

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ,
НАУКИ И КАДРОВОЙ ПОЛИТИКИ**

**Учреждение образования
«БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ
ОРДЕНОВ ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ»**

К. Л. Пузевич

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

ТРАНСФОРМАТОРЫ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

*Курс лекций
для студентов, обучающихся по специальности
1-74 06 04 Техническое обеспечение мелиоративных
и водохозяйственных работ*

**Горки
БГСХА
2022**

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ,
НАУКИ И КАДРОВОЙ ПОЛИТИКИ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ
ОРДЕНОВ ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ»

К. Л. Пузевич

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

ТРАНСФОРМАТОРЫ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

*Курс лекций
для студентов, обучающихся по специальности
1-74 06 04 Техническое обеспечение мелиоративных
и водохозяйственных работ*

Горки
БГСХА
2022

УДК 621.3(075.8)

ББК 32.85я73

П88

*Рекомендовано методической комиссией факультета
механизации сельского хозяйства 22.11.2021 (протокол № 3)
и Научно-методическим советом БГСХА 29.12.2021 (протокол № 1)*

Автор:

кандидат технических наук, доцент *К. Л. Пузевич*

Рецензенты:

кандидат технических наук, доцент *О. В. Понталев*;

кандидат технических наук, доцент *А. И. Филиппов*

Пузевич, К. Л.

П88 Электротехника и электроника. Трансформаторы и электрические машины : курс лекций / К. Л. Пузевич. – Горки : БГСХА, 2022. – 126 с.

ISBN 978-985-882-289-7.

Приведены основные сведения о трансформаторах и электрических машинах, их устройстве, принципе действия и характере применения.

Для студентов, обучающихся по специальности 1-74 06 04 Техническое обеспечение мелиоративных и водохозяйственных работ.

УДК 621.3(075.8)

ББК 32.85я73

ISBN 978-985-882-289-7

© УО «Белорусская государственная
сельскохозяйственная академия», 2022

ВВЕДЕНИЕ

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

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

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

Электроника является областью электротехники и рассматривает движение заряженных частиц в вакууме, газовой среде или твердом теле и управление этим движением с целью различного рода преобразования электрических величин или одного вида энергии в другой. Электроника охватывает вопросы производства и применения электронных приборов и других устройств, выполняющих функции преобразования энергии, управления отдельными механизмами, станками, поточными линиями, а также контроль над ними.

Обширное применение электротехники во всех отраслях народного хозяйства и все большее внедрение электроники в промышленность настоятельно требуют знания молодыми работниками основных вопросов электротехники и электроники.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Касаткин, А. С. Электротехника: учеб. пособие / А. С. Касаткин, М. В. Немцов. – 8-е изд., испр. – Москва: Академия, 2003. – 544 с.
2. Иванов, И. И. Электротехника: учеб. / И. И. Иванов, Г. И. Соловьев, В. С. Равдоник. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Лань, 2003. – 496 с.
3. Электротехника и основы электроники / под ред. О. П. Глудкина и Б. П. Соколова. – Москва: Высш. шк., 1993. – 466 с.
4. Горбачев, Г. Н. Промышленная электроника: учеб. / Г. Н. Горбачев, Е. Е. Чаплыгин. – Москва: Энергоиздат, 1988. – 330 с.
5. Козлов, С. И. Электротехника и электроника: метод. указания: в 2 ч. / С. И. Козлов, К. Л. Пузевич. – Горки: БГСХА, 2010. – Ч. 1. – 47 с.
6. Козлов, С. И. Электротехника и электроника: метод. указания: в 2 ч. / С. И. Козлов, К. Л. Пузевич. – Горки: БГСХА, 2011. – Ч. 2. – 56 с.

7. Козлов, С. И. Электротехника и электроника: метод. указания для студентов-заочников / С. И. Козлов, К. Л. Пузевич. – Горки: БГСХА, 2011. – 32 с.

8. Козлов, С. И. Электротехника и электроника: метод. указания по выполнению контрольной работы для студентов-заочников / С. И. Козлов, К. Л. Пузевич. – Горки: БГСХА, 2013. – 35 с.

9. Пузевич, К. Л. Электротехника и электроника. Электрические измерения и электроизмерительные приборы: метод. указания / К. Л. Пузевич, Н. И. Скакун. – Горки: БГСХА, 2016. – 40 с.

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

11. Пузевич, К. Л. Электротехника и электроника: УМК для самостоятельной работы студентов / К. Л. Пузевич. – Горки: БГСХА, 2020. – 227 с.

Лекция 1. ТРАНСФОРМАТОРЫ

1.1. Общие сведения о трансформаторах

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

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

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

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

При неизменной передаваемой мощности поперечное сечение провода и потери мощности в линии обратно пропорциональны напряжению.

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

Для увеличения напряжения применяют *повышающие трансформаторы*.

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

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

Трансформатор имеет две изолированные обмотки, помещенные на стальном магнитопроводе (рис. 1.1). Обмотка, включенная в сеть источника электрической энергии, называется *первичной*; обмотка, от которой энергия подается к приемнику, – *вторичной*.

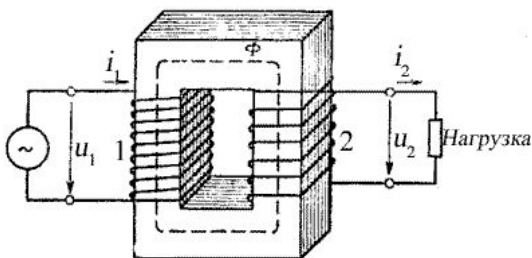


Рис. 1.1. Схема трансформатора:
1 – первичная обмотка; 2 – вторичная обмотка

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

1.2. Принцип действия и устройство трансформатора

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

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

В зависимости от конфигурации магнитной системы, трансформаторы подразделяют на стержневые (рис. 1.2, *а*), броневые (рис. 1.2, *б*) и тороидальные (рис. 1.2, *в*).

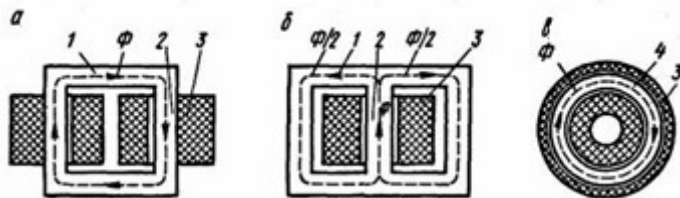


Рис. 1.2. Конструкции однофазных трансформаторов:
а – стержневой; *б* – броневой; *в* – тороидальный

Стержнем 2 называют часть магнитопровода, на которой размещают обмотки. Часть магнитопровода, на которой обмотки отсутствуют, называют ярмом 1. Трансформаторы большой и средней мощности обычно выполняют стержневыми. Они имеют лучшие условия охлаждения и меньшую массу, чем броневые.

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

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

Трансформаторы малой мощности и микротрансформаторы часто выполняют броневыми, так как они имеют более низкую стоимость по сравнению со стержневыми трансформаторами из-за меньшего числа катушек и упрощения сборки и изготовления. Применяют также и мало-мощные трансформаторы стержневого типа с одной или двумя катушками 3. Преимущество тороидальных трансформаторов – отсутствие в магнитной системе воздушных зазоров, что значительно уменьшает магнитное сопротивление магнитопровода. В трансформаторах малой мощности магнитопровод собирают из штамповых пластин П-, Ш- и О-образной формы (рис. 1.3, *а, б, в*).



Рис. 1.3. Магнитопроводы трансформаторов:

а – пластинчатый стержневой; *б* – пластинчатый броневого;
в – пластинчатый кольцевой; *г* – ленточный броневого; *д* – ленточный стержневой;
е – ленточный кольцевой; *ж* – магнитопровод трехфазного трансформатора

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

Широкое применение получили магнитопроводы, навитые из узкой ленты электротехнической стали или из специальных железоникелевых сплавов типа пермаллой. Их можно использовать для стержневых, броневого, тороидальных и трехфазных трансформаторов (рис. 1.3, *г, д, е, ж*).

Холоднокатаная сталь имеет высокую магнитную проницаемость (больше чем горячекатаная) в направлении, совпадающем с направлением проката, тогда как перпендикулярно прокату магнитная проницаемость относительно низкая. Поэтому магнитопроводы из холоднокатаной стали делают так, чтобы магнитные линии замыкались по направлению проката стали. Магнитопроводы трансформаторов малой мощности изготавливают из ленты холоднокатаной стали.

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

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

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

В современных трансформаторах (рис. 1.4) первичную 1 и вторичную 3, 4, 5 обмотки стремятся расположить для лучшей магнитной связи как можно ближе одну к другой. При этом на каждом стержне магнитопровода 2 размещают обе обмотки либо концентрически – одну поверх другой (рис. 1.4, а), либо в виде нескольких дисковых катушек, чередующихся по высоте стержня (рис. 1.4, б). В первом случае обмотки называют *концентрическими*, во втором – *чередующимися*. В силовых трансформаторах обычно применяют концентрические обмотки, причем ближе к стержням располагают обмотку НН, требующую меньшую изоляцию относительно остова трансформатора, а снаружи – обмотку ВН.

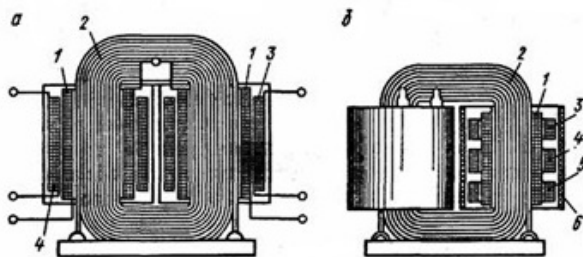


Рис. 1.4. Расположение обмоток на магнитопроводе:
а – концентрическое; б – чередующееся

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

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

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

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

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

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

Номинальной мощностью трансформаторов называется полная мощность, отдаваемая его вторичной обмоткой при полной (номинальной) нагрузке. Номинальная мощность выражается в единицах полной мощности, т. е. в вольт-амперах или киловольт-амперах. В ваттах и киловаттах измеряют активную мощность трансформатора, т. е. ту мощность, которая может быть преобразована из электрической в механическую, тепловую, химическую, световую и т. д.

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

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

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

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

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

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

1.3. Работа трансформатора под нагрузкой

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

$$E_1 = 4,44\omega_1 f \Phi_m,$$

$$E_2 = 4,44\omega_2 f \Phi_m.$$

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

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

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

Если вторичную обмотку трансформатора замкнуть на какой-либо приемник энергии (рис. 1.5, а), то во вторичной цепи будет проходить ток I_2 , а в первичной обмотке – ток I_1 . Магнитодвижущие силы первичной и вторичной обмоток $I_1\omega_1$ и $I_2\omega_2$ совместно возбуждают в магнитопроводе результирующий магнитный поток. Пренебрегая падением напряжения в сопротивлении первичной обмотки трансформатора и потоком рассеяния, можно допустить при любой его нагрузке приближенное равенство абсолютных величин приложенного напряжения и уравнивающей это напряжение ЭДС первичной обмотки, т. е. $U_1 = E_1$. Поэтому при неизменном по величине приложенном напряжении U_1 будет приблизительно неизменной ЭДС E_1 , индуцированная в первичной обмотке при любой нагрузке трансформатора. Так как ЭДС E_1 зависит от магнитного потока, то и магнитный поток в магнитопроводе трансформатора при любом изменении нагрузки будет приблизительно неизменным и равным магнитному потоку при холостом ходе Φ_m .

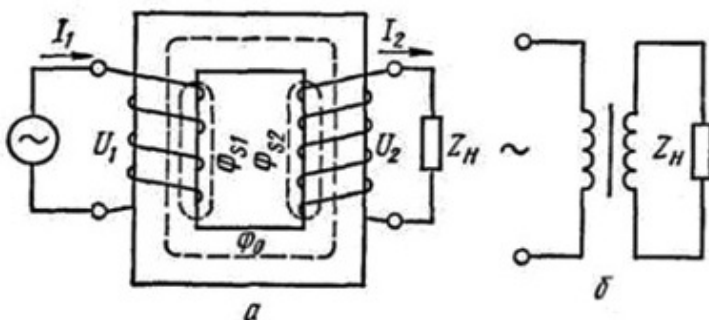


Рис. 1.5. Схема работы трансформатора (а) и его условное обозначение (б)

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

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

Откуда

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

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

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

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

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

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

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

При работе трансформатора под нагрузкой в первичной и во вторичной его обмотках проходят токи, создающие потоки рассеяния Φ_{s1} и Φ_{s2} . Эти магнитные потоки сцеплены только с витками той обмотки, током которой они создаются, и всегда много меньше основного маг-

нитного потока Φ_m , замыкающегося по магнитопроводу трансформатора (по стали), так как потоки рассеяния частично проходят в немагнитной среде. Потоки рассеяния индуцируют в обмотках ЭДС рассеяния, которые в небольшой степени изменяют напряжение вторичной обмотки трансформатора при изменении его нагрузки. Условное обозначение трансформатора показано на рис. 1.5, б.

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

Ток в первичной обмотке равен суммарному току всех приведенных вторичных обмоток: $I_1 = I_2 U_2/U_1 + I_3 U_3/U_1 + \dots$

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

1.4. Трехфазные трансформаторы

Все полученное выше для однофазных трансформаторов можно распространить на каждую фазу трехфазного трансформатора в случае симметричной нагрузки. Рассмотрим особенности устройства и работы трехфазных трансформаторов, которые изготавливают преимущественно стержневыми.

Для трансформирования трехфазной системы токов можно воспользоваться трансформаторной группой – тремя однофазными трансформаторами (рис. 1.6, а), работающими как один агрегат. Но можно объединить три однофазных трансформатора в один трехфазный аппарат и при этом получить экономию материалов. Покажем наглядно, что обуславливает экономию материала при построении трехфазного трансформатора.

Составим магнитопровод трехфазного трансформатора, оставив без изменения те части магнитопроводов трех однофазных трансформаторов, на которых расположены обмотки, и соединив свободные части вместе (рис. 1.6, б). Такое построение магнитной системы можно сопо-

ставить с соединением трех электрических цепей по схеме «звезда». Но для трехфазной системы при симметричной нагрузке нейтральный провод не нужен, так как тока в нейтральном проводе нет; отказавшись от нейтрального провода, получим экономию меди. Нейтральному проводу в магнитной системе трехфазного трансформатора соответствует средний общий стержень. При симметричной трехфазной системе этот стержень не нужен и может быть удален (рис. 1.6, в), так как сумма мгновенных значений трех магнитных потоков в любой момент времени равна нулю.

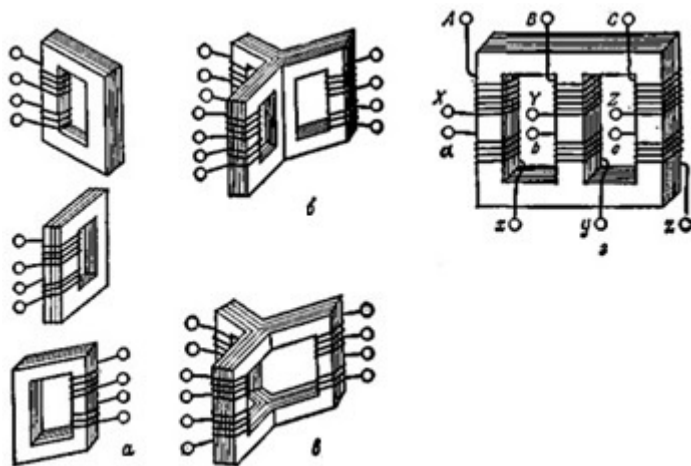


Рис. 1.6. Схема построения трехфазного трансформатора:
 а – три однофазных трансформатора; б – три однофазных трансформатора
 объединены в один магнитопровод; в – три однофазных трансформатора
 с общим магнитопроводом без нейтрального стержня; г – трехфазный стержневой
 трансформатор

Симметричный магнитопровод (рис. 1.6, в) неудобен для изготовления и обычно заменяется несимметричным магнитопроводом (рис. 1.6, г), который можно считать выпрямленным вариантом симметричного магнитопровода. Симметричная трехфазная система первичных токов трансформатора возбуждает и в таком несимметричном магнитопроводе симметричную систему магнитных потоков. Но вследствие неравенства магнитных сопротивлений различных стержней магнитопровода значения намагничивающих токов отдель-

ных фаз не одинаковые. Однако эта несимметрия намагничивающих токов существенного значения не имеет.

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

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

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

Выводы обмоток трехфазного трансформатора размечаются в порядке чередования фаз: на стороне высшего напряжения выводы A, B, C — начала обмоток, X, Y, Z — их концы; на стороне низшего напряжения — соответственно a, b, c и x, y, z (рис. 1.6, z).

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

вой. Точки соединения начала одной фазы с концом другой подключаются к проводам трехфазной сети переменного тока.

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

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

При построении векторной диаграммы напряжений заметно, что вектора первичных и вторичных напряжений сдвинуты относительно друг друга. Для условного обозначения сдвига фазы вторичного напряжения по отношению к первичному принято деление трансформаторов по группам соединений. При определении группы соединений трансформатора первичным напряжением считается его высшее напряжение, а вторичным – низшее.

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

Обозначение групп соединений основано на сопоставлении относительного положения векторов высшего и низшего линейных напряжений на комплексной плоскости с положением минутной и часовой стрелок. Для сопоставления минутная стрелка считается установленной на цифре 12, и с ней совмещается вектор линейного высшего напряжения, а часовая стрелка совмещается с вектором линейного низшего напряжения. Угол 30° , равный центральному углу между

двумя соседними цифрами часового циферблата, служит единицей при отсчете угла сдвига фаз. Отсчет угла производится от минутной к часовой стрелке по направлению их вращения. Группе соединений дается название по положению часовой стрелки (рис. 1.7).

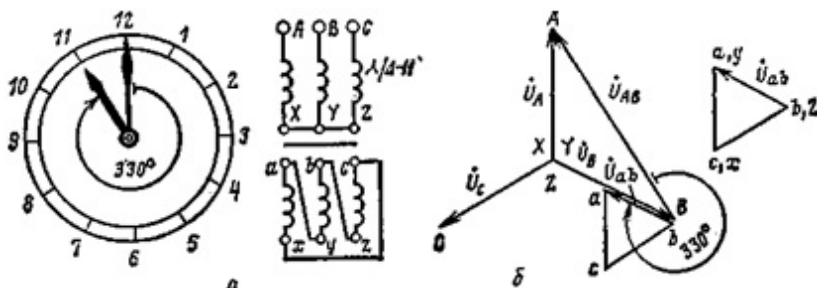


Рис. 1.7. Определение группы соединения обмоток трехфазного трансформатора: а – схема соединения обмоток трансформатора; б – векторная диаграмма напряжений

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

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

У трехфазных трансформаторов возможны все 12 различных групп соединений, но желательно иметь минимальное их число. Поэтому для трехфазных трансформаторов выбраны только две стандартные группы: 11 и 0. Группе 11 соответствуют два вида соединения обмоток: звезда/треугольник (Y/ Δ -11) и звезда с выведенной нейтральной точкой/треугольник (Y_N / Δ -11). Группе 0 соответствует один способ со-

единения обмоток (звезда/звезда с выведенной нейтральной точкой (Y/Y_H-0)). В числителе обозначения всегда указывается, как соединены обмотки высшего напряжения.

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

В качестве примера (рис. 1.7, б) показано, как при соединении Y/Δ вектор низшего (в данном случае вторичного) линейного напряжения U_{ab} образует с вектором высшего (первичного) линейного напряжения U_{AB} угол 330° , который равен углу между стрелками в 11 часов; следовательно, это соединение относится к группе 11.

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

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

1.5. Опыты холостого хода и короткого замыкания

Для испытания трансформатора служат опыты холостого хода и короткого замыкания.

При опыте холостого хода трансформатора (рис. 1.8, а) его вторичная обмотка разомкнута и тока в этой обмотке нет ($I_2 = 0$). Если первичную обмотку трансформатора включить в сеть источника электрической энергии переменного тока, то в этой обмотке будет проходить ток холостого хода I_0 . В трансформаторах больших мощностей ток холостого хода может достигать значений порядка 5–10 % от номинального тока. В трансформаторах малых мощностей этот ток достигает значения 25–30 % от номинального тока.

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

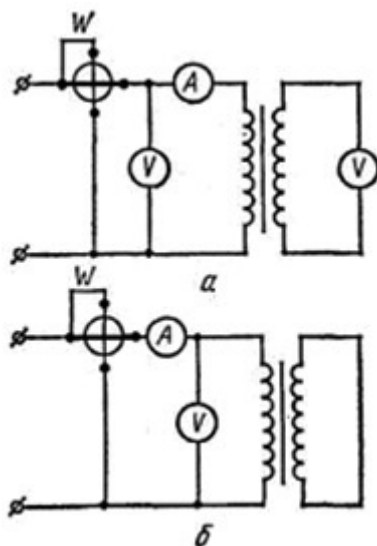


Рис. 1.8. Схемы опытов холостого хода (а) и короткого замыкания (б) трансформатора

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

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

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

При опыте короткого замыкания (рис. 1.8, б) вторичная обмотка трансформатора замкнута накоротко, т. е. напряжение на зажимах вторичной обмотки равно нулю. Первичная обмотка включается в сеть с таким пониженным напряжением, при котором токи в обмотках равны номинальным. Такое пониженное напряжение называется напряжением короткого замыкания и выражается в процентах от номинального значения $u_k\%$.

По данным опыта короткого замыкания определяется напряжение короткого замыкания $u_k\%$, его активная $u_a\%$ и реактивная $u_p\%$ составляющие, потери на нагревание обмоток трансформатора $P_{\text{обм}}$ при номинальной нагрузке и активное, реактивное и полное сопротивления трансформатора при коротком замыкании R_k , X_k и Z_k . Потери в обмотках измеряются ваттметром.

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

$$Z_k = \frac{U_k}{I}; \quad R_k = \frac{P_k}{I^2}; \quad X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2},$$

где U_k , I и P_k – напряжение, ток и мощность, указываемые измерительными приборами, включенными в цепь первичной обмотки трансформатора.

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

Напряжение короткого замыкания и его активная и реактивная составляющие равны:

$$u_a\% = \frac{I_n R_k}{U_n} \cdot 100; \quad u_p\% = \frac{I_n X_k}{U_n} \cdot 100; \quad u_k\% = \frac{I_n Z_k}{U_n} \cdot 100,$$

где U_n и I_n – номинальные напряжение и ток первичной обмотки трансформатора.

1.6. КПД трансформатора

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

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

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

Таким образом, потребляемую трансформатором мощность можно определить следующим выражением:

$$P_1 = P_2 + P_{ст} + P_{обм}.$$

Полезную мощность для однофазного и трехфазного трансформаторов находят следующим образом:

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2; \quad P_2 = \sqrt{3} U_2 I_2 \cos \varphi_2.$$

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

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

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

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

Потери в обмотках $P_{обм}$ расходуются на нагревание проводников этих обмоток проходящими по ним токами и пропорциональны току во второй степени. Таким образом, при нагрузке 0,5 от номинальной токи в обмотках будут вдвое, а потери в обмотках в четыре раза меньшими, чем при номинальной нагрузке. Задаваясь значениями $\cos \varphi_2$, определяют КПД при любой нагрузке трансформатора.

1.7. Автотрансформаторы

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

Принципиальная схема понижающего автотрансформатора показана на рис. 1.9. Первичное напряжение подведено к зажимам $A - x$ первичной обмотки с числом витков ω_1 . Вторичной обмоткой является часть первичной $a - x$ с числом витков ω_2 .

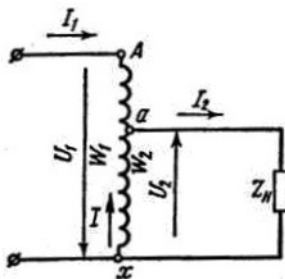


Рис. 1.9. Схема понижающего автотрансформатора

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

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

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

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

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

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

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

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

Полезная мощность автотрансформатора при активной нагрузке равна:

$$P_2 = U_2 I_2.$$

Имея в виду, что

$$I_2 = I_1 + I,$$

получим

$$P_2 = U_2 I_1 + U_2 I = P_3 + P_m,$$

где P_3 – мощность, передаваемая за счет электрической связи между обмотками;

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

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

$$k_{\text{выг}} = \frac{P_m}{P_2} = \frac{U_{\text{ВН}} - U_{\text{НН}}}{U_{\text{ВН}}} = 1 - \frac{1}{k},$$

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

$U_{\text{НН}}$ – значение низшего напряжения;

k – коэффициент трансформации автотрансформатора.

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

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

Наряду с преимуществами автотрансформаторов перед трансформаторами они имеют существенные недостатки: малое сопротивление короткого замыкания, что обуславливает большую кратность тока ко-

роткого замыкания; возможность попадания высшего напряжения в сеть низшего напряжения из-за электрической связи между этими сетями. Наличие электрической связи между сетью источника и приемника энергии делает невозможным применять автотрансформатор в том случае, когда приемник энергии имеет заземленный полюс (в выпрямительных устройствах).

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

1.8. Измерительные трансформаторы

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

Трансформаторы напряжения конструктивно представляют собой обычные трансформаторы малой мощности. Первичная обмотка такого трансформатора включается в два линейных провода сети, напряжение которой измеряется или контролируется (рис. 1.10); во вторичную обмотку включают вольтметр или параллельную обмотку ваттметра, счетчика или другого измерительного прибора. Коэффициент трансформации трансформатора напряжения выбирают таким, чтобы при номинальном первичном напряжении напряжение вторичной обмотки составляло 100 В.

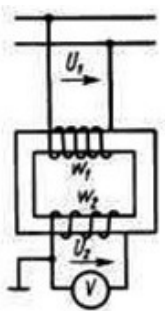


Рис. 1.10. Измерительный трансформатор напряжения

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

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

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

Первичная обмотка трансформатора тока включается в разрез линейного провода (последовательно с нагрузкой), ток в котором измеряется (рис. 1.11); вторичная обмотка замкнута на амперметр или на последовательную обмотку ваттметра, счетчика и т. п., т. е. соединена с измерительным прибором, имеющим малое сопротивление.

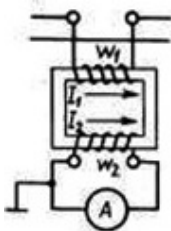


Рис. 1.11. Измерительный трансформатор тока

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

Если в обычном трансформаторе уменьшить нагрузку, т. е. силу тока во вторичной обмотке, то и в первичной обмотке сила тока пони-

зится, и если вторичную обмотку разомкнуть, то сила тока в первичной обмотке уменьшится до тока холостого хода I_0 .

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

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

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

Включение большого числа измерительных приборов во вторичную обмотку трансформатора тока снижает точность измерения.

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

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

Для безопасности обслуживания сердечники и вторичные обмотки измерительных трансформаторов заземляются. Условные обозначения измерительных трансформаторов показаны на рис. 1.12.



Рис. 1.12. Схемы измерительных трансформаторов:
 a – напряжения; b – тока

1.9. Специальные трансформаторы

Помимо рассмотренных видов трансформаторов существуют и

другие, из которых можно выделить импульсные, сварочные, согласующие, вращающиеся, пик-трансформаторы и трансфлюксоры.

Импульсный трансформатор (ИТ) – это трансформатор, предназначенный для преобразования импульсных сигналов с длительностью импульса до десятков микросекунд с минимальным искажением формы импульса. Основное применение заключается в передаче прямоугольного электрического импульса (максимально крутой фронт и срез, относительно постоянная амплитуда). Он служит для трансформации кратковременных видеоимпульсов напряжения, обычно периодически повторяющихся с высокой скважностью (отношение периода повторения к длительности импульса). В большинстве случаев основное требование, предъявляемое к ИТ, заключается в неискаженной передаче формы трансформируемых импульсов напряжения; при воздействии на вход ИТ напряжения той или иной формы на выходе желательно получить импульс напряжения той же самой формы, но, быть может, иной амплитуды или другой полярности.

Сварочный трансформатор – трансформатор, предназначенный для различных видов сварки. Он преобразует напряжение сети (220 или 380 В) в низкое напряжение, а ток, соответственно, из низкого в высокий, до тысяч ампер. Сварочный ток регулируется благодаря изменению величины либо индуктивного сопротивления, либо вторичного напряжения холостого хода трансформатора, что осуществляется посредством секционирования числа витков первичной или вторичной обмотки. Это обеспечивает ступенчатое регулирование тока.

Согласующий трансформатор – трансформатор, применяемый для согласования сопротивления различных частей (каскадов) электронных схем при минимальном искажении формы сигнала. Одновременно согласующий трансформатор обеспечивает создание гальванической развязки между участками схем.

Пик-трансформатор – трансформатор, преобразующий напряжение синусоидальной формы в импульсное напряжение с изменяющейся через каждые полпериода полярностью.

Сдвоенный дроссель (встречный индуктивный фильтр) – конструктивно является трансформатором с двумя одинаковыми обмотками. Благодаря взаимной индукции катушек он при тех же размерах более эффективен, чем обычный дроссель. Сдвоенные дроссели получили широкое распространение в качестве входных фильтров блоков питания; в дифференциальных сигнальных фильтрах цифровых линий, а также в звуковой технике.

Трансфлюксор – разновидность трансформатора, предложенная в 1955 г. для хранения информации. Основное отличие от обычного трансформатора – большая величина остаточной намагниченности магнитопровода. Иными словами, трансфлюксоры могут выполнять роль элементов памяти. Помимо этого трансфлюксоры часто снабжались дополнительными обмотками, обеспечивающими начальное намагничивание и задающими режимы их работы. Эта особенность позволяла (в сочетании с другими элементами) строить на трансфлюксорах схемы управляемых генераторов, элементов сравнения и искусственных нейронов.

Вращающийся трансформатор – трансформатор, применяемый для передачи сигнала на вращающиеся объекты, например на барабан блока магнитных головок в видеомagniтофонах. Состоит из двух половин магнитопровода, каждая со своей обмоткой, одна из которой вращается относительно другой с минимальным зазором. Позволяет реализовать большие скорости вращения, при которых контактный способ съема сигнала невозможен.

Такое же название носит электрическая микромашинa переменного тока, предназначенная для преобразования угла поворота в электрическое напряжение.

Лекция 2. АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

2.1. Общие сведения об электрических машинах

Электрические машины широко применяют на электрических станциях, в промышленности, на транспорте, в авиации, в системах автоматического регулирования и управления, в быту.

Электрические машины преобразуют механическую энергию в электрическую и наоборот. Машина, преобразующая механическую энергию в электрическую, называется **генератором**. Преобразование электрической энергии в механическую осуществляется **двигателями**.

Любая электрическая машина может быть использована как в качестве генератора, так и в качестве двигателя. Это свойство электрических машин изменять направление преобразуемой ею энергии называется **обратимостью машины**. Электрическая машина может быть также использована для преобразования электрической энергии одного рода тока (частоты, числа фаз переменного тока, напряжения постоянного тока) в энергию другого рода тока. Такие электрические машины

называются *преобразователями*. В зависимости от рода тока электроустановки, в которой должна работать электрическая машина, они делятся на машины постоянного и машины переменного тока.

Машины переменного тока могут быть как однофазными, так и многофазными. Наиболее широкое применение нашли трехфазные синхронные и асинхронные машины, а также коллекторные машины переменного тока, которые допускают экономичное регулирование частоты вращения в широких пределах.

Принцип действия электрических машин основан на использовании законов электромагнитной индукции и электромагнитных сил. Если в магнитном поле полюсов постоянных магнитов или электромагнитов (рис. 2.1) поместить проводник и под действием какой-либо силы F_1 перемещать его перпендикулярно магнитным линиям, то в нем возникает ЭДС:

$$E = Blv,$$

где B – магнитная индукция в месте, где находится проводник;

l – активная длина проводника (та часть, которая находится в магнитном поле);

v – скорость перемещения проводника в магнитном поле.

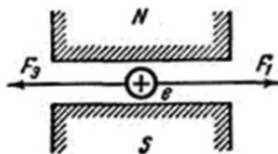


Рис. 2.1. Схема, поясняющая принцип действия электрической машины

Направление ЭДС (на рисунке от зрителя за плоскость чертежа), индуцируемой в проводнике, определяется согласно правилу правой руки.

Если этот проводник замкнуть на какой-либо приемник энергии, то в замкнутой цепи под действием ЭДС будет протекать ток, совпадающий по направлению с ЭДС в проводнике. В результате взаимодействия тока в проводнике с магнитным полем полюсов создается электромагнитная сила F_2 , направление которой определяется по правилу левой руки; эта сила будет направлена навстречу силе, перемещающей

проводник в магнитном поле. При равенстве сил $F_1 = F_3$ проводник будет перемещаться с постоянной скоростью.

Следовательно, в такой простейшей электрической машине механическая энергия, затрачиваемая на перемещение проводника, преобразуется в энергию электрическую, отдаваемую сопротивлению внешнего приемника энергии, т. е. машина работает генератором. Та же простейшая электрическая машина может работать двигателем. Если от постороннего источника электрической энергии через проводник пропустить ток, то в результате взаимодействия тока в проводнике с магнитным полем полюсов создается электромагнитная сила F_3 , под действием которой проводник начнет перемещаться в магнитном поле, преодолевая силу торможения какого-либо механического приемника энергии. Таким образом, рассмотренная машина так же, как и любая электрическая машина, обратима, т. е. может работать как генератором, так и двигателем.

Для увеличения ЭДС и электромеханических сил электрические машины имеют обмотки, состоящие из большого числа проводов, которые соединяются между собой так, чтобы ЭДС в них были одинаково направлены и складывались.

ЭДС в проводнике будет индуцирована также и в том случае, когда проводник неподвижен, а перемещается магнитное поле полюсов.

2.2. Принцип действия асинхронного двигателя

Наибольшее распространение среди электрических двигателей получил трехфазный асинхронный двигатель, впервые сконструированный известным русским электриком М. О. Доливо-Добровольским.

Асинхронный двигатель отличается простотой конструкции и несложностью обслуживания. Как и любая машина переменного тока, асинхронный двигатель состоит из двух основных частей: статора и ротора. *Статором* называется неподвижная часть машины, *ротором* — ее вращающаяся часть. Асинхронная машина обладает свойством обратимости, т. е. может быть использована как в режиме генератора, так и в режиме двигателя. Асинхронный генератор потребляет реактивный ток и требует наличия в сети генераторов реактивной мощности (синхронных машин, синхронных компенсаторов, батарей статических конденсаторов), поэтому асинхронные генераторы практически не применяются, тогда как асинхронные двигатели получили очень широкое распространение.

Многофазная обмотка переменного тока создает вращающееся магнитное поле, частота вращения которого в минуту

$$n = \frac{60 f}{p}.$$

Если ротор вращается с частотой, равной частоте вращения магнитного поля ($n_2 = n_1$), то такая частота называется *синхронной*.

Если ротор вращается с частотой, не равной частоте вращения магнитного поля, то такая частота называется *асинхронной*.

В асинхронном двигателе рабочий процесс может протекать только при асинхронной частоте, т. е. при частоте вращения ротора, не равной частоте вращения магнитного поля.

Частота вращения ротора может очень мало отличаться от частоты вращения поля, но при работе двигателя она будет всегда меньше ($n_2 < n_1$).

Работа асинхронного двигателя основана на явлении, названном «диск Араго – Ленца» (рис. 2.2).

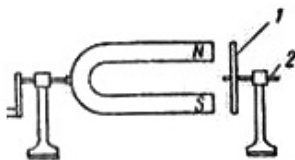


Рис. 2.2. Схема, поясняющая принцип действия асинхронного двигателя: 1 – диск; 2 – ось

Это явление заключается в следующем: если перед полюсами постоянного магнита поместить медный диск 1, свободно сидящий на оси 2, и начать вращать магнит вокруг его оси при помощи рукоятки, то медный диск будет вращаться в том же направлении. Это объясняется тем, что при вращении магнита его магнитное поле пронизывает диск и индуцирует в нем вихревые токи. В результате взаимодействия вихревых токов с магнитным полем магнита возникает сила, приводящая диск во вращение. На основании закона Ленца направление всякого индуцированного тока таково, что он противодействует причине, его вызвавшей. Поэтому вихревые токи в теле диска стремятся задержать вращение магнита, но, не имея возможности сделать это, приводят диск во вращение так, что он следует за магнитом. При этом частота

та вращения диска всегда меньше, чем частота вращения магнита. Если бы эти частоты почему-либо стали одинаковыми, то магнитное поле не перемещалось бы относительно диска и, следовательно, в нем не возникали бы вихревые токи, т. е. не было бы силы, под действием которой диск вращается.

В асинхронных двигателях постоянный магнит заменен вращающимся магнитным полем, создаваемым трехфазной обмоткой статора при включении ее в сеть переменного тока.

Вращающееся магнитное поле статора пересекает проводники обмотки ротора и индуцирует в них ЭДС. Если обмотка ротора замкнута на какое-либо сопротивление или накоротко, то по ней под действием индуцируемой ЭДС проходит ток. В результате взаимодействия тока в обмотке ротора с вращающимся магнитным полем обмотки статора создается вращающий момент, под действием которого ротор начинает вращаться по направлению вращения магнитного поля.

Если предположить, что в какой-то момент времени частота вращения ротора оказалась равной частоте вращения поля статора, то проводники обмотки ротора не будут пересекать магнитное поле статора и тока в роторе не будет. В этом случае вращающий момент станет равным нулю, и частота вращения ротора уменьшится по сравнению с частотой вращения поля статора, пока не возникнет вращающий момент, уравновешивающий тормозной момент, который складывается из момента нагрузки на валу и момента сил трения в машине.

Для изменения направления вращения ротора, т. е. для реверсирования двигателя, необходимо изменить направление вращения магнитного поля, созданного обмоткой статора. Это достигается изменением чередования фаз обмоток статора, для чего следует поменять местами по отношению к зажимам сети любые два из трех проводов, соединяющих обмотку статора с сетью. Реверсивные двигатели снабжаются переключателями, при помощи которых можно изменять чередование фаз обмоток статора, а следовательно, и направление вращения ротора.

Вне зависимости от направления вращения ротора его частота n , как уже указывалось, всегда меньше частоты вращения магнитного поля статора.

2.3. Устройство асинхронного двигателя

Сердечник 2 статора (рис. 2.3) набирается из стальных пластин толщиной 0,35 или 0,5 мм. Пластины штампуют с впадинами (пазами),

изолируют лаком или окалиной для уменьшения потерь на вихревые токи, собирают в отдельные пакеты и крепят в станине 1 двигателя. К станине прикрепляют также боковые щиты с помещенными на них подшипниками, на которые опирается вал ротора. Станину устанавливают на фундаменте. В продольные пазы статора укладывают проводники его обмотки 3, которые соединяют между собой так, что образуется трехфазная система.

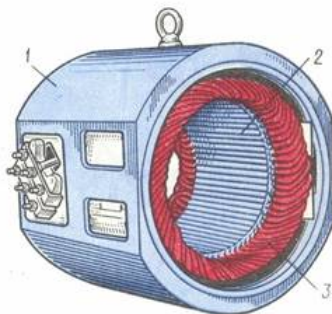


Рис. 2.3. Статор асинхронного двигателя:
1 – станина; 2 – сердечник; 3 – обмотка

Основное назначение обмотки статора – создание вращающегося магнитного поля.

Трехфазная обмотка статора электродвигателя соединяется по схеме «звезда» или «треугольник» в зависимости от напряжения питания сети. Концы трехфазной обмотки могут быть соединены внутри электродвигателя (из двигателя выходит три провода), выведены наружу (выходит шесть проводов), выведены в распределительную коробку (в коробку выходит шесть проводов, из коробки – три).

В распределительной коробке, смонтированной на щитке машины, имеется шесть зажимов, к которым присоединяются начала и концы обмоток каждой фазы (рис. 2.4, а). Для подключения обмоток статора к трехфазной сети они могут быть соединены звездой или треугольником, что дает возможность включать двигатель в сеть с двумя различными линейными напряжениями. Например, двигатель может работать от сети с напряжением 220 и 127 В. На щитке машины указаны оба напряжения сети, на которые рассчитан двигатель, т. е. 220/127 В или 380/220 В.

Для более низких напряжений, указанных на щитке, обмотка статора соединяется треугольником, для более высоких – звездой.

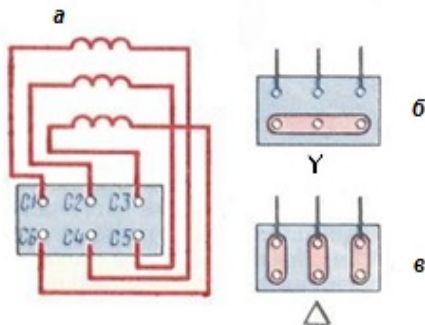


Рис. 2.4. Соединение обмоток статора:
 а – выводы начал и концов фаз в распределительной коробке;
 б – соединение способом «звезда»;
 в – соединение способом «треугольник»

При соединении обмотки статора треугольником (рис. 2.4, в) верхние зажимы объединяют перемычками с нижними, а каждую пару соединенных вместе зажимов подключают к линейным проводам трехфазной сети. Для включения звездой (рис. 2.4, б) три нижних зажима на щитке соединяют перемычками в общую точку, а верхние подключают к линейным проводам трехфазной сети.

Сердечник ротора также набирают из стальных пластин толщиной 0,5 мм, изолированных лаком или окалиной для уменьшения потерь на вихревые токи. Пластины штампуют с впадинами и собирают в пакеты, которые крепят на валу машины. Из пакетов образуется цилиндр с продольными пазами, в которых укладывают проводники обмотки ротора. В зависимости от типа обмотки асинхронные машины могут быть с фазным и короткозамкнутым роторами (рис. 2.5).

Короткозамкнутая обмотка ротора выполняется по типу беличьего колеса (рис. 2.6, а). В пазах ротора (рис. 2.6, б) укладывают массивные стержни 3, соединенные на торцовых сторонах медными кольцами 4. Часто короткозамкнутую обмотку ротора изготавливают из меди, алюминия или латуни. Материал в горячем состоянии заливают в пазы сердечника 2 ротора под давлением. Такая обмотка всегда замкнута накоротко, и включение сопротивлений в нее невозможно.

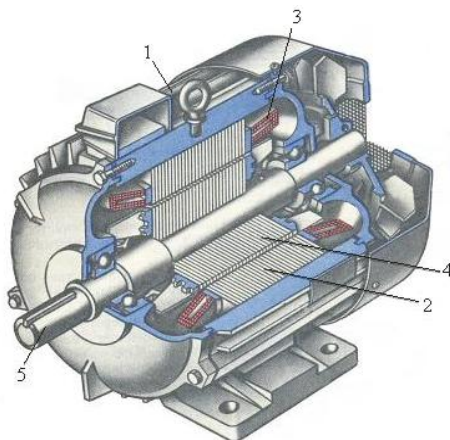


Рис. 2.5. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором в разрезе:
1 – станина; 2 – сердечник статора; 3 – обмотка статора;
4 – сердечник ротора с короткозамкнутой обмоткой; 5 – вал

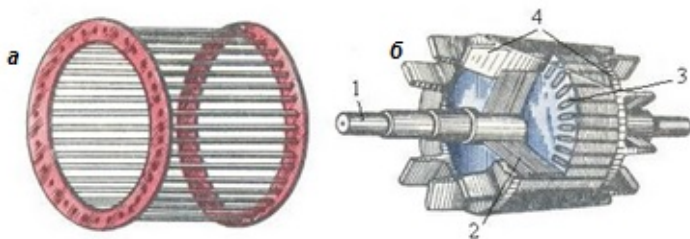


Рис. 2.6. Короткозамкнутый ротор:
а – беличье колесо; б – короткозамкнутая обмотка;
1 – вал; 2 – сердечник; 3 – стержни; 4 – кольца

Фазная обмотка ротора выполнена подобно статорной, т. е. проводники соответствующим образом соединяются между собой, образуя трехфазную систему (рис. 2.7). Обмотки трех фаз соединены звездой. Начала этих обмоток подключены к трем контактными медным кольцам 4, укрепленным на валу ротора. Кольца изолированы друг от друга и от вала и вращаются вместе с ротором 3. При вращении колец поверхности их скользят по металлографитным щеткам 5, неподвижно

укрепленным над кольцами. Обмотка ротора может быть замкнута на какое-либо сопротивление или накоротко при помощи указанных выше щеток.

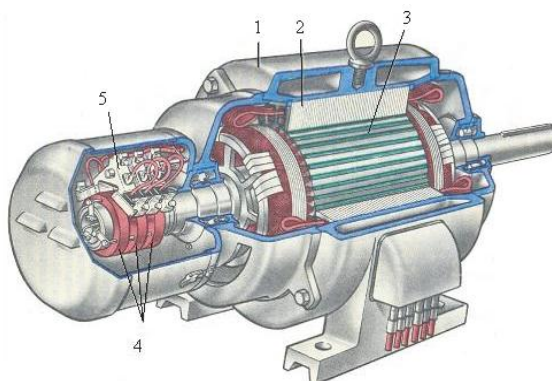


Рис. 2.7. Асинхронный двигатель с фазным ротором в разрезе:
1 – станина; 2 – обмотка статора; 3 – ротор;
4 – контактные кольца; 5 – щетки

Двигатели с короткозамкнутым ротором проще и надежнее в эксплуатации, значительно дешевле, чем двигатели с фазным ротором. Однако двигатели с фазным ротором, как мы увидим ниже, обладают лучшими пусковыми и регулировочными свойствами.

В настоящее время асинхронные двигатели выполняют преимущественно с короткозамкнутым ротором и лишь при больших мощностях и в специальных случаях используют фазную обмотку ротора.

На рис. 2.8 приведено условное обозначение асинхронного двигателя с короткозамкнутым (а) и фазным (б) ротором.

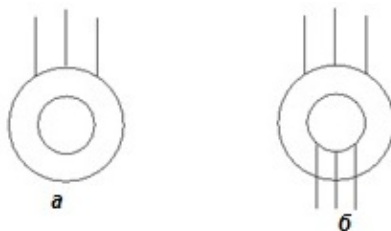


Рис. 2.8. Условные обозначения на электрических схемах асинхронного двигателя с короткозамкнутым (а) и фазным (б) роторами

Производят асинхронные двигатели мощностью от нескольких десятков ватт до 15 000 кВт при напряжениях обмотки статора до 6 кВ.

Между статором и ротором имеется воздушный зазор, величина которого оказывает существенное влияние на рабочие свойства двигателя.

Наряду с важными положительными качествами – простотой конструкции и обслуживания, малой стоимостью – асинхронный двигатель имеет и некоторые недостатки, из которых наиболее существенным является относительно низкий коэффициент мощности $\cos \varphi$. У асинхронного двигателя $\cos \varphi$ при полной нагрузке может достигать значений 0,85–0,9; при недогрузках двигателя его $\cos \varphi$ резко уменьшается и при холостом ходе составляет 0,2–0,3.

Низкий коэффициент мощности асинхронного двигателя объясняется большим потреблением реактивной мощности, которая необходима для возбуждения магнитного поля. Магнитный поток в асинхронном двигателе встречает на своем пути воздушный зазор между статором и ротором, который в большой степени увеличивает магнитное сопротивление, а следовательно, и потребляемую двигателем реактивную мощность.

В целях повышения коэффициента мощности асинхронных двигателей воздушный зазор стремятся делать как можно меньшим, доводя его у малых двигателей (порядка 2–5 кВт) до 0,3 мм. В двигателях большой мощности воздушный зазор приходится увеличивать по конструктивным соображениям, но все же он не превышает 2–2,5 мм.

2.4. Работа асинхронного двигателя под нагрузкой

В рабочем режиме ротор двигателя вращается с частотой n_2 , меньшей частоты n_1 магнитного поля статора, вращающегося в том же направлении, что и ротор. Поэтому магнитное поле, имеющее большую частоту, скользит относительно ротора с частотой, равной разности частот поля и ротора, т. е.

$$n_s = n_1 - n_2.$$

Относительное отставание ротора от вращающегося магнитного поля статора характеризуется *скольжением* S .

Скольжение представляет собой отношение разности частот вращения магнитного поля и вращающегося ротора к частоте поля статора:

$$S = \frac{n_s}{n_1} = \frac{n_1 - n_2}{n_1}.$$

Данная формула определяет скольжение в относительных единицах. Скольжение может быть также выражено в процентах:

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100 \, \%.$$

Если ротор неподвижен ($n_2 = 0$), то скольжение равно единице или 100 %. Если ротор вращается синхронно с магнитным полем, т. е. с одинаковой частотой ($n_1 = n_2$), то скольжение равно нулю. Таким образом, чем больше частота вращения ротора, тем меньше скольжение.

В рабочем режиме асинхронного двигателя скольжение мало. У современных асинхронных двигателей скольжение при полной нагрузке составляет 3–5 %, т. е. ротор вращается с частотой, незначительно отличающейся от частоты магнитного поля статора.

При холостом ходе, т. е. при отсутствии нагрузки на валу, скольжение ничтожно мало и может быть принято равным нулю.

Частоту вращения ротора можно определить из следующих соотношений:

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

Двигатель будет работать устойчиво с постоянной частотой вращения ротора при равновесии моментов, т. е. если вращающий момент двигателя M будет равен тормозному моменту на валу двигателя M_t , который развивает приемник механической энергии, например резец токарного станка. Следовательно, можно записать: $M = M_t$.

Любой нагрузке машины соответствует определенная частота вращения ротора n_2 и определенное скольжение S .

Магнитное поле статора вращается относительно ротора с частотой n_s и индуцирует в его обмотке ЭДС E_2 , под действием которой по замкнутой обмотке ротора проходит ток I_2 .

Если нагрузка на валу машины увеличилась, т. е. возрос тормозной момент M_t , то равновесие моментов будет нарушено, так как тормозной момент окажется больше вращающего ($M < M_t$). Это приведет к уменьшению частоты вращения ротора n_2 , а, следовательно, к увеличению скольжения S . С увеличением скольжения магнитное поле ста-

тора будет пересекать проводники обмотки ротора чаще, ЭДС E_2 , индуцированная в обмотке ротора, возрастет, а в результате увеличится как ток в роторе, так и развиваемый двигателем вращающий момент. Скольжение и ток в роторе будут увеличиваться до значений, при которых вновь наступит равновесие моментов, т. е. вращающий момент станет равным тормозному.

Так же протекает процесс изменения частоты вращения ротора и развиваемого момента при уменьшении нагрузки двигателя. С уменьшением нагрузки на валу двигателя тормозной момент становится меньше вращающего, что приводит к увеличению частоты вращения ротора или к уменьшению скольжения. В результате уменьшаются ЭДС и ток в обмотке ротора, а следовательно, и вращающий момент, который вновь становится равным тормозному моменту.

Магнитное поле статора пересекает проводники обмотки статора и индуцирует в ней ЭДС E_1 , которая уравнивает приложенное напряжение сети U_1 .

Если пренебречь падением напряжения в сопротивлении обмотки статора, которое мало по сравнению с ЭДС, то между абсолютными значениями приложенного напряжения и ЭДС обмотки статора можно допустить приближенное равенство, т. е. $U_1 = E_1$.

Таким образом, при неизменном напряжении сети будет неизменна и ЭДС обмотки статора. Следовательно, магнитный поток в воздушном зазоре машины, так же как в трансформаторе, при любом изменении нагрузки остается примерно постоянным.

Ток обмотки ротора создает свое магнитное поле, которое направлено противоположно магнитному полю тока обмотки статора. Чтобы результирующий магнитный поток в машине оставался неизменным при любом изменении нагрузки двигателя, размагничивающее магнитное поле обмотки ротора должно быть уравновешено магнитным полем обмотки статора. Поэтому при увеличении тока в обмотке ротора увеличивается и ток в обмотке статора.

Таким образом, асинхронный двигатель подобен трансформатору, у которого при увеличении тока во вторичной обмотке увеличивается ток в первичной обмотке.

Асинхронный двигатель преобразует электрическую энергию, подаваемую на обмотки статора, в механическую (вращение вала ротора). Но входная и выходная мощности не равны друг другу, так как во время преобразования происходят потери энергии: на трение, нагрев, вихревые токи и потери на гистерезисе. Это энергия рассеивается как

тепло. Поэтому асинхронный электродвигатель имеет вентилятор для охлаждения.

2.5. Вращающий момент асинхронного двигателя

Вращающий момент асинхронного двигателя создается при взаимодействии вращающегося магнитного поля статора с токами в проводниках обмотки ротора. Поэтому вращающий момент зависит как от магнитного потока статора Φ_m , так и от тока в обмотке ротора I_2 . Однако в процессе преобразования энергии (создании вращающего момента) участвует только активная мощность, потребляемая машиной из сети. Вследствие этого вращающий момент зависит не от тока в обмотке ротора I_2 , а только от его активной составляющей, т. е. $I_2 \cos \varphi_2$. Таким образом, вращающий момент асинхронного двигателя определяется следующим выражением:

$$M = C \Phi_m I_2 \cos \varphi_2,$$

где φ_2 – фазный угол между ЭДС и током в обмотке ротора;

C – конструктивная постоянная машины, зависящая от числа ее полюсов и фаз, числа витков обмотки статора и конструктивного выполнения обмотки.

При условии постоянства приложенного напряжения магнитный поток остается также почти неизменным при любом изменении нагрузки двигателя. Таким образом, в выражении вращающего момента величины Φ_m и C постоянны и вращающий момент пропорционален только активной составляющей тока в обмотке ротора, т. е.

$$M \sim I_2 \cos \varphi_2.$$

Изменение нагрузки или тормозного момента на валу двигателя изменяет частоту вращения ротора и скольжение, что вызывает изменение как тока в роторе I_2 , так и его активной составляющей $I_2 \cos \varphi_2$.

Вместе со скольжением изменяется частота тока ротора. При неподвижном роторе ($n_2 = 0$ и $S = 1$) вращающееся поле с одинаковой частотой пересекает проводники обмотки статора и ротора и частота тока в роторе равна частоте тока сети ($f_2 = f_1$). При уменьшении скольжения обмотка ротора пересекается магнитным полем с меньшей частотой, так что частота тока в роторе уменьшается. Когда ротор вращается синхронно с полем ($n_2 = n_1$ и $S = 0$), проводники обмотки ротора не пересекаются магнитным полем, так что частота тока в роторе равна

нулю ($f_2 = 0$). Таким образом, частота тока в роторе пропорциональна скольжению, т. е.

$$f_2 = S f_1.$$

Активное сопротивление обмотки ротора почти не зависит от частоты, тогда как ЭДС и реактивное сопротивление пропорциональны частоте, т. е. изменяются с изменением скольжения.

На рис. 2.9 показана зависимость вращающего момента от скольжения. При некотором скольжении S_m (примерно 20 %) двигатель развивает максимальный момент, который определяет перегрузочную способность двигателя и обычно в 2–3 раза превышает номинальный момент.

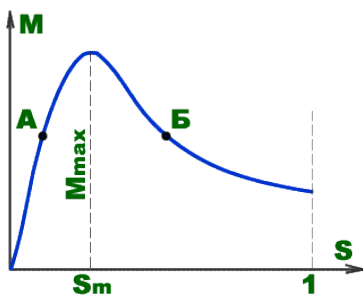


Рис. 2.9. Зависимость вращающего момента асинхронного двигателя от скольжения

При небольших скольжениях (примерно до 20 %) увеличение скольжения вызывает увеличение вращающего момента, так как при этом возрастает активная составляющая тока в роторе ($I_2 \cos \varphi_2$). При больших скольжениях увеличение скольжения будет вызывать уменьшение вращающего момента, так как, несмотря на увеличение силы тока в роторе I_2 , ее активная составляющая $I_2 \cos \varphi_2$ и, следовательно, вращающий момент уменьшаются вследствие значительного увеличения реактивного сопротивления обмотки ротора.

Устойчивая работа двигателя возможна только на восходящей ветви кривой зависимости момента от скольжения, т. е. при изменении скольжения в пределах от 0 до S_m . Работа двигателя на нисходящей ветви указанной зависимости, т. е. при скольжении $S > S_m$, невозможна, так как здесь не обеспечивается устойчивое равновесие моментов.

Если предположить, что вращающий момент был равен тормозному ($M = M_T$) в точках А и Б, то при случайном нарушении равновесия моментов в одном случае оно восстанавливается, а в другом не восстанавливается. Допустим, что вращающий момент двигателя почему-либо уменьшился (например, при понижении напряжения сети), тогда скольжение начнет увеличиваться. Если равновесие моментов было в точке А, то увеличение скольжения вызовет увеличение вращающего момента двигателя и он станет вновь равным тормозному моменту, т. е. равновесие моментов восстановится. Если же равновесие моментов было в точке Б, то увеличение скольжения вызовет уменьшение вращающего момента, который будет оставаться всегда меньше тормозного, т. е. равновесие моментов не восстановится и скорость вращения ротора будет непрерывно уменьшаться до полной остановки двигателя.

Если приложить к валу двигателя тормозной момент, больший максимального момента, то равновесие моментов не восстановится и ротор двигателя остановится.

Вращающий момент двигателя пропорционален квадрату приложенного напряжения, так как пропорциональны напряжению как магнитный поток, так и сила тока в роторе. Поэтому изменение напряжения в сети вызывает значительное изменение вращающего момента.

2.6. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Рабочие характеристики асинхронного двигателя представляют собой зависимости скольжения S , частоты вращения ротора n_2 , развиваемого момента M , потребляемого тока I_1 , расходуемой мощности P_1 , коэффициента мощности $\cos \varphi$ и КПД η от полезной мощности P_2 на валу машины. Эти характеристики (рис. 2.10) снимаются при естественных условиях работы двигателя, т. е. двигатель нерегулируемый, частота тока f_1 и напряжение U_1 сети остаются постоянными, а изменяется только нагрузка на валу двигателя.

При увеличении нагрузки на валу двигателя скольжение S возрастает, причем при больших нагрузках скольжение увеличивается несколько быстрее, чем при малых. При холостом ходе двигателя скольжение очень мало ($S \approx 0$), так как $n_2 \approx n_1$. При номинальной нагрузке скольжение обычно составляет 3–5 %.

При увеличении нагрузки на валу двигателя скольжение возрастает, а частота вращения n_2 будет уменьшаться. Однако изменение частоты вращения при увеличении нагрузки до номинального значения очень незначительно и не превышает 5 %. Поэтому скоростная характеристика асинхронного двигателя является жесткой – она имеет очень малый наклон к горизонтальной оси. При увеличении активного сопротивления ротора двигателя угол наклона этой кривой увеличивается. В этом случае изменения частоты вращения асинхронного двигателя n_2 при колебаниях нагрузки P_2 возрастают. Объясняется это тем, что возрастают электрические потери в роторе.

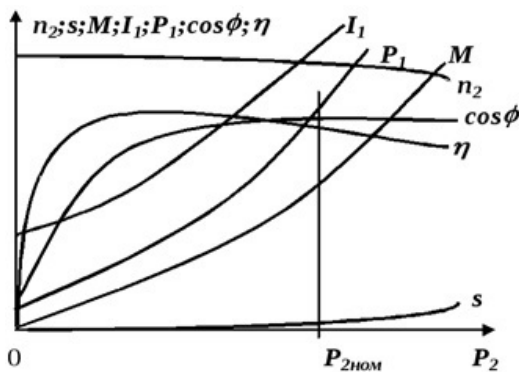


Рис. 2.10. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Вращающий момент M , развиваемый двигателем, уравновешен тормозным моментом M_T на валу и моментом M_0 , идущим на преодоление механических потерь, т. е.

$$M = M_T + M_0.$$

При холостом ходе двигателя $M = M_0$. С увеличением нагрузки на валу вращающий момент также увеличивается, причем за счет некоторого уменьшения частоты вращения ротора увеличение M происходит быстрее, чем увеличение полезной мощности P_2 на валу.

Ток I_1 , потребляемый двигателем из сети, неравномерно изменяется с увеличением нагрузки на валу двигателя. При холостом ходе и малых нагрузках активная составляющая тока в статоре меньше реактивной составляющей, поэтому ток I_1 определяется в основном реактивной составляющей. При больших нагрузках активная составляющая

тока статора становится больше реактивной и изменение нагрузки вызывает большое изменение тока I_1 . Таким образом, реактивная составляющая тока остается практически постоянной при любой нагрузке двигателя, а изменение активной составляющей влияет на значение полного тока I_1 .

Графически зависимость потребляемой двигателем мощности P_1 выражается прямой линией, незначительно изгибающейся вверх при больших нагрузках, что объясняется увеличением потерь в обмотках статора и ротора с возрастанием нагрузки.

Коэффициент мощности напрямую зависит от активной составляющей тока в статоре, обусловленной потерями мощности в двигателе, и изменяется в зависимости от нагрузки на валу ротора. При холостом ходе $\cos \varphi$ мал (порядка 0,2), а при увеличении нагрузки на валу возрастает, достигая значений 0,8–0,95. При очень больших нагрузках происходит некоторое уменьшение $\cos \varphi$, так как вследствие значительного увеличения скольжения и частоты тока в роторе возрастает реактивное сопротивление обмотки ротора.

Кривая КПД η имеет такой же вид, как в любой машине или трансформаторе. При холостом ходе КПД равен нулю. С увеличением нагрузки на валу двигателя КПД резко увеличивается, а затем уменьшается. Наибольшее значение КПД достигает при такой нагрузке, когда потери мощности в стали и механические потери, не зависящие от нагрузки, равны потерям мощности в обмотках статора и ротора, зависящим от нагрузки.

2.7. Пуск в ход асинхронных двигателей

Пуск асинхронных двигателей можно производить при полном напряжении (прямой пуск) и при пониженном напряжении. Прямой пуск осуществляется при помощи рубильников, переключателей, пакетных выключателей, магнитных пускателей, контакторов и контроллеров. При прямом пуске к двигателю подается полное напряжение сети. Недостатком этого способа пуска являются большие пусковые токи, которые в 2–7 раз больше номинальных токов двигателей.

При включении асинхронного двигателя в сеть переменного тока по обмоткам его статора и ротора будут протекать токи, в несколько раз превышающие номинальные. Это объясняется тем, что при неподвижном роторе вращающееся магнитное поле пересекает его обмотку с высокой скоростью, равной скорости вращения магнитного поля в

пространстве, и индуцирует в этой обмотке большую ЭДС. Последняя создает большой ток в цепи ротора, что вызывает возникновение соответствующего тока и в обмотке статора.

При увеличении числа оборотов ротора скольжение уменьшается, что приводит к понижению ЭДС и тока в обмотке ротора. Это в свою очередь вызывает уменьшение тока в обмотке статора.

Большой пусковой ток нежелателен как для двигателя, так и для источника тока, от которого двигатель получает энергию. При частых пусках большой пусковой ток приводит к резкому повышению температуры обмоток двигателя, что может вызвать преждевременное старение их изоляции. Кроме того, в сети при этом происходит значительная потеря напряжения, что оказывает влияние на работу других приемников энергии, включенных в эту же сеть. Поэтому прямой пуск двигателя непосредственным включением его в сеть допускается только в том случае, когда мощность двигателя намного меньше мощности источника энергии, питающего сеть.

Если мощность двигателя соизмерима с мощностью источника энергии, то необходимо уменьшить ток, потребляемый этим двигателем при пуске в ход.

Двигатели с фазным ротором обладают очень хорошими пусковыми свойствами. Для уменьшения пускового тока обмотку ротора замыкают на активное сопротивление, называемое пусковым реостатом (рис. 2.11). При включении такого сопротивления в цепь обмотки ротора ток в ней уменьшается, а следовательно, уменьшаются токи как в обмотке статора, так и потребляемый двигателем из сети. При этом увеличится активная составляющая тока ротора и, следовательно, вращающий момент, развиваемый двигателем при пуске в ход.

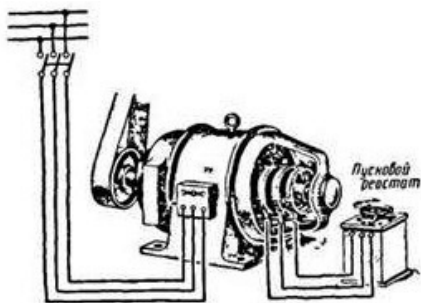


Рис. 2.11. Схема пуска асинхронного двигателя с фазным ротором

Пусковые реостаты имеют несколько контактов, поэтому можно постепенно уменьшать сопротивление, введенное в цепь обмотки ротора. После достижения ротором нормальной частоты вращения реостат полностью выводится, т. е. обмотку ротора замыкают накоротко.

При нормальной частоте вращения ротора скольжение мало и ЭДС, индуцируемая в его обмотке, также незначительна. Поэтому никакие добавочные сопротивления в цепи ротора не нужны.

Пусковые реостаты работают непродолжительное время в процессе разгона двигателя и рассчитываются на кратковременное действие. Если оставить реостат включенным длительное время, то он выйдет из строя.

Двигатели с короткозамкнутым ротором при малой мощности их по сравнению с мощностью источника энергии пускают в ход непосредственным включением в сеть (рис. 2.12).

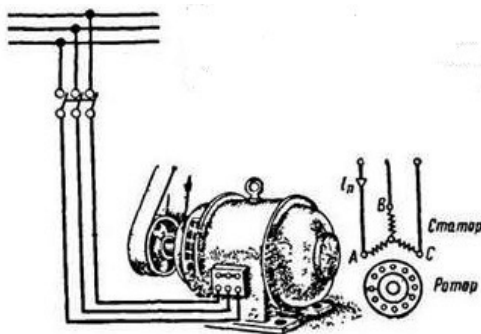


Рис. 2.12. Прямой пуск асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

При большой мощности двигателей пусковой ток уменьшают, понижая приложенное напряжение. Рассмотрим два способа пуска асинхронных двигателей при пониженном напряжении: с помощью переключения обмотки со звезды на треугольник и с помощью автотрансформатора.

На рис. 2.13, а показана схема пуска низковольтного асинхронного двигателя D при помощи автотрансформатора AT , а рис. 2.13, б изображает схему пуска высоковольтного двигателя. Здесь автотрансформатор AT имеет размыкаемую нулевую точку. Для пуска двигателя D в ход включают масляный выключатель 1 , замыкая тем самым нулевую точку автотрансформатора. Затем включают главный масляный вы-

ключатель 2; к двигателю через автотрансформатор подается из сети пониженное напряжение, и двигатель трогается с места. При достижении двигателем максимально возможной (при данном соединении) скорости выключается масляный выключатель 1 и включается масляный выключатель 3, отчего двигатель получает полное напряжение сети и развивает нормальную скорость вращения.

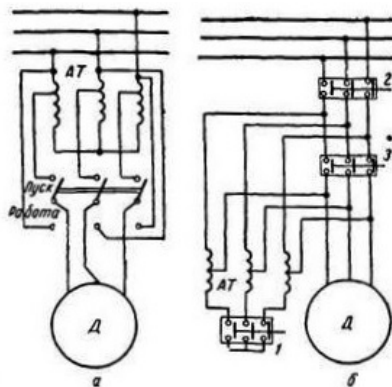


Рис. 2.13. Пуск с помощью автотрансформатора:
а – низковольтного двигателя; б – высоковольтного двигателя

При пуске автотрансформаторы понижают напряжение на 50–80 %.

Недостатком такого способа пуска двигателя в ход является резкое уменьшение пускового момента. Для уменьшения пускового тока в N раз необходимо приложенное напряжение понизить также в N раз. При этом пусковой момент, пропорциональный квадрату напряжения, уменьшится в N^2 раз. Таким образом, понижение напряжения допустимо при пуске двигателя без нагрузки или при малых нагрузках, когда пусковой момент может быть небольшим.

Часто двигатель пускают в ход посредством переключения обмотки статора со звезды на треугольник (рис. 2.14).

При пуске обмотка статора с помощью рубильника соединяется звездой и, как только двигатель разовьет максимально возможную для этого соединения скорость вращения, рубильник откидывается влево, обмотка статора оказывается включенной треугольником и двигатель получает возможность развить полную скорость. При этом способе пуска двигателя пусковой ток уменьшается в три раза. Поясним это на примере.

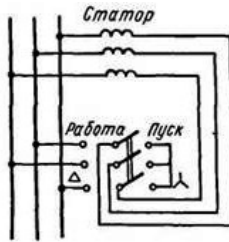


Рис. 2.14. Переключение обмотки статора со звезды на треугольник при пуске двигателя

На рис. 2.15, *а* схематически изображена обмотка статора, имеющая сопротивление 10 Ом и соединенная при пуске звездой. Пусть напряжение между линейными проводами двигателя равно 380 В, а следовательно, напряжение, приходящееся на фазу двигателя при пуске, будет равно:

$$U_{\text{ф}} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В.}$$

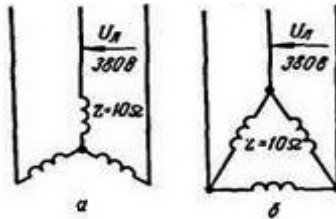


Рис. 2.15. Включение обмотки статора двигателя:
а – звездой; *б* – треугольником

Так как сопротивление фазной обмотки двигателя $Z = 10$ Ом, то фазный ток будет равен:

$$I_{\text{ф}} = \frac{U_{\text{ф}}}{Z} = \frac{220}{10} = 22 \text{ А.}$$

При соединении звездой $I_{\text{л}} = I_{\text{ф}}$. Поэтому ток, потребляемый двигателем в конце пуска (без учета пусковых токов) будет также равен 22 А.

На рис. 2.15, б схематически показан тот же двигатель, если обмотка его соединена треугольником. В этом случае $U_{\Delta} = U_{\phi}$, а поэтому ток фазы двигателя

$$I_{\phi\Delta} = \frac{U_{\phi\Delta}}{Z} = \frac{380}{10} = 38 \text{ А.}$$

Так как при соединении треугольником $I_{\Delta} = \sqrt{3}I_{\phi}$, то двигатель в этом случае будет потреблять из сети ток

$$I_{\Delta\Delta} = \sqrt{3}I_{\phi\Delta} = \sqrt{3} \cdot 38 = 66 \text{ А.}$$

Как видно из приведенного примера, линейный ток двигателя при соединении обмоток статора звездой в три раза меньше линейного тока двигателя, статорная обмотка которого соединена треугольником.

Рассмотренный нами способ пуска двигателя уменьшает пусковой ток в три раза, а так как, согласно доказанному выше, момент двигателя пропорционален току ротора и, стало быть, приближенно и току статора, то одновременно пусковой момент двигателя уменьшается также в три раза. Поэтому двигатели с таким способом пуска можно применять только в тех случаях, когда их пускают вхолостую или слабо нагруженными.

Само собой разумеется, что переключение обмотки статора со звезды на треугольник при пуске можно применять только для двигателей, нормально работающих по схеме «треугольник».

2.8. Двигатели с улучшенными пусковыми свойствами

Простота конструкции и надежность в эксплуатации двигателей с короткозамкнутым ротором являются их существенным достоинством, благодаря чему они получили широкое применение в промышленности. Однако эти двигатели имеют плохие пусковые характеристики.

Значительное улучшение пусковых характеристик асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором достигается изменением конструкции ротора: используют роторы с двойной короткозамкнутой обмоткой (двухклеточный ротор) и с глубокими пазами (рис. 2.16).

Ротор с двойной короткозамкнутой обмоткой был впервые предложен М. О. Доливо-Добровольским в 1889 г. Он имеет две короткоза-

мкнутые обмотки, выполненные в виде беличьих клеток (рис. 2.17), располагающихся на разной глубине.

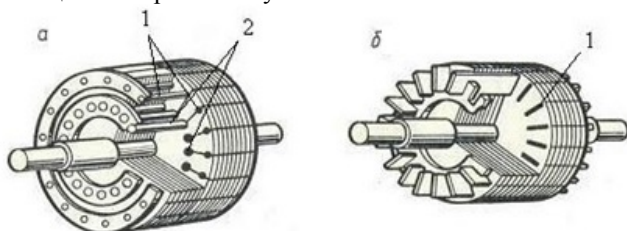


Рис. 2.16. Конструкции роторов двигателей с улучшенными пусковыми свойствами: *а* – с двойной короткозамкнутой обмоткой; *б* – с глубокими пазами; 1 – пусковая обмотка; 2 – рабочая обмотка

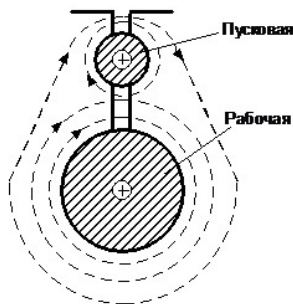


Рис. 2.17. Двойная короткозамкнутая обмотка

Одна обмотка, находящаяся ближе к воздушному зазору, выполнена из стержней малого поперечного сечения и называется пусковой. Внутренняя обмотка выполняется из стержней большого поперечного сечения и называется рабочей. Активное сопротивление пусковой обмотки значительно больше, чем активное сопротивление рабочей обмотки из-за площади поперечного сечения стержней. Индуктивное сопротивление рабочей обмотки значительно больше, чем индуктивное сопротивление пусковой обмотки вследствие того, что стержни рабочей обмотки глубоко погружены в тело ротора и окружены сталью.

Обмотки могут быть как литыми, так и паяными. При паяной конструкции пусковая обмотка выполняется из латуни, а рабочая – из меди. Стержни каждой из обмоток замыкаются отдельными кольцами.

Принцип действия этого двигателя состоит в следующем. В момент включения двигателя в сеть ротор неподвижен и частота тока в роторе равна частоте тока в сети: $f_2 = f_1$. Ток в обмотках распределяется обратно пропорционально их полным сопротивлениям.

Так как реактивные сопротивления обмоток асинхронных машин значительно больше их активных сопротивлений, то при пуске в ход распределение тока между обмотками примерно обратно пропорционально их индуктивным сопротивлениям. Поэтому при пуске в ход ток в основном протекает по проводникам внешней (пусковой) обмотки, имеющей меньшее индуктивное и большее активное сопротивление.

В рабочем режиме скольжение мало и, следовательно, частота тока в роторе также мала ($f_2 \approx 0$). Поэтому индуктивные сопротивления обмоток не имеют значения, и токи в них обратно пропорциональны их активным сопротивлениям.

Таким образом, в рабочем режиме ток в основном проходит по проводникам внутренней (рабочей) обмотки, имеющим меньшее активное сопротивление. При такой конструкции ротора увеличивается активное сопротивление его обмотки в момент пуска в ход двигателя, что уменьшает пусковой ток и увеличивает пусковой момент так же, как включение пускового реостата в цепь фазного ротора.

В двигателях с глубокими пазами на роторе его короткозамкнутая обмотка выполняется в виде тонких высоких полос (рис. 2.18). При такой конструкции обмотки происходит оттеснение тока к верхней части проводников вследствие того, что нижние части проводников сцеплены с большим числом магнитных линий потока рассеяния, чем верхние части.

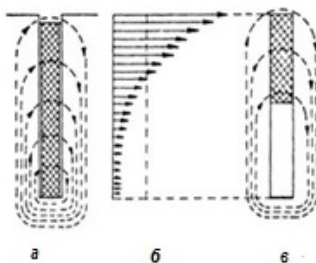


Рис. 2.18. Схема устройства ротора с глубокими пазами и явление вытеснения тока: а – магнитное поле; б – диаграмма распределения плотности тока; в – рабочая часть проводника

Таким образом, ток, протекающий по проводникам, стремится сконцентрироваться преимущественно в верхней их части, что равносильно уменьшению поперечного сечения или увеличению активного сопротивления этих проводников.

Это явление оттеснения тока в верхние части проводников особенно сильно сказывается в момент включения двигателя, когда частота тока в роторе равна частоте тока сети и, следовательно, при пуске в ход увеличивается активное сопротивление обмотки ротора, в результате чего возрастает пусковой момент.

При увеличении скорости вращения ротора частота тока в его обмотке уменьшается, и ток более равномерно распределяется по сечению стержней, и при нормальной скорости вращения неравномерность распределения тока по поперечному сечению стержней почти полностью исчезает.

Пусковой момент двигателей этого типа $M_n = (1,2-1,5)M_n$.

2.9. Регулирование частоты вращения трехфазных асинхронных двигателей

Частота вращения ротора в минуту определяется следующим выражением:

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

Из этого выражения видно, что частоту вращения ротора можно регулировать изменением любой из трех величин, определяющих ее, т. е. изменением частоты тока сети f_1 , числа пар полюсов p и скольжения S .

Изменение скольжения. Этот способ используют в приводе тех механизмов, где установлены асинхронные двигатели с фазным ротором. Например, в приводе подъемно-транспортных машин.

Скольжение можно изменять регулировочным реостатом, введенным в цепь обмотки ротора, а также регулированием напряжения сети.

При регулировании напряжения питающей сети изменяется вращающий момент двигателя пропорционально квадрату напряжения. При уменьшении вращающего момента уменьшится частота вращения ротора, т. е. увеличится скольжение.

Если в цепь фазного ротора вводится регулировочный реостат, то увеличение активного сопротивления ротора не влияет на величину

критического момента, но увеличивает критическое скольжение (рис. 2.19).

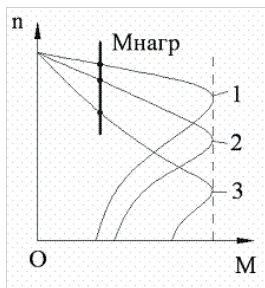


Рис. 2.19. Зависимость механических характеристик асинхронного электродвигателя от изменения сопротивления регулировочного реостата

Регулировочный реостат включается в цепь обмотки фазного ротора подобно пусковому реостату, но в отличие от пускового он рассчитывается на длительное прохождение тока.

При включении регулировочного реостата ток в роторе уменьшится, что вызовет снижение вращающего момента двигателя и, следовательно, уменьшение частоты вращения или увеличение скольжения. При увеличении скольжения увеличиваются ЭДС и ток в роторе. Частота вращения или скольжения будет изменяться до восстановления равновесия моментов, т. е. пока ток в роторе не примет своего начального значения.

На рис. 2.19 приведены механические характеристики асинхронного двигателя при разных сопротивлениях регулировочного реостата $R_{p3} > R_{p2} > 0, R_{p1} = 0$.

Как следует из рис. 2.19, при этом способе можно получить большой диапазон регулирования частоты вращения в сторону понижения. Основные недостатки этого способа заключаются в следующем:

- из-за больших потерь на регулировочном реостате снижается КПД, т. е. способ является неэкономичным;
- механическая характеристика асинхронного двигателя с увеличением активного сопротивления ротора становится мягче, т. е. снижается устойчивость работы двигателя;
- невозможно плавно регулировать частоту вращения.

Из-за перечисленных недостатков этот способ применяют для кратковременного снижения частоты вращения.

Изменение числа пар полюсов. Число полюсов машины может быть изменено, если на статоре имеется несколько (обычно две) обмоток с различным числом полюсов или одна обмотка, которую можно переключать на различное число полюсов, или две обмотки, каждая из которых может переключаться на различное число полюсов.

При изменении числа полюсов обмотки статора изменится частота вращения его магнитного поля, а следовательно, и частота вращения ротора двигателя.

Эти двигатели (многоскоростные) имеют более сложную обмотку статора, позволяющую изменять ее число пар полюсов, и короткозамкнутый ротор. При работе асинхронного двигателя необходимо, чтобы обмотки ротора и статора имели одинаковое число пар полюсов. Только короткозамкнутый ротор способен автоматически приобретать то же число пар полюсов, что и поле статора. Многоскоростные двигатели нашли широкое применение в приводе металлорежущих станков. Нашли применение двух-, трех- и четырехскоростные двигатели.

У двухскоростного двигателя обмотка каждой фазы состоит из двух полуобмоток. Включая их последовательно (рис. 2.20, *а*) или параллельно (рис. 2.20, *б*), можно в два раза изменить число пар полюсов.

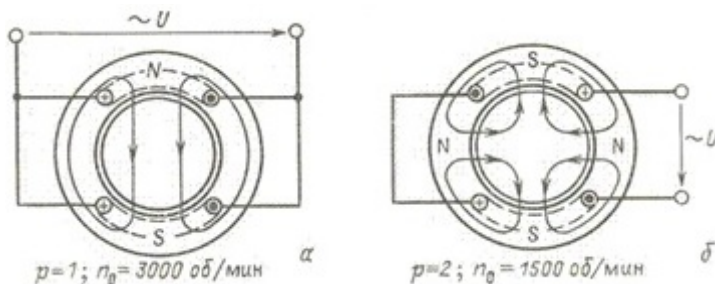


Рис. 2.20. Схема соединения и магнитное поле статора двигателя при параллельном (*а*) и последовательном (*б*) соединении полуобмоток

У четырехскоростного двигателя на статоре должны размещаться две независимые обмотки с разным числом пар полюсов. Каждая из обмоток позволяет в два раза изменять число пар полюсов. Например, у двигателя, работающего от сети с частотой $f = 50 \text{ Гц}$ с частотами вращения 3000, 1500, 1000, 500 об/мин, с помощью одной из обмоток

статора можно получить частоту вращения 3000 об/мин и 1500 об/мин (при этом $p = 1$ и $p = 2$). С помощью другой из обмоток можно получить частоту вращения 1000 об/мин и 500 об/мин (при этом $p = 3$ и $p = 6$).

При переключении числа пар полюсов изменяется и магнитный поток в зазоре, что приводит к изменению критического момента $M_{кр}$ (рис. 2.21, б). Если при изменении числа пар полюсов одновременно изменять и подведенное напряжение, то критический момент может остаться неизменным (рис. 2.21, а). Поэтому при этом способе регулирования могут быть получены два вида семейства механических характеристик.

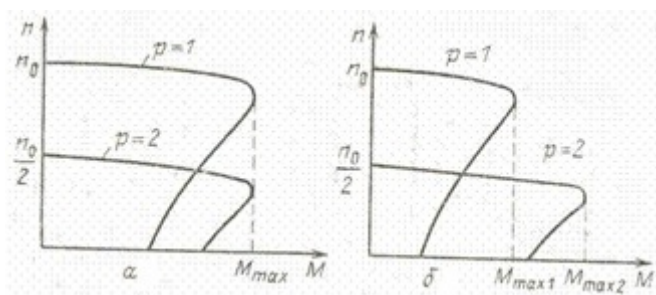


Рис. 2.21. Механические характеристики асинхронного двигателя:
а – при изменении числа пар полюсов и напряжения питающей сети;
б – при изменении числа пар полюсов

Достоинства этого способа регулирования: сохранение жесткости механических характеристик, высокий КПД. Недостатки: ступенчатое регулирование; стоимость такого двигателя значительно возрастает вследствие усложнения обмотки статора и увеличения габаритов машины.

Изменение частоты источника питания. В качестве таких источников питания в настоящее время начали находить применение преобразователи частоты (ПЧ), выполняемые на мощных полупроводниковых приборах – тиристорах. Из уравнения трансформаторной ЭДС $U_1 = 4,44w_1k_1f\Phi$ следует, что для сохранения неизменным магнитного потока, т. е. для сохранения перегрузочной способности двигателя, необходимо вместе с частотой изменять и действующее значение подведенного напряжения. При выполнении соотношения $U_1/f_1 = U'_1/f'_1$ критический момент не изменяется и получается семейство механических характеристик, представленное на рис. 2.22.

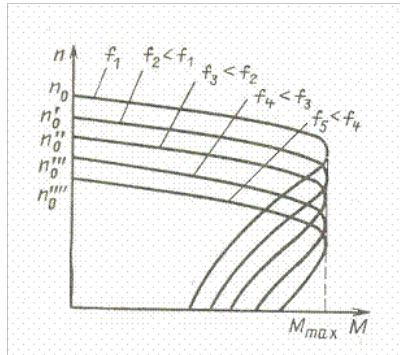


Рис. 2.22. Механические характеристики асинхронного электродвигателя при частотном регулировании

2.10. Принцип действия однофазных асинхронных двигателей

Однофазные асинхронные двигатели широко применяют при небольших мощностях (до 1–2 кВт). Такой двигатель отличается от трехфазного тем, что на статоре его помещается однофазная обмотка. Ротор однофазного асинхронного двигателя имеет фазную или короткозамкнутую обмотку.

Особенностью однофазных асинхронных двигателей является отсутствие начального или пускового момента, т. е. при включении такого двигателя в сеть ротор его будет оставаться неподвижным.

При включении главной обмотки статора в сеть переменный ток, проходя по обмотке, создает пульсирующее магнитное поле, неподвижное в пространстве, но изменяющееся от $+\Phi_{\max}$ до $-\Phi_{\max}$. Если поместить ротор, имеющий начальное вращение, в пульсирующее магнитное поле, то он будет продолжать вращаться в том же направлении.

Чтобы понять принцип действия однофазного асинхронного двигателя, разложим пульсирующее магнитное поле на два одинаковых круговых поля, имеющих амплитуду, равную $\Phi_{\max}/2$ и вращающихся в противоположные стороны с одинаковой частотой (рис. 2.23):

$$n_{\text{пр}} = n_{\text{обр}} = \frac{60 f_1}{p} = n_1,$$

где $n_{\text{пр}}$ – частота вращения магнитного поля в прямом направлении, об/мин;

$n_{\text{обр}}$ – частота вращения магнитного поля в обратном направлении, об/мин.

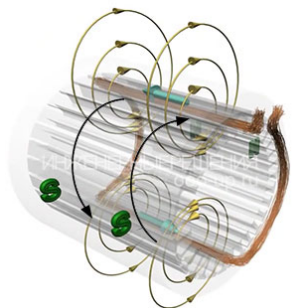


Рис. 2.23. Прямой и обратный вращающиеся магнитные потоки вместо пульсирующего магнитного потока

Рассмотрим случай, когда ротор, находящийся в пульсирующем магнитном потоке, имеет начальное вращение. Например, мы вручную раскрутили вал однофазного двигателя, одна обмотка которого подключена к сети переменного тока. В этом случае при определенных условиях двигатель будет продолжать развивать вращающий момент, так как скольжение его ротора относительно прямого и обратного магнитного потока будет неодинаковым.

Будем считать, что прямой магнитный поток $\Phi_{\text{пр}}$ вращается в направлении вращения ротора, а обратный магнитный поток $\Phi_{\text{обр}}$ – в противоположном направлении. Так как частота вращения ротора n_2 меньше частоты вращения магнитного потока n_1 , скольжение ротора относительно потока $\Phi_{\text{пр}}$ будет равно:

$$S_{\text{пр}} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = S,$$

где $S_{\text{пр}}$ – скольжение ротора относительно прямого магнитного потока.

Магнитный поток $\Phi_{\text{обр}}$ вращается встречно ротору, частота вращения ротора n_2 относительно этого потока отрицательна, а скольжение ротора относительно $\Phi_{\text{обр}}$

$$S_{\text{обр}} = \frac{n_1 - (-n_2)}{n_1} = 2 - S_{\text{пр}}.$$

Согласно закону электромагнитной индукции прямой $\Phi_{\text{пр}}$ и обратный $\Phi_{\text{обр}}$ магнитные потоки, создаваемые обмоткой статора, наводят в обмотке ротора ЭДС, которые соответственно создают в короткозамкнутом роторе токи $I_{2\text{пр}}$ и $I_{2\text{обр}}$ (рис. 2.24).

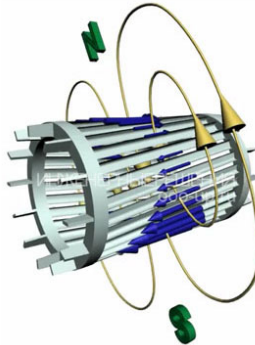


Рис. 2.24. Ток, индуцируемый в роторе переменным магнитным полем

При этом частота тока в роторе пропорциональна скольжению, следовательно:

$$f_{2\text{пр}} = f_1 S_{\text{пр}},$$

где $f_{2\text{пр}}$ – частота тока $I_{2\text{пр}}$, наводимого прямым магнитным потоком, Гц.

$$f_{2\text{обр}} = f_1 S_{\text{обр}},$$

где $f_{2\text{обр}}$ – частота тока $I_{2\text{обр}}$, наводимого обратным магнитным потоком, Гц.

Таким образом, при вращающемся роторе, электрический ток $I_{2\text{обр}}$, наводимый обратным магнитным полем в обмотке ротора, имеет частоту $f_{2\text{обр}}$, намного превышающую частоту $f_{2\text{пр}}$ тока ротора $I_{2\text{пр}}$, наведенного прямым полем.

Согласно закону Ампера, в результате взаимодействия электрического тока $I_{2\text{пр}}$ с магнитным полем $\Phi_{\text{пр}}$ возникает вращающий момент (рис. 2.25):

$$M_{\text{пр}} = C \Phi_{\text{пр}} I_{2\text{пр}} \cos \varphi_{2\text{пр}},$$

где $M_{\text{пр}}$ – магнитный момент, создаваемый прямым магнитным потоком, Н·м;

C – постоянный коэффициент, определяемый конструкцией двигателя.

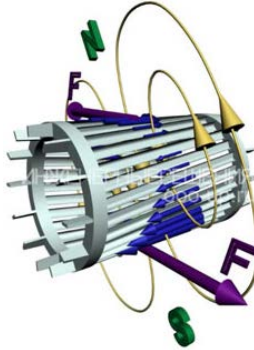


Рис. 2.25. Магнитный момент, действующий на ротор

Электрический ток $I_{2\text{обр}}$, взаимодействуя с магнитным полем $\Phi_{\text{обр}}$, создает тормозящий момент $M_{\text{обр}}$, направленный против вращения ротора, т. е. встречно моменту $M_{\text{пр}}$:

$$M_{\text{обр}} = C\Phi_{\text{обр}}I_{2\text{обр}}\cos \varphi_{2\text{обр}},$$

где $M_{\text{обр}}$ – магнитный момент, создаваемый обратным магнитным потоком, Н·м.

Результирующий вращающий момент, действующий на ротор однофазного асинхронного двигателя,

$$M = M_{\text{пр}} - M_{\text{обр}}.$$

Вследствие того, что во вращающемся роторе прямым и обратным магнитным полем будет наводиться ток разной частоты, моменты сил, действующие на ротор в разных направлениях, будут не равны. Поэтому ротор будет продолжать вращаться в пульсирующем магнитном поле в том направлении, в котором он имел начальное вращение.

При работе однофазного двигателя в пределах номинальной нагрузки, т. е. при небольших значениях скольжения $S = S_{\text{пр}}$, крутящий момент создается в основном за счет момента $M_{\text{пр}}$. Тормозящее действие момента обратного поля $M_{\text{обр}}$ незначительно. Это связано с тем,

что частота $f_{2обр}$ много больше частоты $f_{2пр}$, следовательно, индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора $X_{2обр} = X_2 S_{обр}$ току $I_{2обр}$ намного больше его активного сопротивления. Поэтому ток $I_{2обр}$, имеющий большую индуктивную составляющую, оказывает сильное размагничивающее действие на обратный магнитный поток $\Phi_{обр}$, значительно ослабляя его.

В режиме нагрузки двигателя $M_{обр}$ не оказывает значительного тормозящего действия на ротор однофазного двигателя ввиду того, что коэффициент мощности невелик:

$$\cos \varphi_{2обр} = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_{2обр}^2}},$$

где R_2 – активное сопротивление стержней ротора, Ом;

$X_{2обр}$ – реактивное сопротивление стержней ротора, Ом.

При неподвижном роторе ($n_2 = 0$) скольжение $S_{пр} = S_{обр} = 1$ и $M_{пр} = M_{обр}$, поэтому начальный пусковой момент однофазного асинхронного двигателя $M_{п} = 0$. Для создания пускового момента необходимо привести ротор во вращение в ту или иную сторону. Тогда $S \neq 1$, нарушается равенство моментов $M_{пр}$ и $M_{обр}$, и результирующий электромагнитный момент приобретает некоторое значение (рис. 2.26)

$$M = M_{пр} - M_{обр} \neq 0.$$

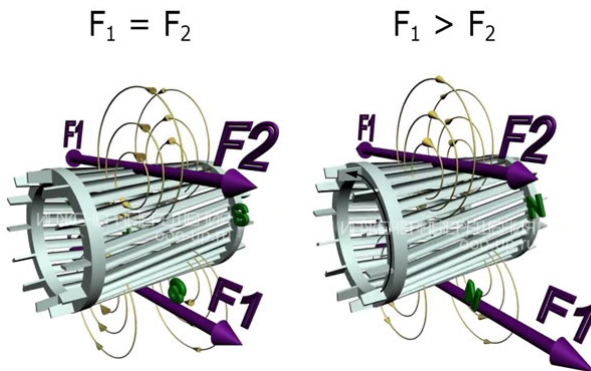


Рис. 2.26. Схема воздействия сил на неподвижный и вращающийся ротор однофазного асинхронного двигателя

Одним из способов создания пускового момента в однофазном асинхронном двигателе является расположение вспомогательной (пусковой) обмотки B , смещенной в пространстве относительно главной (рабочей) обмотки A на угол 90° электрических градусов. Чтобы обмотки статора создавали вращающееся магнитное поле, токи I_A и I_B в обмотках должны быть сдвинуты по фазе относительно друг друга. Для получения фазового сдвига между токами I_A и I_B в цепь вспомогательной (пусковой) обмотки B включают фазосмещающий элемент, в качестве которого используют активное сопротивление (резистор), индуктивность (дроссель) или емкость (конденсатор).

После того как ротор двигателя разгонится до частоты вращения, близкой к установившейся, пусковую обмотку B отключают. Отключение вспомогательной обмотки происходит либо автоматически с помощью центробежного выключателя, реле времени, токового или дифференциального реле, или же вручную с помощью кнопки.

Таким образом, во время пуска двигатель работает как двухфазный, а по окончании пуска – как однофазный.

2.11. Пуск в ход однофазных асинхронных двигателей

Двигатель с расщепленной фазой – однофазный асинхронный двигатель, имеющий на статоре вспомогательную первичную обмотку, смещенную относительно основной, и короткозамкнутый ротор.

Однофазный асинхронный двигатель с пусковым сопротивлением – двигатель с расщепленной фазой, у которого цепь вспомогательной обмотки отличается повышенным активным сопротивлением.

Для запуска однофазного двигателя можно использовать пусковой резистор R_n , который последовательно подключается к пусковой обмотке (рис. 2.27).

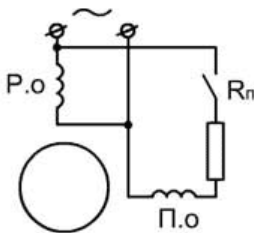


Рис. 2.27. Омический сдвиг фаз,
бифилярный способ намотки пусковой обмотки

В этом случае можно добиться сдвига фаз в 30° между токами главной и вспомогательной обмотки, которого вполне достаточно для пуска двигателя. В двигателе с пусковым сопротивлением разность фаз объясняется разным комплексным сопротивлением цепей.

Также сдвиг фаз можно создать за счет использования пусковой обмотки с меньшей индуктивностью и более высоким сопротивлением. Для этого пусковая обмотка делается с меньшим количеством витков и с использованием более тонкого провода, чем в главной обмотке (рис. 2.28).

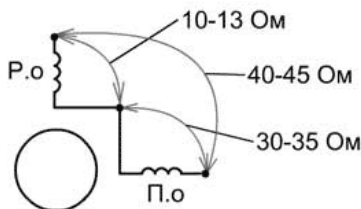


Рис. 2.28. Разное сопротивление и индуктивность обмоток

Отечественной промышленностью изготавливается серия однофазных асинхронных электродвигателей с активным сопротивлением в качестве фазосдвигающего элемента серии АОЛБ мощностью от 18 до 600 Вт при синхронной частоте вращения 3000 и 1500 об/мин, предназначенных для включения в сеть напряжением 127, 220 или 380 В, частотой 50 Гц.

Двигатель с конденсаторным пуском – двигатель с расщепленной фазой, у которого цепь вспомогательной обмотки с конденсатором включается только на время пуска.

Чтобы достичь максимального пускового момента, требуется создать круговое вращающееся магнитное поле. Для этого необходимо, чтобы токи в главной и вспомогательной обмотках были сдвинуты друг относительно друга на 90° . Использование в качестве фазосдвигающего элемента резистора или дросселя не позволяет обеспечить требуемый сдвиг фаз. Лишь включение конденсатора C_n определенной емкости позволяет обеспечить фазовый сдвиг 90° (рис. 2.29).

Среди фазосдвигающих элементов только конденсатор позволяет добиться наилучших пусковых свойств однофазного асинхронного электродвигателя.

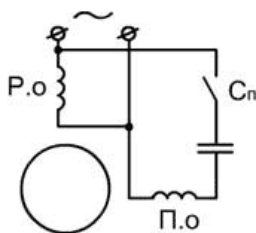


Рис. 2.29. Емкостной сдвиг фаз с пусковым конденсатором

Двигатели, в цепь которых постоянно включен конденсатор, используют для работы две фазы и называются **конденсаторными**. Принцип действия этих двигателей основан на использовании вращающегося магнитного поля. Конденсаторный двигатель, хотя и питается от однофазной сети, по существу, является двухфазным.

Конструктивно конденсаторный асинхронный двигатель представляет собой двухфазный двигатель. На статоре располагают две обмотки фаз, оси которых смещены относительно друг друга на 90 электрических градусов. Обе обмотки занимают равное число пазов. Питание электродвигателя осуществляется от однофазной сети переменного тока, при этом одна обмотка подключается непосредственно к сети, а другая через конденсатор C_p (рис. 2.30). Таким образом, в отличие от однофазного двигателя, который после пуска работает с пульсирующим магнитным потоком, конденсаторный электродвигатель работает с вращающимся магнитным потоком.

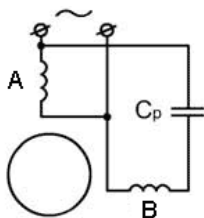


Рис. 2.30. Емкостной сдвиг фаз с рабочим конденсатором

Емкость рабочего конденсатора, требуемая для получения кругового вращающегося поля, определяется по формуле

$$C_{\text{раб}} = \frac{I_B \cos \varphi_A}{2\pi f U} = \frac{I_A \cos \varphi_A}{2\pi f U k},$$

где $C_{\text{раб}}$ – емкость рабочего конденсатора, Ф;

I_A – ток обмотки A , А;

I_B – ток обмотки B , А;

φ_A – угол фазового сдвига между током I_A и напряжением питания U при круговом вращающемся поле, град;

U – напряжение питания сети, В;

f – частота сети, Гц;

k – коэффициент, определяемый отношением эффективных чисел витков в обмотках фаз статора B и A .

$$k = \frac{\omega_B k_{\text{об}B}}{\omega_A k_{\text{об}A}},$$

где ω_A , ω_B – число последовательно соединенных витков в обмотках фаз A и B статора;

$k_{\text{об}A}$, $k_{\text{об}B}$ – обмоточный коэффициент обмоток фаз статора A и B .

Для повышения пускового момента параллельно рабочему конденсатору C_r включают пусковой конденсатор C_n (рис. 2.31). Для создания пускового момента, равного номинальному, требуется пусковой конденсатор C_n емкостью в 2–2,5 раза больше рабочего C_r .

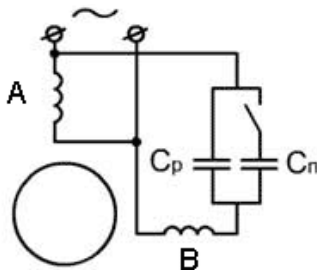


Рис. 2.31. Емкостной сдвиг фаз с пусковым и рабочим конденсатором

Двигатель с экранированными полюсами – двигатель с расщепленной фазой, у которого вспомогательная обмотка короткозамкнута.

Статор однофазного асинхронного двигателя с экранированными полюсами обычно имеет явно выраженные полюса. На явно выражен-

ных полюсах статора намотаны катушки однофазной обмотки возбуждения. Каждый полюс статора разделен на две неравные части аксиальным пазом. Меньшую часть полюса охватывает короткозамкнутый виток. Ротор такого двигателя короткозамкнутый в виде беличьей клетки.

При включении однофазной обмотки статора в сеть в магнитопроводе двигателя создается пульсирующий магнитный поток, одна часть которого (Φ') проходит по неэкранированной, а другая (Φ'') – по экранированной части полюса. Поток Φ'' наводит в короткозамкнутом витке ЭДС E_k , в результате чего возникает ток I_k , отстающий от E_k по фазе из-за индуктивности витка. Ток I_k создает магнитный поток Φ_k , направленный встречно Φ'' , создавая результирующий поток в экранированной части полюса $\Phi_3 = \Phi'' + \Phi_k$. Таким образом, в двигателе потоки экранированной и неэкранированной частей полюса сдвинуты во времени на некоторый угол.

Пространственный и временной углы сдвига между потоками Φ_3 и Φ' создают условия для возникновения в двигателе вращающегося эллиптического магнитного поля, так как $\Phi_3 \neq \Phi'$.

Пусковые и рабочие свойства рассматриваемого двигателя невысоки. КПД намного ниже, чем у конденсаторных двигателей такой же мощности, что связано со значительными электрическими потерями в короткозамкнутом витке.

Однофазный электродвигатель с асимметричным магнитопроводом статора (рис. 2.32). Статор такого однофазного двигателя выполняется с ярко выраженными полюсами на несимметричном шихтованном сердечнике. Ротор короткозамкнутый типа «беличья клетка».

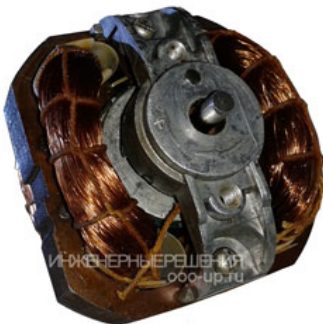


Рис. 2.32. Однофазный электродвигатель с асимметричным магнитопроводом статора

Данный электродвигатель для работы не требует использования фазосдвигающих элементов. Недостатком данного двигателя является низкий КПД.

Трехфазные асинхронные электродвигатели могут быть подключены к однофазной сети с помощью фазосдвигающих элементов. При этом электродвигатель будет работать либо в режиме однофазного двигателя с пусковой обмоткой (рис. 2.33, а, б, г) либо в режиме конденсаторного двигателя с постоянно включенным рабочим конденсатором (рис. 2.33, в, д, е).

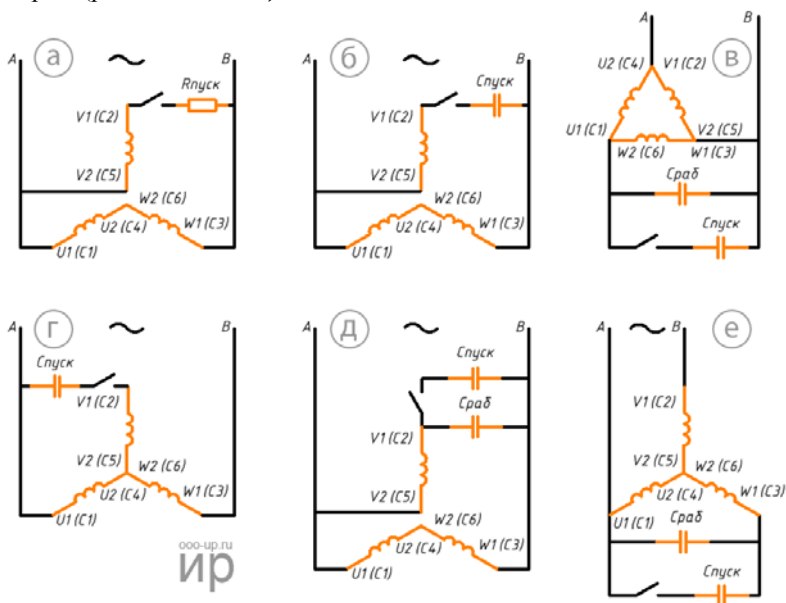


Рис. 2.33. Схемы подключения трехфазного асинхронного электродвигателя к однофазной сети

Схемы, приведенные на рис. 2.33, а, б, д, применяются, когда выведены все шесть концов обмотки. Электродвигатели с соединением обмоток согласно схемам, приведенным на рис. 2.33, а, б, г, практически равноценны двигателям, которые спроектированы как однофазные электродвигатели с пусковой обмоткой. Номинальная мощность при этом составляет 40–50 % от мощности в трехфазном режиме, а при работе с рабочим конденсатором – 75–80 %.

Емкость рабочего конденсатора при частоте тока 50 Гц для схем, приведенных на рис. 2.33, *в*, *д*, *е*, примерно рассчитывается по следующей формуле:

$$C_{\text{раб}} \approx c \frac{I_{\text{н}}}{U_1},$$

где $C_{\text{раб}}$ – емкость рабочего конденсатора, мкФ;

c – коэффициент (для рис. 2.33, *в* $c = 4800$; для рис. 2.33, *д* $c = 2700$; для рис. 2.33, *е* $c = 2800$);

$I_{\text{н}}$ – номинальный (фазный) ток статора трехфазного двигателя, А;

U_1 – напряжение однофазной сети, В.

Лекция 3. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

3.1. Принцип действия синхронного генератора

В синхронных машинах частота вращения ротора равна частоте вращения магнитного поля статора и, следовательно, определяется частотой тока сети и числом пар полюсов, т. е.

$$n = 60f/p \text{ и } f = pn/60.$$

Как и всякая электрическая машина, синхронная машина обратима, т. е. может работать как генератором, так и двигателем.

Электрическая энергия вырабатывается синхронными генераторами, первичными двигателями которых являются либо гидравлические, либо паровые турбины, либо двигатели внутреннего сгорания.

Обычно обмотки возбуждения получают энергию от возбудителя, который представляет собой генератор постоянного тока.

Возбудитель находится на одном валу с рабочей машиной, и мощность его составляет малую величину, порядка 1–5 % мощности синхронной машины, возбуждаемой им.

При небольшой мощности часто используются схемы питания обмоток возбуждения синхронных машин от сети переменного тока через полупроводниковые выпрямители. Простейшим генератором может быть виток из провода 1 и 2, вращающийся в магнитном поле (рис. 3.1). Магнитное поле возбуждается током обмотки возбуждения, помещенной на полюсах статора N – S .

При вращении витка проводники 1 и 2 пересекают магнитное поле, созданное между полюсами N – S , вследствие чего в витке будет индуцироваться ЭДС.

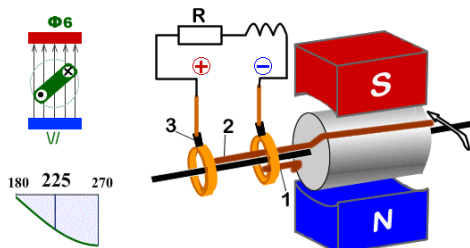


Рис. 3.1. Простейший генератор:
1 и 2 – проводники; 3 – кольца

Концы витка соединены с кольцами 3, вращающимися вместе с витком. Если на кольцах поместить неподвижные щетки и соединить их с приемником электрической энергии, то по замкнутой цепи, состоящей из витка, колец, щеток и приемника энергии, пойдет электрический ток под действием ЭДС.

Полученная в таком простейшем генераторе ЭДС будет непрерывно изменяться в зависимости от положения витка в магнитном поле. Когда проводники 1 и 2 находятся под осями полюсов, то при вращении витка они пересекают в единицу времени наибольшее число линий магнитного поля. Следовательно, в данный момент индуцируемая в витке ЭДС будет иметь наибольшее значение.

В дальнейшем при повороте витка изменится число линий магнитного поля, пересекаемых в единицу времени проводниками 1 и 2. При повороте витка на 90° в пространстве проводники будут перемещаться в вертикальном направлении, совпадающем с направлением магнитных линий поля. Следовательно, проводники 1 и 2 не пересекают магнитных линий и ЭДС в витке равна нулю.

При повороте витка на угол, больший 90° , изменится направление перемещения этих проводников в магнитное поле, а следовательно, и направление ЭДС, индуцируемой в витке.

Если магнитное поле между полюсами N и S распределяется равномерно, то ЭДС будет меняться во времени синусоидально. За один оборот витка в пространстве ЭДС, индуцируемая в нем, претерпевает один период изменения.

Если виток вращается при помощи какого-либо первичного двигателя с постоянной частотой вращения n в минуту, то в этом витке индуцируется переменная ЭДС с частотой

$$f = n/60.$$

3.2. Устройство синхронного генератора

Возникновение ЭДС в проводниках возможно как при перемещении этих проводников в неподвижном магнитном поле, так и при перемещении магнитного поля относительно неподвижных проводников.

В первом случае полюсы, т. е. индуктирующая часть машины, возбуждающая магнитное поле, помещаются на неподвижной части машины (на статоре), а индуктируемая часть (якорь), т. е. проводники, в которых создается ЭДС, – на вращающейся части машины (на роторе). Во втором случае полюсы помещаются на роторе, а якорь – на статоре.

Выше мы рассмотрели принцип действия синхронного генератора с неподвижными полюсами и вращающимся якорем. В таком генераторе энергия, вырабатываемая им, передается приемнику энергии посредством скользящих контактов – контактных колец и щеток.

Скользящий контакт в цепи большой мощности создает значительные потери энергии, а при высоких напряжениях наличие такого контакта крайне нежелательно. Поэтому генераторы с вращающимся якорем и неподвижными полюсами выполняют только при невысоких напряжениях (до 380/220 В) и небольших мощностях (до 15 кВА).

Наиболее широкое применение получили синхронные генераторы, в которых полюсы помещены на роторе, а якорь – на статоре.

Ток возбуждения протекает по обмотке возбуждения, которая представляет собой последовательно соединенные катушки, помещенные на полюсы ротора. Концы обмотки возбуждения соединены с контактными кольцами, которые крепятся на валу машины. На кольцах помещаются неподвижные щетки, посредством которых в обмотку возбуждения подводится постоянный ток от постороннего источника энергии – генератора постоянного тока, называемого возбудителем.

На рис. 3.2 показан общий вид синхронного генератора с возбудителем.

Устройство статора синхронного генератора аналогично устройству статора асинхронной машины. Ротор синхронных генераторов выполняют либо с явно выраженными (выступающими) полюсами, либо с неявно выраженными полюсами, т. е. без выступающих полюсов.

Для подачи тока в обмотку возбуждения на роторе устанавливают два кольца (так как возбуждение осуществляется постоянным током, то на одно из них подают «+», а на другое «–»). Щетки закреплены на щеткодержателе.

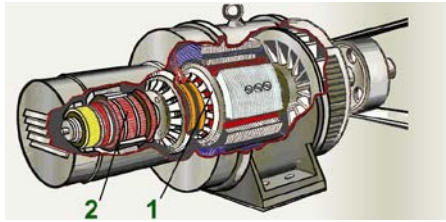


Рис. 3.2. Синхронный генератор:
1 – ротор; 2 – возбудитель

В машинах с относительно малой частотой вращения (при большом числе полюсов) роторы должны быть с явно выраженными полюсами (рис. 3.3, *а*), равномерно расположенными по окружности ротора.

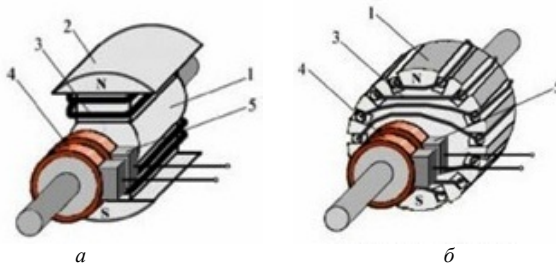


Рис. 3.3. Ротор синхронной машины
а – явнополюсный; *б* – неявнополюсный;
1 – магнитопровод; 2 – полюса; 3 – обмотка возбуждения;
4 – контактные кольца; 5 – электрические щетки

Полюс состоит из сердечника, полюсного наконечника и катушки обмотки возбуждения, помещаемой на сердечнике полюса.

Первичные двигатели синхронных генераторов с явно выраженными полюсами обычно представляют собой гидравлические турбины, являющиеся тихоходными машинами. При большой частоте вращения такое устройство ротора не может обеспечить нужной механической прочности и поэтому у высокоскоростных машин роторы выполняют с неявно выраженными полюсами (рис. 3.3, *б*).

Сердечники роторов с неявно выраженными полюсами обычно изготавливают из цельных поковок, на поверхности которых фрезеруются пазы. После укладки обмоток возбуждения на роторе пазы его забива-

ются клиньями, а лобовые соединения обмотки возбуждения укрепляются стальными бандажами, помещенными на торцовых частях ротора. При такой конструкции ротора допускаются большие частоты вращения. Для генераторов с неявно выраженными полюсами первичными двигателями обычно являются паровые турбины, принадлежащие к числу быстроходных машин.

3.3. Работа синхронного генератора под нагрузкой

Если синхронный генератор не нагружен, т. е. работает вхолостую, то тока в обмотках статора нет. Магнитный поток полюсов, созданный током возбуждения, индуцирует в трехфазной обмотке статора ЭДС. При нагрузке генератора по обмотке статора протекает ток.

При симметричной нагрузке токи в фазах обмотки статора равны и сдвинуты на $1/3$ периода. Токи статора создают вращающееся магнитное поле, частота вращения которого

$$n_1 = 60f/p = n,$$

т. е. магнитное поле, созданное токами в обмотке статора, вращается синхронно с магнитным полем полюсов.

В обмотке статора синхронного генератора создается ЭДС, величина которой зависит от магнитного потока полюсов. Если магнитный поток полюсов очень мал, то и ЭДС также мала. При увеличении магнитного потока возрастает и ЭДС машины. Таким образом, при постоянной частоте вращения ротора ЭДС пропорциональна магнитному потоку, который возбуждается постоянным током, протекающим по проводникам обмотки возбуждения.

Если повысить ток в обмотке возбуждения, то возрастет и магнитный поток полюсов, что вызовет увеличение ЭДС машины. Следовательно, изменение тока в обмотке возбуждения вызывает соответствующее изменение ЭДС машины и позволяет регулировать напряжение на зажимах генератора.

При холостом ходе синхронного генератора напряжение равно ЭДС, индуцированной в обмотке статора. При нагрузке генератора напряжение не равно ЭДС, так как в сопротивлении (активном и реактивном) обмотки статора возникает падение напряжения. Кроме того, токи, проходящие по обмоткам статора, создают поток реакции якоря, который воздействует на поток полюсов, так что при нагрузке магнитный поток не будет равен магнитному потоку полюсов при холостой

работе генератора. Поэтому изменение нагрузки, т. е. тока в статоре генератора, будет вызывать изменение напряжения на зажимах генератора в случае, если ток в обмотке возбуждения остается неизменным.

На рис. 3.4, *а* изображены внешние характеристики синхронного генератора при активной и реактивной нагрузках. Эти характеристики показывают зависимость напряжения на зажимах генератора от тока нагрузки при неизменных частоте вращения ротора и токе возбуждения. Различный вид этих характеристик при активной, индуктивной и емкостной нагрузках объясняется неодинаковым воздействием поля реакции якоря на магнитный поток полюсов.

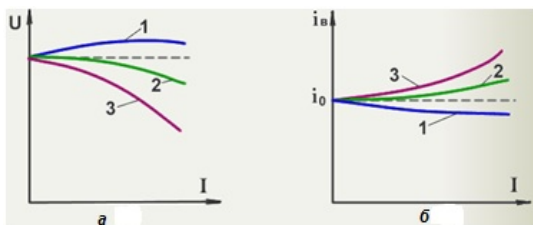


Рис. 3.4. Характеристики синхронного генератора:
а – внешние; *б* – регулировочные;
 1 – емкостная; 2 – активная; 3 – индуктивная

Для нормальной работы любого приемника электрической энергии требуется постоянное напряжение сети. Чтобы обеспечить постоянное напряжение сети при изменении нагрузки в синхронном генераторе, изменяют и ток возбуждения. Зависимость, показывающая, каким образом необходимо изменить ток в обмотке возбуждения для того, чтобы при изменении нагрузки генератора напряжение на его зажимах оставалось неизменным, называется регулировочной характеристикой (рис. 3.4, *б*).

При активной нагрузке увеличение тока в статоре вызывает незначительное понижение напряжения, так как реакция якоря уменьшает магнитный поток в малой степени. При этой нагрузке требуется незначительно увеличить ток возбуждения для обеспечения постоянства напряжения. При индуктивной нагрузке создается размагничивающее поле реакции якоря, уменьшающее поток полюсов. Поэтому для постоянства напряжения (т. е. для постоянства результирующего магнитного потока) необходимо в большей мере увеличить ток возбуждения для компенсации размагничивающего поля реакции якоря.

При емкостной нагрузке происходит усиление магнитного поля и для постоянства напряжения следует уменьшить ток возбуждения при увеличении тока в статоре.

Наиболее часто синхронные генераторы работают на общую мощную сеть электростанции или энергосистемы. Напряжение такой сети U_c и частота тока в ней неизменны. ЭДС генератора E_r равна и противоположна напряжению сети

$$E_r = -U_c.$$

Результирующее магнитное поле Φ_p статора, вращающееся с частотой

$$n_1 = 60f/p$$

в пространстве, опережает напряжение E_r на 90° (рис. 3.5).

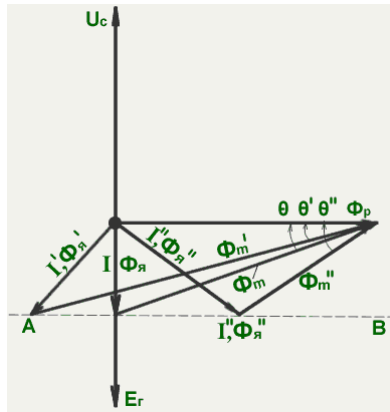


Рис. 3.5. Векторная диаграмма синхронного генератора при различных токах возбуждения

При неизменном напряжении сети U_c амплитуда магнитного потока Φ_p результирующего магнитного поля статора также неизменна.

При активной нагрузке генератора ток статора I совпадает по фазе с напряжением U_r . Поток реакции якоря $\Phi'_я$ совпадает по фазе с током I , так что вектор тока в статоре I в другом масштабе определит вектор $\Phi'_я$. Результирующий магнитный поток создается действием потока полюсов Φ_m и потока реакции якоря $\Phi'_я$ и может быть представлен геометрической суммой этих магнитных потоков.

Изменение тока возбуждения генератора не вызывает изменения его активной мощности, так как мощность, потребляемая им от первичного двигателя, остается неизменной (вращающий момент первичного двигателя и частота вращения постоянны).

Активная составляющая тока статора постоянна и конец вектора I_{Φ_a} находится на прямой AB , параллельной горизонтальной оси. Если увеличить ток возбуждения, то возрастет поток полюсов Φ_m' , вектор которого находится между прямой AB и концом неизменного вектора Φ_p . В этом случае изменится как по величине, так и по направлению вектор I и Φ_a' , т. е. ток окажется отстающим по фазе от напряжения генератора.

При уменьшении тока возбуждения уменьшится также и поток полюсов Φ_m'' , что приведет к изменению тока в статоре $I'\Phi_a''$ как по величине, так и по фазе.

Таким образом, изменение тока возбуждения генератора, работающего на мощную сеть, вызывает изменение реактивной составляющей тока в статоре, т. е. изменяет реактивную мощность, вырабатываемую генератором.

Для изменения активной мощности необходимо изменить вращающий момент первичного двигателя, приводящего во вращение ротор синхронного генератора. Под действием вращающего момента первичного двигателя M_1 ротор машины с помещенными на нем полюсами приводится во вращение с частотой вращения в минуту n . Результирующее поле статора вращается в том же направлении с частотой $n_1 = n$. Следовательно, поле полюсов Φ_m и результирующее поле статора Φ_p вращаются синхронно, оставаясь неподвижными друг относительно друга, и между этими полями устанавливается взаимодействие. В результате создается электромагнитный тормозной момент M_s , уравновешивающий момент первичного двигателя.

Для включения генератора в сеть необходимо:
одинаковое чередование фаз в сети и генераторе;
равенство напряжения сети и ЭДС генератора;
равенство частот ЭДС генератора и напряжения сети;
включение генератора в тот момент, когда ЭДС генератора в каждой фазе направлена встречно напряжению сети.

Невыполнение этих условий ведет к тому, что в момент включения генератора в сеть возникают токи, которые могут оказаться большими и вывести из строя генератор.

При включении генераторов в сеть используют специальные

устройства – синхроскопы. Простейшим синхроскопом являются три лампы накаливания, включаемые между зажимами генератора и контактами сети. Лампы должны быть рассчитаны на двойное напряжение сети и до включения генератора будут одновременно загораться и погасать.

В момент, когда ЭДС генератора равна и направлена встречно напряжению сети, лампы погаснут, так как напряжение на каждой лампе равно нулю. При погасании ламп генератор включается в сеть. До включения генератора в сеть ЭДС его измеряется вольтметром и регулированием тока возбуждения устанавливается равной напряжению сети. Частота ЭДС генератора регулируется изменением частоты вращения первичного двигателя.

3.4. Конструкции синхронных двигателей

Синхронный двигатель не имеет принципиальных конструктивных отличий от синхронного генератора. Так же как и в генераторе, на статоре синхронного двигателя помещается трехфазная обмотка, при включении которой в сеть трехфазного переменного тока будет создано вращающееся магнитное поле Φ_p , частота вращения в минуту которого

$$n_1 = 60f/p.$$

Существуют следующие типы синхронных двигателей: с обмоткой возбуждения, с постоянными магнитами, реактивные, гистерезисные, реактивно-гистерезисные и шаговые.

Синхронный электродвигатель с обмоткой возбуждения (рис. 3.6) имеет явнополюсный ротор с электромагнитным возбуждением. Для создания постоянного магнитного поля ротора требуется источник постоянного тока. Обмотки ротора двигателя соединены с контактными кольцами, к которым через щетки подводится постоянный ток. Преимуществом данных двигателей является отсутствие дорогостоящих магнитов, недостатком – наличие щеток и необходимость питания обмоток ротора.

Синхронный электродвигатель с постоянными магнитами (рис. 3.7) имеет ротор с постоянными магнитами. Обычно ротор располагается внутри статора электродвигателя, также существуют конструкции с внешним ротором – электродвигатели обращенного типа (рис. 3.8). Ротор состоит из постоянных магнитов. В качестве постоян-

ных магнитов используются материалы с высокой коэрцитивной силой. По конструкции ротора синхронные двигатели делятся на электродвигатели с явно выраженными полюсами и электродвигатели с неявно выраженными полюсами.

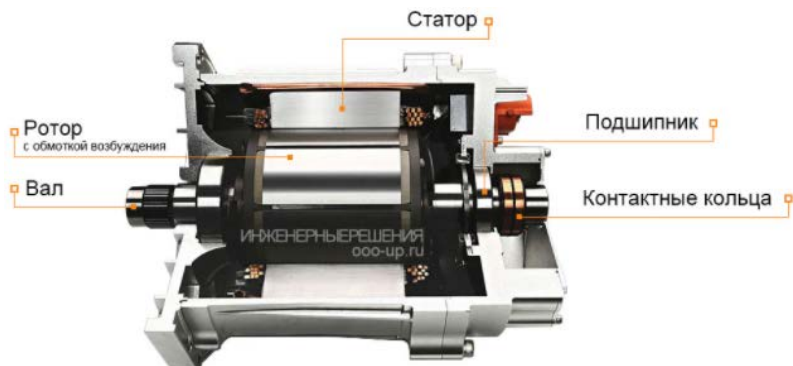


Рис. 3.6. Синхронный электродвигатель с обмоткой возбуждения



Рис. 3.7. Синхронный электродвигатель со встроенными постоянными магнитами

Также по конструкции ротора синхронные двигатели с постоянными магнитами делятся на синхронные двигатели с поверхностной

установкой постоянных магнитов (англ. SPMSM – surface permanent magnet synchronous motor) и синхронные двигатели со встроенными (инкорпорированными) магнитами (англ. IPMSM – interior permanent magnet synchronous motor) (рис. 3.9).

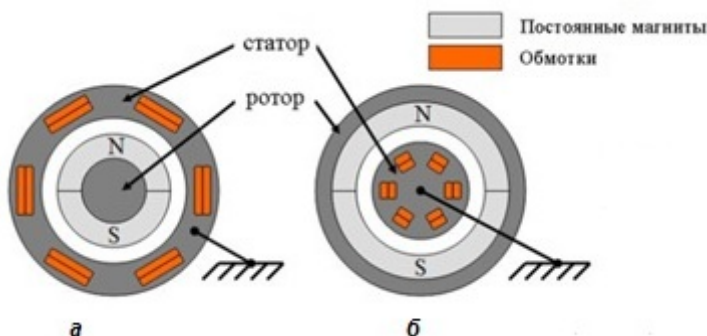


Рис. 3.8. Конструкции синхронного двигателя с постоянными магнитами:
а – стандартная; б – обращенная

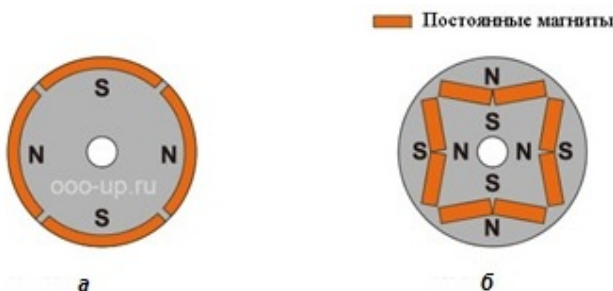


Рис. 3.9. Конструкции роторов синхронных двигателей с постоянными магнитами:
а – с поверхностной установкой магнитов; б – со встроенными магнитами

Статор состоит из корпуса и сердечника с обмоткой. Наиболее распространены конструкции с двух- и трехфазной обмоткой.

В зависимости от конструкции статора синхронный двигатель с постоянными магнитами бывает (рис. 3.10) с распределенной обмоткой и с сосредоточенной обмоткой.

Распределенной называют такую обмотку, у которой число пазов на полюс и фазу $Q = 2, 3, \dots, k$ (рис. 3.11, а).



Рис. 3.10. Статоры синхронного электродвигателя с постоянными магнитами:
а – с распределенной обмоткой; *б* – с сосредоточенной обмоткой

Сосредоточенной называют такую обмотку, у которой число пазов на полюс и фазу $Q = 1$ (рис. 3.11, *б*). При этом пазы расположены равномерно по окружности статора. Две катушки, образующие обмотку, можно соединить как последовательно, так и параллельно. Основным недостатком таких обмоток – невозможность влияния на форму кривой ЭДС.

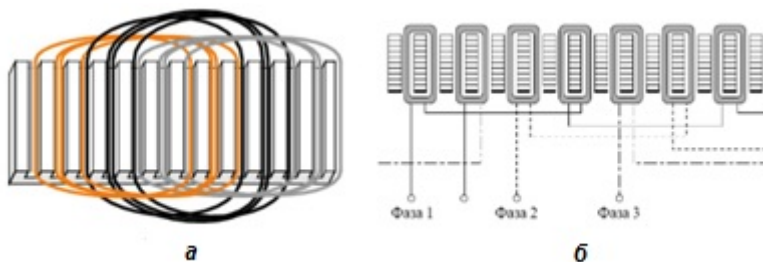


Рис. 3.11. Схемы обмоток статора синхронного электродвигателя с постоянными магнитами: *а* – распределенная; *б* – сосредоточенная

В отличие от коллекторного двигателя постоянного тока функции коллектора и щеток выполняют полупроводниковые ключи. Такой электродвигатель имеет такие же преимущества, что и коллекторный двигатель постоянного тока, при этом не требует текущего ремонта (бесщеточный) в процессе эксплуатации, но требует сложной системы управления. Бесщеточные синхронные электродвигатели с постоян-

ными магнитами имеют ряд преимуществ по сравнению с другими двигателями, обладая лучшими показателями: мощность (объем), КПД, момент (инерция) и др.

Синхронный реактивный электродвигатель (рис. 3.12) – двигатель с ротором из ферромагнитного материала. Статор реактивного двигателя бывает с распределенной и сосредоточенной обмоткой и состоит из корпуса и сердечника с обмоткой.



Рис. 3.12. Синхронный реактивный электродвигатель:
а – общий вид; б – статор с распределенной обмоткой

Выделяют три основных типа ротора реактивного двигателя: ротор с явно выраженными полюсами, аксиально-расслоенный ротор и поперечно-расслоенный ротор (рис. 3.13).

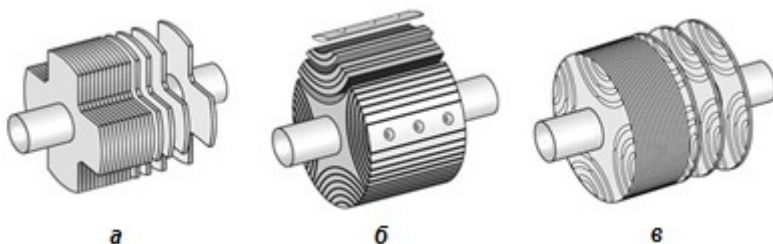


Рис. 3.13. Конструкции роторов синхронного реактивного двигателя:
а – с явно выраженными полюсами; б – аксиально-расслоенный;
в – поперечно-расслоенный

Принцип действия синхронного реактивного электродвигателя основан на свойствах ферромагнитных тел ориентироваться так, чтобы сцепленный с ним магнитный поток оказался максимальным. Основными преимуществами электродвигателя являются: простая и надежная конструкция ротора (без магнитов и короткозамкнутой обмотки), низкий нагрев (в роторе отсутствуют токи и во время работы он не нагревается, что увеличивает срок службы), низкий момент инерции ротора (быстрый разгон и экономия электроэнергии), возможность регулирования частоты вращения (частотный преобразователь) и низкая цена изготовления. При одинаковых размерах реактивный электродвигатель развивает больший момент, чем асинхронный, но имеет более низкий коэффициент мощности из-за того, что магнитный поток создается только за счет реактивного тока. Данный электродвигатель для работы требует систему управления.

Гистерезисный электродвигатель (рис. 3.14) – синхронный электродвигатель с неявнополюсным гистерезисным ротором. Вращающий момент этого электродвигателя создается за счет магнитного гистерезиса материала ротора. Достоинствами гистерезисных двигателей являются простота устройства, надежность в эксплуатации, отсутствие пусковых приспособлений, плавность втягивания в синхронизм, практически неизменный ток при пуске и работе. К недостаткам можно отнести относительно высокую стоимость материала ротора.



Рис. 3.14. Синхронный гистерезисный двигатель

Реактивно-гистерезисный электродвигатель (рис. 3.15) – это гибридный синхронный электродвигатель с явно выраженными полюсами, ротор которого выполнен из магнитотвердого материала с большим остаточным намагничиванием. Пуск электродвигателя происходит за счет асинхронного и гистерезисного моментов, а работа – за счет гистерезисного и реактивного моментов.



Рис. 3.15. Конструкция синхронного реактивно-гистерезисного электродвигателя

Статор однофазного реактивно-гистерезисного электродвигателя подобен статору однофазного асинхронного электродвигателя с экранированными полюсами и имеет шихтованный двухполюсный сердечник с явно выраженными полюсами. Для упрощения установки однофазной обмотки сердечник статора выполняют разборным, состоящим из двух половин. Полюсы сердечника статора оканчиваются полюсными наконечниками. Каждый полюс разделен на две равные части продольным пазом, на одной из частей расположены короткозамкнутые медные экранирующие витки, обеспечивающие получение в однофазном двигателе вращающегося магнитного поля. Двигатели с экранированными полюсами нереверсивны – ротор всегда вращается только в одну сторону – от неэкранированной части полюса статора к экранированной.

Ротор включает две или более пластин (дисков) толщиной по 0,4 мм из закаленной магнитотвердой стали. Для создания гистерезисного момента выбирается сталь с большим остаточным намагничиванием. Пластины имеют форму колец с перемычками. Магнитное сопротивление ротора в направлении перемычек меньше, и поэтому магнитные проводимости по продольной и поперечной осям не равны, что обеспечивает получение на роторе еще и реактивного момента. Кольцевой обод на пластинах ротора обеспечивает получение асинхронного и гистерезисного моментов. Ротор закреплен на валу с помощью прорезей в перемычках пластин. Вал электродвигателя связан с редуктором, понижающим частоту вращения и увеличивающим вращающий момент. Ротор с редуктором помещен в герметичный корпус из немагнитного металла.

В реактивно-гистерезисном электродвигателе создается три электромагнитных вращающих момента. При пуске двигателя на ротор

действуют вихревой и гистерезисный моменты. При этом магнитный гистерезис стального ротора снижает КПД двигателя, но значительно увеличивает пусковой момент. После пуска ротор втягивается в синхронизм и вращается с неизменной синхронной частотой под действием реактивного и гистерезисного моментов.

Синхронные реактивно-гистерезисные двигатели при сравнительно больших габаритных размерах и массе имеют низкие энергетические показатели (КПД и $\cos \phi$). Однако они широко применялись в автоматических устройствах благодаря простоте конструкции, технологичности и возможности работы от однофазного питания.

Шаговый электродвигатель (рис. 3.16) – синхронный бесщеточный электродвигатель, который без устройств обратной связи преобразует сигнал управления в угловое перемещение ротора с фиксацией его в заданном положении.

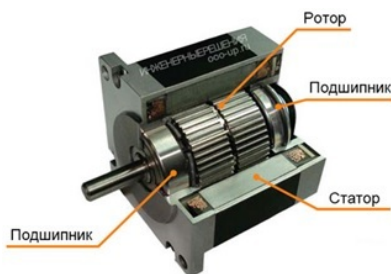


Рис. 3.16. Гибридный шаговый электродвигатель

Шаговые двигатели надежны и недороги, так как ротор не имеет контактных колец и коллектора. Ротор имеет либо явно выраженные полюса, либо тонкие зубья. Реактивный шаговый двигатель имеет ротор из магнитомягкого материала с явно выраженными полюсами. Шаговый двигатель с постоянными магнитами имеет ротор на постоянных магнитах. Гибридный шаговый двигатель имеет составной ротор, включающий полюсные наконечники (зубья) из магнитомягкого материала и постоянные магниты. Определить, имеет ли ротор постоянные магниты или нет, можно посредством вращения обесточенного двигателя. Если при вращении имеются фиксирующий момент и (или) пульсации, значит, ротор выполнен на постоянных магнитах.

Статор шагового двигателя имеет сердечник с явно выраженными полюсами, который обычно делается из ламинированных штампован-

ных листов электротехнической стали для уменьшения вихревых токов и нагрева. Статор шагового двигателя обычно имеет от двух до пяти фаз.

Главное преимущество шаговых электродвигателей – точность, а также возможность осуществлять позиционирование и регулировать скорость без датчика обратной связи.

3.5. Пуск в ход синхронных двигателей

На роторе двигателя помещена обмотка возбуждения, включаемая в сеть источника постоянного тока. Ток возбуждения создает магнитный поток полюсов Φ_m . Вращающееся магнитное поле, полученное токами обмотки статора, увлекает за собой полюсы ротора. При этом ротор может вращаться только синхронно с полем, т. е. с частотой, равной частоте вращения поля статора. Таким образом, частота вращения синхронного двигателя строго постоянна, если неизменна частота тока питающей сети.

Основным достоинством синхронных двигателей является возможность их работы с потреблением опережающего тока, т. е. двигатель может представлять собой емкостную нагрузку для сети. Такой двигатель повышает $\cos \varphi$ всего предприятия, компенсируя реактивную мощность других приемников энергии. Так же как и в генераторах, в синхронных двигателях изменение реактивной мощности, т. е. изменение $\cos \varphi$, достигается регулированием тока возбуждения. При некотором токе возбуждения, соответствующем нормальному возбуждению, $\cos \varphi = 1$. Уменьшение тока возбуждения вызывает появление отстающего (индуктивного) тока в статоре, а при увеличении тока возбуждения (перевозбужденный двигатель) – опережающего (емкостного) тока в статоре.

Достоинством синхронных двигателей является также меньшая, чем у асинхронных, чувствительность к изменению напряжения питающей сети. У синхронных двигателей вращающий момент пропорционален напряжению сети в первой степени, тогда как у асинхронных – квадрату напряжения. Вращающий момент синхронного двигателя создается в результате взаимодействия магнитного поля статора с магнитным полем полюсов. От напряжения питающей сети зависит только магнитный поток поля статора. Синхронные двигатели выполняют преимущественно с явно выраженными полюсами, и работают они в нормальном режиме с опережающим током при $\cos \varphi = 0,8$.

Возбуждение синхронные двигатели получают либо от возбудителя, либо от сети переменного тока через полупроводниковые выпрямители. Пуск в ход синхронного двигателя непосредственным включением его в сеть невозможен, так как при включении обмотки статора в сеть создается вращающееся магнитное поле, а ротор в момент включения неподвижен.

Поэтому для пуска в ход двигателя необходимо предварительно довести частоту вращения ротора до синхронной частоты или близкой к ней.

В настоящее время исключительное применение имеет так называемый асинхронный пуск синхронных двигателей, сущность которого заключается в следующем.

В полюсных наконечниках ротора синхронного двигателя уложена пусковая обмотка, выполненная в виде беличьего колеса, наподобие короткозамкнутой обмотки ротора асинхронной машины. Обмотка статора двигателя включается в трехфазную сеть, и пуск его производится так же, как и пуск асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. После того как двигатель разовьет частоту, близкую к синхронной (примерно 95 %), обмотка возбуждения включается в сеть постоянного тока и двигатель входит в синхронизм, т. е. частота ротора увеличивается до синхронной.

При пуске в ход двигателя обмотка возбуждения замыкается на сопротивление, примерно в 10–12 раз большее сопротивления самой обмотки. Нельзя обмотку возбуждения при пуске в ход оставить разомкнутой или замкнуть накоротко. Если при пуске в ход обмотка возбуждения окажется разомкнутой, то в ней будет индуцироваться очень большая ЭДС, опасная как для изоляции обмотки, так и для обслуживающего персонала.

Создание ЭДС большой величины объясняется тем, что при пуске в ход поле статора вращается с большой частотой относительно неподвижного ротора и с большой частотой пересекает проводники обмотки возбуждения, имеющей большое число витков.

Работа синхронной машины с потреблением из сети переменного тока дает возможность использовать ее в качестве компенсатора. Компенсатором является синхронный двигатель, работающий без нагрузки и предназначенный для повышения $\cos \varphi$ предприятия.

Конструктивно компенсатор отличается от синхронного двигателя незначительно. Компенсатор не несет механической нагрузки, поэтому его вал и ротор легче, а воздушный зазор меньше, чем у двигателя.

Основным недостатком синхронных двигателей является потребность в источнике как переменного, так и постоянного тока. Потребность в источнике постоянного тока для питания обмотки возбуждения синхронного двигателя делает его крайне неэкономичным при небольших мощностях.

Лекция 4. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

4.1. Принцип действия и устройство машины постоянного тока

Простейшим генератором является виток, вращающийся в магнитном поле полюсов N и S (рис. 4.1). В таком витке индуцируется переменная во времени ЭДС. Поэтому при соединении концов витка с контактными кольцами, вращающимися вместе с витком, в нагрузке через неподвижные щетки протекает переменный ток, т. е. такая машина является генератором переменного тока.

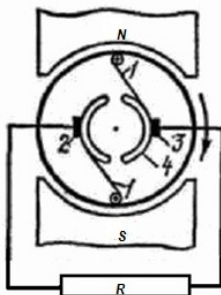


Рис. 4.1. Схема устройства генератора постоянного тока:
1 – виток; 2 и 3 – щетки; 4 – коллекторные пластины

Для преобразования переменного тока в постоянный применяют коллектор, принцип действия которого состоит в следующем. Концы витка 1 присоединены к двум медным полукольцам (сегментам), называемым коллекторными пластинами. Пластины жестко укреплены на валу машины и изолированы как друг от друга, так и от вала. На пластинах помещены неподвижные щетки 2 и 3, электрически соединенные с приемником энергии.

При вращении витка коллекторные пластины также вращаются вместе с валом машины и каждая из неподвижных щеток 2 и 3 соприкасается то с одной, то с другой пластиной.

Щетки на коллекторе установлены так, чтобы они переходили с одной пластины на другую в тот момент, когда ЭДС, индуцируемая в витке, была равна нулю. В этом случае при вращении якоря в витке индуцируется переменная ЭДС, изменяющаяся синусоидально при равномерном распределении магнитного поля, но каждая из щеток соприкасается с той коллекторной пластиной и соответственно с тем из проводников, которые в данный момент находятся под полюсом определенной полярности.

Следовательно, ЭДС на щетках 2 и 3 знака не меняет, и ток по внешнему участку замкнутой электрической цепи проходит в одном направлении от щетки 2 через сопротивление R к щетке 3. Однако несмотря на неизменность направления ЭДС во внешней цепи величина ее меняется во времени, т. е. получена не постоянная, а пульсирующая ЭДС. Ток во внешней цепи будет также пульсирующим.

Если поместить на якоре два витка под углом 90° один к другому и концы этих витков соединить с четырьмя коллекторными пластинами, то пульсация ЭДС и тока во внешней цепи значительно уменьшится. При увеличении числа коллекторных пластин пульсация быстро уменьшается и при большом числе коллекторных пластин ЭДС и ток практически постоянны.

На рис. 4.2 показан общий вид машины постоянного тока. неподвижная часть является индуктирующей, т. е. создающей магнитное поле, а вращающаяся часть – индуцируемой (якорем).

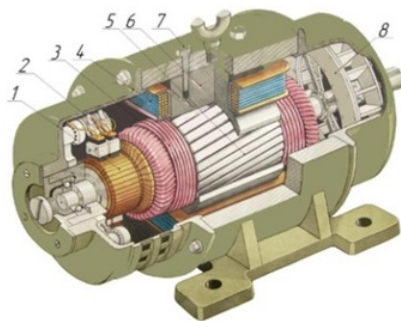


Рис. 4.2. Устройство машины постоянного тока:

- 1 – коллектор; 2 – щетки и щеткодержатель; 3 – обмотка якоря;
- 4 – полюсная катушка; 5 – якорь; 6 – сердечник полюса возбуждения;
- 7 – станина; 8 – вентилятор

Любая электрическая машина состоит, как правило, из двух составных частей: неподвижной части – статора, располагаемой обычно снаружи, и вращающейся внутренней части – ротора. Всю вышеперечисленную совокупность вращающихся деталей называют по имени главной из них – якорем. Таким образом, на практике термин «якорь» имеет двоякое значение: во-первых, совокупность вращающихся частей машины постоянного тока, во-вторых, собственно якорь.

Статор современной машины постоянного тока (рис. 4.3) состоит из ярма, главных, или основных, магнитных полюсов с намагничивающими их катушками из изолированного или голого медного провода круглого или прямоугольного сечения и из добавочных, или коммутационных, магнитных полюсов с намагничивающими их катушками из изолированного или из голого (с изоляционными прокладками) медного провода круглого или прямоугольного сечения.

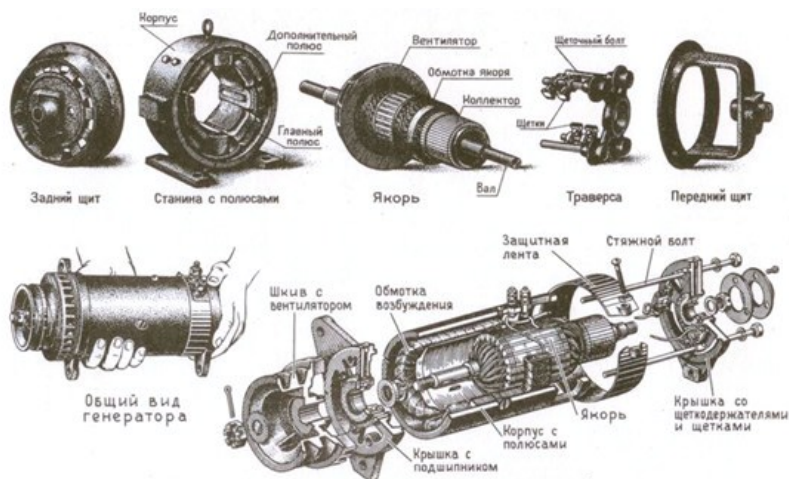


Рис. 4.3. Узлы и детали машины постоянного тока

Термин «статор» в применении к машинам постоянного тока на практике не используется, вместо него пользуются термином «магнитная система или индуктор». Термин «ядро» также заменяют на практике термином «машины постоянного тока», так как в качестве конструктивной части машины ядро выполняет эту роль.

Неподвижная часть машины состоит из главных полюсов,

дополнительных полюсов и станины (рис. 4.4). Главный полюс представляет собой электромагнит, создающий магнитный поток. Он состоит из сердечника, обмотки возбуждения и полюсного наконечника. Полюсы крепятся на станине с помощью болта. Сердечник полюса отливается из стали и имеет поперечное сечение овальной формы. На сердечнике полюса помещена катушка обмотки возбуждения, намотанная из изолированного медного провода. Катушки всех полюсов соединяются последовательно, образуя обмотку возбуждения. Ток, проходящий по обмотке возбуждения, создает магнитный поток. Полюсный наконечник удерживает обмотку возбуждения на полюсе и обеспечивает равномерное распределение магнитного поля под полюсом. Полюсному наконечнику придают такую форму, при которой воздушный зазор между полюсами и якорем одинаков по всей длине полюсной дуги.

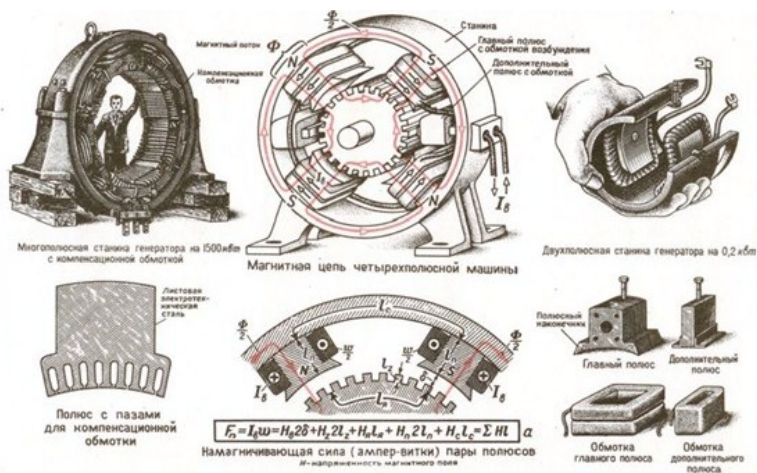


Рис. 4.4. Магнитная система машины постоянного тока

Добавочные полюсы имеют также сердечник и обмотку. Добавочные полюсы расположены между главными полюсами, и число их может быть либо равным числу главных полюсов, либо вдвое меньшим. Добавочные полюсы устанавливают в машинах больших мощностей; они служат для устранения искрения под щетками. В машинах малых мощностей добавочных полюсов обычно нет.

В больших машинах постоянного тока, предназначенных для тяже-

лых условий работы, в полюсных башмаках главных магнитных полюсов, которым в этом случае придают особо развитую форму, проштамповывают ряд пазов для укладки в них компенсационной обмотки. Она предназначена для воспрепятствования искажению формы распределения индукции основного магнитного потока в пространстве, отделяющем полюсный башмак от якоря. Это пространство называется *междужелезным пространством* или *главным электромашинным зазором*.

Компенсационная обмотка выполняется, как и прочие обмотки машины, из меди и изолируется. Обмотки добавочных полюсов и компенсационная обмотка соединяются с обмоткой якоря последовательно.

Станину отливают из стали; она является остовом машины. На станине крепят главные и добавочные полюсы, а также на торцовых сторонах ее — боковые щиты с подшипниками, удерживающими вал машины (см. рис. 4.3).

Вращающаяся часть машины (якорь) состоит из сердечника (рис. 4.5), обмотки и коллектора.



Рис. 4.5. Якорь машины постоянного тока

Сердечник якоря представляет собой цилиндр, собранный из листов электротехнической стали. Листы изолируются друг от друга лаком или бумагой для уменьшения потерь на вихревые токи (рис. 4.6). Стальные листы штампуют на станках по шаблону; они имеют пазы, в которых укладываются проводники обмотки якоря. В теле якоря делают воздушные каналы для охлаждения обмотки и его сердечника. Обмотка тщательно изолируется от сердечника и закрепляется в пазах деревянными клиньями. Лобовые соединения укрепляются стальными бандажами. Все секции обмотки, помещенные

на якоре, включаются между собой последовательно, образуя замкнутую цепь, и присоединяются к коллекторным пластинам.

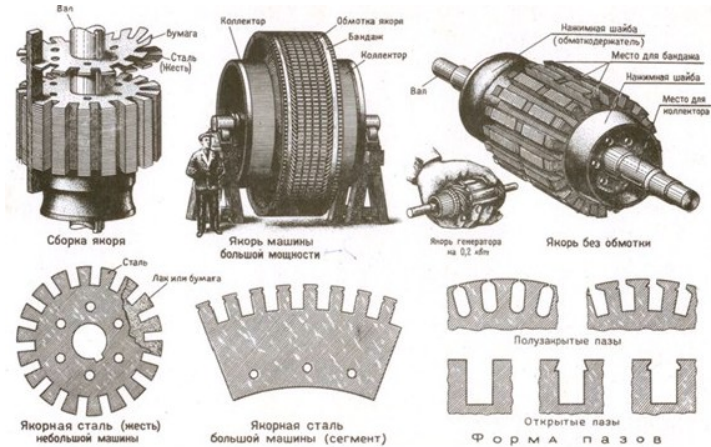


Рис. 4.6. Составные элементы якоря машины постоянного тока

Коллектор представляет собой цилиндр, состоящий из отдельных пластин (рис. 4.7).

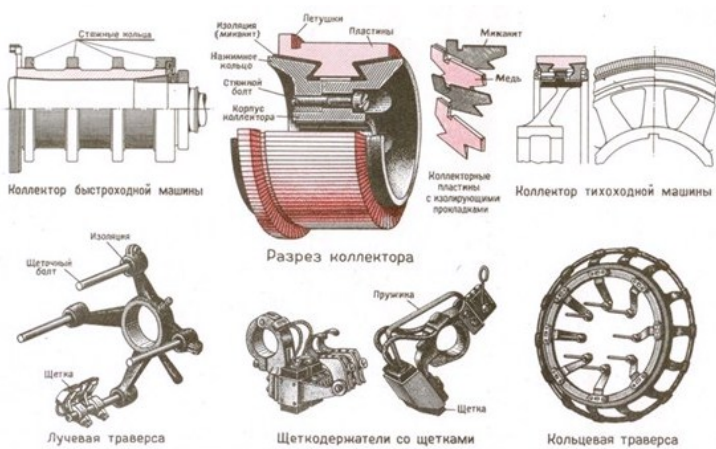


Рис. 4.7. Токосъемное устройство

Коллекторные пластины изготавливают из твердотянутой меди и изолируют между собой и от корпуса прокладками из миканита. Для крепления на втулке коллекторным пластинам придают форму ласточкина хвоста, который зажимается между выступом на втулке и шайбой, имеющими форму, соответствующую форме пластины. Шайба крепится к втулке болтами.

Коллектор является наиболее сложной в конструктивном отношении и наиболее ответственной в работе частью машины. Поверхность коллектора должна быть строго цилиндрической во избежание биения и искрения щеток.

Для соединения обмотки якоря с внешней цепью на коллекторе помещают неподвижные щетки (рис. 4.8), которые могут быть графитными, угольно-графитными или бронзо-графитными.



Рис. 4.8. Щетка

В машинах высокого напряжения применяют графитные щетки, имеющие большое переходное сопротивление между щеткой и коллектором, в машинах низкого напряжения – бронзо-графитные щетки. Щетки помещают в особых щеткодержателях. Щетка, помещенная в обойме щеткодержателя, прижимается пружиной к коллектору (рис. 4.9). На каждом щеткодержателе может находиться несколько щеток, включенных параллельно.

Щеткодержатели помещаются на щеточных болтах-пальцах, которые, в свою очередь, закреплены на траверсе.

Щеточные пальцы изолируются от траверсы изоляционными шайбами и втулками. Число щеткодержателей обычно равно числу полюсов.

Траверса устанавливается на подшипниковом щите в машинах малой и средней мощности или прикрепляется к станине в машинах большой мощности. Траверсу можно поворачивать и этим изменять положение щеток относительно полюсов.

Обычно траверса находится в таком положении, при котором

расположение щеток в пространстве совпадает с расположением осей главных полюсов.

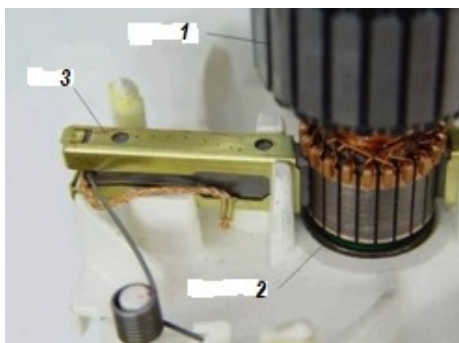


Рис. 4.9. Токособираательный аппарат:
1 – якорь; 2 – коллектор; 3 – щеткодержатель

Щетки, щеткодержатели, пальцы (или brackets) и траверса (или суппорт) составляют так называемый токособираательный аппарат машины постоянного тока. В него входят также соединения между собой зонных комплектов щеток одной и той же полярности.

Концы вала якоря машины, называемые шейками вала, вставляют в подшипники. В небольших и средних машинах подшипники укрепляют в подшипниковых щитах, которые в то же время выполняют роль защиты машины от внешних воздействий, а также служат для полного закрытия машины, если она выполняется закрытой.

Малые машины постоянного тока с подшипниковыми щитами не имеют, как правило, фундаментной плиты. Их устанавливают на болтах, которые крепят к бетонному или кирпичному фундаменту, или к полу, или на особых балочках, называемых салазками.

Иногда генераторы, а также двигатели имеют всего один подшипник. Другой конец вала имеет фланец или обрабатывается под насадку полумуфты для соединений со свободным концом вала приводного двигателя (в случае генератора) или механизма (в случае двигателя).

4.2. Обмотки якорей и ЭДС машины постоянного тока

Обмотки якорей машины постоянного тока изготавливают из

изолированных медных проводов, а в машинах больших мощностей – из шин прямоугольного поперечного сечения; обмотки выполняются замкнутыми. При изготовлении обмотки из шин прямоугольного поперечного сечения (стержней) каждая секция может состоять из двух активных проводов (одновитковая секция). Из изолированного медного провода секции обмоток изготавливают в виде катушек с определенным числом витков (многовитковые секции). В машинах постоянного тока наиболее широкое применение находят двухслойные обмотки, у которых в пазах якоря активные части секций размещаются в два слоя (рис. 4.10).

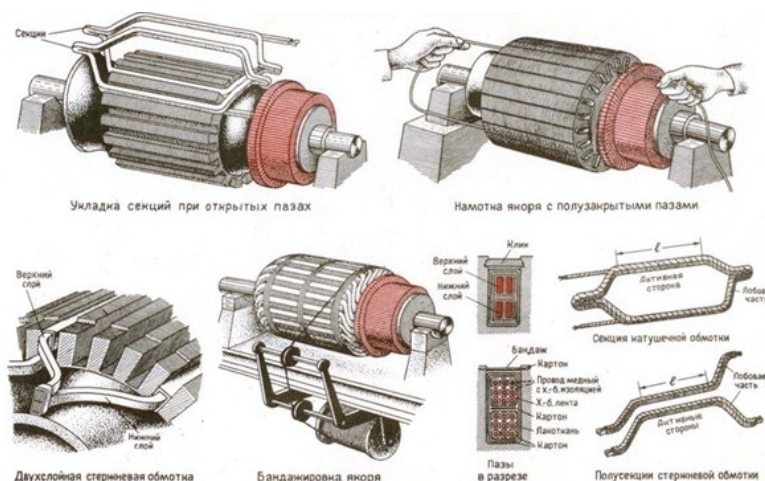


Рис. 4.10. Обмотка якоря

Кольцевой якорь в настоящее время не применяется, так как внутренние стороны спиральной обмотки не участвуют в образовании ЭДС, а только соединяют между собой активные проводники, лежащие на его внешней стороне. Обмотка используется не полностью. В применяемом сейчас барабанном якоря все проводники обмотки размещаются только с внешней стороны якоря.

Виток обмотки состоит из двух заложённых в пазах сердечника активных сторон 1 и $1'$, имеющих лобовые соединения 3 (рис. 4.11, a). ЭДС витка будет наибольшей, если к проводнику, лежащему под северным полюсом, присоединить проводник, лежащий под южным по-

люсом. В этом случае при обходе витка ЭДС активных проводников складываются арифметически. Соединить два рядом лежащих проводника нельзя, так как их результирующая ЭДС будет равна нулю (рис. 4.11, б).

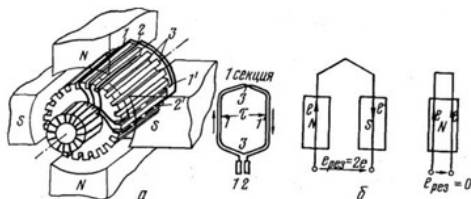


Рис. 4.11. Начало укладки двухслойной барабанной, петлевой обмотки в пазы якоря четырехполусной машины

Длина окружности якоря, приходящаяся на один полюс, называется полюсным делением и обозначается τ :

$$\tau = \frac{\pi D}{2p},$$

где D – диаметр окружности сердечника якоря;

$2p$ – число полюсов машины.

Один или несколько последовательно соединенных витков образуют секцию. Секции обмотки соединяются между собой последовательно, т. е. начало следующей секции присоединяется к концу предыдущей. В месте соединения секций делается отпайка к коллекторной пластине.

В машинах постоянного тока применяется обычно двухслойная обмотка, она укладывается во всех пазах в два слоя (рис. 4.12, а).

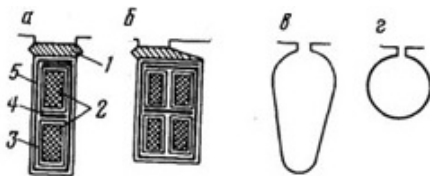


Рис. 4.12. Пазы машины постоянного тока:
а – открытый; б – полукоткрытый; в и г – полукоткрытый;
1 – клин; 2 – проводники; 3 – изоляция слоя;
4 – междуслойная изоляция; 5 – пазовая изоляция

Первые активные стороны каждой секции размещаются в верхнем слое пазов, а вторые активные стороны — в нижнем слое. При изображении развернутых схем обмоток активные стороны, лежащие в верхнем слое пазов, изображаются сплошной линией, а стороны нижнего слоя — прерывистой. Две активные стороны разных секций, располагающиеся в пазу одна над другой в верхнем и нижнем слоях, образуют элементарный паз. В действительном пазу сердечника якоря может размещаться несколько элементарных пазов (рис. 4.12, б). Пазы мощных машин выполняются открытыми (рис. 4.12, а); в машинах меньших мощностей применяются полуоткрытые и полузакрытые пазы (рис. 4.12, в, г).

ЭДС витка будет иметь максимальное значение в том случае, если его ширина y_1 (рис. 4.13) равна полюсному делению τ . Ширина витка y_1 получила название *шаг обмотки*. Обмотка, у которой шаг $y_1 = \tau$, называется *диаметральной*.

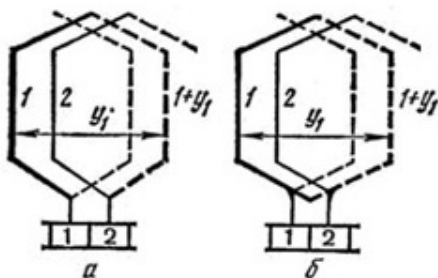


Рис. 4.13. Секция простой параллельной обмотки:
а — одновитковая; б — многовитковая

Секции, образующие обмотки, соединяются между собой так, чтобы индуктированные в них ЭДС были направлены согласно, т. е. в одну сторону. Для этого начальные (конечные) проводники последовательно соединенных секций должны находиться в любой момент под полюсами одинаковой полярности. В зависимости от порядка соединения секций друг с другом обмотки могут быть параллельными (петлевыми) и последовательными (волновыми).

На рис. 4.13 показаны (толстой линией) одновитковая (а) и многовитковая (б) секции параллельной обмотки, состоящие из активной части верхнего слоя пазов 1 и нижнего слоя пазов $1 + y_1$. В этих обмотках последовательно соединяются между собой секции

начальные (конечные), активные стороны которых находятся под одним полюсом в расположенных рядом пазах. Таким образом, концы секции параллельной обмотки присоединяются к двум соседним коллекторным пластинам ($1'$ и $2'$), причем в многовитковых секциях к пластине $1'$ подключается начало первого витка, а к пластине $2'$ – конец последнего витка, соединяемый с началом следующей секции. Любая коллекторная пластина (например, $1'$) соединяется с двумя активными проводами, в каждом из которых проходит ток одной параллельной ветви обмотки, так что между двумя щетками различной полярности обмотка образует две параллельные ветви.

При параллельных обмотках число щеток должно быть всегда равно числу полюсов $2p$ и, следовательно, число параллельных ветвей $2a$ в этих обмотках равно числу полюсов, т. е. $2a = 2p$ или $a = p$.

При большом числе полюсов параллельная обмотка образует много параллельных ветвей, что дает возможность понизить ток в одной ветви и уменьшает поперечное сечение провода обмотки.

В последовательных обмотках начальные (конечные) активные провода секций находятся под различными полюсами одинаковой полярности (рис. 4.14).

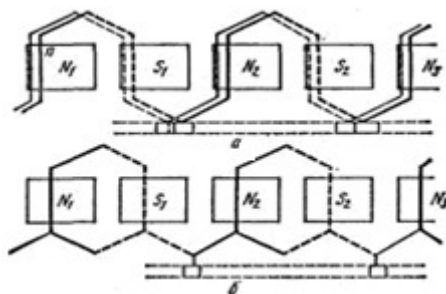


Рис. 4.14. Развернутая схема секций простой последовательной обмотки:
 a – одновитковая; b – многовитковая

Активные стороны первой секции находятся под полюсами N_1 и S_2 . Активные стороны второй секции, последовательно соединенной с первой, находятся под полюсами N_2 - S_2 , третьей секции – под полюсами N_3 и S_3 и т. д. После включения всех секций по окружности якоря соединяется верхний проводник пары $n-1$, лежащей рядом (обычно слева), с проводником пары n , от которого начали обход обмотки. Последовательно с верхним проводником пары $n-1$ включаем проводни-

ки, лежащие под полюсами S_1, N_2, S_2 и т. д. по окружности якоря, и заканчиваем проводником, лежащим рядом с проводником $n-1$. Затем вновь соединяем пары проводников, находящиеся под различными полюсами по окружности якоря и т. д., пока все проводники не окажутся включенными в замкнутую цепь. Вне зависимости от числа полюсов простая последовательная обмотка образует две параллельные ветви, т. е. $2a = 2$. Поэтому при любом числе полюсов машина может иметь только две щетки, если обмотка якоря последовательная, причем эти щетки должны помещаться на расстоянии $1/2p$ части окружности коллектора. Например, при $p = 2$ расстояние между щетками должно быть равно четверти окружности коллектора. Это дает возможность делать доступной для осмотра не всю окружность коллектора, а только ее часть.

Наличие только двух параллельных ветвей свидетельствует о том, что в каждой ветви последовательно соединяется большое число активных проводов и ЭДС машины может иметь большое значение. Поэтому последовательные обмотки находят применение для машин высокого напряжения (до 500 кВт).

В проводнике, перемещающемся в магнитном поле в направлении, перпендикулярном направлению магнитных линий этого поля, создается ЭДС:

$$e = Blv,$$

где B – среднее значение магнитной индукции, Тл;

l – длина проводника, м;

v – скорость перемещения проводника, м/с.

На якоре машины укладывается большое число активных проводников, которое обозначим буквой N . В каждой параллельной ветви обмотки будет последовательно включено $N/2a$ активных проводника. Таким образом, ЭДС машины будет равна

$$E = eN/2a = BlvN/2a.$$

Скорость перемещения проводников в магнитном поле определяется диаметром якоря D :

$$v = \pi D \frac{n}{60},$$

где n – частота вращения якоря, об/мин.

Выразив длину окружности якоря через полюсное деление τ , получим

$$\nu = 2p\tau n/60.$$

Имея в виду, что произведение среднего значения магнитной индукции B на осевую длину полюса l и на полюсное деление τ представляет собой магнитный поток одного полюса

$$\Phi = Bl\tau,$$

получим для ЭДС машины следующее выражение:

$$E = \frac{pN}{60a} n\Phi.$$

Для каждой машины величины p , N и a постоянны, так что отношение $pN/60a = C$ представляет собой величину, постоянную для данной машины. Следовательно, ЭДС машины постоянного тока определяется следующим выражением:

$$E = Cn\Phi,$$

т. е. ЭДС машины постоянного тока равна произведению постоянной конструктивной величины C на частоту вращения якоря в минуту n и магнитный поток полюсов Φ . Это выражение показывает, что для изменения ЭДС (или напряжения) машины необходимо изменить либо частоту вращения якоря, либо магнитный поток полюсов. Так как изменение частоты вращения двигателя, приводящего в движение генератор, связано со значительными сложностями, на практике регулировку ЭДС и напряжения производят изменением магнитного потока, который зависит от тока в обмотке возбуждения. В цепь обмотки возбуждения включают реостат для изменения тока возбуждения.

4.3. Электромагнитный момент машины постоянного тока

Принцип действия машины постоянного тока основан на явлениях электромагнитной индукции (при движении проводника в магнитном поле в нем наводится ЭДС) и электромагнитной силы (на проводник с током в магнитном поле действует сила $F = BU$). Рассмотрим его на примере машины с кольцевым якорем (рис. 4.15, а).

На сердечнике якоря размещена обмотка, состоящая, например, из четырех витков. Все витки соединены последовательно и образуют замкнутый контур. Начало одного и конец следующего витка подсоединены к одной и той же пластине коллектора. Щетки на коллекторе де-

лят обмотку на две равные части – на две параллельные ветви, верхнюю и нижнюю. В каждой ветви последовательно соединены два витка.

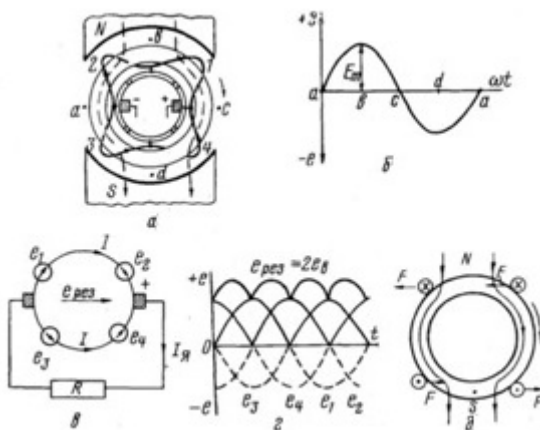


Рис. 4.15. Принцип работы машины постоянного тока:
 а – устройство; б – график ЭДС витка; в – схема замещения обмотки;
 г – график ЭДС обмотки; д – направление электромагнитных сил

При вращении якоря наружные (активные) стороны витков пересекают магнитные силовые линии и в них, согласно закону электромагнитной индукции, возбуждается ЭДС. Направление ЭДС определим по правилу правой руки. Изменение ЭДС в одном витке за один оборот якоря показано на рис. 4.15, б. За начало отсчета принят момент времени, когда виток 1 находился в точке а и ЭДС в нем была равна нулю (виток не пересекал магнитных силовых линий). Через четверть оборота (точка б) ЭДС e_1 имеет максимальное значение, через пол-оборота (точка с) $e_1 = 0$. После пересечения геометрической нейтрали ас ЭДС в витке изменяет направление – в точке d она имеет отрицательный максимум, в точке а – снова равна нулю. ЭДС в витке изменяется по синусоидальному закону.

Рассмотрим, как изменяется ЭДС ветви (напряжение на щетках). Обмотку с наведенными ЭДС можно представить в виде электрической схемы (рис. 4.15, в). Так как витки сдвинуты по окружности якоря на 90° , то ЭДС в них сдвинуты по фазе (во времени) на четверть периода (рис. 4.15, г). Результирующая ЭДС ветви при вращении якоря

равна сумме мгновенных значений ЭДС тех двух витков, которые окажутся в этот момент времени в одной ветви. Для положения якоря, указанного на рис. 4.15, *a*

$$e_{\text{рез}} = e_1 + e_2.$$

Следует обратить внимание на то, что в одной ветви находятся витки только с одинаковым направлением ЭДС. Когда в витке 1 ЭДС e_1 получит отрицательное направление, виток перейдет в нижнюю ветвь, а на его место, в верхнюю ветвь, придет виток 3, ЭДС в котором будет иметь положительное направление. Результирующая ЭДС, т. е. ЭДС ветви $e_{\text{рез}}$, постоянна по направлению, по величине она несколько изменяется, пульсирует (рис. 4.15, *з*, см. $e_{\text{рез}}$). При большом (десятки или сотни) количестве витков и пластин коллектора пульсации уменьшаются и напряжение на щетках практически постоянное.

Коллектор играет роль механического переключателя. Он переключает витки обмотки при изменении знака ЭДС в витке из одной параллельной ветви в другую и таким образом превращает переменные ЭДС отдельных витков в постоянное напряжение на щетках.

Токи ветвей, верхней и нижней, складываясь, образуют ток якоря, здесь $I_{\text{я}} = 2I$. В общем случае, если число ветвей $2a$, ток в якоре

$$I_{\text{я}} = 2aI.$$

ЭДС обмотки равна ЭДС отдельной параллельной ветви (рис. 9.15, *в*).

Если к щеткам, скользящим по коллектору вращающегося якоря, подключить сопротивление R (рис. 4.15), то ЭДС создаст ток в цепи якоря. Машина будет работать в качестве *генератора*. Напряжение U на его зажимах меньше ЭДС E на величину падения напряжения во внутреннем сопротивлении якоря $R_{\text{я}}$:

$$U = E - R_{\text{я}}I_{\text{я}}.$$

На проводник с током в магнитном поле действует сила Ампера. Применив правило левой руки к рис. 4.15, *д*, найдем, что электромагнитные силы создают тормозной момент, так как направление сил противоположно направлению вращения якоря. Вращающий момент первичного двигателя, приводящего якорь во вращение, должен преодолевать тормозной электромагнитный момент генератора.

Подадим на щетки неподвижного якоря напряжение сети U . В обмотке возникнет ток, и на каждый проводник будут действовать силы Ампера. Они приведут якорь во вращение. Машина начнет работать в

режиме *электродвигателя*. Но во всяком проводнике, движущемся в магнитном поле, возникает ЭДС. При указанном на рис. 4.15 направлении токов якорь будет вращаться против движения часовой стрелки. По правилу правой руки найдем, что направление ЭДС в якоре двигателя противоположно направлению тока. Поэтому ЭДС двигателя называют *противо-ЭДС*. Приложенное к зажимам двигателя напряжение уравнивает противо-ЭДС и падение напряжения на внутреннем сопротивлении якоря:

$$U = E + R_{\text{я}} I_{\text{я}}.$$

Одна и та же машина постоянного тока может работать как генератором, так и двигателем. Это свойство называется *обратимостью* машины.

Один проводник обмотки при диаметре якоря D создает электромагнитный момент (рис. 4.15, δ):

$$M_1 = \frac{D}{2} F.$$

Суммарный момент всей обмотки, имеющей N проводников:

$$M_1 = \frac{D}{2} F N.$$

Подставив среднее значение силы $F = B_{\text{ср}} I l$, где $B_{\text{ср}} = \Phi/S$ – среднее значение индукции под полюсом, ток в проводнике $I = I_{\text{я}}/2a$ и диаметр якоря D , выраженный через длину полюсного деления, получим:

$$M_1 = \frac{\tau p}{\pi} B_{\text{ср}} l \frac{I_{\text{я}}}{2a} N.$$

Учитывая, что магнитный поток одного полюса

$$\Phi = B_{\text{ср}} l \tau = B_{\text{ср}} S_{\text{пол}},$$

получим

$$M = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_{\text{я}},$$

где конструктивная постоянная машины

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

Тогда окончательно получим:

$$M = C_M \Phi I_a.$$

Электромагнитный момент машины постоянного тока определяется величиной и направлением магнитного потока и тока в якоре. В генераторах это тормозной момент, у двигателей – вращающий момент.

4.4. Реакция якоря

При холостом ходе машины тока в обмотке якоря нет, магнитное поле Φ_0 создается только обмоткой возбуждения (рис. 4.16, а). Оно симметрично относительно оси полюсов и распределяется равномерно в воздушном зазоре. Предположим, что щетки установлены на геометрической нейтрали, т. е. на линии, проходящей через центр якоря и перпендикулярной оси полюсов.

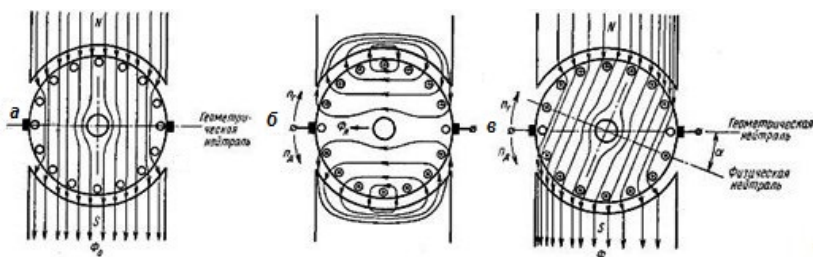


Рис. 4.16. Магнитное поле машины постоянного тока:

а – магнитное поле полюсов; б – магнитное поле якоря;
в – результирующее магнитное поле при нагрузке

При нагрузке машины в обмотке якоря протекает ток, который создает свое магнитное поле Φ_a (рис. 4.16, б). Магнитный поток якоря направлен по линии, на которой расположены щетки. Если щетки расположены на геометрической нейтрали, то поток якоря направлен перпендикулярно основному магнитному потоку и поэтому называется *поперечным магнитным потоком*.

Магнитные силовые линии замыкаются вокруг проводников обмотки через сталь якоря и полюсов. Так как направление токов в проводниках между щетками неизменно, то поле вращающегося якоря оказывается неподвижным относительно щеток и полюсов возбуждения. Сам якорь становится магнитом, ось магнита совпадает с линией

щеток. Влияние магнитного поля якоря на поле полюсов называется *реакцией якоря*.

Наложением двух магнитных полей – поля полюсов и поля якоря – создается результирующее магнитное поле (рис. 4.16, в). При этом под одним краем полюса (под набегающим для генератора и под сбегающим для двигателя) магнитные линии якоря и полюса будут направлены встречно и поэтому здесь создается ослабление магнитного поля; а под другим краем полюса (под сбегающим для генератора и под набегающим для двигателя) силовые линии направлены одинаково, и магнитное поле усиливается. Таким образом, под одним краем полюса результирующий магнитный поток Φ увеличивается по сравнению с основным магнитным потоком, под другим краем полюса – уменьшается. В результате он становится несимметричным по отношению к осевой линии полюсов.

Физическая нейтраль – линия, проходящая через центр якоря и проводники обмотки якоря, в которых индуцируемая результирующим магнитным потоком ЭДС равна нулю. Данная линия поворачивается на угол α по отношению к геометрической нейтрали (в сторону опережения у генераторов, в сторону отставания – у двигателей). При холостном ходе физическая нейтраль совпадает с геометрической.

В результате реакции якоря магнитная индукция в зазоре машины становится еще более неравномерной. В проводниках якоря, находящихся в точках повышенной магнитной индукции, индуцируется большая ЭДС, что приводит к увеличению разности потенциалов между соседними пластинами коллектора и возникновению искрения на коллекторе. Иногда электрическая дуга перекрывает весь коллектор, образуя «круговой огонь».

Кроме того, реакция якоря приводит к уменьшению ЭДС якоря, если машина работает в области, близкой к насыщению. Это связано с тем, что когда основной магнитный поток Φ_0 создает насыщенное состояние магнитопровода, увеличение магнитного потока на $+\Delta\Phi$ под одним краем полюса будет меньшим, чем уменьшение на $-\Delta\Phi$ под другим (рис. 4.17). Это приводит к уменьшению суммарного потока полюса и ЭДС якоря, так как

$$E = Cn\Phi.$$

Отрицательное влияние реакции якоря можно уменьшить, сдвигая щетки на физическую нейтраль. При этом поток якоря поворачивается на угол α и встречный поток под набегающим краем полюса генерато-

ра уменьшается. Сдвиг щеток осуществляют у генератора по направлению вращения якоря, а у двигателя – против направления вращения якоря. Угол α меняется с изменением тока якоря $I_{\text{я}}$. На практике щетки обычно устанавливают на угол, соответствующий средней нагрузке.

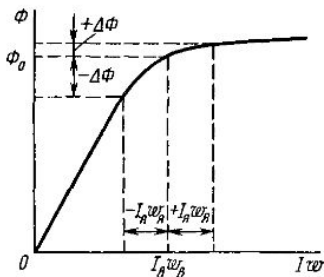


Рис. 4.17. Ослабление магнитного поля реакцией якоря вследствие насыщения

Также для ослабления реакции якоря можно увеличить воздушный зазор между якорем и полюсами.

В машинах средней и большой мощностей применяют компенсационную обмотку, расположенную в пазах главных полюсов (см. рис. 4.4) и включаемую последовательно с обмоткой якоря так, чтобы ее магнитный поток $\Phi_{\text{к}}$ был противоположен магнитному потоку $\Phi_{\text{я}}$. Если при этом $\Phi_{\text{к}} = \Phi_{\text{я}}$, то магнитный поток в воздушном зазоре из-за реакции якоря практически не искажается.

4.5. Коммутация тока

Из рис. 4.15 видно, что при вращении якоря секции обмотки поочередно переходят из одной ветви якоря в другую. Переключение секции из одной ветви якоря в другую называется **коммутацией** (от лат. *commutatio* – изменение). Под коммутацией в широком смысле слова понимаются все явления и процессы, возникающие под щеткой при работе машины.

На рис. 4.18 показана развертка части обмотки якоря, состоящей из четырех проводников, части коллектора (две коллекторные пластины) и щетки. Проводники 2 и 3 образуют коммутируемый виток, который на рис. 4.18, а показан в положении, которое он занимает до коммутации, на рис. 4.18, в – после коммутации, а на рис. 4.18, б – в период

коммутации. Коллектор и обмотка якоря вращаются в указанном стрелкой направлении с частотой вращения n , щетка неподвижна.

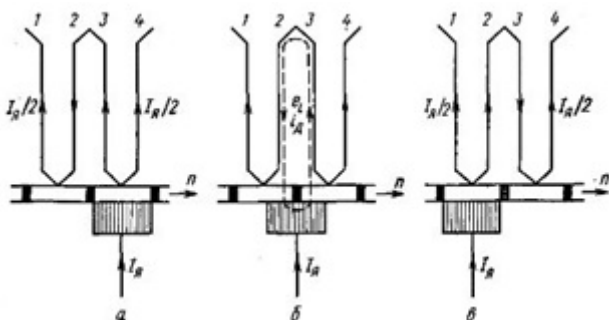


Рис. 4.18. Схема процесса коммутации

В момент времени до коммутации ток якоря $I_я$ проходит через щетку, правую коллекторную пластину и разделяется между параллельными ветвями обмотки якоря пополам. Одна ветвь состоит из проводников 1, 2 и 3, а вторая – из проводника 4.

После коммутации проводники 2 и 3 перешли в другую параллельную ветвь и направление тока в них изменилось на противоположное. Это изменение произошло за время, равное периоду коммутации $T_к$, т. е. за время, которое требуется, чтобы щетка перешла с правой пластины на соседнюю левую (в действительности щетка перекрывает сразу несколько пластин коллектора, но в принципе это не влияет на процесс коммутации).

Период коммутации тем больше, чем шире щетка и чем медленнее вращается коллектор (якорь):

$$T_к = \frac{b_{щ}}{v_к},$$

где $b_{щ}$ – ширина щетки, м;

$v_к$ – окружная скорость коллектора, м/с.

Период коммутации длится тысячные доли секунды.

Один из моментов периода коммутации показан на рис. 4.18, б. Коммутируемый виток оказывается замкнутым накоротко коллекторными пластинами и щеткой. Так как за период коммутации происходит изменение направления тока в витке 2–3, то это означает, что по

витку протекает переменный ток, создающий переменный магнитный поток.

Последний индуцирует в коммутируемом витке ЭДС самоиндукции e_L :

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

где L – индуктивность секции.

Согласно принципу Ленца, ЭДС самоиндукции стремится поддерживать в проводнике ток прежнего направления. Следовательно, направление e_L совпадает с направлением тока в витке до коммутации.

Под действием ЭДС самоиндукции в короткозамкнутом витке 2–3 протекает большой дополнительный ток i_d , так как сопротивление контура мало. В месте контакта щетки с левой пластиной ток i_d направлен противоположно току якоря, а в месте контакта щетки с правой пластиной направление этих токов совпадает.

Чем ближе к окончанию периода коммутации, тем меньше площадь контакта щетки с правой пластиной и тем больше плотность тока. По окончании периода коммутации контакт щетки с правой пластиной разрывается и образуется электрическая дуга. Чем больше ток i_d , тем мощнее электрическая дуга.

Так как в действительности щетка замыкает не одну, а 2–3 коллекторные пластины, то в коммутации участвуют одновременно еще 2–3 секции. Изменение тока в них вызывает в рассматриваемой секции ЭДС взаимной индукции e_m . Результирующая ЭДС самоиндукции и взаимной индукции называется **реактивной ЭДС**:

$$e_p = e_L + e_m.$$

Если щетки располагаются на геометрической нейтрали, то в коммутируемом витке магнитным потоком якоря индуцируется ЭДС вращения $e_{вр}$. На рис. 4.19 в увеличенном масштабе показаны проводники коммутируемого витка, расположенные на геометрической нейтрали, и направление ЭДС самоиндукции e_L для генератора, совпадающее с направлением тока якоря в этом проводнике до коммутации.

Направление $e_{вр}$ определяется по правилу правой руки и всегда совпадает с направлением e_L . В результате i_d еще больше увеличивается. Возникающая электрическая дуга между щеткой и коллекторной пластиной может разрушить поверхность коллектора, в результате чего ухудшается контакт между щеткой и коллектором.

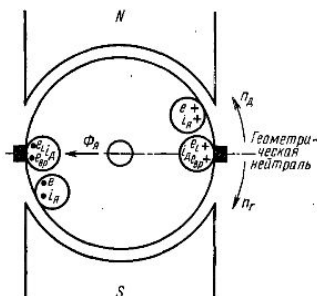


Рис. 4.19. Направление ЭДС в коммутируемом витке

Реактивные ЭДС, препятствуя изменениям тока, вызывают неравномерное распределение плотности тока под щеткой, что является причиной образования искрения, которое особенно интенсивно в момент размыкания щеткой секции обмотки. Чрезмерная плотность тока при наличии разности потенциалов между щеткой и коллектором приводит к образованию дугового разряда, который ионизирует тончайшие слои воздуха, находящегося между щеткой и коллектором и способствует развитию дуги. Дуга может перейти к щетке другой полярности, образовав круговой огонь на коллекторе (рис. 4.20), и это приведет к повреждению последнего.



Рис. 4.20. Круговой огонь на коллекторе

Искрение щеток может быть также вызвано рядом других причин: неровностью поверхности коллектора, биением щеток, загрязненностью поверхности коллектора, наличием влаги на ней и т. д. Даже незначительное искрение щеток нежелательно, так как увеличивается износ щеток и коллектора и повышается нагрев последнего вследствие

увеличения переходного сопротивления между щеткой и коллектором.

Для улучшения условий коммутации в машинах малой мощности (до 1 кВт) сдвигают щетки в сторону физической нейтрали. При расположении щеток на физической нейтрали коммутируемый виток не пересекает никакого внешнего магнитного потока и ЭДС вращения не индуцируется. Если сдвинуть щетки дальше физической нейтрали, как показано на рис. 4.21, то в коммутируемом витке результирующий магнитный поток будет индуцировать компенсирующую ЭДС e_k , направление которой противоположно направлению ЭДС самоиндукции e_L .

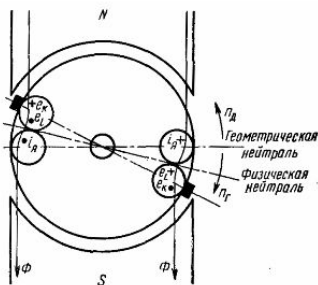


Рис. 4.21. Направление ЭДС в коммутируемом витке при сдвиге щеток за физическую нейтраль

Для устранения искрения, вызванного коммутацией, необходимо скомпенсировать реактивную ЭДС e_p и ЭДС вращения $e_{вр}$:

$$e_p + e_{вр} + e_k = 0.$$

Таким образом будет скомпенсирована не только ЭДС вращения, но и ЭДС самоиндукции (частично или полностью). Как указывалось ранее, угол сдвига физической нейтрали все время меняется, и поэтому щетки обычно устанавливают со сдвигом на некоторый средний угол по отношению к ней.

Уменьшение ЭДС в коммутируемом витке приводит к уменьшению тока i_d и ослаблению электрического разряда между щеткой и коллекторной пластиной.

Улучшить условия коммутации машин постоянного тока мощностью 1 кВт и выше можно установкой добавочных полюсов ($N_{дп}$ и $S_{дп}$ на рис. 4.22). Добавочный полюс располагают по геометрической

нейтрали. У генераторов одноименный добавочный полюс располагается за основным полюсом по ходу вращения якоря, а у двигателя – наоборот. Обмотки добавочных полюсов включают последовательно с обмоткой якоря таким образом, чтобы создаваемый ими поток $\Phi_{дп}$ был направлен навстречу потоку якоря Φ_a .

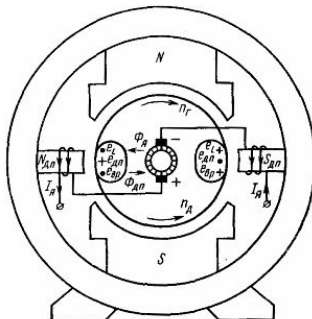


Рис. 4.22. Схема включения обмоток добавочных полюсов

Так как оба эти потока создаются одним током (током якоря), то можно подобрать число витков обмотки добавочных полюсов и воздушный зазор между ними и якорем такими, чтобы потоки были равны по значению при любом токе якоря. Поток добавочных полюсов будет всегда компенсировать поток якоря и, таким образом, ЭДС вращения в коммутируемом витке будет отсутствовать.

В некоторых современных двигателях постоянного тока применены следующие решения: обмотки якоря и индуктора меняются местами: первую размещают на статоре, вторую – на роторе. Скользящий контакт при этом остается, но из-за низкой нагрузки в обмотке возбуждения он намного проще и надежнее коллекторно-щеточного. Переключение между обмотками якоря, теперь расположенного в неподвижной части, осуществляется при помощи полупроводниковых ключей, срабатывающих по сигналу датчика положения ротора, т. е. коллектор заменен электронным переключателем. Такие двигатели называют бесколлекторными, за рубежом – BLDC-двигателями.

4.6. Способы возбуждения генераторов постоянного тока

Генераторы постоянного тока могут быть выполнены с магнитным

и электромагнитным возбуждением. Для создания магнитного потока в генераторах с магнитным возбуждением используют постоянные магниты, а в генераторах с электромагнитным возбуждением – электромагниты. Постоянные магниты применяют лишь в машинах очень малых мощностей (рис. 4.23).

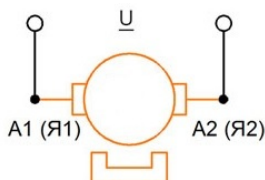


Рис. 4.23. Схема МПТ с постоянными магнитами

Генераторы с магнитным возбуждением практически не применяются, тогда как коллекторный двигатель постоянного тока с постоянными магнитами является наиболее распространенным. Индуктор этого двигателя включает постоянные магниты, которые создают магнитное поле статора. Такие двигатели обычно используются в задачах, не требующих больших мощностей. Они дешевле в производстве, чем коллекторные двигатели с обмотками возбуждения. При этом вращающий момент ограничен полем постоянных магнитов статора. Двигатель с постоянными магнитами очень быстро реагирует на изменение напряжения. Благодаря постоянному полю статора легко управлять скоростью двигателя. Недостатком является то, что со временем магниты теряют свои магнитные свойства, в результате чего уменьшается поле статора, и снижаются характеристики двигателя.

Таким образом, электромагнитное возбуждение является наиболее широко используемым способом для создания магнитного потока. При этом способе возбуждения магнитный поток создается током, проходящим по обмотке возбуждения.

В зависимости от способа питания обмотки возбуждения генераторы постоянного тока могут быть с независимым возбуждением и с самовозбуждением.

При независимом возбуждении (рис. 4.24, а) обмотки индуктора и якоря не имеют электрического соединения.

У генераторов этого типа обмотку возбуждения питает сеть постоянного тока, аккумулятор или специально предназначенный для этого генератор – возбудитель. Мощность последнего – несколько сотых

мощности основного генератора. Областью применения генераторов с независимым возбуждением являются системы значительной мощности, где напряжение на обмотке возбуждения существенно отличается от генерируемого, поэтому питание обмотки возбуждения от цепи якоря недопустимо по конструктивным соображениям, а также системы регулирования скорости вращения двигателей, запитанных от генераторов.

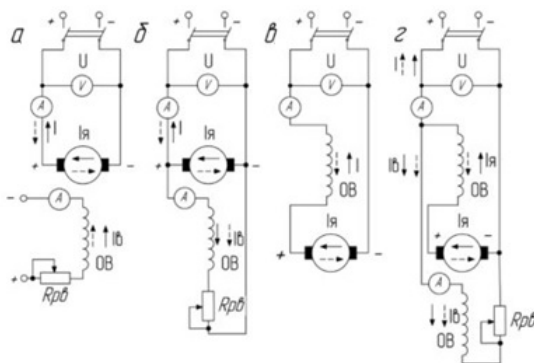


Рис. 4.24. Способы возбуждения МПТ

У двигателей с независимым возбуждением запитана и якорная обмотка. В основном это также агрегаты большой мощности. Независимость обмотки индуктора позволяет удобнее и экономичнее регулировать ток возбуждения. Еще одна особенность таких моторов – постоянство магнитного потока возбуждения при любой нагрузке на валу. Если напряжение на обмотке возбуждения равно напряжению обмотки якоря, то их подключают параллельно друг другу.

Генераторы с самовозбуждением в зависимости от включения обмотки возбуждения могут быть параллельного (рис. 4.24, б), последовательного (рис. 4.24, в) и смешанного (рис. 4.24, г) возбуждения.

У генераторов параллельного возбуждения обмотки индуктора и якоря соединены в одну цепь параллельно друг другу. При этом ток мал (несколько процентов от номинального тока якоря) и обмотка возбуждения имеет большое число витков. Генераторы этого типа обычно применяются для средних мощностей.

В двигателях с параллельным возбуждением на индуктор подается то же напряжение и от того же источника питания, что и на якорь. По своим характеристикам они идентичны моторам с независимым

возбуждением и обладают следующими особенностями: при изменении нагрузки частота вращения практически не трансформируется (замедление составляет не более 8 % при переводе от холостого хода к номинальной нагрузке); можно с минимальными потерями регулировать частоту вращения, причем в широких пределах (двукратно, а у специально сконструированных моторов и шестикратно). Индуктор вращающегося двигателя с параллельным возбуждением нельзя отсоединять от цепи якоря, даже если он уже отключен. Это приведет к наведению значительной ЭДС в обмотке возбуждения с последующим выходом мотора из строя. Находящийся рядом персонал может получить травму.

У генераторов последовательного возбуждения ток возбуждения равен току якоря и обмотка возбуждения имеет малое количество витков. Генераторы этого типа почти не применяются, поскольку процесс самовозбуждения происходит достаточно бурно и устройство не способно обеспечить необходимое большинству потребителей постоянство напряжения. Их используют только в специальных установках.

Двигатели этого типа широко применяют в качестве тяговых (электровозы, троллейбусы, краны и пр.): по сравнению с аналогами параллельного возбуждения при нагрузке они дают более высокий вращающий момент с одновременным уменьшением скорости вращения. Пусковой момент также высок. Недопустимо включать двигатели последовательного возбуждения в сеть в режиме холостого хода (без нагрузки на валу) или с нагрузкой менее 25 % от номинальной, так как при малых нагрузках частота вращения якоря резко возрастает, достигая значений, при которых возможно механическое разрушение двигателя, поэтому в приводах с двигателями последовательного возбуждения недопустимо применять ременную передачу, при обрыве которой двигатель переходит в режим холостого хода. Исключение составляют двигатели последовательного возбуждения мощностью до 100–200 Вт, которые могут работать в режиме холостого хода, так как их мощность механических и магнитных потерь при больших частотах вращения соизмерима с номинальной мощностью двигателя.

При смешанном возбуждении на полюсах генератора помещаются две обмотки возбуждения – параллельная и последовательная. Существует два вида схемы: основная обмотка индуктора включена параллельно с якорной, вспомогательная – последовательно; основная обмотка индуктора включена последовательно с якорной, вспомогательная – параллельно. Подключение параллельной обмотки до последова-

тельной называют *коротким шунтом*, за последовательной – *длинным шунтом*.

Генераторы этого типа применяются крайне редко. Двигатели сочетают в себе достоинства аналогов с параллельным и последовательным возбуждением: способны работать на холостом ходу и при этом развивают значительное тяговое усилие. Однако в настоящее время они почти не применяются.

Процесс самовозбуждения генераторов постоянного тока протекает одинаково при любой схеме возбуждения. Рассмотрим, например, процесс самовозбуждения в генераторах параллельного возбуждения, получивших наиболее широкое применение. Какой-либо первичный двигатель вращает якорь генератора, магнитная цепь (ядро и сердечники полюсов) которого имеет небольшой остаточный магнитный поток Φ_0 . Этим магнитным потоком в обмотке вращающегося якоря индуцируется ЭДС E_0 , составляющая несколько процентов от номинального напряжения машины.

Под действием ЭДС E_0 в замкнутой цепи, состоящей из якоря и обмотки возбуждения, проходит ток I_b . Магнитодвижущая сила обмотки возбуждения ωI_b (где ω – число витков) направлена согласно с потоком остаточного магнетизма и увеличивает магнитный поток машины Φ , вызывая повышение как ЭДС в обмотке якоря E , так и тока в обмотке возбуждения I_b . Увеличение последнего приводит к дальнейшему возрастанию Φ , что, в свою очередь, увеличивает E и I_b .

Из-за насыщения стали магнитной цепи машины самовозбуждение происходит не беспрестанно, а до какого-то определенного напряжения, зависящего от частоты вращения якоря машины и сопротивления в цепи обмотки возбуждения. При насыщении стали магнитной цепи увеличение магнитного потока замедляется и процесс самовозбуждения заканчивается. Увеличение сопротивления в цепи обмотки возбуждения уменьшает как ток в ней, так и магнитный поток, возбуждаемый этим током. Поэтому уменьшаются ЭДС и напряжение, до которого возбуждается генератор.

Напряжение, так же как и ЭДС, прямо пропорционально частоте, вследствие чего с изменением частоты вращения изменяется и напряжение, до которого возбуждается генератор.

4.7. Пуск двигателей постоянного тока

Для пуска двигателя могут быть применены три способа: прямой

пуск, реостатный пуск, пуск путем изменения питающего напряжения.

При прямом пуске обмотка якоря подключается непосредственно к сети. Обычно в электродвигателях постоянного тока падение напряжения $I_{\text{я}}R_{\text{я}}$ во внутреннем сопротивлении цепи обмотки якоря при номинальном токе составляет 5–10 % от $U_{\text{н}}$, поэтому при прямом пуске ток $I_{\text{я}} = U_{\text{н}}/R_{\text{я}} = (10\text{--}20)I_{\text{н}}$, что недопустимо для машины. По этой причине прямой пуск применяют только для двигателей очень малой мощности (до нескольких сотен ватт), в которых сопротивление $R_{\text{я}}$ относительно велико, и лишь в отдельных случаях – для двигателей мощностью в несколько киловатт. При прямом пуске таких двигателей пусковой ток $I_{\text{п}} = (4\text{--}6)I_{\text{н}}$.

Для маломощных двигателей (до 1 кВт) при условии отсутствия нагрузки на валу можно применить прямой пуск, потому что масса движущихся частей двигателя невелика, а сопротивление обмотки относительно большое. При прямом пуске таких двигателей пусковые токи не превышают значений $(3\text{--}5)I_{\text{н}}$, что для таких двигателей не критично.

Когда двигатель работает при постоянном напряжении и сопротивлении обмотки якоря, ток в якоре можно найти с помощью формулы

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E_{\text{пр}}}{R_{\text{я}}},$$

где U – напряжение питающей сети, В;

$E_{\text{пр}}$ – противо-ЭДС, В;

$R_{\text{я}}$ – сопротивление обмотки якоря, Ом.

Противо-ЭДС $E_{\text{пр}}$ возникает при вращении якоря в магнитном поле статора, при этом в двигателе она направлена против якоря. Но когда якорь двигателя неподвижен, $E_{\text{пр}} = 0$, а значит, выражение для тока примет следующий вид:

$$I_{\text{я}} = \frac{U}{R_{\text{я}}}.$$

Это и есть выражение для определения пускового тока.

Глядя на формулу, можно прийти к выводу, что добиться снижения пускового тока возможно либо снижением напряжения, либо увеличением сопротивления якорной обмотки.

Рассмотрим более подробно способ пуска двигателя постоянного тока с помощью введения дополнительного сопротивления в цепь яко-

ря. При этом пусковой ток будет равен:

$$I_{\text{я}} = \frac{U}{R_{\text{я}} + R_{\text{д}}}.$$

Таким образом можно добиться величины пускового тока в нужном диапазоне, безопасном для двигателя. Добавочное сопротивление может быть как в виде реостата, так и в виде нескольких резисторов. Это необходимо для того, чтобы в процессе запуска двигателя менять сопротивление в якорной цепи.

Следует знать, что с дополнительным сопротивлением в обмотке якоря двигатель работает не на естественной, а на более мягкой искусственной характеристике, которая не подходит для нормальной работы двигателя.

Пусковой реостат выполняется из провода или ленты с высоким удельным сопротивлением, разделенных на секции. Провода присоединяются к медным кнопочным или плоским контактам в местах перехода от одной секции к другой. По контактам перемещается медная щетка поворотного рычага реостата. Реостаты могут иметь и другое выполнение. Они рассчитаны на кратковременный режим работы. Разделение на секции дает возможность ступенчато изменять ток в якоре двигателя в процессе пуска его в ход.

Схема пуска двигателя параллельного возбуждения с пусковым реостатом приведена на рис. 4.25, а.

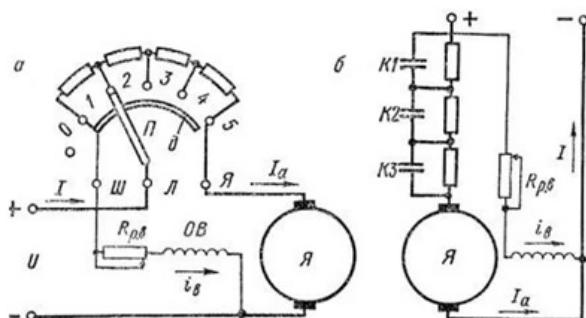


Рис. 4.25. Схема пуска двигателя параллельного возбуждения:
а – с помощью пускового реостата; б – с помощью пусковых сопротивлений

Пусковой реостат данного двигателя имеет три зажима, обозначае-

мые буквами *Л*, *Я* и *Ш*. Зажим *Л* соединен с движком реостата и подключается к одному из полюсов рубильника (к линии). Зажим *Я* соединяется с сопротивлением реостата и подключается к зажиму якоря. Зажим *Ш* соединен с неподвижной контактной дугой δ , помещенной на реостате (шунт). Подвижный контакт пускового реостата *П* скользит по контактной дуге δ так, что между ними имеется непрерывный контакт. К зажиму *Ш* через регулировочное сопротивление $R_{\text{рв}}$ присоединяется обмотка возбуждения. Вторые зажимы якоря и обмотки возбуждения соединены между собой перемычкой и подключены ко второму полюсу рубильника, включающего двигатель в сеть.

При пуске в ход включается рубильник и подвижный контакт реостата *П* переводится на контакт 1, так что последовательно с якорем соединены все четыре секции пускового реостата, т. е. его полное сопротивление, которое выбирается таким, чтобы наибольший пусковой ток был равен $I_{\text{max}} \leq (1,7-2,5)I_{\text{н}}$.

По обмотке возбуждения также будет проходить ток, возбуждающий магнитный поток. В результате взаимодействия магнитных полей якоря и обмотки возбуждения создается пусковой момент. Если пусковой момент больше тормозного момента на валу двигателя, то якорь машины начнет вращаться. Под действием инерции частота вращения не может изменяться мгновенно, поэтому увеличение будет происходить постепенно. Также возрастет и противо-ЭДС, что вызовет уменьшение тока в якоря и вращающего момента двигателя.

Когда ток в якоря уменьшится до минимального значения $I_{\text{min}} = (1,1-1,3)I_{\text{н}}$, подвижный контакт реостата *П* переводится на контакт 2. При этом сопротивление пускового реостата уменьшится на одну ступень, что увеличит ток. Сопротивление всех ступеней пускового реостата выбирают так, чтобы при переводе подвижного контакта с одного контакта на другой ток в якоря изменялся от I_{min} до I_{max} .

С увеличением тока в якоря возрастает вращающий момент, вследствие чего частота вращения вновь увеличивается. С увеличением частоты вращения якоря возрастает противо-ЭДС, что вызывает уменьшение тока в якоря. Когда ток в якоря вновь достигнет значения I_{min} , подвижный контакт реостата *П* переводится на контакт 3.

Таким образом, сопротивление пускового реостата постепенно (ступенями) уменьшается, пока оно полностью не будет выведено (подвижный контакт реостата *П* переводится на контакт 5), и в рабочем режиме ток и частота вращения якоря принимают установившиеся значения, соответствующие тормозному моменту на валу двигателя.

Механическая характеристика пуска двигателя с помощью четырехступенчатого пускового реостата будет выглядеть следующим образом (рис. 4.26).

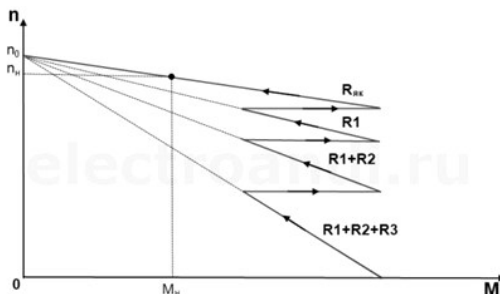


Рис. 4.26. Механическая характеристика пуска двигателя с помощью четырехступенчатого пускового реостата

На первой ступени, когда подключенное сопротивление максимально и равно $R_1 + R_2 + R_3$, двигатель начинает свой разгон. После достижения определенной точки, которую получают с помощью расчетных данных, сопротивление R_3 шунтируют. При этом двигатель переходит на новую характеристику и разгоняется на ней все до той же точки. Таким образом двигатель выходит на естественную характеристику, не пострадав от действия больших пусковых токов и моментов.

Число ступеней пускового реостата зависит от разности $I_{\max} - I_{\min}$, причем чем меньше разность этих токов, тем больше число ступеней. Обычно пусковые реостаты имеют число ступеней в пределах 2–7. При пуске двигателя в ход регулировочное сопротивление $R_{\text{рв}}$ (рис. 4.25, б) в цепи обмотки возбуждения должно быть полностью выведено, т. е. ток возбуждения должен быть наибольшим, что дает возможность уменьшить пусковой ток. Для пуска двигателя необходимо создать пусковой момент, больший тормозного момента на валу.

Подвижный контакт пускового реостата Π соединен с контактом 1. Это необходимо для того, чтобы при отключении двигателя от сети не было разрыва цепи обмотки возбуждения, имеющей значительную индуктивность. При отключении двигателя подвижный контакт переводится на холостой контакт 0 и рубильник отключается. При этом обмотка возбуждения будет замкнута на сопротивление пускового реостата и якоря, что дает возможность избежать перенапряжений и дугообразования.

Автоматизировать переключение пускового реостата неудобно. Поэтому в автоматизированных установках вместо пускового реостата используют пусковые сопротивления, которые поочередно шунтируются контактами $K1$, $K2$, $K3$ автоматически работающих контакторов. Для упрощения схемы и уменьшения количества аппаратов число ступеней принимается минимальным (у двигателей малой мощности обычно 1–2 ступени).

Реостатный пуск применяют на электровозах и электропоездах постоянного тока.

При приблизительно постоянной массе поезда, характерной для электропоездов, выключение ступеней пускового реостата производят автоматически. Для этой цели на электропоездах предусмотрено специальное реле ускорения (реле минимального тока), срабатывающее, когда пусковой ток уменьшается до установленного значения, и тем самым обеспечивающее замыкание соответствующих контакторов. На электровозах ступени пускового реостата выключаются по мере увеличения скорости движения поезда непосредственно самим машинистом при помощи ручного аппарата, называемого контроллером машиниста. Однако на некоторых электровозах применяют автоматическое выключение ступеней пусковых реостатов с той или иной скоростью.

При реостатном пуске возникают довольно большие потери энергии в пусковом реостате. Этот недостаток можно устранить, если пускать двигатель путем плавного повышения напряжения, подаваемого на обмотку якоря. Такой пуск называют *безреостатным*. Для этого необходимо иметь отдельный источник постоянного тока с регулируемым напряжением (генератор или управляемый выпрямитель). Безреостатный пуск применяют на электроподвижных составах переменного тока и тепловозах.

4.8. Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока

Двигатели постоянного тока получили широкое распространение и часто являются незаменимыми благодаря ценному свойству – возможности плавно и экономично регулировать частоту вращения в широких пределах.

Частота вращения якоря двигателя при любой схеме возбуждения определяется следующим выражением:

$$n = \frac{U - I(R_{\text{я}} - R_{\text{с}})}{C\Phi},$$

где $R_{\text{с}}$ – сопротивление последовательной обмотки возбуждения (для двигателя параллельного возбуждения $R_{\text{с}} = 0$), Ом.

Это выражение показывает, что частота вращения двигателя зависит от напряжения питающей сети, сопротивления цепи якоря и магнитного потока.

Частоту вращения регулируют путем *изменения напряжения сети* в том случае, когда источником электрической энергии является какой-либо генератор.

Угловая скорость двигателя постоянного тока независимо от нагрузки изменяется прямо пропорционально напряжению, подводимому к якорю. Поскольку все регулировочные характеристики являются жесткими, а степень их жесткости остается для всех характеристик неизменной, работа двигателя является стабильной на всех угловых скоростях и, следовательно, обеспечивается широкий диапазон регулирования скорости независимо от нагрузки. Этот диапазон равен 10 и может быть расширен за счет специальных схем управления.

При данном способе угловую скорость можно уменьшать и увеличивать относительно основной. Повышение скорости ограничено возможностями источника энергии с регулируемым напряжением и номинальным напряжением двигателя.

Если источник энергии обеспечивает возможность непрерывного изменения подводимого к двигателю напряжения, то регулирование скорости двигателя будет плавным.

Данный способ регулирования является экономичным, так как регулирование угловой скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения осуществляется без дополнительных потерь мощности в силовой цепи якоря и обеспечивает плавное регулирование в широком диапазоне $n_{\text{max}}/n_{\text{min}} \geq 25$. Наибольшая частота вращения здесь ограничивается условиями коммутации, а наименьшая – условиями охлаждения двигателя. Еще одним достоинством рассматриваемого способа регулирования является то, что он допускает безреостатный пуск двигателя при пониженном напряжении.

Разновидностью регулирования частоты вращения изменением подводимого к цепи якоря напряжения является импульсное регулирование, применяемое для двигателей постоянного тока с независимым возбуждением.

Для регулирования частоты вращения двигателя *изменением сопротивления цепи якоря* используют регулировочный реостат, включенный последовательно с якорем. В отличие от пускового, регулировочный реостат должен быть рассчитан на длительное прохождение тока.

В сопротивлении регулировочного реостата происходит большая потеря энергии, т. е. такой способ регулирования частоты вращения является неэкономичным, к тому же он используется только под нагрузкой, при этом вращающий момент остается постоянным. Частоту вращения можно изменять только в сторону уменьшения, при этом диапазон регулирования ограничен, так как при снижении частоты вращения до $0,5n_n$ стабильность работы двигателя резко ухудшается. Трудно обеспечить плавность регулирования, так как требуется значительное количество ступеней регулирования и соответственно большое число контактов. Все это приводит к уменьшению КПД двигателя.

Достоинством рассмотренного способа регулирования являются простота и надежность схемы управления.

Учитывая большие потери в реостате при малых скоростях, данный способ регулирования частоты вращения применяется для приводов с кратковременным и повторно-кратковременным режимами работы.

Регулирование частоты вращения двигателя *изменением величины магнитного потока* осуществляется за счет введения в цепь обмотки возбуждения дополнительного регулировочного реостата (при параллельном и смешанном возбуждении) или шунтированием обмотки возбуждения регулируемым сопротивлением (при последовательном возбуждении). При ослаблении магнитного потока частота вращения двигателя как при нагрузке, так и при холостом ходе возрастает, а при усилении потока — уменьшается. Практически возможно изменение скорости только в сторону увеличения ввиду насыщения двигателя.

При ослаблении магнитного потока допустимый момент двигателя изменяется по закону гиперболы, а мощность остается постоянной. Диапазон регулирования скорости для данного способа $n_{\max}/n_{\min} = 2-4$. Регулирование осуществляется плавно.

Существенными преимуществами данного способа регулирования скорости являются его простота и высокая экономичность.

Данный способ регулирования используют в приводах в качестве вспомогательного, обеспечивающего повышение частоты вращения при холостом ходе механизма.

4.9. Потери и КПД машин постоянного тока

В машинах постоянного тока при работе происходит потеря энергии, которая складывается из трех составляющих.

Первой составляющей являются **потери в стали** $P_{ст}$ на гистерезис и вихревые токи, возникающие в сердечнике якоря. При вращении якоря машины сталь его сердечника непрерывно перемагничивается. На его перемагничивание затрачивается мощность, называемая потерями на гистерезис. Одновременно при вращении якоря в магнитном поле в сердечнике его индуктируются вихревые токи. Потери на гистерезис и вихревые токи, называемые потерями в стали, обращаются в тепло и нагревают сердечник якоря.

Потери в стали зависят от магнитной индукции и частоты перемагничивания сердечника якоря.

Магнитная индукция определяет ЭДС машины или, иначе, напряжение, а частота перемагничивания зависит от частоты вращения якоря. Поэтому при работе машины постоянного тока в режиме генератора или двигателя потери в стали будут постоянными, не зависящими от нагрузки, если напряжение на зажимах якоря и частота его вращения постоянны.

Ко второй составляющей относятся потери энергии на нагревание проводов обмоток возбуждения и якоря протекающими по ним токами, называемыми **потерями в обмотках** $P_{обм}$.

Потери в обмотке якоря и в щеточных контактах зависят от тока в якоре, т. е. являются переменными — меняются при изменениях нагрузки.

Третья составляющая — **механические потери** $P_{мех}$, представляющие собой потери энергии на трение в подшипниках, трение вращающихся частей о воздух и щеток о коллектор. Эти потери зависят от частоты вращения якоря машины. Поэтому механические потери также постоянны и не зависят от нагрузки.

КПД машины определяется по формуле

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 \%,$$

где P_2 — полезная мощность, Вт;

P_1 — потребляемая мощность, Вт.

При работе машины постоянного тока в качестве генератора полезная мощность равна:

$$P_2 = UI,$$

где U – напряжение на зажимах генератора, В;

I – ток при нагрузке генератора, А.

Потребляемая мощность определится из выражения

$$P_1 = P_2 + P_{\text{ст}} + P_{\text{обм}} + P_{\text{мех}} = UI + P_{\text{ст}} + P_{\text{обм}} + P_{\text{мех}},$$

а КПД

$$\eta = \frac{UI}{UI + P_{\text{ст}} + P_{\text{обм}} + P_{\text{мех}}} \cdot 100 \, \%.$$

При работе машины постоянного тока в качестве двигателя потребляемая мощность равна:

$$P_1 = UI,$$

где U – напряжение питающей сети, В;

I – ток, потребляемый двигателем из сети, А.

Полезная мощность определится из выражения

$$P_2 = P_1 - P_{\text{ст}} - P_{\text{обм}} - P_{\text{мех}} = UI - P_{\text{ст}} - P_{\text{обм}} - P_{\text{мех}},$$

а КПД

$$\eta = \frac{UI - P_{\text{ст}} - P_{\text{обм}} - P_{\text{мех}}}{UI} \cdot 100 \, \%.$$

4.10. Универсальные двигатели

Универсальный двигатель – вращающийся электродвигатель, который может работать при питании от сети как постоянного, так и однофазного переменного тока.

Конструкция универсального коллекторного электродвигателя (рис. 4.27) не имеет принципиальных отличий от конструкции коллекторного электродвигателя постоянного тока с обмотками возбуждения, за исключением того, что вся магнитная система (и статор, и ротор) выполняется шихтованной и обмотка возбуждения делается секционированной. Шихтованная конструкция и статора, и ротора обусловлена тем, что при работе на переменном токе их пронизывают переменные магнитные потоки, вызывая значительные магнитные потери.

Секционирование обмотки возбуждения вызвано необходимостью изменения числа витков обмотки возбуждения с целью сближения рабочих характеристик при работе электродвигателя от сетей постоянного и переменного тока.

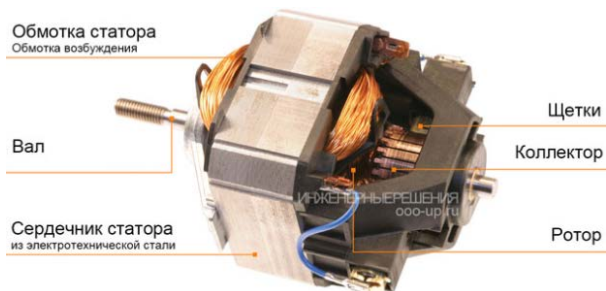


Рис. 4.27. Конструкция универсального двигателя

Универсальный коллекторный электродвигатель может быть выполнен как с последовательным, так и с параллельным и независимым возбуждением. В настоящее время универсальные коллекторные электродвигатели выполняют только с последовательным возбуждением (рис. 4.28).

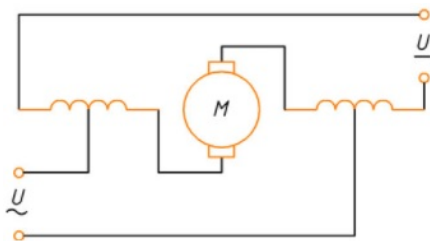


Рис. 4.28. Схема универсального коллекторного двигателя

Возможность работы универсального двигателя от сети переменного тока объясняется тем, что при изменении полярности подводимого напряжения изменяются направления токов в обмотке якоря и обмотке возбуждения. При этом изменение полярности полюсов статора практически совпадает с изменением направления тока в обмотке якоря. В итоге направление электромагнитного вращающего момента не изменяется.

У двигателя последовательного возбуждения ток якоря является и током возбуждения, что обеспечивает почти одновременное изменение направления тока в обмотке якоря и магнитного потока возбуждения при переходе от положительного полупериода переменного напряжения сети к отрицательному.

Коэффициент полезного действия универсального двигателя при его работе от сети переменного тока более низкий, чем при его работе от сети постоянного тока. Другой недостаток универсального двигателя – тяжелые условия коммутации, вызывающие интенсивное искрение на коллекторе при включении двигателя в сеть переменного тока. Этот недостаток объясняется наличием трансформаторной связи между обмотками возбуждения и якоря, что ведет к наведению в коммутируемых секциях трансформаторной ЭДС, ухудшающей процесс коммутации в двигателе.

Наличие щеточно-коллекторного узла является причиной ряда недостатков универсальных коллекторных двигателей, особенно при их работе на переменном токе (искрение на коллекторе, радиопомехи, повышенный шум, невысокая надежность). Однако эти двигатели по сравнению с асинхронными и синхронными при частоте питающего напряжения $f = 50$ Гц позволяют получать частоту вращения до 10000 об/мин и более (наибольшая синхронная частота вращения при $f = 50$ Гц равна 3000 об/мин).

Благодаря тому, что универсальный двигатель может иметь высокую скорость вращения при работе от однофазной сети переменного тока без использования дополнительных преобразовательных устройств, он получил широкое применение в таких домашних приборах, как пылесосы, блендеры, фены и др. Также универсальный электродвигатель широко используется в таких инструментах, как дрели и шуруповерты.

Благодаря тому, что скорость вращения универсального двигателя легко регулируется изменением величины питающего напряжения, ранее он широко использовался в стиральных машинах. Сейчас благодаря развитию преобразовательной техники более широкое использование получают бесщеточные электродвигатели (синхронные и асинхронные), скорость вращения которых регулируется изменением частоты напряжения питающей сети.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Список рекомендуемой литературы	3
Лекция 1. Трансформаторы	4
1.1. Общие сведения о трансформаторах	4
1.2. Принцип действия и устройство трансформатора	6
1.3. Работа трансформатора под нагрузкой	10
1.4. Трехфазные трансформаторы	13
1.5. Опыты холостого хода и короткого замыкания	18
1.6. КПД трансформатора	20
1.7. Автотрансформаторы	22
1.8. Измерительные трансформаторы	25
1.9. Специальные трансформаторы	27
Лекция 2. Асинхронные двигатели	29
2.1. Общие сведения об электрических машинах	29
2.2. Принцип действия асинхронного двигателя	31
2.3. Устройство асинхронного двигателя	33
2.4. Работа асинхронного двигателя под нагрузкой	38
2.5. Вращающий момент асинхронного двигателя	41
2.6. Рабочие характеристики асинхронного двигателя	43
2.7. Пуск в ход асинхронных двигателей	45
2.8. Двигатели с улучшенными пусковыми свойствами	50
2.9. Регулирование частоты вращения трехфазных асинхронных двигателей	53
2.10. Принцип действия однофазных асинхронных двигателей	57
2.11. Пуск в ход однофазных асинхронных двигателей	62
Лекция 3. Синхронные машины	68
3.1. Принцип действия синхронного генератора	68
3.2. Устройство синхронного генератора	70
3.3. Работа синхронного генератора под нагрузкой	72
3.4. Конструкции синхронных двигателей	76
3.5. Пуск в ход синхронных двигателей	84
Лекция 4. Машины постоянного тока	86
4.1. Принцип действия и устройство машины постоянного тока	86
4.2. Обмотки якорей и ЭДС машины постоянного тока	93
4.3. Электромагнитный момент машины постоянного тока	99
4.4. Реакция якоря	103
4.5. Коммутация тока	105
4.6. Способы возбуждения генераторов постоянного тока	110
4.7. Пуск двигателей постоянного тока	114
4.8. Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока	119
4.9. Потери и КПД машин постоянного тока	122
4.10. Универсальные двигатели	123

Учебное издание

Пузевич Константин Леонидович

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

ТРАНСФОРМАТОРЫ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Курс лекций

Редактор *О. Г. Толмачёва*

Технический редактор *Н. Л. Якубовская*

Подписано в печать 11.11.2022. Формат 60×84 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная.

Ризография. Гарнитура «Таймс». Усл. печ. л.. Уч.-изд. л..

Тираж 40 экз. Заказ .

УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия».

Свидетельство о ГРИРПИ № 1/52 от 09.10.2013.

Ул. Мичурина, 13, 213407, г. Горки.

Отпечатано в УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия».

Ул. Мичурина, 5, 213407, г. Горки.