих РУ к обмотке НН основных трансформаторов.

На ПС с переменным и выпрямленным оперативным током трансформаторы собственных нужд должны присоединяться через предохранители на участке между вводами НН основного трансформатора и его выключателем. В случае питания оперативных цепей переменного тока или выпрямленного тока от трансформаторов напряжения, присоединенных к питающим ВЛ, трансформаторы собственных нужд допускается присоединять к шинам НН ПС. При питании оперативных цепей переменного тока от трансформаторов собственных нужд последние следует присоединять к ВЛ, питающим ПС.

Для сети собственных нужд переменного тока необходимо принимать напряжение 380/220 В, с заземленной нейтралью. Питание сети оперативного тока от шин собственных нужд должно осуществляться через стабилизаторы с напряжением на выходе 220 В.

7.6.2. Кабельное хозяйство

Прокладка кабельных трасс должна осуществляться наземным или надземным способом. Кабели должны применяться с изоляцией, не распространяющей горение (с индексом НГ–LS). На ОРУ кабели должны прокладываться, как правило, в наземных лотках и металлических коробах необходимой прочности и долговечности.

Применение кабельных каналов и тоннелей должно иметь специальное обоснование. Не следует применять лотки в местах проезда механизмов для производства ремонтных работ между фазами оборудования.

При применении лотков должен обеспечиваться проезд по ОРУ и подъезд к оборудованию машин и механизмов, необходимый для выполнения ремонтных и эксплуатационных работ.

Для обеспечения проезда механизмов должны предусматриваться переезды с сохранением расположения лотков на одном уровне.

При применении лотков не допускается прокладка кабелей под дорогами или переездами для машин в трубах и каналах, расположенных ниже уровня лотков.

Одиночные кабели (до 7) от кабельных сооружений до приводов и шкафов различного назначения могут прокладываться в земле без специальной защиты (в том числе небронированные), при отсутствии над ними проездов.

Во всех кабельных сооружениях следует предусматривать запас емкости для дополнительной прокладки кабелей порядка 15 % от количества, предусмотренного на расчетный период.

На ПС 110 кВ, от которых питаются потребители Г – II категории, кабельные потоки от РУ 6 и 10 кВ указанных потребителей прокладываются в отдельных коробах, лотках, каналах. Расположение кабельных каналов и прокладку кабелей следует выполнять с учетом требований по электромагнитной совместимости. При проходе кабелей через стены и фундаменты используются огнестойкие блоки из разных элементов противопожарных преград.

На ПС 110 кВ и выше, на которых установлены два трансформатора, компоновка кабельного хозяйства должна быть выполнена таким образом, чтобы при возникновении пожаров в кабельном хозяйстве или вне его вероятность выхода из строя двух трансформаторов была бы минимальной.

В целях повышения надежности и полноценного дублирования основные и резервные защиты (либо два комплекта защит) должны быть разделены по цепям переменного тока и напряжения. По цепям оперативного тока и исполнительным цепям путем размещения их в разных кабелях, а также, по возможности, по разным трассам.

7.7. РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА

7.7.1. Общие принципы построения

Релейная защита и автоматика (РЗА) должна проектироваться в соответствии с ПУЭ. При проектировании должны применяться современные устройства РЗА отечественного или иностранного производства.

Отключение любого поврежденного элемента сети (линий, подстанционного оборудования – шин, реакторов, трансформаторов и другого первичного оборудования) должно осуществляться с минимальным возможным временем в целях сохранения устойчивой бесперебойной работы неповрежденной части системы и ограничения области и степени повреждения.

Состав и построение защит и автоматики каждого элемента сети 110 кВ и выше должны отвечать требованиям ближнего резервирования и при выводе из работы любого устройства по любой причине должны:

- обеспечивать сохранение функций защиты данного элемента сети от всех видов повреждений;
- исключать необходимость его вывода из работы.

Количество трансформаторов тока, вторичных обмоток и их классы точности должны обеспечивать отдельное подключение устройств РЗА и систем измерений. Основные и резервные защиты каждого элемента сети должны включаться на разные вторичные обмотки трансформаторов тока.

Автоматизированная информационно-измерительная система коммерческого учета электроэнергии (АИИС КУЭ) должна подключаться к отдельной вторичной обмотке ТН.

7.7.2. Релейная защита трансформаторов 35–220 кВ

На трансформаторе должны быть предусмотрены следующие защиты:

- дифференциальная токовая защита (два комплекта для трансформаторов 110–220 кВ мощностью 63 МВА и более);
- газовая защита;
- защита устройства РПН;
- резервные защиты на сторонах высшего, среднего (для трехобмоточного трансформатора) и низшего напряжения;
- защита от перегрузки;
- дифференциальная токовая защита ошиновки НН с включением в зону ее действия токоограничивающего реактора (при наличии реактора).

На трансформаторе 35/0,4 кВ вместо дифференциальной защиты должна предусматриваться токовая отсечка.

Газовые (струйные) реле должны действовать через два терминала дифференциальных защит. При одном комплекте дифференциальной защиты газовые (струйные) реле должны действовать через терминал дифференциальной защиты и через терминал резервной защиты стороны ВН (необходимо оснащение трансформатора реле с двумя отключающими контактами).

7.7.3. Защита шин (ошиновок)

Защита систем (секций) шин 110–220 кВ должна выполняться, как правило, с использованием одного комплекта дифференциальной токовой защиты. Защита комплектных РУ 110–220 кВ с элегазовой изоляцией с использованием двух комплектов дифференциальной защиты.

Защита систем (секций) шин 35 кВ может выполняться с использованием одного комплекта дифференциальной токовой защиты. При отсутствии питания со стороны сети 35 кВ допускается использовать логическую защиту. Дифференциальная защита шин (ошиновок) должна иметь устройство контроля исправности цепей переменного тока.

7.7.4. Защита и автоматика КРУ 6–10 кВ

На вводных ячейках предусматривать:

- максимальную токовую защиту с возможностью комбинированного пуска по напряжению;
- дуговую защиту;
- защиту минимального напряжения;
- УРОВ.

На секционном выключателе предусматривать:

- максимальную токовую защиту;
- дуговую защиту;
- автоматическое включение резерва (АВР).

На каждой секции шин должна быть предусмотрена:

- дуговая защита шин;
- логическая защита шин;
- сигнализация замыканий на землю.

На отходящих фидерах предусматривать:

- максимальную токовую защиту;
- токовую отсечку;
- защиту от перегрузки (на ТСН);
- защиту от замыканий на землю;
- дуговую защиту;
- АПВ (для воздушных линий);
- УРОВ.

Защита от дуговых замыканий должна выполняться с контролем тока.

На линиях, питающих внешних потребителей, должна предусматриваться селективная сигнализация при однофазных замыканиях на землю.

7.8. КОМПОНОВКА И КОНСТРУКТИВНАЯ ЧАСТЬ

ПС 35 кВ и выше проектируются, как правило, открытого типа. ПС 35, 110 кВ должны, преимущественно, проектироваться комплектными, заводского изготовления. РУ 6 и 10 кВ для комплектных трансформаторных ПС выполняются в виде КРУН наружной установки. Либо КРУ, устанавливаемые в закрытом помещении.

В ЗРУ 6 и 10 кВ рекомендуется устанавливать шкафы КРУ заводского изготовления. Для ремонта КРУ и хранения выкатных тележек в ЗРУ должно предусматриваться специальное место. В закрытых РУ 6, 10 кВ рекомендуется располагать оборудование секций в отдельных, изолированных друг от друга помещениях, с установкой, при соответствующем обосновании, двух последовательно включенных секционных выключателей в разных помещениях.

Уровень изоляции оборудования ОРУ и ошиновки выбирается в соответствии с требованиями ПУЭ и с учетом степеней загрязнения.

ЗРУ 35–220 кВ применяются в районах:

- с загрязненной атмосферой, где применение ОРУ с усиленной изоляцией или аппаратурой следующего класса напряжения с учетом ее обмыва не эффективно, а удаление ПС от источника загрязнения экономически нецелесообразно;
- требующих установки оборудования исполнения ХЛ при отсутствии такого исполнения;
- стесненной городской и промышленной застройки;
- с сильными снеготаносами и снегопадами, а также в особо суровых климатических условиях и при стесненных площадках при соответствующем технико-экономическом обосновании.

Трансформаторы 35 кВ и выше следует, как правило, устанавливать открытыми. Закрытая установка трансформаторов 35–220 кВ применяется:

- когда усиление изоляции не дает должного эффекта;
- когда в атмосфере содержатся вещества, вызывающие коррозию, а применение средств защиты не рационально;
- при необходимости снижения уровня шума до нормированных значений и невозможности обеспечить необходимое снижение шума другими средствами.

Ошиновка ОРУ 35 кВ и выше выполняется, как правило, алюминиевыми и сталеалюминевыми проводами, а также трубами (жесткая ошиновка) из алюминиевых сплавов. При трубчатой ошиновке следует предусматривать компенсаторы от температурных расширений и меры против вибрации.

При сооружении ОРУ вблизи морских побережий, соленых озер, химических предприятий и т.п. местах, где опытом эксплуатации установлено разрушение алюминия, следует применять специальные алюминиевые и сталеалюминевые провода, защищенные от коррозии.

Жесткая ошиновка выбирается с учетом наибольшего допустимого прогиба от собственного веса, веса ответвлений и гололедных отложений, а также расчетных ветровых и электродинамических воздействий. Жесткая ошиновка на стороне 6 и 10 кВ трансформаторов (реакторов) допускается только на коротких участках в случаях, когда применение гибких токопроводов усложняет конструкцию.

Закрытые подстанции и РУ с элегазовыми КРУ (КРУЭ). Элегазовые комплектные распределительные устройства КРУЭ напряжением 110 кВ и выше должны применяться в районах с высокой плотностью застройки, с суровыми климатическими условиями и в труднодоступных местах.

При проектировании строительной части ПС выбор материалов, конструирование и расчеты зданий и сооружений выполняются в соответствии с требованиями нормативно – технических документов (ГОСТы, СНиПы, технические условия, руководства и др.)

Стальные порталы, молниеотводы, опоры под оборудование и т.д., а также стальные детали железобетонных стоек порталов и опор под оборудование должны быть защищены от коррозии на заводах-изготовителях с применением технологии горячего или «холодного» цинкования.

При отсутствии производственных возможностей их осуществления допускается по согласованию с заказчиком применение лакокрасочных покрытий и других способов защиты, выполняемых на заводах-изготовителях.

ПЕРЕЧЕНЬ ДЕЙСТВУЮЩИХ НОРМАТИВНЫХ И МЕТОДИЧЕСКИХ ДОКУМЕНТОВ

1. Правила устройства электроустановок. – М.: НЦ ЭНАС, 2003.
2. Строительные Нормы и Правила (СНиПы), Госстрой РФ.
3. Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок, ПОТРМ-016-2001, СО 153-34.0-03.150-2003, Минтруда РФ, Минэнерго РФ.
4. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации, СО 153-34.20.501-2003, ОРГРЭС.
5. Сборник действующих документов по техническому перевооружению и реконструкции электростанций, тепловых и электрических сетей. – Ч. 1. ОРГРЭС, 1991.
6. Методические рекомендации по проектированию развития энергосистем, СО153-34.47.43-2003.
7. Правила пожарной безопасности для энергетических предприятий. СО 153 – 34.03.30195. – М.: Энергоатомиздат, 1995.
8. Инструкция по проектированию противопожарной защиты энергетических предприятий, РД 153-34.0-49.101-2003.
9. О введении в действие эталонов заданий на разработку проектов и приказов – об утверждении проектов строительства энергообъектов: Приказ РАО «ЕЭС России», № 360 от 29.09.99.
10. Схемы принципиальные электрические распределительных устройств подстанций напряжением 35-750 кВ. Типовые решения. – М.: Энергосетьпроект, 2006.
11. Нормативы выбора мощности силовых трансформаторов, № 8080. – М.: Энергосетьпроект, 1989.

ГЛАВА 8

ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ СХЕМЫ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ПОДСТАНЦИЙ ПРЕДПРИЯТИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 6-220 кВ

8.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

8.1.1. Общие сведения

В данной главе представлены основные типовые схем РУ, ОРУ, ЗРУ, КРУЭ, охватывающие большинство встречающихся в практике подстанций (ПС) и комплектных трансформаторных подстанций (КТП), предприятий организаций и учреждений с различным уровнем напряжений в диапазоне 6–220 кВ. Использование типовых схем позволяет обеспечить требуемую надежность и повысить экономическую эффективность функционирования электрооборудования.

Ведущие проектные институты рекомендуют применение типовых схемы РУ, ОРУ, ЗРУ, КРУЭ при проектировании новых, расширении действующих и подлежащих техническому перевооружению и реконструкции ПС.

Применение нетиповых схем, а также отступления от типовых схем допускаются при наличии соответствующих технико-экономических обоснований и согласований с заказчиком, поскольку отступления ведут к удорожанию проектируемых ПС.

8.1.2. Методические указания

Перед изучением данной главы целесообразно повторить материал по трехфазным цепям, а также разделы нормативных документов по ПС и канализации электрической энергии.

При изучении материала главы необходимо знать основные формулы, определяющие выбор номинальной мощности трансформаторов, сечений проводников, проверку оборудования по термической и динамической стойкости. Для лучшего запоминания формул следует выписать их в отдельную таблицу.

С точки зрения применения и эксплуатации ПС, важно знать их рабочие характеристики, особенности эксплуатации в нормальном и аварийном режимах.

Необходимо не только изучить электрические схемы, но и разобраться в физических процессах, протекающих при распределении электрической энергии, уяснить преимущества и недостатки каждого конструктивного способа устройства РУ, ОРУ, ЗРУ, КРУЭ.

После усвоения материала важно ответить на вопросы самоконтроля, самостоятельно проработать приведенные схемы ПС.

8.2 ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К СХЕМАМ ПС

8.2.1. Основные требования, предъявляемые к схемам ПС

Схемы РУ ПС при конкретном проектировании разрабатываются на основании схем развития энергосистемы, схем электроснабжения района или объекта и других работ по развитию электрических сетей и должны:

1) обеспечивать коммутацию заданного числа высоковольтных линий (ВЛ), трансформаторов (Т) и автотрансформаторов (АТ) и компенсирующих устройств (КУ) с учетом перспективы развития ПС;

2) обеспечивать требуемую надежность работы РУ исходя из условий электроснабжения потребителей в соответствии с категориями электроприемников и транзитных перетоков мощности по межсистемным и магистральным связям в нормальном режиме без ограничения мощности и в послеаварийном режиме при отключенных нескольких присоединениях с учетом допустимой нагрузки оставшегося в работе оборудования;

3) учитывать требование секционирования сети и обеспечить работу РУ при расчетных значениях токов короткого замыкания;

4) обеспечивать возможность и безопасность проведения ремонтных и эксплуатационных работ на отдельных элементах схемы;

5) обеспечивать требования наглядности, удобства эксплуатации, компактности и экономичности.

Схемы РУ должны позволять вывод отдельных выключателей и других аппаратов в ремонт, осуществляемый:

1) для РУ напряжением до 220 кВ включительно, как правило, путем временного отключения присоединения, в котором установлен выводимый для ремонта или обслуживания выключатель или другой аппарат, если это допустимо по условиям электроснабжения потребителей и обеспечения транзитных перетоков мощности; если отключение цепи недопустимо переключением цепи на обходную систему шин или использованием схем с подключением присоединений более чем через один выключатель;

2) путем отключения присоединения на согласованное с потребителем время для установки, вместо выводимого в ремонт, подменного аппарата;

3) для аппаратов, подключенных непосредственно к ВЛ (или Т), при отключенных ВЛ или Т (вч-заградители, конденсаторы связи, ограничители перенапряжений и др.);

Сравнение вариантов схем, намеченных к разработке на основании перечисленных требований, и их окончательный выбор производится на основании технико-экономических расчетов. Выбираются варианты, обеспечивающие требуемую надежность, а затем из них выбирается более экономичный.

8.2.2. Общие указания по выбору и применению схем

Схемы РУ, указанные в схеме развития энергосистемы, электрических сетей района, города или в схемах электроснабжения предприятия, являются предварительными и уточняются при конкретном проектировании ПС.

Число трансформаторов высшего напряжения, устанавливаемых на ПС, принимается, как правило, не менее двух. Они подключаются к разным секциям шин.

При расширении ПС число трансформаторов может возрасти до 3–4 при наличии обоснования.

При выборе схем РУ необходимо руководствоваться следующими принципами:

1) схема РУ выбирается с учетом схемы прилегающей сети, ее параметров и перспектив развития, количества присоединяемых ВЛ и трансформаторов, необходимости секционирования и установки компенсирующих устройств, размера и стоимости земельного участка, природно-климатических условий и других факторов;

2) схема РУ разрабатывается с учетом назначения подстанции в данной энергосистеме, надежности работы примыкающих ВЛТ и подстанций и условий их резервирования.

Основные требования, предъявляемые к схемам РУ заключаются в обеспечении качества функционирования ПС: надежности, экономичности, наглядности и простоте, возможности и безопасности обслуживания, выполнения ремонтов и расширения, компактности и др.

Отказ любого выключателя, в РУ 35–110 кВ с секционированными сборными шинами, как правило, не должен приводить к отключению более 6 присоединений, в том числе не более 1 трансформатора если при этом не нарушается более одной цепи транзита и электроснабжение особо ответственных электроприемников I категории.

Отказ любого выключателя в РУ 220 кВ с секционированными сборными шинами, как правило, не должен приводить к отключению более 4 присоединений в т.ч. не более 1 трансформатора, если при этом не нарушается более одной цепи транзита, электроснабжение особо ответственных электроприемников 1 категории и устойчивость работы энергосистемы.

Обобщенным критерием при выборе схемы РУ при равном обеспечении качества функционирования ПС является минимум затрат на строительство и эксплуатацию РУ и подстанции в целом.

При применении типовых схем для конкретной ПС с заданным количеством РУ разных напряжений и ВЛ подлежат определению:

- 1) типы, количество и технические параметры основного оборудования;
- 2) необходимость и места установки регулирующих, защитных и компенсирующих устройств, измерительных трансформаторов тока и напряжения, токоограничивающих и дугогасящих реакторов, а также схемы их присоединения;

- 3) режимы работы нейтралей трансформаторов всех классов напряжений.

При большом числе присоединений, для ограничения токов к.з., при необходимости системного деления сети, для ограничения числа одновременно отключаемых выключателей присоединений, сборные шины РУ секционируют.

На ПС с одной группой трансформаторов и шунтирующих реакторов подключение резервных фаз рекомендуется предусматривать с помощью заранее смонтированных перемычек (при снятом напряжении).

Схемы с подключением всех или части присоединений через два выключателя применяются, если по условиям надежности электроснабжения потребителей или сохранения транзита мощности через ПС к схеме РУ предъявляются требования о недопустимости отключения присоединений при отключении выключателя присоединения по любой причине, кроме повреждения присоединения.

Схемы с двумя системами шин и одним выключателем на присоединение применяются в РУ 110–220 кВ в случаях, когда имеются присоединения, длительное отключение которых (на все время вывода из работы сборных шин) недопустимо.

Схемы с обходной системой шин – с одной рабочей и обходной системами шин, с двумя рабочими и обходной системами шин применяются в РУ 110–220 кВ в следующих случаях:

1) когда в РУ имеются присоединения, отключение которых при выводе выключателя из работы (отключении его оперативным персоналом) недопустимо даже кратковременно, а подключение этих присоединений через два выключателя экономически нецелесообразно или технически невозможно;

2) когда обходная система шин необходима для организации схемы устройства плавки гололеда, для районов с загрязненной атмосферой и необходимости периодической очистки изоляции, при других обоснованиях.

Если допускается отключение присоединений при отключении выключателя (автоматическом или оперативным персоналом) на длительное время, то применяются схемы:

1) при числе присоединений до 4 включительно – упрощенные блочные, мостиковые схемы;

2) при числе присоединений 5 и более – схема с одной секционированной выключателем системой шин и схемы с одной системой шин с секционирующими цепочками из 2 или 3 выключателей, с подключением ответственных присоединений в секционирующие цепочки.

8.2.3. Обоснование надежности схем

Схемы РУ подстанций должны удовлетворять экономически целесообразному уровню надежности, расчеты которого осуществляются при необходимости и по требованию Заказчика при их выборе при разработке конкретных подстанций.

Результаты расчета надежности могут быть использованы при выборе схемы РУ для последующей оценки: частоты возможного полного или частичного погашения ПС в течении года, математического ожидания длительности перерывов электроснабжения и возможного недоотпуска электроэнергии, устойчивости работы энергосистемы, нарушения функционирования подключенных объектов и т.п.

При обосновании и выборе схем рассматриваются нормальный и послеаварийный режимы работы и ремонтные схемы.

В нормальном режиме все элементы схемы находятся в работе и ПС должна обеспечить передачу всей получаемой мощности в систему за вычетом расходов на СН и полное электроснабжение потребителей.

Ремонтные схемы – один или более – при соответствующем обосновании из элементов схемы отключен для проведения планового ремонта. При этом пропускная способность элементов ремонтных схем

должна, как правило, исключать ограничение транзитов мощности, электроснабжение потребителей, запирающие генерирующей мощности. Допускается, при соответствующем обосновании и согласовании, временное отключение потребителей и снижение или даже перерыв транзитных потоков мощности.

Послеаварийные режимы – это режимы работы схемы после отказа или аварии одного из элементов схемы.

В качестве расчетных аварий учету подлежат: единичный отказ элемента схемы при исходном нормальном режиме схемы, а также отказ одного элемента во время ремонта другого для ремонтной схемы.

При проверке устойчивости систем с выбранными схемами РУ в качестве расчетных учету подлежат нормативные возмущения I, II и III групп.

Нерасчетные аварийные режимы, сопровождающиеся значительными разовыми экономическими последствиями (отказ двух или трех элементов схемы), могут приниматься во внимание в случае, когда сравниваемые при расчетных авариях варианты схем равнозначны.

В послеаварийных режимах допускается снижение или даже перерыв в электроснабжении, а также ограничение электроснабжения потребителей при условии сохранения устойчивости в сечениях и обеспечения допустимых токовых нагрузок оборудования. При наличии технико – экономического обоснования, которое является сопоставлением экономических последствий отказов элементов схемы с затратами на увеличение пропускной способности схемы, исключающей ограничение электроснабжения потребителей.

Показатели надежности элементов схемы (линий, трансформаторов, выключателей, разъединителей и др.), в том числе: частота (интенсивность) отказов и время восстановления, должны приниматься с учетом опыта эксплуатации электросетевых объектов данного региона.

8.3. ПРИМЕНЕНИЕ БЛОЧНЫХ СХЕМ ПС

8.3.1. Указания по применению блочных схем

Блочные схемы применяются на стороне ВН тупиковых, в основном потребительских ПС или ответвительных ПС до 500 кВ включительно – это упрощенные, экономичные схемы ПС территориально недалеко расположенных от питающих ПС или проходящих ВЛ.

Схема один блок (линия-трансформатор) с разъединителем применяется на напряжении 35...220 кВ при питании линией, не имеющей ответвлений, одного трансформатора и наличием надежной линии связи для передачи сигналов релейной защиты.

РУ по схемам могут развиваться за счет установки, при необходимости, другого аналогичного блока без перемычки на ВН. Такое решение рекомендуется применять при ограниченной площади застройки.

Применение однотрансформаторных ПС допускается при обеспечении требуемой надежности электроснабжения потребителей.

Схема два блока (линия – трансформатор) с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линий применяется на напряжении 35–220 кВ для тупиковых или ответвительных двухтрансформаторных подстанций.

В зависимости от схем сети начальным этапом развития данной схемы возможна схема укрупненного блока (линия + 2 трансформатора).

При одной линии и двух трансформаторах разъединители в «перемычке» допускается не устанавливать.

8.3.2. Указания по применению мостиковых схем, схем «заход-выход»

Мостиковые схемы применяются на стороне ВН ПС 35, 110 и 220 кВ при 4 присоединениях (2ВЛ+2Т) и необходимости осуществления секционирования сети.

На напряжении 110 и 220 кВ мостиковые схемы применяются как с ремонтной перемычкой так и при соответствующем обосновании без ремонтной перемычки.

При необходимости секционирования сети на данной ПС в режиме ремонта выключателя предпочтительнее применять схему мостик с выключателями в цепях трансформаторов и ремонтной перемычкой со стороны трансформаторов. Данная схема применяется при необходимости частого отключения трансформаторов.

Схема «заход–выход» применяется при соответствующем обосновании на проходных и ответвительных однотрансформаторных ПС на напряжении 110–220 кВ как с ремонтной перемычкой, так и без нее.

В качестве схемы «заход–выход» более предпочтительной является схема треугольник. Чаше схема «треугольник» применяется в качестве пускового этапа РУ выполняемого по более сложной схеме.

При необходимости коммутации двух трансформаторов и трех линий в качестве схемы РУ может быть использована схема сдвоенного мостика с 4 выключателями.

8.4. УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ СХЕМ СО СБОРНЫМИ ШИНАМИ И ОДНИМ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕМ НА ПРИСОЕДИНЕНИЕ

К схемам со сборными шинами и одним выключателем на присоединение относятся схемы с одной секционированной системой шин и схемы с двумя системами шин. Они применяются, как правило, при 5-ти и более присоединениях.

Схемы с одной секционированной системой шин применяются на напряжение 35...220 кВ при парных линиях или линиях, резервируемых от других ПС, а также нерезервируемых, но не более одной на любой из секций, т.е. при отсутствии требования сохранения в работе всех присоединений при выводе в ревизию или ремонт рабочей секции шин.

Для повышения надежности РУ применяется схема с секционированием рабочей системы шин по числу трансформаторов и с подключением каждого трансформатора и ответственных линий в секционирующую цепочку из двух или трех выключателей к разным секциям шин.

Схемы одна рабочая секционированная выключателем и обходная системы шин и одна рабочая, секционированная выключателями и обходная система шин с подключением каждого трансформатора к обеим секциям рабочей системы шин через развилку выключателей применяются, и рекомендуется на напряжение 110...220 кВ при пяти и более присоединениях и допустимости потери питания потребителей на время переключения присоединения на обходную систему. Схема может быть использована при применении выключателей, для которых период между плановыми ремонтами менее 10 лет, а его продолжительность более суток; в этом случае питание потребителей осуществляется через обходную систему шин.

Схема две рабочие системы шин и схема с двумя рабочими и обходной системами сборных шин применяется на напряжении 110...220 кВ при числе присоединений от 5 до 15 при повышенных требованиях к надежности питания каждой ВЛ и при отсутствии возможности отключения всех присоединений секции (системы шин) на время ревизии и ремонта этой секции сборных шин.

Схема две рабочие, секционированные выключателями и обходная системы шин с двумя шиносоединительными и двумя обходными выключателями может применяться, при соответствующем обосновании, в РУ напряжением 110...220 кВ при 3–4 трансформаторах, при необходимости снижения токов КЗ (например, путем опережающего деления сети), при других обоснованиях.

Схемы с обходными системами шин рекомендуются для РУ ПС с повышенными требованиями к надежности питания ВЛ, а также с устройствами для плавки гололеда в районах с загрязненной атмосферой и при необходимости периодической чистки изоляции и др.

В РУ 110...220 кВ по схемам из герметизированных ячеек с элегазовой изоляцией (КРУЭ, PASS), а также в РУ с выкатными выключателями или аппаратными комплексами обходная система шин не выполняется при условии возможности замены при необходимости выключателя в удовлетворяющее эксплуатацию время.

8.5. ПРИМЕНЕНИЕ СХЕМ ДЛЯ КРУЭ

Для КРУЭ (комплектных распределительных устройств элегазовых), как правило, применяются те же схемы, что и для ОРУ. При проектировании КРУЭ необходимо руководствоваться следующими принципами:

Ячейки комплектных распределительных устройств элегазовых (КРУЭ) изготавливаются в настоящее время на напряжение до 750 кВ включительно.

В КРУЭ основные элементы, из которых собирается схема, в том числе аппараты (выключатели, разъединители, заземлители, измерительные выключатели и обходная система шин с подключением каждого трансформатора к обеим секциям рабочей системы шин через развилку выключателей) применяются и рекомендуется на напряжение 110...220 кВ при пяти и более присоединениях и допустимости потери питания потребителей на время переключения присоединения на обходную систему.

Схемы «две рабочие системы шин» и «с двумя рабочими и обходной системами сборных шин» применяются на напряжении 10...220 кВ при числе присоединений от 5 до 15 при повышенных требованиях к надежности питания каждой секции и при отсутствии возможности отключения всех присоединений секции (системы шин) на время ревизии и ремонта этой секции сборных шин.

Схемы с обходными системами шин рекомендуются для РУ ПС с повышенными требованиями к надежности питания ВЛ, а также с устройствами для плавки гололеда в районах с загрязненной атмосферой и при необходимости периодической чистки изоляции и др.

В РУ 110...220 кВ по схемам из герметизированных ячеек с элегазовой изоляцией (КРУЭ, PASS), а также в РУ с выкатными выключателями или аппаратными комплексами обходная система шин не выполняется при условии возможности замены при необходимости выключателя в удовлетворяющее эксплуатацию время.

8.6. УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ СХЕМ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ 10(6) кВ

Для обеспечения электроэнергией местных потребителей и собственных нужд (СН) на подстанциях используется РУ 10(6) кВ. Применяются схемы с одной, двумя, четырьмя секционированными системами сборных шин.

Схема «одна секционированная выключателем (или двумя выключателями) система шин» применяется при двух трансформаторах, каждый из которых присоединен к одной секции (возможно и к обеим).

Схема «две секционированные выключателями системы шин» применяется при двух трансформаторах с расщепленными обмотками или при сдвоенных реакторах, присоединенных каждый к двум секциям.

Схема «четыре секционированные выключателями системы шин» применяется при двух трансформаторах с расщепленными обмотками НН и сдвоенных реакторах.

При наличии соответствующих обоснований в указанных схемах допускается другое количество секций, а также групповое или индивидуальное реактирование присоединений вместо реакторов в цепях трансформаторов.

Количество отходящих линий в РУ 10(6) кВ ПС определяется схемой развития сетевого хозяйства.

Реакторы следует устанавливать между автотрансформатором и линейным регулировочным трансформатором, если не обеспечивается стойкость линейных регулировочных трансформаторов к сквозному току КЗ.

При раздельной работе секций сборных шин допускается установка вторых (резервных) трансформаторов напряжения.

В схемах 10(6) допускается установка на вводе 10(6) кВ дополнительных ТТ.

Схема 10(6) может быть выполнена с присоединением каждого трансформатора к обеим секциям, что несколько усложняет представленную схему, но обеспечивает большую надежность в режиме ремонта выключателя трансформаторного присоединения.

На ПС с постоянным оперативным током трансформаторы СН присоединяются к шинам 10(6) кВ через предохранители или выключатели.

Питание сторонних потребителей от сети СН подстанций не допускается.

8.7. ПРИМЕНЕНИЕ СХЕМ РУ 20 кВ

РУ на номинальное напряжение 20 кВ широко применяются за рубежом и рекомендованы для использования в нашей стране в распределительных сетях некоторых крупных городов.

На напряжение 20 кВ для РУ, в основном рекомендуется схема с одной секционированной системой шин (схема 20–9), но для отдельных присоединений с тупиковыми однотрансформаторными подстанциями может применяться и блочная схема (схема 20–3Н).

Сеть 20 кВ рекомендуется выполнять с нейтралью, заземленной через резистор. При этом используется понижающий трансформатор со схемой соединения обмоток «звезда-звезда» с включением резистора в нейтраль обмотки напряжением 20 кВ или используется присоединенный к шинам РУ 20 кВ специальный трансформатор «звезда-треугольник» с включением в нейтраль «звезды» заземляющего резистора.

Для обеспечения селективности работы релейной защиты сопротивление заземляющего резистора выбирается таким, чтобы значение тока при однофазном замыкании в сети 20 кВ было не ниже 1000 А.

8.8. ПРИМЕНЕНИЕ СХЕМ ПОДКЛЮЧЕНИЯ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Для компенсации реактивной мощности в сети в зависимости от ее параметров могут применяться следующие устройства, устанавливаемые на подстанциях.

Шунтовые конденсаторные батареи (регулируемые и нерегулируемые ШКБ) на напряжение 10 (6) и 35 кВ и комплектные конденсаторные установки; их устанавливают, главным образом, на ПС до 110 кВ.

Синхронные компенсаторы (СК) и асинхронизированные компенсаторы (АСК), подключаемые чаще к выводам НН автотрансформаторов. АСК обеспечивают работу со 100 % выдачей и 100 % потреблением реактивной мощности с заданным быстродействием и допускают кратковременную, до двухкратного значения, перегрузку по току.

Шунтирующие реакторы (ШР) применяются, в основном, для компенсации зарядной емкости ВЛ.

Управляемые шунтирующие реакторы (УШР) применяются для регулирования напряжения в точке включения путем непрерывного регулирования потребления реактивной мощности.

Статические тиристорные компенсаторы (СТК), включающие тиристорно-реакторные и конденсаторные группы, обеспечивают регулируемое потребление реактивной мощности. Применяются для быстрого и непрерывного регулирования в диапазоне $\pm 100\%$ изменения реактивной мощности.

Статические компенсаторы на базе инверторов напряжения с полностью управляемыми вентилями (СТАТКОМы) обеспечивают полное быстродействующее регулируемое потребление или генерацию реактивной мощности.

На ПС для компенсации реактивной мощности применяются конденсаторные батареи, подключаемые к системе сборных шин.

Для подключения ШР и УШР в сетях 330–750 кВ и в слабо загруженных протяженных сетях 220 кВ для исключения повышения напряжения выше допустимого уровня (в режиме минимальных нагрузок), для компенсации избытков реактивной мощности и ограничения внутренних перенапряжений применяются схемы с подключением их к ВЛ или к сборным шинам РУ.

Кроме того, для обеспечения успешного ОАПВ (зависит от параметров сети) применяются схемы с включением в нейтраль ШР компенсационного реактора (КР).

На напряжение 110 кВ в РУ СТК и ШКБ подключаются как линейные присоединения.

При выборе средств регулирования напряжения следует исходить из того, что на всех ПС 35–750 кВ устанавливаются трансформаторы с устройством регулирования напряжения под нагрузкой. Необходимость подключения компенсирующих устройств и их тип определяются в схеме развития энергосистемы и при конкретном проектировании.

В РУ 110–220 кВ количество ТН на шинах определяется расчетом исходя из обеспечения условий их работы в требуемом классе точности.

В схемах *n*-угольников рекомендуется для осуществления АПВ с контролем наличия напряжения и синхронизма при отключениях соответствующего присоединения устанавливать ТН в каждой вершине.

В случае обоснованной необходимости установки на ВЛ двух ТН они устанавливаются с разных сторон высокочастотного заградителя. До заградителя со стороны ВЛ предпочтительна установка ТН емкостного типа. Другой ТН должен присоединяться по другую сторону от ВЧ заградителя.

В схемах «мостика» рекомендуется предусматривать ТН в узлах, к которым подключена ремонтная перемычка.

В районах холодного климата применение ТН электромагнитного типа предпочтительнее.

В схемах РУ на среднем напряжении 110 и 220 кВ, на вводах автотрансформаторов при соответствующем обосновании устанавливаются ТН.

ТН индуктивного типа к сборным шинам присоединяются через разъединители. ТН емкостного типа присоединяется к сборным шинам без разъединителя. ТН на отходящих линиях, в соответствии с ПУЭ, устанавливаются без разъединителей.

При установке на ВЛ трансформаторов тока и трансформаторов напряжения рекомендуется при соответствующем обосновании применение комбинированных трансформаторов тока и напряжения.

Установка ограничителей перенапряжений. При выборе ограничителей перенапряжений (ОПН) необходимо иметь в виду следующее.

Для защиты от перенапряжений на всех схемах показаны ограничители перенапряжений (ОПН). Установка ОПН на схемах показывается условно. Необходимость и место установки ОПН определяется при конкретном проектировании в соответствии с ПУЭ.

Для всех классов напряжений в цепях трансформаторов и шунтирующих реакторов должны быть установлены ОПН.

Необходимость установки ОПН на шинах 110 кВ и их количество определяются сравнением расстояний по ошиновке от силовых трансформаторов до самого удаленного присоединения, с наибольшим допустимым расстоянием по ПУЭ и характеристиками ОПН.

Для защиты оборудования КРУЭ от грозовых перенапряжений ОПН устанавливается снаружи КРУЭ между вводом воздушной линии в КРУЭ и последней опорой. Установка ОПН со стороны (АТ, ШР) может осуществляться как снаружи, так и внутри КРУЭ в цепи присоединения трансформатора до коммутационного аппарата. Необходимость установки дополнительных ОПН на шинах КРУЭ определяется расчетом в зависимости от мест расположения и расстояний от остальных ОПН до защищаемого оборудования, параметров ОПН и количества отходящих от шин присоединений.

При устройстве кабельных вставок, соединенных с воздушными линиями, ОПН устанавливаются в местах перехода кабельных линий в ВЛ. При наличии в месте перехода коммутационного аппарата ОПН устанавливается между коммутационным аппаратом и кабельной вставкой.

Необходимость установки ОПН по обоим концам вставки определяется ее длиной, параметрами ОПН и наличием других ОПН на ПС.

Неиспользуемые обмотки низшего и среднего напряжений силовых трансформаторов (автотрансформаторов), а также обмотки, временно отключенные от шин РУ в грозовой период, должны быть соединены в звезду или треугольник. Кроме этого, включенными между вводами каждой фазы и землей, ОПН также защищены. Защита неиспользуемых обмоток не требуется, если к ним постоянно присоединена кабельная линия длиной не менее 30 м, имеющая заземленную оболочку или броню.

ГЛАВА 9

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ПОДСТАНЦИЙ ПРЕДПРИЯТИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 6–220 кВ

9.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

9.1.1. Общие сведения

В данной главе представлены основные типовые схемные решения электротехнического оборудования РУ, ОРУ, ЗРУ, КРУЭ, охватывающие большинство встречающихся в практике подстанций (ПС) и комплектных трансформаторных подстанций (КТП), предприятий организаций и учреждений с различным уровнем напряжений в диапазоне 6–220 кВ. Использование типовых схем позволяет обеспечить требуемую надежность, безопасность функционирования, а также повысить экономическую эффективность функционирования электрооборудования.

9.1.2. Методические указания

Перед изучением данной главы целесообразно повторить материал по трехфазным цепям, а также разделы нормативных документов по ПС и канализации электрической энергии.

При изучении материала главы необходимо знать основные формулы, определяющие выбор номинальной мощности трансформаторов, сечений проводников, проверку оборудования по термической и динамической стойкости. Для лучшего запоминания формул следует выписать их в отдельную таблицу.

С точки зрения применения и эксплуатации ПС, важно знать их рабочие характеристики, особенности эксплуатации в нормальном и аварийном режимах.

Необходимо не только изучить электрические схемы, но и разобраться в физических процессах, протекающих при распределении электрической энергии, уяснить преимущества и недостатки каждого отдельного вида оборудования.

После усвоения материала важно ответить на вопросы самоконтроля, самостоятельно проработать приведенные описания электротехнического оборудования.

9.2. РАЗЪЕДИНИТЕЛИ

Рассмотрим различные понятия «разъединитель», приведенные в ГОСТах. Разъединитель – это контактный коммутационный аппарат, в разомкнутом положении соответствующий требованиям к функции разъединения. Разъединение (функция) – действие, направленное на отключение питания всей установки или ее отдельной части путем отсоединения этой установки или ее части от любого источника электрической энергии по соображениям безопасности (ГОСТ Р 50030.1-2007 (МЭК 60947-1:2004)).

Определение «разъединитель» по ГОСТ Р 50030.3-99 (МЭК 60947-3-99) представлено: разъединитель – это коммутационный аппарат, который в отключенном положении удовлетворяет определенным требованиям для изолирующей функции.

При этом в примечании к данному ГОСТу отмечается, что это определение отличается от приведенного в МЭС 441-14-05 ссылкой на изолирующую функцию, вместо изолирующего расстояния.

Разъединитель способен включать и отключать цепь с незначительным током или при незначительном изменении напряжения на зажимах каждого из полюсов разъединителя. Разъединитель может проводить токи в нормальных условиях работы, а также в течение определенного времени в аномальных условиях работы выдерживать токи короткого замыкания.

Определения, касаемые высоковольтных аппаратов, в ГОСТ Р 52726-2007 определяются, как: разъединитель – это контактный коммутационный аппарат, который обеспечивает в отключенном положении изоляционный промежуток, удовлетворяющий нормированным требованиям.

При этом в примечании данного ГОСТа отмечается: разъединитель способен размыкать и замыкать цепь при малом токе или малом изменении напряжения на выводах каждого из его полюсов. Он также способен проводить токи при нормальных условиях в цепи и проводить в течение нормированного времени токи при ненормальных условиях, таких как короткое замыкание.

Малые токи – это такие токи, как емкостные токи вводов, шин, соединений, очень коротких кабелей, токи постоянно соединенных ступенчатых сопротивлений выключателей и токи трансформаторов напряжения и делителей. Для номинальных напряжений до 330 кВ

включительно ток, не превышающий 0,5 А, считается малым током по этому определению; для номинального напряжения от 500 кВ и выше и токов, превышающих 0,5 А, необходимо проконсультироваться с изготовителем, если нет особых указаний в руководствах по эксплуатации разъединителей.

К малым изменениям напряжения относятся изменения напряжения, возникающие при шунтировании регуляторов индуктивного напряжения или выключателей.

Для разъединителей номинальным напряжением от 110 кВ и выше может быть установлена коммутация уравнительных токов.

Особенности применения разъединителей. Разъединители используются для видимого отделения участка электрической сети на время ревизии или ремонта оборудования, для создания безопасных условий работы и отделения от смежных частей электрооборудования, находящихся под напряжением, для создания которых разъединители комплектуются блокировкой включенного (отключенного) положения и заземляющими ножами, исключающими подачу напряжения на выведенный в ремонт участок сети.

Также разъединители применяются для переключения присоединений с одной системы шин на другую, в электроустановках с несколькими системами шин.

Согласно Правилам технической эксплуатации электроустановок (ПТЭЭП), разрешалось отключение и включение разъединителями:

- нейтралей силовых трансформаторов 110–220 кВ;
- заземляющих дугогасящих реакторов 6–35 кВ при отсутствии в сети замыкания на землю;
- намагничивающего тока силовых трансформаторов 6–500 кВ;
- зарядного тока и тока замыкания на землю воздушных и кабельных линий электропередачи;
- зарядного тока систем шин, а также зарядного тока присоединений с соблюдением требований нормативных документов.

В кольцевых сетях 6–10 кВ разрешается отключение разъединителями уравнительных токов до 70 А и замыкание сети в кольцо при разности напряжений на разомкнутых контактах разъединителей не более, чем на 5 %.

Допускается отключение и включение трехполюсными разъединителями наружной установки при напряжении 10 кВ и ниже нагрузочного тока до 15 А.

Допускается дистанционное отключение разъединителями неисправного выключателя 220 кВ и выше, зашунтированного одним выключателем или цепочкой из нескольких выключателей других присоединений системы шин (схема четырехугольника, полуторная и т.п.), если отключение выключателя может привести к его разрушению и обесточиванию подстанции.

Непрерывно растущий спрос на электроэнергию предъявляет повышенные требования к распределительным устройствам и их элементам. В этой связи надежность, а также низкие расходы на эксплуатацию играют важную роль. Многие годы разъединители, как один из основных видов электротехнического оборудования, удовлетворяют все возрастающим требованиям по надежности и безопасности при эксплуатации, которые предъявляются к системам электроснабжения. Они доказали свою необходимость как при нормальных, так и экстремальных условиях эксплуатации. Опыт использования постоянно отражается в разработке новых изделий и улучшении существующих.

Разъединители предназначены для создания видимых разрывов в электрических цепях и (в случае необходимости) заземления отключённых участков. Они также пригодны для коммутации малых токов или таких токов, при которых на их выводах не происходит значительного изменения напряжения.

Двухколонковые разъединители серии горизонтально-поворотного типа могут быть применены на высоковольтных подстанциях любого типа, с номинальным напряжением 110, 150, 220, 330 и 500 кВ. Они выпускаются на номинальные токи (от нескольких сотен ампер до 4 кА (в зависимости от типа). Для заземления отключенных участков цепи каждый полюс разъединителя может оборудоваться одним или двумя заземляющими ножами.

Разъединители изготавливаются по Техническим условиям. Они должны соответствовать ГОСТ689-90 и стандартам МЭК. А также должны быть сертифицированы в РФ и полностью адаптированы к российским условиям.



Рис. 9.1. Внешний вида разъединителя горизонтально-поворотного типа

9.2.1. Типовая конструкция разъединителя

Несущим элементом разъединителя преимущественно является стальная рама. На ней располагаются поворотные основания закрытой конструкции, защищенные от атмосферных воздействий. Изолятор устанавливается на плиту поворотного основания. На верхних фланцах изоляторов установлена токоведущая система, выполненная в виде двух токопроводов с высоковольтными выводами. Когда разъединитель находится в замкнутом положении, контактная площадка располагается между контактными пальцами. Прохождение тока через защищенные от внешних воздействий вращающиеся контактные выводы осуществляется

посредством розеточных контактов, установленных вокруг двух медных стержней, покрытых серебром. Такой вариант дает свободу в установке, поскольку высоковольтный вывод имеет возможность вращаться на 360° и подвод проводов возможен в любом направлении. Контактная площадка высоковольтных выводов выполнена в соответствии с требованиями ГОСТы.

Токопровод изготовлен в виде сварной алюминиевой конструкции с минимальным количеством точек, подверженных коррозии и, как следствие, не меняет свою электропроводность в течение всего срока эксплуатации. Разъединители на номинальные напряжения 150 кВ и выше оборудуются блокировочным устройством, которое в случае прохождения токов короткого замыкания удерживает токопроводы от разделения в продольном направлении. Отклонение изолятора, возникающее вследствие воздействия сил тяжения проводов, можно легко компенсировать путем регулировки шпилек на поворотных основаниях. Поскольку разъединители рассчитаны на высокие механические нагрузки на выводы, то регулировка для разъединителей на классы напряжения до 150 кВ включительно обычно не требуется. Дополнительно может устанавливаться устройство заземления, состоящее из навешиваемого на раму заземлителя, который в отключенном положении располагается вдоль рамы. Во включенном положении заземлитель своим контактными пальцами, входит в сцепление с контактом, установлены на токопроводе. Заземлитель может быть установлен либо у одного из токопроводов, либо у обоих. Универсальность конструкции заземлителя позволяет монтировать его непосредственно на месте установки разъединителя. Заземлитель также может быть легко подвергнут модернизации.

Все элементы разъединителя защищены от атмосферных воздействий; антикоррозийная защита всех стальных деталей, как правило, выполняется методом горячего цинкования или окрашивания.

Описание работы разъединителя. Управление разъединителем и заземлителями осуществляется независимо. Конструкция приводного механизма часто характеризуется тем, что рычажный механизм проходит положение «мертвой точки» до того, как достигнуты конечные положения контактов, что предотвращает возможность самопроизвольного изменения их положения из-за внешних воздействий. Движение передается от привода к поворотным опорам посредством тяги. Обе опоры поворачиваются одновременно. При отключении токопроводы поворачиваются на угол 90° градусов и располагаются параллельно друг другу, под прямыми углами к раме. На заземлитель движение передается через вал. При включении заземлитель поворачивается вверх и его контактные пальцы входят в сцепление с заземляемым контактом на токопроводе.

9.2.2. Привод разъединителя

Разъединители производятся с механизмом, имеющим ручной или электродвигательный привод. Для трехполюсного разъединителя (без заземлителей) требуется только один приводной механизм. Соединительные тяги между отдельными полюсами имеют бесступенчатую регулировку. Привод может крепиться на раме или в зоне, удобной для оперирования. Его соединение с механизмом разъединителя осуществляется при помощи дополнительной шарнирной опоры и приводного вала, длина которого может достигать 12 метров.

9.2.3. Вспомогательные контакты

Блоки вспомогательных контактов расположены в шкафу привода и служат для индикации положения разъединителя. Механическое воздействие на них, оказываемое приводным механизмом, происходит таким образом, что сигнал выдается только после того, как пройдено положение мертвой точки и произошла фиксация положения главных контактов и заземлителя.

9.2.4. Блокировка

Разъединитель и заземлитель заблокированы друг с другом таким образом, что при управлении переключение заземлителя возможно только при выключенном разъединителе, а переключение разъединителя – при отключенном заземлителе. Для разъединителя, имеющего электродвигательные приводы, также применяется механическая блокировка. Как в электродвигательных, так и в ручных приводах в качестве дополнительного блокирующего устройства используется блокирующий электромагнит. Электродвигательный привод может включать электромагнит, препятствующий срабатыванию электродвигателя при оперировании разъединителем при помощи аварийной рукоятки. Также могут применяться различные типы замков.

9.3. ОГРАНИЧИТЕЛИ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ ДО 35 кВ

Ограничители предназначены для защиты электротехнического оборудования, воздушных и кабельных линий от грозовых и коммутационных перенапряжений в сетях переменного тока частотой от 17 до 60 Гц с заземленной, изолированной или компенсированной нейтралью, с номинальным напряжением до 35 кВ.

9.3.1. Конструкция ОПН

Ограничители всех серий имеют унифицированную конструкцию опорного типа и отличаются только числом и размером варисторов и количеством внутренних стяжек.

Конструктивно ограничители состоят из одной колонки варисторов – нелинейных сопротивлений, включенных последовательно и скрепленных между собой и с фланцами при помощи стяжек из отвержденного стекложгута. Фланцы ограничителей изготавливаются из алюминиевых сплавов или из нержавеющей стали. Между фланцами и варисторами установлены демпфирующие шайбы из алюминия.



Рис. 9.2. Внешний вид ОПН

Корпуса ограничителей изготавливаются преимущественно из негорючей кремний органической резины, методом вакуумного литья непосредственно на колонку варисторов. Во фланцах имеются отверстия с резьбой для подсоединения внешних токовых цепей. Формирование корпусов ограничителей методом вакуумного литья непосредственно на колонку варисторов исключает образование каких-либо воздушных пор, полостей и т.п. в теле ограничителей, что делает их взрывобезопасными в случаях недопустимых перегрузок.

9.3.2. Монтаж и обслуживание ОПН

Рабочее положение ОПН в пространстве может быть вертикальным, горизонтальным либо под углом. ОПН не вызывают, как правило, трудностей в установке и не требуют специального инструмента при монтаже.

Правильно выбранный и смонтированный ОПН практически не нуждается в каком-либо техническом обслуживании при эксплуатации. Если по каким-либо причинам контроль за состоянием ОПН все таки необходим, то для этого можно провести измерение его классификационного напряжения и измерить величину сопротивления мегомметром. При эксплуатации ОПН в районах с повышенным уровнем загрязнения рекомендуется проводить периодическую чистку их внешней изоляции.

9.3.3. Энергетические показатели ОПН

Энергоемкость ограничителя является характеристикой, отражающей совокупность воздействий на него в различных режимах при напряжениях выше номинального. Класс энергоемкости ОПН характеризуется величиной удельной поглощаемой энергии в кДж на 1 кВ наибольшего рабочего напряжения.

Длина пути утечки – это расстояние, измеренное вдоль внешней поверхности изолятора, которое характеризует работоспособность ОПН при различных уровнях загрязнения внешней среды без риска перекрытия по поверхности.

9.4. ОГРАНИЧИТЕЛИ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ 110 кВ

Ограничители перенапряжений (ОПН) служат для первичной защиты от грозовых и коммутационных перенапряжений. Для ограничения перенапряжений они обычно устанавливаются параллельно защищаемому

оборудованию. Активные элементы (цинко-оксидные варисторы) ограничителей перенапряжения АББ изготавливаются из керамического материала с высокой нелинейной характеристикой, который, в основном, состоит из оксида цинка, смешанного с оксидами других металлов.

Основные характеристики ОПН

Номинальное напряжение сети (U_m). Линейное напряжение сети, в которой устанавливается ограничитель.

Номинальный разрядный ток (МЭК). Наибольшее значение грозового разрядного тока, имеющего форму волны 8/20 мкс, которое ОПН способен выдержать не менее 20 раз.

Классификационный ток грозового разряда. Амплитудное значение переменного тока промышленной частоты, при котором измеряется значение классификационного напряжения (для конкретного типа ОПН этот ток указывается предприятием – изготовителем).

Амплитудное значение переменного тока промышленной частоты, при котором измеряется значение классификационного напряжения (для конкретного типа ОПН этот ток указывается предприятием-изготовителем).

Номинальное напряжение (U_r). Действующее значение напряжения промышленной частоты, которое ОПН способен выдержать в течение 10 секунд после нагрева до температуры 60°C и воздействия двух импульсов тока, соответствующих классу удельной емкости данного типа ОПН.

Номинальное напряжение рабочего цикла. Указанное максимально допустимое напряжение между выводами, при котором ОПН должен выполнять свой рабочий цикл.

Длительно допустимое рабочее напряжение ОПН (U_c). Наибольшее действующее напряжение промышленной частоты, которое может быть неограниченно долго приложено между выводами ОПН. Такое напряжение определяется различными способами (проверяется с помощью различных методик испытаний) в МЭК и ANSI.

Временно допустимое повышение напряжения на ОПН (TOV).

Временно допустимые перенапряжения, в отличие от импульсных перенапряжений, являются колебательными перенапряжениями промышленной частоты относительно большой длительностью (от нескольких циклов до нескольких часов).

Самая распространенная форма временно-допустимого перенапряжения – это перенапряжение, возникающее на исправных фазах системы во время замыкания на землю одной или более фаз. Другими источниками временно-допустимого перенапряжения являются сброс нагрузки, подача напряжения на ненагруженные линии и т.д.

Стойкость ограничителя к временно-допустимым перенапряжениям указывается в соответствующих каталогах с учетом предварительного воздействия импульсов тока.

Остающееся напряжение

Наибольшее значение напряжения, которое возникает между выводами ОПН при протекании через него разрядного тока с данной амплитудой и длиной фронта. Остающееся напряжение зависит как от величины, так и от формы импульса разрядного тока. Вольтамперные характеристики ограничителей указываются в соответствующих каталогах.

Энергоемкость ОПН

В стандартах отсутствует точное определение энергоемкости ОПН. Единственная мера измерения – класс разряда линии в стандарте МЭК. Часто этой информации недостаточно для сравнения продукции различных изготовителей, поэтому часто указывается также величина удельной поглощаемой энергии в кДж/кВ (U_T). Это энергия, полученная ОПН в ходе испытания коммутационным перенапряжением в рабочем режиме, после поглощения которой ОПН остается термически стабильным и способен выдержать как $U_{нр}$, так и временные перенапряжения промышленной частоты.

Энергия в процессе приемо-сдаточных испытаний

Это полная энергия, которую поглощает каждый отдельный варистор во время наших производственных испытаний.

Удельная поглощаемая энергия

Это максимально допустимая удельная энергия одного импульса тока длительностью 4 мс или более, после поглощения которой ОПН остается термически стабильным и способен выдержать как $U_{нр}$, так и временные перенапряжения промышленной частоты.

Ток взрывобезопасности

Значение одно- или трехфазного (большого из них) тока короткого замыкания, при котором не происходит взрывного разрушения покрышки ОПН.

Если разрушение покрышки все же произошло, то элементы должны находиться внутри нормируемой зоны. После такого воздействия ОПН необходимо заменить.

Ток короткого замыкания в системе может быть большим или малым, в зависимости от полного сопротивления системы и состояния нейтрали. Поэтому определение тока взрывобезопасности проводится при различных уровнях тока.

Изоляционный уровень внешней изоляции.

МЭК: 15 % для коротких импульсов и 10 % для длинных импульсов (на уровне моря);

ANSI: 20 % для коротких импульсов и 15 % для длинных импульсов (на уровне моря).

Примечание. Коэффициенты поправки на высоту – это максимальное значение приложенного напряжения (определенной величины и формы), которое не приводит к перекрытию ОПН по внешней поверхности. В отличие от другого оборудования, ОПН рассчитаны на внутренний разряд, и напряжение на крышке никогда не может превысить уровни защиты. Таким образом, самозащита внешней изоляции обеспечивается, если ее электрическая прочность выше уровней защиты, заданных с поправкой на высоту установки. Стандартами предписаны дополнительные коэффициенты безопасности, кроме поправки на высоту:

- характеристики ОПН для ЛЭП;
- обратное перекрытие.

При ударе молнии в конструкцию опоры или в грозозащитный трос линии, ток грозового разряда, проходящий через опору и контур полного сопротивления заземлителя опоры, создает разность потенциалов в изоляции линии.

При превышении электрической прочности изоляции линии происходит пробой, т.е. обратное перекрытие. Обратное перекрытие преобладает при большом полном сопротивлении заземлителя опоры.

Линии с компактной изоляцией

ЛЭП с уменьшенными расстояниями между фазами и между фазой и землей, а также с более низким уровнем прочности изоляции по сравнению с нормальными линиями для того же напряжения сети.

Коэффициент связи

Отношение полученного перенапряжения на параллельном проводнике к перенапряжению на проводнике под воздействием. Этот коэффициент определяется на основе геометрических соотношений между фазой и землей (или защищенных фазных проводников). Значение, часто применяемое для оценки, составляет 0,25.

Энергоемкость ОПН

Энергия, которую может поглотить ОПН за один или более импульсов, без повреждения и без потери термической устойчивости. Эта характеристика различна для разных типов и длительности импульсов. Интенсивность грозовой активности.

Количество ежегодных грозových дней для данного региона.

Тросовая защита (экранирование)

Защита фазных проводов от прямых ударов молнии; обычно посредством дополнительных проводов (тросов), проходящих наверху опор и заземленных через конструкцию опор.

Защитный угол

Угол, обычно 20–30 градусов, между грозозащитным тросом и фазным проводом.

Прорыв разряда молнии через тросовую защиту происходит при ударе молнии в фазный провод линии, защищенной воздушными грозозащитными тросами.

Ограничители перенапряжения для линий электропередач

Полное сопротивление заземлителя опоры.

Полное сопротивление импульсу тока грозового перенапряжения, стекающего с основания опоры на истинную землю. Риск обратного перекрытия повышается с увеличением полного сопротивления заземлителя опоры.

Набегающие волны

Возникают при ударе молнии в пролет ЛЭП и при большом броске тока в проводе под воздействием молнии. Волны импульсного напряжения и тока разделяются и распространяются в обоих направлениях от места удара со скоростью примерно 300 метров в микросекунду с величиной, определяемой грозвым импульсом тока и полным сопротивлением линии.

Упрощенная процедура выбора

Процедура выбора состоит из двух основных этапов:

- выбор электрических характеристик ОПН в соответствии с параметрами сети;
- выбор механических характеристик ОПН и его климатического исполнения.

Окончательный выбор отражается в обозначении типа ОПН.

9.5. ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА

Трансформатор предназначен для передачи сигнала измерительной информации измерительным приборам, в том числе в схемах коммерческого учета электроэнергии устройствам защиты и управления в установках переменного тока частотой 50 Гц.

Трансформатор тока предназначен для эксплуатации в следующих условиях:

- 1) температура окружающей среды от минус 55 °С до плюс 45 °С;
- 2) относительная влажность воздуха 100 % при 25 °С;
- 3) высота установки над уровнем моря – не более 1000 м;
- 4) рабочее положение в пространстве – вертикальное;
- 5) окружающая среда – атмосфера типа II по ГОСТ 15150-69 (промышленная).



Рис. 9.3. Трансформаторы тока с элегазовой изоляцией

Общий вид трансформатора тока может варьироваться в зависимости от первичного напряжения. Трансформатор тока на напряжение 110 кВ и выше, как правило, имеет баковую конструкцию с первичной обмоткой U-образной формы с конденсаторной изоляцией и песочно-масляным заполнением.

Первичная обмотка трансформатора состоит из одного или нескольких параллельных медных или алюминиевых проводников. Изоляция выполнена из высокопрочной бумаги с конденсаторными обкладками. Последняя обкладка соединена с заземленным баком. По требованию заказчика трансформатор может поставляться с емкостным выводом напряжения, который через специальный изолятор в стенке бака

соединен с предпоследней конденсаторной обкладкой. Емкостной вывод используется для контроля $\operatorname{tg} f$ бумажной изоляции.

Вторичные обмотки равномерно намотаны на ленточные тороидальные магнитопроводы. Магнитопроводы обмоток для измерений изготовлены из никелевого сплава, обладающего малыми потерями и низким уровнем насыщения. Магнитопроводы обмоток для защиты изготовлены из анизотропной электротехнической стали.

Вторичные обмотки расположены в алюминиевом баке, служащем основанием трансформатора. На крышке бака смонтирован фарфоровый или полимерный изолятор.

Внутреннее пространство трансформатора заполнено очищенным кварцевым песком (примерно на 60 % от общего объема) и залито дегазированным минеральным маслом, соответствующим классу II по МЭК 296.

На верхнем торце изолятора установлена герметичная расширительная система, в которой в качестве компенсирующего элемента применена азотная «подушка».

В трансформаторах тока на большие токи (3000–4000 А) расширительная система выполнена в виде сильфона из нержавеющей стали.

На корпусе расширительной системы имеется окно для контроля уровня масла и отверстие для заливки масла.

Коробка выводов вторичных обмоток расположена на баке трансформатора. В коробке расположен клеммник с выводами типа «Феникс» для подключения кабеля с диаметром жил до 10 мм. Коробка снабжена съемной не просверленной пластиной для ввода внешних кабелей. Отверстия сверлятся на месте установки трансформатора.

Трансформатор снабжен выводом заземления из никелированной латуни для подключения проводников 0,8–1,5 мм. Вывод заземления прикреплен к одной из ножек корпуса.

Вывод для заземления вторичных цепей находится в коробке вторичных выводов.

Все внешние металлические части трансформатора изготавливаются из алюминиевых сплавов, стойких к агрессивным средам, крепеж изготовлен из нержавеющей стали.

Маркировка. Линейные выводы первичной обмотки имеют маркировку $P1$ и $P2$.

Выводы вторичных обмоток имеют маркировку $1S1$, $1S2$, $5S1$, $5S2$.

Выводы $P1$ и $S1$ имеют одинаковую полярность в один и тот же момент времени.

Емкостной вывод напряжения обозначен F .

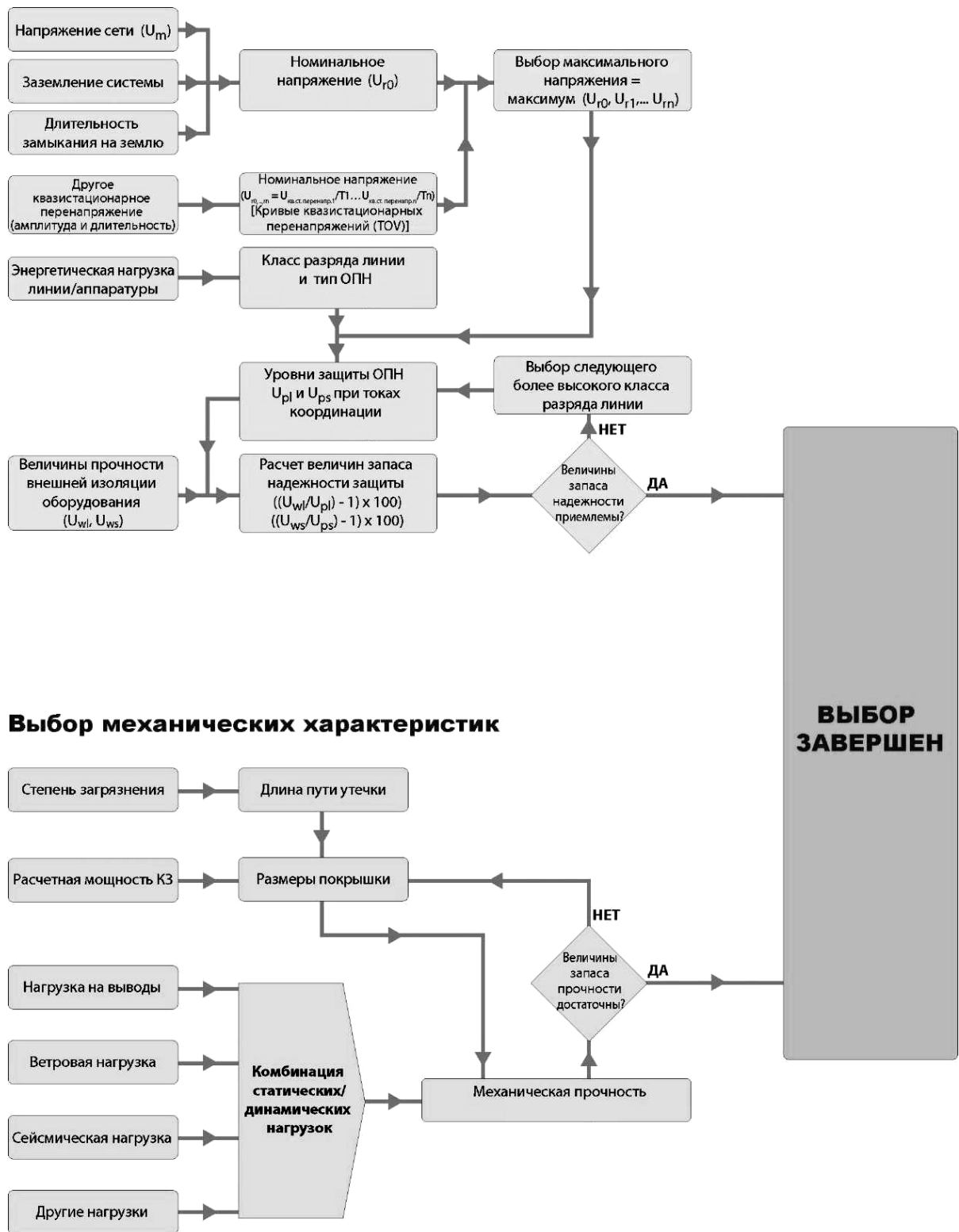


Рис. 9.4. Методика выбора типа ОПН, предложенная компанией ABB

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Антонов М.В. Технология производства электрических машин: Учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
2. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1987.
3. Вольдек А.И. Электрические машины: Учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1978.
4. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: Учебник для вузов. – М.: Энергия, 1980.
5. Инструкция по проектированию противопожарной защиты энергетических предприятий, РД 153-34.0-49.101 – 2003.
6. Копылов И.П. Электрические машины: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 2006.
7. Костенко М.П. Электрические машины / М.П. Костенко, Л.М. Пиотровский. – Л.: Энергия. Ч. I, 1972; Ч. II, 1973.
8. Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок, ПОТ РМ–016–2001 РД 153-34.0-03.150 –00 / Постановление Минтруда РФ от 5.01.2001 № 3 и приказ Минэнерго РФ от 27.12.2000 г. № 163.
9. Методические рекомендации по проектированию развития энергосистем, СО153-34.20.118 – 2003 / Нормативные документы по надзору в электроэнергетике. Вып. 19. – М.: 2006.
10. Нормативы выбора мощности силовых трансформаторов, № 8080. – М.: Энергосетьпроект, 1989.
11. «О введении в действие эталонов заданий на разработку проектов и приказов – об утверждении проектов строительства энергообъектов: Приказ РАО ЕЭС России, № 360 от 29.09.99.
12. Проектирование электрических машин. / И.П. Копылов, Ф.А. Горяинов, Б.К. Клоков и др. – М.: Высшая школа, 2004.
13. Петров Г.Н. Электрические машины: Учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергия. Ч. I, 1974; Ч. II, 1963; Ч. III, 1968.
14. Правила устройства электроустановок. – М.: Изд. НИЦ ЭНАС, 2003.
15. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации: Приказ Минэнерго РФ от 19.06.03. № 229.
16. Правила пожарной безопасности для энергетических предприятий, СО 153-34.03.301 – 95. – М.: Энергоатомиздат, 1995.

17. Сборник действующих документов по техническому перевооружению и реконструкции электростанций, тепловых и электрических сетей. Ч. 1. М.: ОРГРЭС, 1991.
18. Строительные Нормы и Правила (СНиПы). – М.: Госстрой РФ, 2006.
19. Схемы принципиальные электрические распределительных устройств подстанций напряжением 35–750 кВ. Типовые решения. – М.: Энергосетьпроект, 2006.
20. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. Учебн. пособие для вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
21. Токарев Б.Ф. Электрические машины. Для студентов вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
22. Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1988.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
ВВЕДЕНИЕ.....	4
 ГЛАВА 1. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ. МАГНИТНОЕ ДЕЙСТВИЕ ТОКА.....	6
1.1. Общие сведения и методические указания.....	6
1.1.1. Общие сведения.....	6
1.1.2. Методические указания.....	7
1.2. Магниты и магнитное поле.....	8
1.3. Магнитное действие тока.....	14
1.4. Действие магнитного поля на проводник с током.....	15
1.5. Магнитная индукция.....	15
1.6. Сила, действующая на проводник с током.....	16
1.7. Наглядное изображение магнитных полей.....	18
1.8. Взаимодействие токов.....	20
1.9. Изменение магнитного поля создает электродвижущую силу.....	22
1.10. Правило Ленца	26
1.11. Магнитный поток.....	27
1.12. Закон наведения электродвижущей силы.....	34
1.13. Наведение ЭДС в прямолинейном проводнике, движущемся в поле.....	37
1.14. Взаимная индукция.....	41
1.15. Самоиндукция.....	42
 ГЛАВА 2. ТРАНСФОРМАТОРЫ.....	45
2.1. Общие сведения и методические указания.....	45
2.1.1. Общие сведения.....	45
2.1.2. Методические указания.....	45
2.2. Устройство и принцип действия трансформатора.....	46
2.3. Режим холостого хода.....	51
2.4. Работа трансформатора под нагрузкой.....	56
2.5. Короткое замыкание трансформатора.....	61
2.6. Внешняя характеристика трансформатора.....	63
2.7. Коэффициент полезного действия трансформатора.....	64
2.8. Автотрансформаторы.....	66
2.9. Трехфазные трансформаторы.....	69
 ГЛАВА 3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.....	75
3.1. Общие сведения и методические указания.....	75
3.1.1. Общие сведения.....	75
3.1.2. Методические указания.....	75
3.2. Синхронные машины.....	76

3.2.1. Общие понятия о синхронных машинах.....	76
3.2.2. Устройство синхронных машин.....	78
3.3. Синхронный генератор.....	80
3.3.1. Принцип действия и ЭДС.....	80
3.3.2. Магнитное поле синхронного генератора.....	83
3.3.3. Противодействующий момент.....	84
3.3.4. Реакция якоря.....	85
3.3.5. Условно-логическая схема нагруженного синхронного генератора...	87
3.3.6. Уравнение напряжений обмотки статора генератора.....	88
3.3.7. Векторная диаграмма синхронного генератора.....	89
3.3.8. Основные характеристики синхронного генератора.....	90
3.4. Синхронные двигатели.....	91
3.4.1. Принцип действия.....	91
3.4.2. Пуск в ход и остановка синхронного двигателя.....	92
3.4.3. Рабочие характеристики синхронных двигателей.....	94
3.5. Трехфазные асинхронные двигатели.....	95
3.5.1. Устройство трехфазного асинхронного двигателя.....	95
3.5.2. Принцип действия асинхронного двигателя.....	97
3.6. Вращающееся магнитное поле.....	98
3.6.1. Создание вращающегося магнитного поля.....	98
3.6.2. Частота вращения магнитного поля.....	102
3.7. Скольжение.....	103
3.7.1. Основные сведения и определения.....	103
3.7.2. ЭДС обмоток статора и ротора.....	104
3.7.3. Уравнение электрического состояния.....	105
3.8. Схема замещения и ток ротора.....	106
3.9. Потери и коэффициент полезного действия асинхронного двигателя...	107
3.10. Вращающий момент.....	109
3.10.1. Электромагнитный момент.....	109
3.10.2. Зависимость вращающего момента от скольжения.....	111
3.10.3. Механическая характеристика асинхронного двигателя.....	112
3.10.4. Влияние напряжения сети и активного сопротивления обмотки ротора на механическую характеристику.....	113
3.11. Рабочие характеристики асинхронных двигателей.....	115
3.12. Пуск в ход асинхронных двигателей.....	117
3.12.1. Пусковые свойства двигателей.....	117
3.12.2. Прямой пуск.....	117
3.12.3. Пуск двигателей с улучшенными пусковыми свойствами.....	118
3.12.4. Автотрансформаторный пуск.....	119
3.12.5. Пуск при включении добавочных резисторов в цепь статор.....	119
3.12.6. Пуск двигателя переключением фазных обмоток статора со звезды на треугольник.....	120

3.12.7. Пуск двигателя с фазным ротором.....	120
3.13. Регулирование частоты вращения двигателя.....	121
3.13.1. Общие сведения.....	121
3.13.2. Регулирование изменением частоты.....	121
3.13.3. Регулирование изменением числа полюсов.....	122
3.13.4. Регулирование частоты вращения изменением подводимого напряжения.	122
3.13.5. Регулирование изменением скольжения.....	122
ГЛАВА 4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	124
4.1. Общие сведения и методические указания.....	124
4.1.1. Общие сведения.....	124
4.1.2. Методические указания.....	125
4.2. Преобразование энергии в электрических машинах.....	126
4.3. Классификация электрических машин.....	128
4.4. Принцип действия машины постоянного тока.....	129
4.4.1. Принцип действия генератора.....	129
4.4.2. Принцип действия двигателя.....	131
4.4.3. Противодействующий электромагнитный момент и противодействующая ЭДС.	132
4.5. Устройство машины постоянного тока.....	133
4.6. Магнитная цепь машины постоянного тока.....	137
4.7. Понятия об обмотках машины постоянного тока.....	139
4.7.1. Обмотки возбуждения.....	139
4.7.2. Обмотка якоря.....	140
4.8. Способы возбуждения машин постоянного тока.....	144
4.9. Электродвижущая сила машины постоянного тока.....	144
4.10. Электромагнитный момент машины постоянного тока.....	146
4.11. Реакция якоря.....	147
4.12. Коммутация в машинах постоянного тока.....	151
4.13. Энергетические соотношения и КПД машины постоянного тока.....	155
4.13.1. Мощность и потери.....	155
4.13.2. КПД машины.....	155
4.14. Общие сведения о генераторах постоянного тока.....	156
4.14.1. Условно-логическая схема генератора.....	156
4.14.2. Уравнение напряжения генератора.....	157
4.14.3. Уравнение моментов генератора.....	157
4.14.4. Основные характеристики генераторов.....	158
4.15. Характеристики генератора с независимым возбуждением.....	158
4.16. Самовозбуждение генераторов постоянного тока.....	162
4.17. Характеристики генератора с параллельным возбуждением.....	164
4.18. Характеристики генераторов с последовательным возбуждением.....	167

4.19. Характеристики генераторов со смешанным возбуждением.....	168
4.20. Общие сведения о двигателях постоянного тока.....	170
4.20.1. Условно-логическая схема двигателя.....	170
4.20.2. Уравнение напряжения двигателя.....	171
4.20.3. Уравнение моментов двигателя.....	171
4.20.4. Основные характеристики двигателей.....	172
4.20.5. Пуск двигателя в ход.....	172
4.20.6. Регулирование частоты вращения двигателя.....	174
4.20.7. Реверсирование двигателя.....	174
4.20.8. Торможение двигателей.....	175
4.21. Характеристики двигателя с параллельным возбуждением.....	175
4.22. Характеристики двигателя с последовательным возбуждением.....	180
4.23. Характеристики двигателя со смешанным возбуждением.....	182
4.2.4. Вопросы эксплуатации машин постоянного тока.....	183
 ГЛАВА 5. КОЛЛЕКТОРНЫЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.....	186
5.1. Общие сведения и методические указания.....	186
5.1.1. Общие сведения.....	186
5.1.2. Методические указания.....	186
5.2. Виды коллекторных двигателей	187
5.2.1. Однофазные коллекторные двигатели.....	187
5.2.2. Трехфазные коллекторные двигатели.....	190
 ГЛАВА 6. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ.....	195
6.1. Общие сведения и методические указания.....	195
6.1.1. Общие сведения.....	195
6.1.2. Методические указания.....	196
6.2. Силовые исполнительные двигатели.....	196
6.2.1. Однофазный асинхронный двигатель.....	196
6.2.2. Однофазный двигатель с пусковой обмоткой.....	199
6.2.3. Конденсаторный двигатель.....	200
6.2.4. Гистерезисный двигатель.....	201
6.2.5. Синхронный реактивный двигатель.....	205
6.3. Гироскопические двигатели.....	207
6.3.1. Общие сведения о гироскопических двигателях.....	207
6.3.2. Асинхронные гиродвигатели с короткозамкнутой обмоткой.....	208
6.3.3. Синхронные гистерезисные гиродвигатели.....	210
6.4. Исполнительные микродвигатели.....	212
6.4.1. Исполнительные микродвигатели постоянного тока.....	212
6.4.2. Двухфазные управляемые асинхронные двигатели.....	213
6.5. Шаговые электродвигатели.....	215
6.5.1. Общие сведения о шаговых двигателях.....	215

6.5.2. Электромагнитные шаговые двигатели (механизмы).....	216
6.5.3. Шаговые двигатели с постоянными магнитами.....	216
6.6. Информационные микромашины.....	218
6.6.1. Тахогенераторы постоянного тока.....	218
6.6.2. Синхронные тахогенераторы.....	219
6.6.3. Асинхронные тахогенераторы.....	221
6.7. Сельсины.....	223
6.7.1. Общие сведения о сельсинах.....	223
6.7.2. Конструкция и принцип действия.....	223
6.7.3. Индикаторный режим работы сельсинов.....	224
6.7.4. Трансформаторный режим работы сельсинов.....	224
6.8. Поворотные трансформаторы.....	225
6.8.1. Общие сведения о поворотных трансформаторах.....	225
6.8.2. Синусно-косинусные поворотные трансформаторы (СКПТ).....	226
6.9. Специальные синхронные генераторы.....	227
6.9.1. Общие сведения и принцип действия индукторных синхронных генераторов.....	227
6.9.2. Синхронные генераторы с постоянными магнитами.....	230
6.9.3. Вентильные генераторы.....	232

ГЛАВА 7. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДСТАНЦИЙ 35-110 кВ.....	234
7.1. Общие сведения и методические указания.....	234
7.1.1. Общие сведения.....	234
7.1.2. Методические указания.....	236
7.2. Площадка для строительства подстанции.....	236
7.3. Схемы электрические распределительных устройств.....	237
7.4. Выбор основного электротехнического оборудования.....	239
7.5. Защита от перенапряжения, заземление.....	241
7.5.1. Защита от грозовых перенапряжений.....	241
7.5.2. Защита от внутренних перенапряжений.....	241
7.5.3. Заземление.....	242
7.5.4. Режим заземления нейтрали трансформаторов.....	242
7.6. Собственные нужды, кабельное хозяйство.....	242
7.6.1. Собственные нужды.....	242
7.6.2. Кабельное хозяйство.....	243
7.7. Релейная защита и автоматика.....	245
7.7.1. Общие принципы построения.....	245
7.7.2. Релейная защита трансформаторов 35–220 кВ.....	245
7.7.3. Защита шин (ошиновок).....	246
7.7.4. Защита и автоматика КРУ 6–10 кВ.....	246
7.8. Компоновка и конструктивная часть.....	247

ГЛАВА 8. ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ СХЕМЫ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ПОДСТАНЦИЙ ПРЕДПРИЯТИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 6-220 кВ	250
8.1. Общие сведения и методические указания.....	250
8.1.1. Общие сведения.....	250
8.1.2. Методические указания.....	250
8.2. Общие требования к схемам ПС.....	251
8.2.1. Основные требования, предъявляемые к схемам ПС.....	251
8.2.2. Общие указания по выбору и применению схем.....	252
8.2.3. Обоснование надежности схем.....	254
8.3. Применение блочных схем ПС.....	255
8.3.1. Указания по применению блочных схем.....	255
8.3.2. Указания по применению мостиковых схем, схем «заход-выход»	256
8.4. Указания по применению схем со сборными шинами и одним выключателем на присоединение.....	257
8.5. Применение схем для КРУЭ.....	258
8.6. Указания по применению схем распределительных устройств 10(6) кВ	259
8.7. Применение схем РУ 20 кВ.....	260
8.8. Применение схем подключения компенсирующих устройств.....	260
ГЛАВА 9. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ПОДСТАНЦИЙ ПРЕДПРИЯТИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 6-220 кВ.....	264
9.1. Общие сведения и методические указания.....	264
9.1.1. Общие сведения.....	264
9.1.2. Методические указания.....	264
9.2. Разъединители.....	265
9.2.1. Типовая конструкция разъединителя.....	268
9.2.2. Привод разъединителя.....	270
9.2.3. Вспомогательные контакты.....	270
9.2.4. Блокировка.....	270
9.3. Ограничители перенапряжения до 35 кВ.....	270
9.3.1. Конструкция ОПН.....	271
9.3.2. Монтаж и обслуживание ОПН.....	272
9.3.3. Энергетические показатели ОПН.....	272
9.4. Ограничители перенапряжения 110 кВ.....	272
9.5. Трансформаторы тока.....	276
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	280

Учебное издание

**Сидоров Александр Евгеньевич,
Вагапов Георгий Валериянович**

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ
ПРЕДПРИЯТИЙ, ОРГАНИЗАЦИЙ, УЧРЕЖДЕНИЙ**

Учебное пособие

Кафедра электрооборудования и электрохозяйства предприятий,
организаций и учреждений КГЭУ

Редактор издательского отдела *К.В. Аришинова*
Компьютерная верстка *Т.И. Лунченкова*
Дизайн обложки *Ю.Ф. Мухаметшина*

Подписано в печать 14.06.13.

Формат 60 × 84/16. Гарнитура «Times». Вид печати РОМ.

Усл. печ. л. 16,91. Уч.-изд. л. 18,77. Тираж 500 экз. Заказ № 4631

Редакционно-издательский отдел КГЭУ, 420066, Казань, Красносельская, 51