

Министерство образования и науки Российской Федерации
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Кузбасский государственный технический университет»

С. Г. ФИЛИМОНОВ

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Учебное пособие

Кемерово 2010

УДК 621.313

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

Кафедра автоматизации производственных процессов и АСУ Кемеровского технологического института пищевой промышленности (зав. кафедрой АПП и АСУ кандидат технических наук, доцент А. В. Чупин)

Академик РАЕН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электромеханики Сибирского государственного индустриального университета Е. В. Пугачев

Филимонов, С. Г. Электрические машины переменного тока : учеб. пособие / С. Г. Филимонов ; Кузбас. гос. техн. ун-т. – Кемерово, 2010. – 193 с. ISBN 978-5-89070-772-7

Рассматриваются конструкция и принцип действия основных типов индуктивных электрических машин переменного тока, механические, электро-механические и рабочие характеристики, а также методологические основы расчета режимов их работы и математического моделирования.

Книга подготовлена в качестве учебного пособия для студентов технических университетов, обучающихся по специальности «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов» (140604), может быть использована для подготовки дипломированных специалистов по направлению «Электроснабжение» (140211).

Печатается по решению редакционно-издательского совета Кузбасского государственного технического университета.

УДК 621.313

© Кузбасский государственный
технический университет,
2010

ISBN 978-5-89070-772-7

© Филимонов С. Г., 2010

ПРЕДИСЛОВИЕ

Цель подготовки учебного пособия – в наиболее доступной форме ознакомить студентов с современными взглядами на математическое описание и устройство индуктивных электрических машин переменного тока, различающихся по конструкции и принципу действия. Изложенный материал базируется на использовании теории обобщенного электромеханического преобразователя энергии, рассмотренной ранее в первой части пособия.

При подготовке настоящего учебного пособия и его первой части, а также лекционного курса по данной дисциплине автором за основу приняты монографии известных специалистов в области электромеханики и электрических машин.

Содержание учебного пособия соответствует требованиям Государственных образовательных стандартов, определяющих объем и содержание лекционных курсов по электрическим машинам переменного тока по специальности «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов» (140604) и направлению «Электроснабжение» (140211).

Учебное пособие может быть полезно студентам и другим электротехническим специальностям при подготовке к экзаменам и выполнении курсовых работ.

Принцип действия большинства машин переменного тока основан на использовании вращающегося магнитного поля, создаваемого неподвижными многофазными обмотками статора. По конструкции машины переменного тока подразделяются на асинхронные, синхронные и коллекторные.

1. АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Асинхронной машиной называется двухобмоточная электрическая машина переменного тока, у которой только одна обмотка (первичная) получает питание от электрической сети переменного тока с частотой f_1 , а вторая обмотка (вторичная) замыкается накоротко или на электрические сопротивления.

Токи во вторичной обмотке появляются в результате электромагнитной индукции. Их частота f_2 является функцией угловой скорости ротора ω_r , которая в свою очередь зависит от вращающего электромагнитного момента, созданного в воздушном зазоре неподвижными относительно друг друга магнитными полями первичной и вторичной обмоток.

Асинхронные машины, как наиболее дешёвые, прочные и простые в изготовлении электромеханические преобразователи энергии, получили самое массовое распространение во всех отраслях промышленности. В количественном отношении они составляют около 90 % всего мирового парка электрических машин мощностью более 750 Вт, а по суммарной установленной мощности на их долю приходится по разным источникам от 40 до 55 % мирового парка электрических машин.

1.1. История создания асинхронной машины

В 1824 г. Ф. Д. Араго опытным путем обнаружил, что медный диск приводится во вращение вращающимся рядом с ним на одной оси постоянным магнитом. Это явление в 1831 г. объяснил Фарадей, открыв закон электромагнитной индукции.

Однако в опытах Ф. Д. Араго медный диск приводился в движение вращающимся постоянным магнитом, а не вращающимся полем, создаваемым неподвижным устройством, каким в современных машинах является статор. Практическое применение открытие

Араго нашло лишь в 1888 г., когда Г. Феррарис и Н. Тесла независимо друг от друга запатентовали устройства, содержащие две катушки, расположенные под углом 90° друг к другу, питаемые одинаковыми синусоидальными токами, сдвинутыми по фазе относительно друг друга на 90° , и создающие круговое вращающееся магнитное поле. Вектор индукции такого магнитного поля в точке пересечения осей катушек равномерно вращается, не изменяясь по амплитуде. Асинхронный двигатель Н. Теслы имел сосредоточенные обмотки на статоре и роторе, а это приводило к зависимости пускового момента двигателя от начального положения ротора. Ротор двухфазного асинхронного двигателя Феррариса представлял собой медный цилиндр, а сам двигатель развивал мощность всего 3 Вт. Кроме того, Г. Феррарис пришел к ошибочному заключению о том, что КПД асинхронного двигателя не может превышать 50 %, и это заметно охладило у промышленников интерес к идее асинхронной машины.

Российский исследователь М. О. Доливо-Добровольский не согласился с мнением Г. Феррариса и занялся разработкой конструкции асинхронного двигателя, питающегося от предложенной им трехфазной системы переменного тока.

За короткий срок с 1889 по 1890 гг. им были изобретены все основные узлы трехфазной асинхронной машины, сохранившие практически неизменными свою конструкцию до настоящего времени. Это:

- короткозамкнутая обмотка ротора в виде беличьей клетки;
- статор с распределенной трехфазной обмоткой;
- фазный ротор с распределенной трехфазной обмоткой, концы которой выведены через контактные кольца и угольные щётки на статор;
- пусковой реостат, вводимый через контактные кольца в цепь обмотки фазного ротора при пуске.

1.2. Конструкция асинхронной машины

Конструктивно асинхронные машины делятся на два основных типа: с короткозамкнутым ротором и фазным ротором. Наибольшее распространение получили более простые и дешевые асинхронные машины с короткозамкнутым ротором.

Конструктивная компоновка асинхронной машины представлена на рис. 1.1. В основных чертах она совпадает с компоновкой машины постоянного тока, рассмотренной нами ранее [11], и состоит из неподвижной части – *статора*, вращающейся части – *ротора* и воздушного зазора между ними. Статор состоит из магнитопровода 5, трехфазной распределенной разноименнополюсной обмотки 8, выводные концы которой с помощью выводной коробки 2 присоединяются к сети переменного тока, и станины 7.

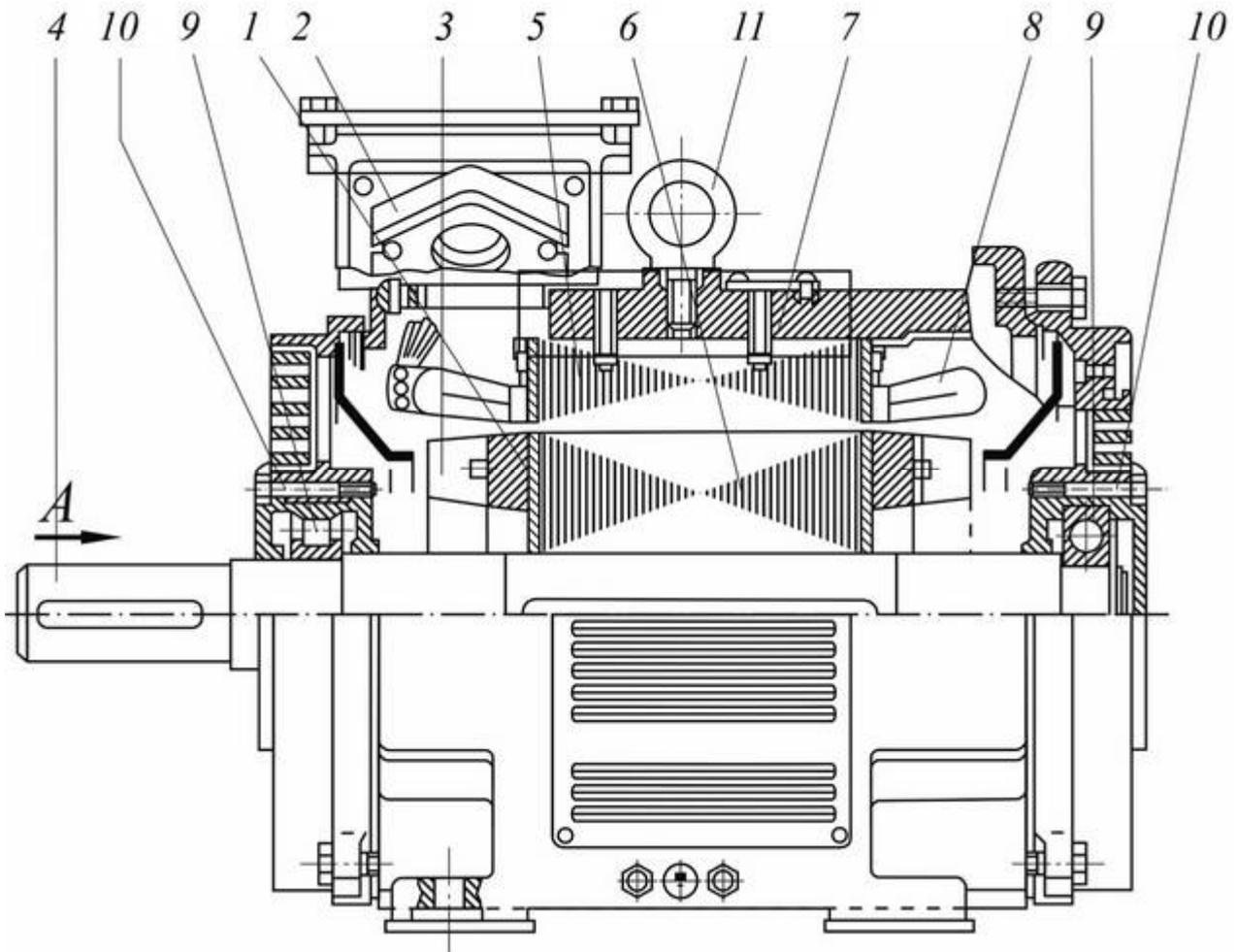


Рис. 1.1. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором

Активными элементами статора, специально предназначенными для образования вращающегося магнитного поля, являются магнитопровод 5 и обмотка 8; станина 7 выполняет только конструктивные функции, фиксируя активные части в определенном положении и неподвижно закрепляя с помощью лап саму машину относительно фундамента.

Магнитопровод статора 5 набирают из листов электротехнической стали толщиной $0,35 \div 0,5$ мм. При длине магнитопровода ста-

тора более 250÷300 мм они снабжаются радиальными вентиляционными каналами, служащими для прохода охлаждающего воздуха.

Обмотка статора 8 во всех машинах общего назначения до напряжения 660 В и мощности до 100 кВт – из круглого провода, насыпная, а при мощности более 100 кВт – из подразделенных катушек из прямоугольного провода.

В машинах малой мощности корпуса (станины) 7 выполняются из алюминия. В более мощных машинах корпуса и подшипниковые щиты 10 чугунные или стальные. В машинах большой мощности корпуса сварные из листовой стали.

Вращающаяся часть машины – ротор – состоит из магнитопровода 6 (рис. 1.1), в пазах которого размещается неизолированная, многофазная, короткозамкнутая обмотка 1, с присоединенными к ней вентиляционными лопастями 3 и вала 4. Активными элементами ротора, принимающими участие в преобразовании энергии, являются магнитопровод 6 и обмотка 1; остальные детали имеют конструктивное назначение: вал 4 передает механическую энергию к исполнительному механизму, вентиляционные лопасти 3 обеспечивают циркуляцию охлаждающей среды. Магнитопровод ротора 6 набирается из цельных кольцевых пластин, отштампованных из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм, на наружной стороне которых вырублены пазы нужной формы.

Вал ротора 4 опирается на подшипники качения 9, которые в свою очередь с помощью подшипниковых щитов 10 сопрягаются со станиной 7.

Подъем двигателя при монтаже производится с помощью рыма 11, ввинченного в станину 7.

Обмотки короткозамкнутых роторов, имеющих форму беличьей клетки (рис. 1.2, а), выполняются литыми, из алюминия или его сплавов.

При отливке одновременно отливаются стержни 5, лежащие в пазах, и короткозамыкающие кольца 2 (рис. 1.2, а) с размещенными на их торцах вентиляционными лопатками 1 и штырями для размещения балансировочных грузиков. Обмотка короткозамкнутого ротора от стали магнитопровода 3 не изолируется. Короткозамкнутые роторы крупных машин и специальных асинхронных машин с улучшенными пусковыми характеристиками выполняются сварными.

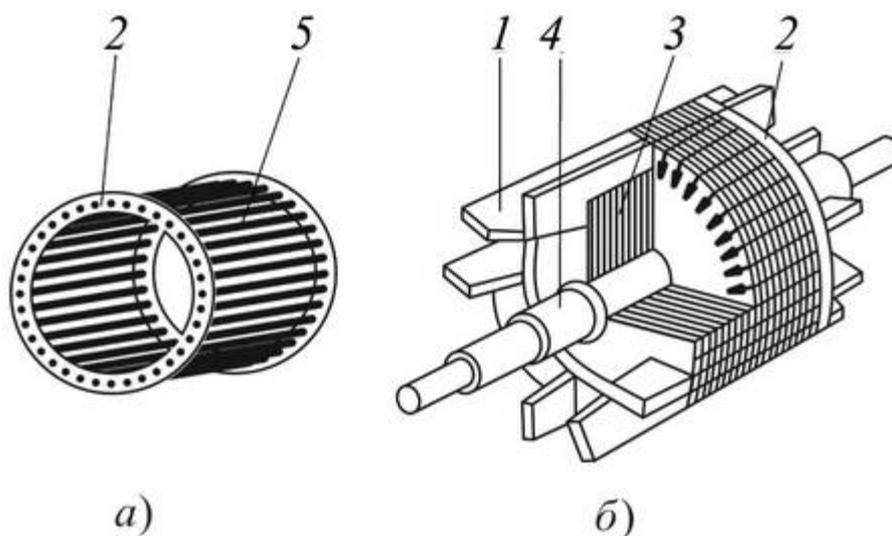


Рис. 1.2. Обмотка короткозамкнутого ротора (а) и конструкция короткозамкнутого ротора (б): 1 – вентиляционные лопатки; 2 – короткозамыкающие кольца; 3 – сердечник ротора

Стержни из меди или латуни приваривают к короткозамыкающим кольцам, имеющим отверстия, куда перед сваркой вставляют стержни обмотки, уложенные в пазы ротора. Сердечники 3 роторов двигателей с высотой вращения до 450 мм насаживаются непосредственно на вал 4 и крепят шпонкой.

1.3. Асинхронная машина с фазным ротором

Конструкционная компоновка асинхронной машины с фазным ротором и контактными кольцами представлена на рис. 1.3. Машина этого типа отличается от АД с короткозамкнутым ротором только устройством самого ротора.

Статоры асинхронных машин с фазным и короткозамкнутым ротором по конструктивному исполнению одинаковы.

Фазный ротор состоит из вала 4, на котором укреплены в запрессованном состоянии пакеты магнитопровода 3, набранные из кольцевых пластин. Радиальные вентиляционные каналы 2 между пакетами образуются дистанционными распорками, помещенными на каждом зубцовом делении. В полузакрытых пазах магнитопровода ротора размещается трехфазная двухслойная волновая стержневая обмотка б, соединенная обычно в звезду, выводные концы которой посредством электрических кабелей 7, проведенных через от-

верстие в валу 4, присоединены к изолированным медным контакт-ным кольцам 1.

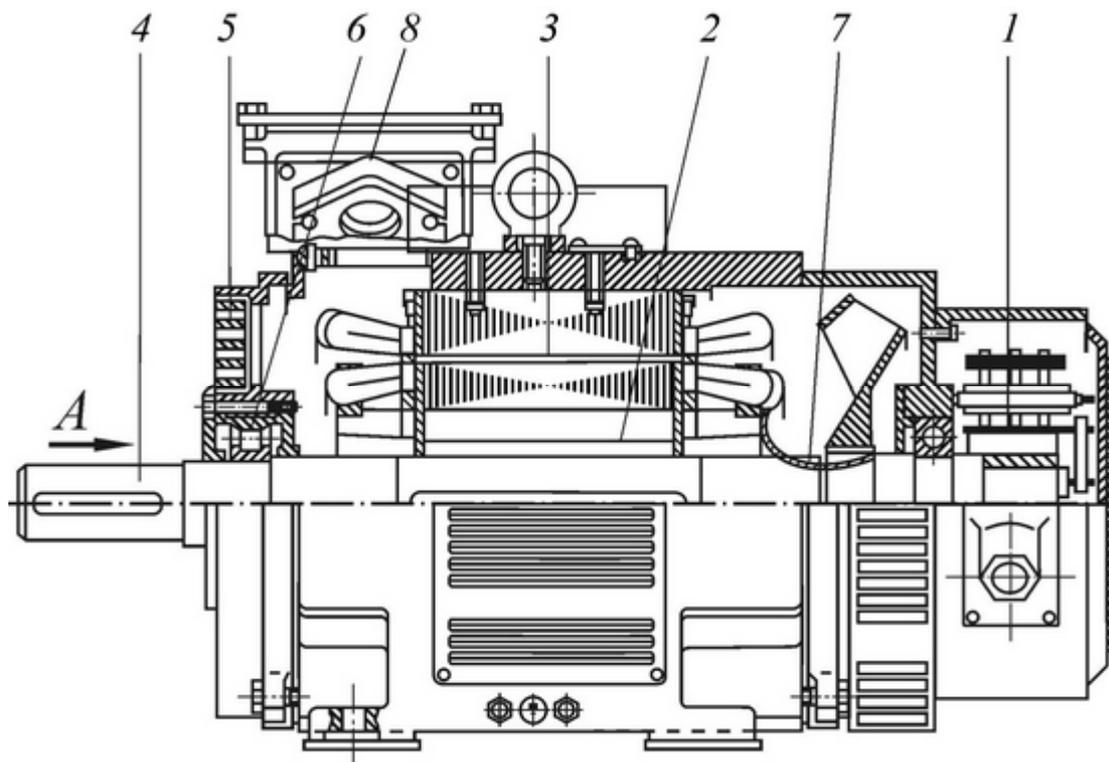


Рис. 1.3. Асинхронный двигатель с фазным ротором

Необходимый электрический контакт щеток с кольцами обеспечивается с помощью щеткодержателей, укрепленных на шинах 7. Соединение изолированных токопроводящих шин 1 щеточной траверсы с пусковым реостатом производится в выводной коробке 8.

Наружный воздух поступает в машину через отверстия в подшипниковых щитах 5. Необходимый для циркуляции воздуха напор создается радиальными каналами в роторе 2, которые играют роль центробежных вентиляторов.

Изменение сопротивления цепи фазного ротора путем введения добавочных резисторов используется для плавного пуска двигателя и для регулирования частоты вращения.

Изготовление короткозамкнутых роторов значительно проще и дешевле, чем фазных, а отсутствие контактных колец, скользящих контактов и пусковых реостатов уменьшает общие габариты машины, повышает её надежность и упрощает эксплуатацию. Поэтому большинство современных асинхронных двигателей мощностью до нескольких сотен киловатт выпускают с короткозамкнутыми роторами.

1.4. Принцип действия асинхронной машины

Преобразование энергии в асинхронных машинах происходит при несинхронном (асинхронном) вращении ротора и магнитного поля статора. Разность частот вращения ротора ω_p и поля статора ω_c определяет частоту f_2 и амплитуду ЭДС, наводимой в проводниках обмотки ротора.

Работа асинхронной машины основывается на принципе электромагнитного взаимодействия между вращающимся магнитным полем, которое создается системой трехфазного тока, подводимого от сети к обмотке статора, и магнитным полем ротора, созданным токами, наводимыми в обмотке ротора при пересечении ее проводников вращающимся полем статора. При этом оба вращающихся магнитных поля, и статора и ротора, неподвижны относительно друг друга, т. к. сумма механической частоты вращения ротора ω_p и частоты вращения поля ротора ω_2 равна частоте вращения поля статора ω_c .

Таким образом, работа асинхронной машины по своей физической сущности подобна работе трансформатора, причем статор можно рассматривать как первичную обмотку, а ротор – как вторичную, которая в общем случае может вращаться со скоростью ω_p .

Поле статора вращается с постоянной скоростью n_c , зависящей от частоты напряжения питающей сети (f_1), числа пар полюсов обмотки статора (p) и не зависящей от нагрузки:

$$n_c = \frac{f_1}{p} (с^{-1}), \quad n_c = \frac{60 f_1}{p} (\text{об/мин}) \quad \text{или} \quad \omega_c = \frac{2\pi f_1}{p} (\text{рад/с}), \quad (1.1)$$

где f_1 – частота тока питающей сети; p – число пар полюсов обмотки статора.

Ток в обмотке ротора появляется в результате электромагнитной индукции, и его частота равна разности частот вращения поля статора ω_c и ротора ω_p :

$$f_2 = \frac{\omega_c - \omega_p}{2\pi}.$$

Электромагнитное взаимодействие между обеими частями асинхронной машины возможно только при условии $\omega_c \neq \omega_p$, так как при $\omega_c = \omega_p$ вращающееся поле статора неподвижно относи-

тельно обмоток ротора и в них не наводится ЭДС, а следовательно, не создается и магнитное поле ротора.

При анализе работы асинхронной машины частоту вращения её ротора оценивают не в абсолютных единицах, а в относительных, вводя понятие *скольжение* s , определяемое как:

$$s = (\omega_c \pm \omega_p) / \omega_c.$$

Скольжение выражается либо в процентах ($s = 1,1 \%$; $2,5 \%$ и т. д.), либо в относительных долях ($s = 0,011$; $0,025$ и т. д.).

Часто при описании работы асинхронной машины по аналогии с трансформатором обозначениям параметров, принадлежащим статору, присваивают индекс «1», а параметрам, принадлежащим ротору, – индекс «2».

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Кто является изобретателем асинхронного двигателя?
2. Объясните принцип действия асинхронной машины.
3. Почему ротор асинхронного двигателя не может вращаться с частотой вращения магнитного поля статора?
4. Дайте определение скольжения асинхронной машины.
5. Как устроен асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором?
6. Как устроен асинхронный двигатель с фазным ротором?

2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ В АСИНХРОННЫХ МАШИНАХ

2.1. Описание динамических и установившихся режимов работы асинхронной машины

Для описания динамических режимов преобразования энергии в асинхронной машине воспользуемся рассмотренной ранее математической моделью обобщенного электромеханического преобразователя [11].

Если считать тепловой процесс стационарным, то дифференциальные уравнения электрического равновесия обмоток асинхронной машины и уравнение одномерного механического движения

ротора в неподвижной относительно статора системе координат α , β будут иметь вид:

$$\begin{aligned}
 u_{\alpha}^S &= r_{\alpha}^S i_{\alpha}^S + \frac{d}{dt} L_{\alpha}^S i_{\alpha}^S + \frac{d}{dt} M i_{\alpha}^r; \\
 0 &= r_{\alpha}^r i_{\alpha}^r + \frac{d}{dt} L_{\alpha}^r i_{\alpha}^r + \frac{d}{dt} M i_{\alpha}^S + \omega_r L_{\beta}^r i_{\beta}^r + \omega_r M i_{\beta}^S; \\
 0 &= r_{\beta}^r i_{\beta}^r + \frac{d}{dt} L_{\beta}^r i_{\beta}^r + \frac{d}{dt} M i_{\beta}^S - \omega_r M i_{\alpha}^S - \omega_r L_{\alpha}^r i_{\alpha}^r; \\
 u_{\beta}^S &= r_{\beta}^S i_{\beta}^S + \frac{d}{dt} L_{\beta}^S i_{\beta}^S + \frac{d}{dt} M i_{\beta}^r; \\
 J \frac{d\omega_r}{dt} &= (M_{\text{эм}} - M_c); \\
 M_{\text{эм}} &= \frac{pm}{2} M (i_{\beta}^S i_{\alpha}^r - i_{\alpha}^S i_{\beta}^r),
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

где $u_{\alpha}^S; u_{\beta}^S$ – напряжение на обмотках статора; $i_{\alpha}^S; i_{\beta}^S; i_{\alpha}^r; i_{\beta}^r$ – токи в обмотках статора и ротора по осям α , β ; $L_{\alpha}^S; L_{\alpha}^r; L_{\beta}^S; L_{\beta}^r; M$ – индуктивности обмоток статора и ротора по осям α , β и взаимная индуктивность обмоток статора и ротора; $r_{\alpha, \beta}^S, r_{\alpha, \beta}^r$ – активные сопротивления обмоток статора и ротора; m – число фаз; p – число пар полюсов; M_c – момент сопротивления на валу машины.

В асинхронной машине с короткозамкнутой обмоткой ротора напряжения $U_{\alpha}^r = 0$ и $U_{\beta}^r = 0$.

Система уравнений (2.1) описывает процессы преобразования энергии в асинхронных машинах в переходных и установившихся режимах работы и представляет собой достаточно полную динамическую модель этого процесса.

Дифференциальные уравнения (2.1) не имеют аналитического решения, т. к. содержат произведения переменных. Решения этих уравнений получают численными методами с помощью ЭВМ. Математическая модель асинхронной машины позволяет исследовать динамические процессы изменения токов, моментов, возникающих в обмотках машины при нестационарных нагрузках и при изменении амплитуды, частоты и фазы питающего напряжения $U_{\alpha}^S; U_{\beta}^S$.

В установившемся симметричном режиме работы АД, когда не только тепловой и механический, но и электромагнитный процесс становятся стационарными, т. е. синусоидальные напряжения U_α и U_β асинхронной машины имеют постоянные амплитуду, частоту и фазу, а скорость вращения $\omega_r = \text{const}$, описание процесса преобразования энергии может быть упрощено. Дифференциальное уравнение движения принимает вид тождества $M_{эм} = M_c$, а уравнения электрического равновесия могут быть записаны в символической форме. Для этого необходимо заменить оператор дифференцирования d/dt на $j\omega$.

$$\begin{aligned} \dot{U}_\alpha^s &= r_\alpha^s \dot{I}_\alpha^s + j\omega L_\alpha^s \dot{I}_\alpha^s + j\omega M \dot{I}_\alpha^r; \\ \dot{U}_\beta^s &= r_\beta^s \dot{I}_\beta^s + j\omega L_\beta^s \dot{I}_\beta^s + j\omega M \dot{I}_\beta^r; \\ 0 &= r_\beta^r \dot{I}_\beta^r + j\omega L_\beta^r \dot{I}_\beta^r + j\omega M \dot{I}_\beta^s - \omega_r L_\alpha^r \dot{I}_\alpha^r - \omega_r M \dot{I}_\alpha^s; \\ 0 &= r_\alpha^r \dot{I}_\alpha^r + j\omega L_\alpha^r \dot{I}_\alpha^r + j\omega M \dot{I}_\alpha^s + \omega_r L_\beta^r \dot{I}_\beta^r + \omega_r M \dot{I}_\beta^s. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Так как машина симметрична, то число витков, индуктивность и активные сопротивления обмоток, расположенных по осям α и β статора и ротора, равны и могут быть обозначены как:

$$\text{для статора } L_s = L_\alpha^s = L_\beta^s; \quad r_s = r_\alpha^s = r_\beta^s,$$

$$\text{для ротора } L_r = L_\alpha^r = L_\beta^r; \quad r_r = r_\alpha^r = r_\beta^r.$$

Для упрощения аналитического описания установившихся процессов в асинхронной машине представим напряжения, токи и сопротивления обмоток статора и ротора по осям α и β в векторной форме. Тогда система уравнений (2.2) запишется в виде:

$$\begin{aligned} \dot{U}_s &= r_s \dot{I}_s + j\omega L_s \dot{I}_s + j\omega M \dot{I}_r; \\ 0 &= r_r \dot{I}_r + j\omega L_r \dot{I}_r + j\omega M \dot{I}_s - M\omega_r \dot{I}_s - j\omega_r L_r \dot{I}_r. \end{aligned} \quad (2.2a)$$

Представим полные индуктивности обмоток как $L = M + L_\delta$, где M – взаимная индуктивность между обмотками статора и ротора; L_δ – индуктивность рассеяния соответствующей обмотки.

Переходя к индуктивным сопротивлениям обмоток, обозначим:

$$\begin{aligned} j\omega L_s &= j\omega M + j\omega L_\delta^s; \\ j\omega L_r &= j\omega M + j\omega L_\delta^r, \end{aligned}$$

где $\omega M = x_0$ – индуктивное сопротивление цепи намагничивания; $x_s = \omega L_s^s$ и $x_r = \omega L_r^r$ – индуктивные сопротивления рассеяния обмоток статора и ротора соответственно.

Обозначим $\omega_r / \omega_c = \gamma$ – как относительная частота вращения ротора.

Преобразуем уравнения (2.2а) с учетом принятых выше обозначений:

$$\dot{U}_s = r_s \dot{I}_s + jx_s \dot{I}_s + jx_0 \dot{I}_s + jx_0 \dot{I}_r; \quad (2.3)$$

$$0 = -r_r \dot{I}_r - jx_r \dot{I}_r - jx_0 \dot{I}_r - jx_0 \dot{I}_s + jx_0 \dot{I}_s \gamma + jx_0 \dot{I}_r \gamma + jx_r \dot{I}_r \gamma.$$

Сделав в (2.3) замену переменных $\dot{I}_0 = \dot{I}_s + \dot{I}_r$ и приведя подобные, получим:

$$\dot{U}_s = r_s \dot{I}_s + jx_s \dot{I}_s + jx_0 \dot{I}_0; \quad (2.4)$$

$$0 = -r_r \dot{I}_r + jx_r \dot{I}_r (1 - \gamma) - jx_0 \dot{I}_0 (1 - \gamma).$$

Используем выражение для скольжения: $s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} = (1 - \gamma)$,

и вводя ЭДС $E_0 = -jx_0 \dot{I}_0$, эквивалентную падению напряжения на сопротивлении в цепи намагничивания, получим уравнения асинхронной машины в комплексной форме:

$$\begin{aligned} \dot{U}_s &= -E_0 + r_s \dot{I}_s + jx_s \dot{I}_s; \\ 0 &= E_0 s - r_r \dot{I}_r + x_r \dot{I}_r s; \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_s + \dot{I}_r$$

Обозначив полное сопротивление статора и ротора как

$$Z_s = r_s + jx_s, \quad Z_r = r_r + jx_r$$

и поделив второе уравнение (2.5) на s , получим уравнения асинхронной машины в установившемся режиме работы:

$$\begin{aligned} \dot{U}_s &= -E_0 + \dot{I}_s Z_s; \\ 0 &= E_0 - \frac{r_r}{s} \dot{I}_r - jx_r \dot{I}_r; \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_s + \dot{I}_r .$$

Так как $\frac{r_r}{s} = r_r + r_r \frac{1-s}{s}$, то, подставив это выражение в (2.6), получим уравнения асинхронной машины в виде системы уравнений, похожих на уравнения математической модели трансформатора:

$$\begin{aligned} \dot{U}_s &= -\dot{E}_0 + \dot{I}_s Z_s; \\ 0 &= \dot{E}_0 - \dot{I}_r Z_r - \dot{I}_r r_r \frac{1-s}{s}; \\ \dot{I}_0 &= \dot{I}_s + \dot{I}_r. \end{aligned} \quad (2.7)$$

Согласно уравнению (2.7) процесс электрохимического преобразования энергии в асинхронной машине в установившихся режимах аналогичен процессу преобразования энергии в трансформаторе, во вторичную обмотку которого включено активное сопротивление нагрузки $Z_H = r_r \frac{1-s}{s}$. Активная мощность, выделяющаяся на этом сопротивлении, эквивалентна механической мощности на валу асинхронной машины.

2.2. Приведение параметров асинхронной машины

У реальной асинхронной машины число фаз и число витков в обмотках ротора и статора различно. Обычно в асинхронной машине, как и в трансформаторе, вторичную обмотку приводят к первичной, т. е. заменяют действительную вторичную обмотку другой, имеющей то же число фаз и число витков, шаг обмотки и количество пазов на полюс и фазу, как и первичная, при условии соблюдения законов сохранения энергии.

В уравнениях приведенной асинхронной машины по аналогии с трансформатором обозначим цепь статора индексом 1, цепь ротора – 2.

Коэффициент трансформации (он же и коэффициент приведения) ЭДС и напряжения асинхронной машины с неподвижным ротором ($s = 1$) определится как:

$$k_e = \frac{E_1}{E_2} = \frac{\sqrt{2}\pi f_1 w_1 k_{o61} \Phi_m}{\pi f_1 w_2 k_{o62} \Phi_m \sqrt{2}} = \frac{4,44 f_1 \Phi_m w_1 k_{o61}}{4,44 f_1 \Phi_m w_2 k_{o62}} = \frac{w_1 k_{o61}}{w_2 k_{o62}},$$

где w_1, w_2 – число витков обмоток статора и ротора; $k_{о61}, k_{о62}$ – обмоточные коэффициенты обмоток статора и ротора; $\dot{E}'_2 = \dot{E}_2 k_e = \dot{E}_1$.

Коэффициент трансформации токов определится из условия сохранения МДС:

$$I'_2 = \frac{I_2}{k_i} = I_2 \frac{m_2 w_2 k_{о62}}{m_1 w_1 k_{о61}}, \quad k_i = \frac{m_1 w_1 k_{о61}}{m_2 w_2 k_{о62}},$$

где m_1, m_2 – число фаз обмоток статора и ротора.

Обратите внимание, что у асинхронной машины в общем случае при $m_1 \neq m_2$ коэффициенты приведения по току и напряжению также могут быть не равны друг другу $k_i \neq k_e$.

Коэффициент приведения для сопротивлений цепи ротора k_z определяют из условия инвариантности (сохранения) активной и реактивной мощностей обмоток до и после приведения, и в общем случае для фазного ротора он равен:

$$k_z = k_e k_i = \frac{m_1 w_1^2 k_{о61}^2}{m_2 w_2^2 k_{о62}^2} = \frac{m_1}{m_2} (k_e)^2.$$

Отсюда приведенное сопротивление ротора: $\dot{Z}'_2 = Z_2 k_z$.

Короткозамкнутая обмотка образуется из стержней, лежащих по одному в каждом пазу ротора (см. рис. 2.7). В соседних стержнях наводится ЭДС и протекают токи, сдвинутые по фазе на угол $\alpha_2 = 2\pi p/Z_2$. При приведении короткозамкнутой обмотки ротора считают, что при $2p = 2$ число стержней обмотки Z_2 (оно же и число пазов ротора N_2) равно числу фаз обмотки ротора m_2 , т. е. считают: $N_2 = Z_2 = m_2$, а число витков обмотки ротора в каждой фазе $W_2 = 1/2$.

Согласно классификационным признакам (см. п. 2.1), короткозамкнутая обмотка ротора является сосредоточенной и имеет диаметральный шаг. Следовательно, ее коэффициент распределения $k_{p2} = 1$ и коэффициент укорочения $k_{y2} = 1$. При прямом пазе ротора $k_{ск2} = 1$ и, следовательно, $k_{о62} = 1$ и коэффициент приведения для сопротивления ротора можно записать как:

$$k_z = \frac{4m_1 (w_1 k_{о61})^2}{N_2}.$$

При наличии скоса пазов на роторе $k_{ск2} < 1$, следовательно, коэффициент приведения для сопротивления ротора в этом случае будет равен

$$k_{зск} = \frac{4m_1(w_1 k_{об1})^2}{N_2 k_{ск2}^2}.$$

С учетом полученных коэффициентов система уравнения приведенной асинхронной машины будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1; \\ 0 &= \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 Z'_2 - \dot{I}'_2 r'_2 \frac{1-s}{s}; \\ \dot{I}_0 &= \dot{I}_1 + \dot{I}'_2. \end{aligned} \quad (2.8)$$

2.3. Векторная диаграмма и схемы замещения асинхронной машины

Векторная диаграмма для одной фазы асинхронной машины, построенная согласно уравнениям (2.8), изображена на рис. 2.1.

Векторная диаграмма асинхронной машины отличается от векторной диаграммы трансформатора тем, что $\dot{U}'_2 = 0$, а ЭДС ротора \dot{E}'_2 уравновешивается падением напряжения на индуктивном сопротивлении ротора $-j\dot{I}'_2 x'_2$ и активном сопротивлении $\dot{I}'_2 \frac{r'_2}{s}$, которое можно представить как:

$$-\dot{I}'_2 \frac{r'_2}{s} = -(\dot{I}'_2 r'_2 + \dot{I}'_2 r'_2 \frac{1-s}{s}),$$

где $\dot{I}'_2 r'_2$ – падение напряжения на активном сопротивлении обмотки ротора; $\dot{I}'_2 r'_2 (1-s)/s$ – падение напряжения, эквивалентное механической нагрузке на валу машины.

Можно сказать, что асинхронный двигатель в электрическом отношении подобен трансформатору, работающему на чисто активную нагрузку. Учитывая, что уравнения (2.8) составлены для одной фазы, то часть активной мощности вторичной обмотки такого трансформатора с учетом числа фаз m_1 , составляющая

$$P'_2 = m_1 (\dot{I}'_2)^2 r'_2 \frac{1-s}{s},$$

представляет полную механическую мощность, развиваемую асинхронным двигателем.

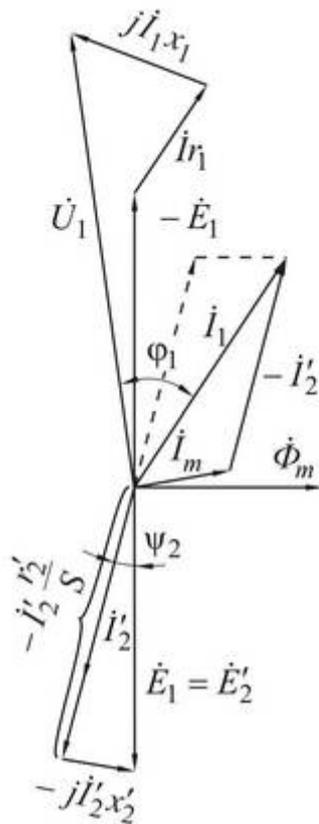


Рис. 2.1. Векторная диаграмма асинхронной машины в режиме двигателя

Векторные диаграммы при проектировании машин практически не используются, но они имеют большое методическое значение при изучении работы асинхронных машин.

Векторная диаграмма (рис. 2.1) и схема замещения (рис. 2.2) строятся для одной фазы машины на основании уравнений (2.8).

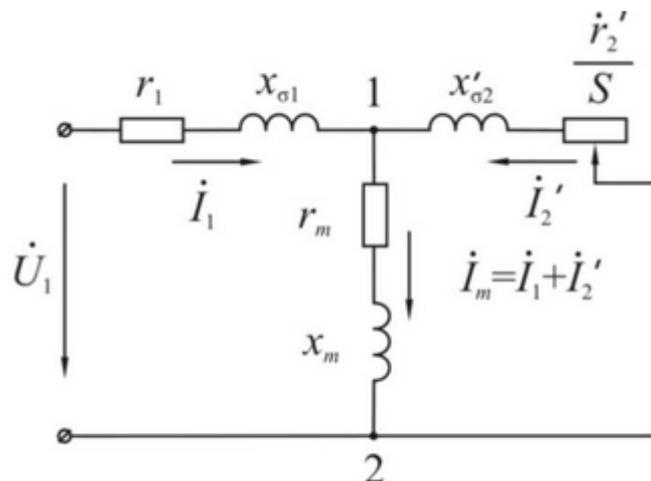


Рис. 2.2. Т-образная схема замещения асинхронной машины с учетом магнитных потерь

Падение напряжения на сопротивлении взаимной индукции X_m определяет ЭДС $\dot{E}_1 = \dot{E}'_2$.

При неподвижном роторе $s = 1$ и $f_1 = f_2$ ЭДС машины

$$E_1 = E'_2 = 4,44 f_1 w_1 k_{об1} \Phi_m.$$

Уравнениям (2.8) и векторной диаграмме (рис. 2.1) соответствует Т-образная схема замещения, состоящая из активных и индуктивных сопротивлений обмоток и цепи намагничивания (рис. 2.2).

При изменении нагрузки в асинхронной машине изменяется скольжение s и частота тока в роторе:

$$f_2 = f_1 s. \quad (2.8a)$$

При неизменном потоке Φ_m , который определяется приложенным напряжением сети \dot{U}_1 и падением напряжения на сопротивлении обмотки статора $\dot{I}_1 Z_1$, ЭДС ротора зависит от скольжения:

$$E_{2s} = 4,44 f_1 s w_2 k_{об2} \Phi_m.$$

При изменении частоты в роторе будет изменяться и индуктивное сопротивление обмотки ротора:

$$x_{2s} = 2\pi f_2 L_{\delta 2} = 2\pi f_1 s L_{\delta 2} = s x_2,$$

где $L_{\delta 2}$ – индуктивность рассеяния обмотки ротора при $s = 1$ ($f_1 = f_2$).

Изменение активного сопротивления обмотки ротора при изменении частоты f_2 у машин общепромышленной серии незначительно, и им можно пренебречь.

Параметры схемы замещения в относительных единицах (помечены знаком *) для асинхронных машин единых серий мощностью от нескольких киловатт до сотен киловатт изменяются в следующих пределах: $x^*_m = 2 \div 4$; $r^*_m = 0,08 \div 0,35$; $r^*_1 \approx r^*_2 = 0,001 \div 0,07$; $x^*_1 \approx x^*_2 = 0,08 \div 0,13$.

С увеличением мощности машины относительные значения активных сопротивлений уменьшаются, а индуктивных возрастают. Сопротивление взаимной индукции ветви намагничивания x^*_m в основном определяется воздушным зазором. Чем меньше воздушный зазор, тем больше x^*_m .

Недостаток Т-образной схемы замещения асинхронной машины заключается в следующем. С ростом нагрузки на валу машины растут токи \dot{I}'_2 и \dot{I}_1 . При этом за счет падения напряжения на сопротивлении z_1 при протекании тока \dot{I}_1 уменьшается ЭДС $\dot{E}_1 = \dot{E}'_2$, что приводит к уменьшению потока Φ_m и намагничивающего тока \dot{I}_0 .

Это изменение тока \dot{I}_0 можно не учитывать только при анализе рабочих процессов в машине с изменением скольжения в небольших пределах (при работе машины в режиме от холостого хода до номинального, т. е. при $s = 0 \dots 0,02$).

Для исследований асинхронной машины в широком диапазоне изменения скольжения более удобной схемой замещения является Г-образная схема. В Г-образной схеме при $U_1 = \text{const}$ ток \dot{I}_0 в цепи z_m остается неизменным при любых значениях скольжения s . Изменяется только ток в главной цепи \dot{I}_1 .

Поправочный комплексный коэффициент $\dot{\sigma}_1$ для параметров Г-образной схемы замещения определится как

$$\dot{\sigma}_1 = e^{j\gamma} = \frac{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_m}{\dot{Z}_m} = 1 + \frac{\dot{Z}_1}{\dot{Z}_m} = \frac{\dot{I}_2'}{\dot{I}_2''}; \quad Z_m' = Z_m \dot{\sigma}_1 = Z_1 + Z_m, \quad (2.9)$$

где $\gamma < 0$ – угол между вектором ЭДС $-\dot{E}_1$ и вектором напряжения \dot{U}_1 (см. рис. 2.1).

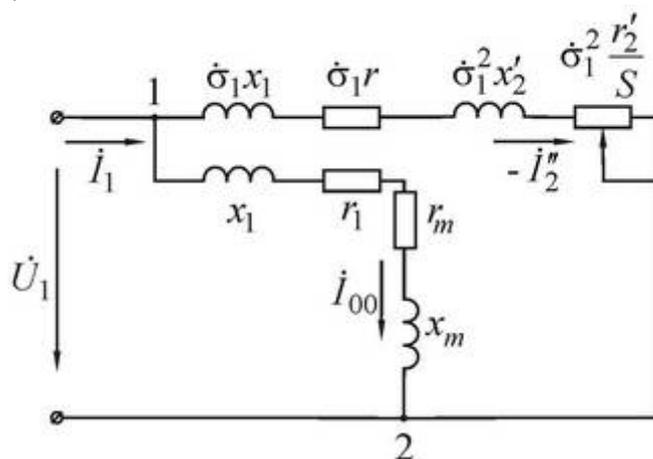


Рис. 2.3. Г-образная схема (уточненная схема) замещения асинхронной машины

Для асинхронных двигателей общего назначения мощностью 10–100 кВт $\gamma = -(1 \dots 3)^\circ$. Поэтому с погрешностью $3 \div 5$ % комплексный коэффициент можно считать вещественным числом равным единице $\dot{\sigma}_1 \approx 1$. В этом случае Г-образная схема замещения асинхронной машины упрощается, что удобно для инженерных расчетов.

Схемы замещения играют важную роль в теории асинхронных машин. На их основе получены основные соотношения для установившихся режимов асинхронных машин. Но современные ЭВМ по-

зволяет решать основные уравнения асинхронной машины (2.1) и исследовать как статические, так и динамические режимы работы. Поэтому в настоящее время схемы замещения для исследования режимов работы электрических машин практически не применяют.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Напишите систему уравнений, описывающих работу асинхронной машины в динамических режимах.
2. Покажите математическую модель асинхронной машины, описывающую ее работу в установившемся режиме.
3. С какой целью производят приведение параметров асинхронной машины?
4. Поясните T-образную схему замещения асинхронной машины.
5. Чем отличается Г-образная схема замещения асинхронной машины от T-образной схемы?
6. Изобразите векторную диаграмму асинхронной машины в двигательном режиме работы.
7. В чем заключается физический смысл приведения параметров асинхронной машины?
8. Какая часть схемы замещения эквивалентна механической нагрузке на валу двигателя?

3. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ

3.1. Энергетические режимы работы асинхронной машины при питании от сети переменного тока

Теоретически асинхронная машина может работать во всем диапазоне изменения скольжения s от $+\infty$ до $-\infty$ (рис. 3.1).

В зависимости от частоты и направления вращения ротора ω_p по отношению к полю статора различают четыре режима работы асинхронной машины:

- при изменении s от $-\infty$ до 0 – генераторный режим;
- при изменении s от 0 до 1 – двигательный режим;
- при $s = 1$ – трансформаторный режим;

- при изменении s от 1 до $+\infty$ – режим электромагнитного тормоза (режим противовключения).

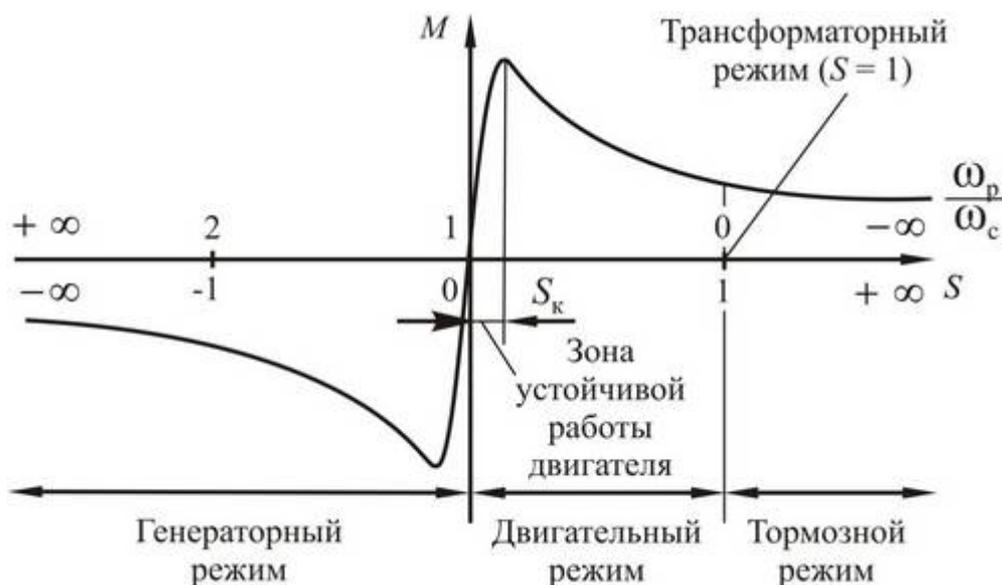


Рис. 3.1. Энергетические режимы работы асинхронной машины совместно с сетью переменного тока

В режиме электромагнитного тормоза (или режиме противовключения) ротор вращается против направления вращения поля статора ($s = (\omega_c - (-\omega_p))/\omega_c > 1$), и машина создает момент, обратный моменту, приложенному к валу со стороны нагрузки. В этом случае асинхронная машина потребляет как электрическую энергию, со стороны статора, так и механическую энергию со стороны вала рабочей машины, превращает ее в электрическую и рассеивает в виде тепла в обмотках ротора и статора.

Скорость вращения ротора асинхронной машины в режиме противовключения $\omega_p < 0$. На практике такой режим используется при спуске груза в подъемно-транспортных механизмах, экстренном торможении и реверсе электропривода станков. Это самый тяжелый тепловой режим для асинхронной машины.

Двигательный режим – это основной режим работы асинхронных машин. Большинство машин работают в диапазоне скольжения от $s = 1$ (начальный момент пуска – ротор неподвижен) до значений, близких к нулю (в режиме холостого хода $s \rightarrow 0$). Для оценки и сравнения свойств асинхронных двигателей моменты, развиваемые ими при пуске и разгоне, принято выражать не в абсолютных, а в

относительных единицах, т. е. указывать кратность момента по отношению к номинальному ($M^* = M/M_{\text{НОМ}}$).

Кривая $M^* = f(s)$ имеет несколько характерных точек, соответствующих пусковому $M^*_п$, минимальному M^*_{min} , максимальному (критическому) M^*_{max} и номинальному моментам ($M^*_{\text{НОМ}} = 1$) (рис. 3.2).

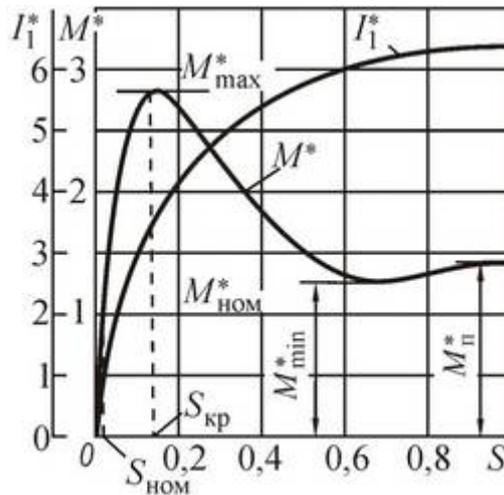


Рис. 3.2. Зависимость относительного тока статора и момента асинхронной машины от скольжения при работе в режиме двигателя

Пусковой момент характеризует начальный момент, развиваемый двигателем непосредственно после включения в сеть при неподвижном роторе ($s = 1$). В начале разгона асинхронного двигателя его момент несколько уменьшается по сравнению с пусковым. Поэтому двигатель может быть пущен под нагрузкой только при условии, что момент сопротивления на валу будет меньше, чем M^*_{min} , иначе двигатель не разгонится. Максимальный момент характеризует наибольший момент, создаваемый асинхронным двигателем, — его перегрузочную способность.

Часто M^*_{max} называют также *критическим моментом*, а скольжение, при котором момент достигает максимума, — *критическим скольжением* ($s_{\text{к}}$).

В асинхронных двигателях общего назначения $s_{\text{к}}$ обычно находится в пределах $0,07 \div 0,12$. Если момент сопротивления при работе асинхронного двигателя превышает M^*_{max} , двигатель останавливается (или, как часто называют этот процесс, «опрокидывается»).

Трансформаторный режим, при котором обмотка статора подключена к сети, а ротор неподвижен (заторможен), для асинхронно-

го двигателя с короткозамкнутым ротором называют *режимом короткого замыкания*.

Как видно на рис. 3.2, в этом случае ток статора и ротора при $s = 1$ в несколько раз превышает номинальный, поэтому в режиме короткого замыкания асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором может находиться лишь несколько секунд. Режим короткого замыкания – это тяжелый тепловой режим для асинхронного двигателя. Хуже может быть только режим противовключения. Но специально спроектированные асинхронные машины с фазным ротором работают в трансформаторном режиме с заторможенным ротором. Это так называемые *индукционные регуляторы* напряжения и *фазорегуляторы*.

В генераторном режиме асинхронные машины применяются сравнительно редко. Это связано с тем, что для создания магнитного поля в зазоре асинхронного генератора необходима реактивная мощность, которая должна поступать из сети или от других источников реактивной мощности. Асинхронные машины не могут работать с $\cos\varphi = 1$, что ограничивает применение их для работы в генераторном режиме.

Работа асинхронной машины в режиме двойного питания. Обычно к асинхронному двигателю электрическая энергия подводится только со стороны статора. Но в двигателях с фазным ротором мы можем подвести энергию к обеим частям машины: и к статору, и через контактные кольца к фазному ротору. В этом случае может быть получена синхронная скорость вращения ротора ω_p , равная сумме синхронных скоростей вращения поля статора ω_c и поля ротора ω_2 . Машина при этом приобретает ряд свойств синхронной машины. Двигатель двойного питания может работать и в режиме асинхронной скорости, но при этом машина отдает в сеть токи с частотой скольжения, вредно отражающиеся на работе сети. Машины двойного питания, как трехфазные, так и однофазные, имеют широкое применение в системах синхронной связи и носят название *сельсины*.

3.2. Энергетическая диаграмма асинхронной машины

Процесс преобразования электрической энергии в механическую в асинхронной машине может быть описан и уравнением ба-

ланса активной мощности. На основании закона сохранения энергии для двигательного режима работы можно записать:

$$P_1 = P_2 + \Delta P_{эл1} + \Delta P_{эл2} + \Delta P_{м1} + \Delta P_{мех} + \Delta P_{д}, \quad (3.1)$$

где $P_1 = m_1 U I_1 \cos \varphi_1$ – активная электрическая мощность, потребляемая машиной из сети; $P_2 = \omega_2 M_{дв}$ – полезная механическая мощность на валу двигателя; $\Delta P_{эл1}$ и $\Delta P_{эл2}$ – электрические потери мощности в обмотке статора и ротора; $\Delta P_{м1}$ – магнитные потери в магнитопроводе статора; $\Delta P_{мех}$ – механические потери; $\Delta P_{д}$ – добавочные потери.

Уравнение (3.1) наглядно иллюстрирует энергетическая диаграмма (рис. 3.3, а).

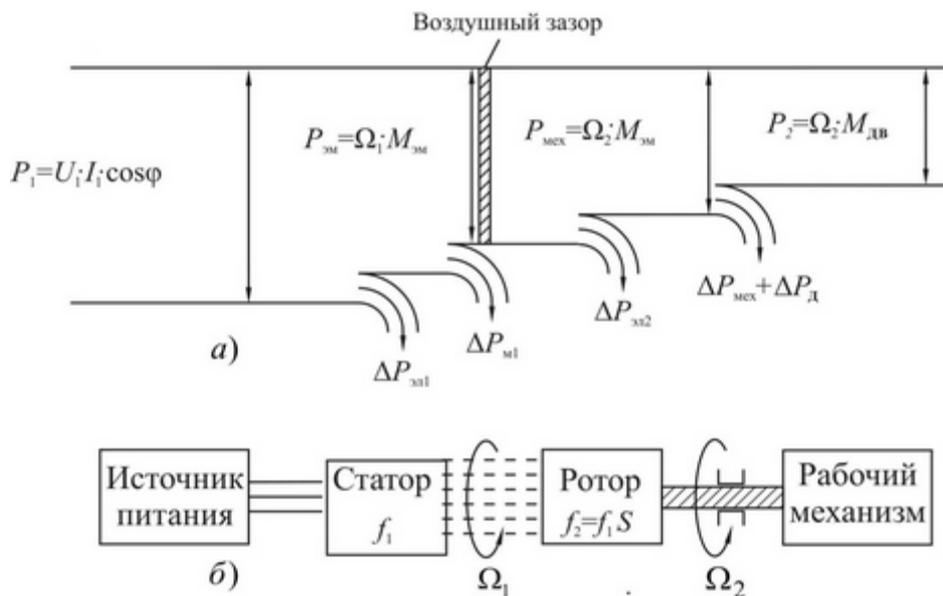


Рис. 3.3. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя (а) и (б) структурная схема электромеханической системы: источник питания – двигатель – рабочий механизм

Здесь же показана структурная схема электромеханической системы (рис. 3.3, б), устанавливающая взаимосвязь между ее элементами. При работе машины в двигательном режиме к обмотке статора от источника питания (например, от трехфазной сети) подводится электрическая мощность $P_1 = m_1 U I_1 \cos \varphi_1$.

Часть мощности P_1 затрачивается на покрытие электрических потерь $\Delta P_{эл1} = m_1 I_1^2 r_1$ в активном сопротивлении обмотки статора и магнитных потерь $\Delta P_{м1} = m_1 I_{1a}^2 r_m$ в магнитопроводе статора

(см. рис. 3.2). На обмотку ротора посредством вращающегося с частотой $\omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p}$ магнитного поля статора трансформируется электромагнитная мощность:

$$P_{\text{эм}} = m_1(I_2')^2 \frac{r_2'}{s} = m_1(I_2')^2 r_2' + m_1(I_2')^2 r_2' \frac{1-s}{s} = \omega_1 M_{\text{эм}}.$$

Часть электромагнитной мощности, полученной ротором, затрачивается на покрытие электрических потерь $\Delta P_{\text{эл2}} = m_1(I_2')^2 r_2'$ в его обмотке. В машинах с фазным ротором имеют место еще потери в щеточных контактах на кольцах, которые обычно включаются в потери $\Delta P_{\text{эл2}}$. Оставшаяся часть электромагнитной мощности

$$P_{\text{мех}} = m_1(I_2')^2 r_2' \frac{1-s}{s} = \omega_2 M_{\text{эм}}$$

поступает в виде механической мощности на вал машины. В установившемся режиме работы магнитные потери в роторе из-за малой частоты перемагничивания f_2 практически отсутствуют. За вычетом незначительных потерь на трение $\Delta P_{\text{мех}}$ и добавочных потерь $\Delta P_{\text{д}}$ механическая мощность двигателя $P_2 = \omega_2 M_{\text{д}}$ передается на вал и является выходной мощностью двигателя.

Ранее мы установили, что магнитный поток в трансформаторе всегда создается реактивным током. Физический процесс возбуждения асинхронного двигателя, т. е. образования в нем магнитного поля, такой же, как в трансформаторе, и, следовательно, тоже требуется наличие реактивного намагничивающего тока. Поэтому для работы асинхронной машины нужен источник реактивной мощности.

Реактивная мощность, которую асинхронная машина забирает из сети для создания рабочего магнитного потока и потоков рассеяния:

$$Q_1 = m_1 U_1 I_1 \sin \varphi_1.$$

Произведение полного тока статора I_1 на $\sin \varphi_1$ как раз и является реактивной составляющей этого тока. Намагничивающим током машины называется геометрическая сумма (т. е. арифметическая разность) реактивных составляющих токов статора I_1 и ротора $-I_2'$ (см. рис. 2.1).

Из-за наличия воздушного зазора между статором и ротором намагничивающий ток в асинхронном двигателе значительно больше, чем в трансформаторе. Это легко объясняется законом Ома для магнитной цепи: с увеличением зазора растет его магнитное сопротивление. И для получения требуемого магнитного потока надо увеличивать МДС обмотки статора, т. е. её намагничивающий ток.

Следовательно, асинхронные машины с большим числом полюсов имеют меньший $\cos \varphi_1$, так как рабочий поток в машине пересекает воздушный зазор $2p$ раз. Максимальное число полюсов у серийных асинхронных двигателей составляет $2p = 12$, несмотря на то, что потребность промышленности в машинах с большим числом полюсов, конечно же, существует, но дальнейшее увеличение числа полюсов машины ведет к недопустимому росту ее намагничивающего тока и снижению $\cos \varphi_1$.

При номинальной нагрузке $\cos \varphi_1$ в асинхронных двигателях ниже, чем в трансформаторах, и равен приблизительно $0,7 \dots 0,95$. Со снижением механической нагрузки на валу $\cos \varphi_1$ падает до значения, соответствующего холостому ходу ($\cos \varphi_{1xx} = 0,1 \dots 0,15$).

Наибольшая часть потребляемой реактивной мощности идет на создание основного (рабочего) магнитного потока в воздушном зазоре машины. В соответствии со схемой замещения, показанной на рис. 2.2:

$$Q_m = m_1 I_m^2 x_m.$$

На создание потоков рассеяния обмоток статора и ротора соответственно расходуются реактивные мощности:

$$q_1 = m_1 I_1^2 x_1 \quad \text{и} \quad q_2 = m_2 I_2^2 x_2 = m_1 (I_2')^2 x_2'.$$

Уравнение баланса реактивных мощностей в асинхронной машине имеет вид:

$$Q_1 = Q_m + q_1 + q_2.$$

3.3. Уравнение механической характеристики асинхронной машины

Изучение электромеханических свойств асинхронной машины начнем с установившихся статических режимов работы. Воспользуемся для этого упрощенной Г-образной схемой замещения фазы

двигателя (рис. 2.5). Приведенный ток ротора можно определить как:

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1 + r'_2 \frac{1}{s}\right)^2 + x_k^2}}, \quad (3.2)$$

где $x_k = x_1 + x'_2$ – реактивное сопротивление короткого замыкания.

Электромагнитная мощность, передаваемая через воздушный зазор двигателя на ротор:

$$P_{эм} = m_1 (I'_2)^2 r'_2 \frac{1}{s}. \quad (3.3)$$

Эту же мощность мы можем выразить и через параметры механического движения – электромагнитный момент и угловую скорость вращения поля:

$$P_{эм} = M_{эм} \omega_1 = M_{эм} \frac{2\pi f_1}{p}. \quad (3.4)$$

Приравниваем выражения (3.3) и (3.4) и, определив электромагнитный момент $M_{эм}$, получим уравнение механической статической характеристики асинхронной машины (рис. 3.2):

$$M_{эм} = \frac{pm_1 U_1^2 r'_2}{2\pi f_1 s \left[\left(r_1 + r'_2 \frac{1}{s} \right)^2 + x_k^2 \right]}. \quad (3.5)$$

Анализ функции (3.5) показывает, что она имеет точки экстремума. Значения скольжения S_k , соответствующие $\frac{dM}{ds} = 0$, называют критическими:

$$S_k = \pm \frac{r'_2}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}}. \quad (3.6)$$

Подставив выражение критического скольжения (3.6) в уравнение статической механической характеристики (3.5) получаем уравнение для критического момента M_k .

$$M_k = \pm \frac{pm_1 U_1^2}{4\pi f_1 \left[\pm r_1 + \sqrt{r_1^2 + x_k^2} \right]}. \quad (3.7)$$

С учетом (3.6) и (3.7) уравнение момента (3.5) может быть представлено в форме уточненной формулы Клосса:

$$M = \frac{2M_{\text{к}}(1 + as_{\text{к}})}{\frac{s}{s_{\text{к}}} + \frac{s_{\text{к}}}{s} + 2as_{\text{к}}}, \quad (3.8)$$

где в большинстве случаев может быть принято $a = \frac{r_1}{r_2'} \approx 1$;

и тогда получаем упрощенное уравнение Клосса, имеющее вид:

$$M = \frac{2M_{\text{к}}}{\frac{s}{s_{\text{к}}} + \frac{s_{\text{к}}}{s}}. \quad (3.8a)$$

Выражая скольжение через скорость ротора $s = \frac{\omega_0 - \omega_{\text{р}}}{\omega_{\text{р}}}$ и подстав-

ля в выражение (3.8), мы можем построить механическую $\omega = f(M)$ и электромеханическую $\omega = f(I)$ характеристики асинхронной машины (рис. 3.4).

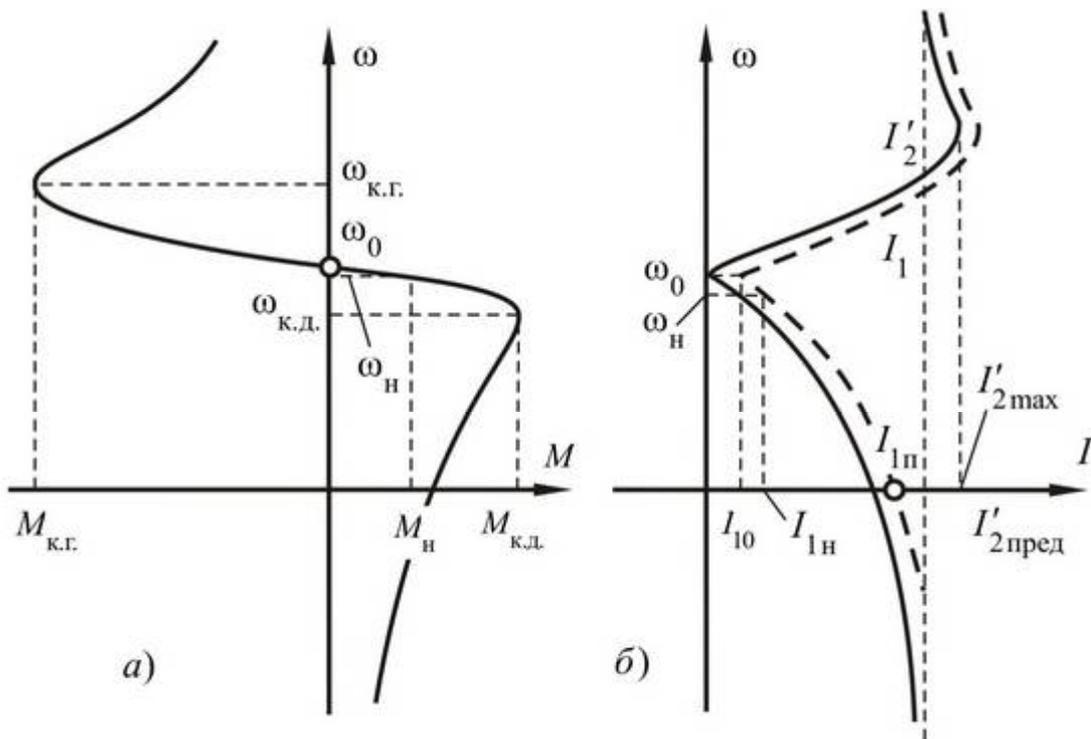


Рис. 3.4. Естественная механическая и электромеханическая характеристики асинхронной машины

При построении электромеханической характеристики необходимо учитывать, что $\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}'_2$, т. е. ток намагничивания присутствует во всех режимах работы асинхронной машины.

Пусковой момент двигателя, развиваемый в начальный момент пуска при $s = 1$, может быть получен из (3.5):

$$M_{\text{пуск}} = \frac{pm_1 U_1^2 r'_2}{2\pi f_1 [(r_1 + r'_2)^2 + x_k^2]} \quad (3.9)$$

Момент $M_{\text{пуск}}$ зависит от сопротивления в цепи ротора r'_2 . Увеличивая значение r'_2 до величины, при которой критическое скольжение

будет равно единице $s_k = \frac{r'_2}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}} = 1$, получим значение сопро-

тивления ротора, при котором пусковой момент достигает максимального значения $M_{\text{пуск}} = M_{\text{кр}}$:

$$r'_2 = \sqrt{r_1^2 + x_k^2}.$$

Кратность пускового момента относительно номинального определяется как

$$\frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{н}}} = \lambda_{\text{п}}$$

и является важной характеристикой асинхронного двигателя.

Рассмотрим уравнение Клосса (3.8). При $S \ll S_k$ механическая характеристика близка к линейной $M \approx 2M_k \frac{S}{S_k}$, а в области

больших скольжений $S \gg S_k$ имеет гиперболический вид:

$$M \approx 2M_k \frac{S_k}{S}.$$

При $S = S_k$ – момент максимальный. Причем в генераторном режиме критический момент несколько больше, чем в двигательном.

$$M_{\text{кр.г}} = M_{\text{кр.д}} \frac{1 + a|s_k|}{1 - a|s_k|}.$$

Отношение максимального (критического) момента к номинальному называют *перегрузочной способностью двигателя по моменту* λ_M :

$$\lambda_M = M_{кр}/M_H.$$

Максимальный момент асинхронного двигателя превышает номинальный в $2,0 \div 2,2$ раза ($\lambda_M = 2,0 \div 2,2$). В каталожных данных по двигателям часто используют понятие *перегрузочная способность двигателя по току* λ_i (для серийных АД обычно $\lambda_i = 5 \dots 7$), которую определяют как отношение пускового тока к номинальному:

$$\lambda_i = I_{пуск}/I_H.$$

Данные о критическом скольжении S_k в каталогах обычно не приводятся. Однако их можно получить из уравнения механической характеристики, записав его для номинального режима:

$$\frac{M_K}{M_H} = \frac{s/s_k + s_k/s + 2as_k}{2(1 + as_k)} = \lambda_M.$$

Решая квадратные уравнения относительно переменной S_k и применив $a = \frac{r_1}{r_2'} \approx 1$, получим:

$$S_k = \frac{S_H \left[\lambda_M + \sqrt{\lambda_M^2 + 2S_H(\lambda_M - 1)} \right]}{1 - 2S_H(\lambda_M - 1)}. \quad (3.10)$$

Если использовать упрощенную форму Клосса, т. е. при $r_1 \approx 0$, выражение (3.10) принимает вид:

$$s_k = s_H \left(\lambda_M + \sqrt{\lambda_M^2 - 1} \right), \quad (3.10a)$$

где S_H – каталожное значение номинального скольжения двигателя.

По уравнению Клосса характеристика $M = f(s)$ соответственно и механическая характеристика $M = f(\omega)$ могут быть построены с погрешностью 10–15 %, если для каких-либо двух режимов работы известны M и s . Этими двумя режимами могут быть номинальный режим работы и режим пуска, данные по которым обычно приводятся в каталогах.

Условия устойчивой работы асинхронного двигателя. На рис. 3.5 показаны механические характеристики асинхронного дви-

гателя (*a*) и производственного механизма (*б*), имеющие в общем случае три точки пересечения.

При пуске из неподвижного состояния двигатель достигает в точке (3) устойчивой скорости вращения, но дальнейшее увеличение скорости вращения невозможно, т. к. в этом случае момент, развиваемый двигателем, меньше момента сопротивления, создаваемого рабочей машиной. При снижении скорости вращения двигателя в точке (3) по какой-либо причине момент, развиваемый двигателем, станет больше момента производственного механизма, двигатель будет стремиться увеличить скорость вращения, т. е. вернуться в точку (3). Аналогичная ситуация возникает и в точке пересечения характеристик (1).

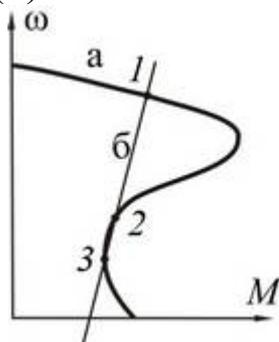


Рис. 3.5. Точки характеристики, соответствующие устойчивой (1), (3) и неустойчивой (2) работе асинхронного двигателя

Это точки устойчивого равновесия моментов двигателя $M_{дв}$ и сопротивления движению ротора со стороны рабочей машины M_c . В них выполняется условие

$$dM_{дв}/d\omega < dM_c/d\omega \text{ или } \beta_{дв} < \beta_c, \quad (3.11)$$

где $\beta_{дв}$ – жесткость статической механической характеристики асинхронного двигателя; β_c – жесткость статической механической характеристики рабочей машины.

В точке (2), наоборот, малейшее нарушение равенства моментов двигателя и рабочей машины ведет либо к повышению скорости вращения и переходу в режим работы, соответствующий точке (1), либо к снижению скорости вращения и переходу в режим работы в точке (3). Точка (2) соответствует неустойчивому режиму работы, и ей соответствует условие

$$dM_{дв}/d\omega > dM_c/d\omega \text{ или } \beta_{дв} > \beta_c.$$

На практике режим работы в точке (3) статической характеристики недопустим, т. к. характеризуется малой скоростью вращения

ротора, низким КПД двигателя, большими токами в обмотках и, как следствие, быстрым перегревом и выходом двигателя из строя.

3.4. Искусственные механические характеристики асинхронной машины

Влияние параметров самой асинхронной машины и питающего напряжения на форму ее механической характеристики показано на рис. 3.6.

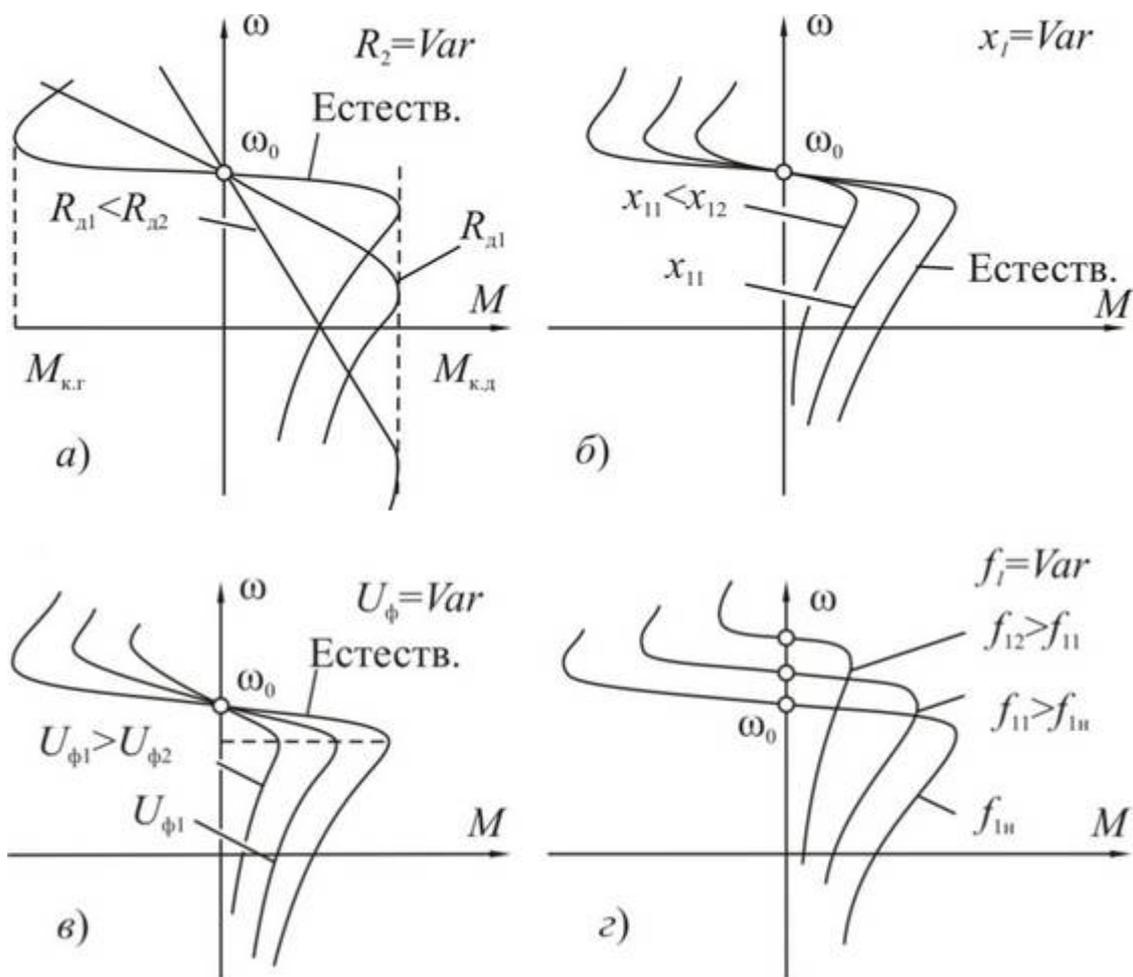


Рис. 3.6. Искусственные механические характеристики асинхронной машины

Напомним, что естественная механическая характеристика асинхронной машины получена при номинальных значениях параметров самой машины и питающего напряжения.

Увеличение сопротивления ротора r'_2 приводит в соответствии с формулой (3.6) к увеличению критического скольжения, а крити-

ческий момент (3.7) остается неизменным (рис. 3.6, а). Увеличение x_k или R_1 уменьшает s_k и M_k (рис. 3.6, б).

Несколько подробнее необходимо остановиться на влиянии на электромеханические свойства асинхронного двигателя изменения напряжения (рис. 3.6, в) и частоты тока (рис. 3.6, г), подводимого к статору.

В пределах рабочего участка механической характеристики, когда ток статора \dot{I}_1 существенно не превышает номинального значения, произведением $\dot{I}_1 z_1$ (2.8) можно пренебречь вследствие относительной малости. При этом $\dot{E}_1 \approx \dot{U}_\phi$ и с известным приближением можно записать:

$$\dot{U}_\phi \approx \dot{E}_1 = 4,44 f_1 w_1 k_{об1} \Phi_m \equiv f_1 \Phi_m. \quad (3.12)$$

Из выражения (3.12) следует, что при неизменной частоте $f_1 = \text{const}$ изменение напряжения U_ϕ приводит к пропорциональному изменению магнитного потока двигателя Φ_m .

Так как в номинальном режиме магнитная цепь двигателя насыщена (рис. 3.7), то даже незначительное повышение напряжения сверх номинального приводит при прочих равных условиях к быстрому возрастанию тока намагничивания I_μ .

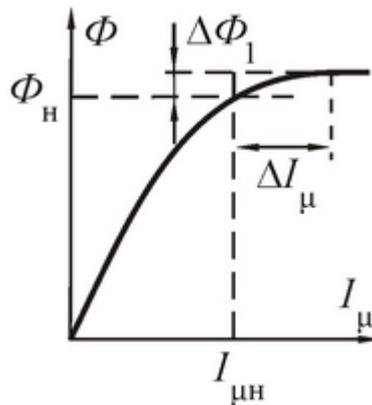


Рис. 3.7. Кривая намагничивания асинхронного двигателя

У двигателей нормального исполнения ток холостого хода равен току намагничивания и составляет $I_\mu \approx I_0 = (0,25 \div 0,35) I_{1н}$. Поэтому повышение напряжения на 20÷30 % увеличивает ток холостого хода до значений, превышающих номинальный ток $I_{1н}$, и двигатель может нагреваться этим током сверх допустимой температуры даже при отсутствии полезной нагрузки на валу.

При тех же условиях снижение напряжения вызывает уменьшение магнитного потока, поэтому напряжение, проложенное к обмоткам статора асинхронного двигателя, при $f_1 = \text{const}$ может рассматриваться как управляющее воздействие, определяющее магнитный поток двигателя, аналогично напряжению $U_{\text{возб}}$, приложенному к обмотке возбуждения двигателя постоянного тока. Форма механических характеристик при $f_1 = \text{const}$ и $U_{\phi} = \text{var}$ показана на рис. 3.5, в. Она определяется соотношениями (3.6) и (3.7), из которых следует, что скольжение S_k при этом остается неизменным, а критический момент уменьшается пропорционально квадрату напряжения. Этот фактор следует учитывать при выборе допустимого момента нагрузки двигателя с учетом колебания напряжения сети:

$$M_{\text{кр.доп}} = \left(\frac{0,9U_{1\Phi\text{н}}}{U_{1\Phi\text{н}}} \right)^2 \lambda_{\text{м}} M_{\text{н}} \approx 0,8\lambda_{\text{м}} M_{\text{н}}.$$

Во всех рассмотренных выше вариантах изменения параметров АД скорость холостого хода двигателя остается неизменной. Изменение частоты тока статора f_1 приводит к пропорциональному изменению ω_0 , но одновременно при $U_{\phi} = \text{const}$ вызывает обратно-пропорциональное частоте изменение потока двигателя Φ . Так как в номинальном режиме машина насыщена (рис. 3.7), при $U_{\phi} = U_{\phi\text{н}}$ допустимо только увеличение частоты $f_1 > f_{1\text{н}}$, что вызывает соответствующее уменьшение потока Φ . Увеличение f_1 приводит к уменьшению критического момента (3.7) из-за увеличения $\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}$ и повышения индуктивного сопротивления рассеяния

$X_{\text{к}}$. Критическое скольжение при этом также уменьшается, а скорость идеального холостого хода увеличивается, как показано на рис. 3.6, з.

При уменьшении частоты $f_1 < f_{1\text{н}}$ для снижения скорости $\omega_0 < \omega_{0\text{н}}$, по-видимому, необходимо дополнительно изменять напряжение питания U_{ϕ} таким образом, чтобы магнитный поток поддерживался примерно постоянным.

Приведенный выше анализ основан на предположении, что при данной механической характеристике в любой ее точке параметры двигателя r_1 , r'_2 , x'_2 , x_1 остаются неизменными. Эти допущения вполне приемлемы на рабочем участке характеристики, а при s

$> s_k$ уже являются грубыми, т. к., например, с возрастанием частоты тока ротора существенно проявляется эффект вытеснения тока, вызывающий увеличение сопротивления роторной обмотки r'_2 и x'_2 .

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какие параметры асинхронной машины определяют величину тока в обмотке роторе при работе машины в установившемся режиме?

2. Напишите уравнение статической механической характеристики асинхронной машины.

3. Изобразите статическую механическую характеристику асинхронной машины при работе в двигательном и генераторном режимах.

4. Изобразите статическую электромеханическую характеристику асинхронной машины при работе в двигательном и генераторном режимах.

5. Какие параметры асинхронной машины определяют значение момента и скольжения в критических точках механической характеристики?

6. Поясните условия устойчивой работы асинхронной машины.

7. Назовите способы получения искусственных характеристик асинхронной машины.

8. Изобразите искусственные характеристики асинхронной машины, полученные при изменении напряжения статора.

9. Изобразите искусственные характеристики асинхронной машины, полученные при изменении частоты напряжения статора.

10. Изобразите искусственные характеристики асинхронной машины, полученные при изменении сопротивления ротора.

11. Изобразите искусственные характеристики асинхронной машины, полученные при изменении активного и индуктивного сопротивления статора.

4. ГЕНЕРАТОРНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ

4.1. Генераторный режим работы асинхронной машины параллельно с сетью

При работе в генераторном режиме параллельно с сетью асинхронная машина отдает в сеть активную мощность и одновременно потребляет из этой же сети реактивную мощность, необходимую ей для создания вращающегося магнитного поля. Обычно источниками реактивной мощности являются синхронные машины, параллельно работающие на эту же сеть переменного тока, что и асинхронный генератор, или (если сеть автономная) конденсаторная батарея, подключенная к автономной сети. Поэтому различают два режима работы асинхронного генератора:

- параллельно с сетью переменного тока;
- автономный генераторный режим (режим генератора с самовозбуждением).

В асинхронном генераторе, работающем параллельно с сетью, частота вырабатываемого тока задается частотой сети и не изменяется при изменении скорости вращения ротора n_2 . При этом ротор вращается приводным двигателем в сторону вращения магнитного поля статора с частотой, превышающей синхронную частоту вращения поля n_0 . Как и в двигательном режиме, номинальное скольжение в генераторном режиме поддерживают в пределах нескольких процентов, так как при повышении скольжения растут электрические потери, а КПД генератора снижается. При переходе из двигательного в генераторный режим асинхронная машина проходит точку холостого хода (точка пересечения механической характеристики с осью скорости на рис. 4.1). В генераторном режиме активные составляющие токов I_1 и I_2 меняют свое направление.

При этом ток холостого хода I_0 остается практически неизменным и реактивная составляющая первичного тока I_1 также не изменяет своего направления. Это означает, что и в генераторном режиме асинхронная машина потребляет из сети реактивную мощность

$$Q_1 = m_1 U_1 I_1 \sin \varphi_1 > 0.$$

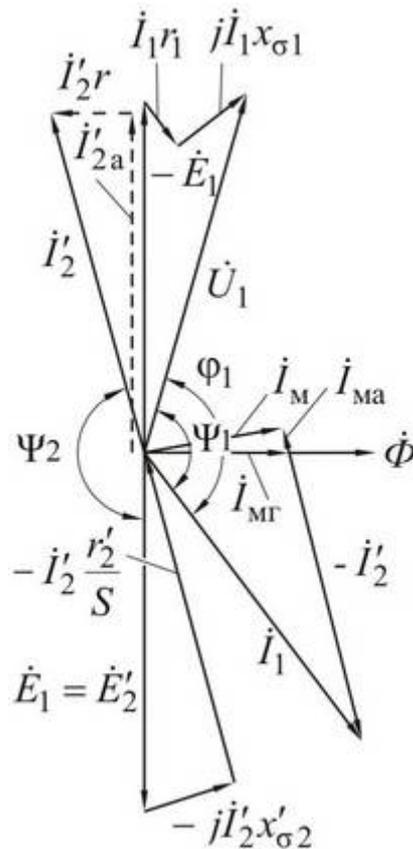


Рис. 4.1. Векторная диаграмма асинхронной машины при работе в режиме генератора

Как следует из векторной диаграммы, в генераторном режиме $\dot{E}_1 > \dot{U}_1$ и угол $\varphi_1 > 90^\circ$. При этом

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1 < 0,$$

что свидетельствует о том, что механическая мощность в асинхронном генераторе преобразуется в электрическую и отдается в сеть.

Для асинхронной машины, работающей в генераторном режиме, справедливы те же схемы замещения, что и для двигательного режима. Параметры схемы замещения и потери определяются аналогично.

Асинхронные генераторы применяются на приливных, аккумулярующих и ветряных электростанциях, на малых гидростанциях, там, где скорость вращения турбин нестабильна и может изменяться в широких пределах.

К числу достоинств асинхронных генераторов следует отнести их высокую надежность, особенно при больших скоростях вращения; эти машины не требуют защиты от коротких замыканий. Это связано с тем, что при коротком замыкании в цепи обмотки статора

асинхронная машина теряет источник реактивной энергии (развозбуждается) и, как генератор, перестает преобразовывать механическую энергию в электрическую и подпитывать место короткого замыкания.

4.2. Работа асинхронной машины в режиме автономного асинхронного генератора

При применении асинхронных генераторов в автономных энергетических установках в качестве источника реактивной мощности используются конденсаторные батареи (рис. 4.2).

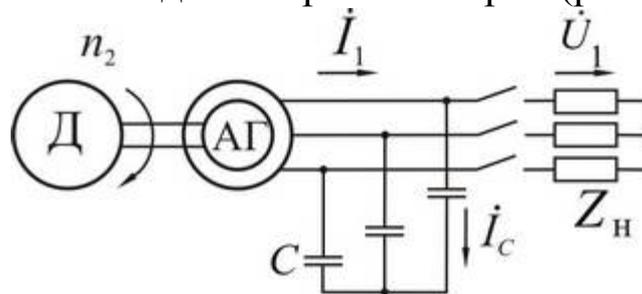


Рис. 4.2. Схема автономного асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением

В автономном асинхронном генераторе (рис. 4.2) к выходу генератора АГ, приводимого во вращение каким-либо двигателем Д, параллельно нагрузке Z_n в каждую фазу подключается конденсатор С. Для получения номинального напряжения генератора при номинальной чисто активной нагрузке $Z_n = R_n$, требуемая реактивная мощность конденсаторной батареи эквивалентна реактивной мощности генератора

$$Q_1 = m_1 U_1 I_1 \sin \varphi_1.$$

Если нагрузка активно-индуктивная, емкость конденсаторов должна быть такой, чтобы покрывать реактивную мощность, необходимую для возбуждения генератора, и реактивную мощность нагрузки. При работе на активно-емкостную нагрузку асинхронный генератор может обойтись без конденсаторной батареи, если емкостная составляющая мощности нагрузки обеспечивает необходимую реактивную мощность для возбуждения генератора.

В установившемся режиме основные соотношения для асинхронного генератора с самовозбуждением можно определить из схемы замещения (рис. 4.3), которая отличается от схемы замеще-

ния асинхронного двигателя тем, что на ее выводы вместо сети с напряжением U_1 включены сопротивление нагрузки Z_H и конденсаторная батарея $X_c = 1/(\omega_1 C)$.

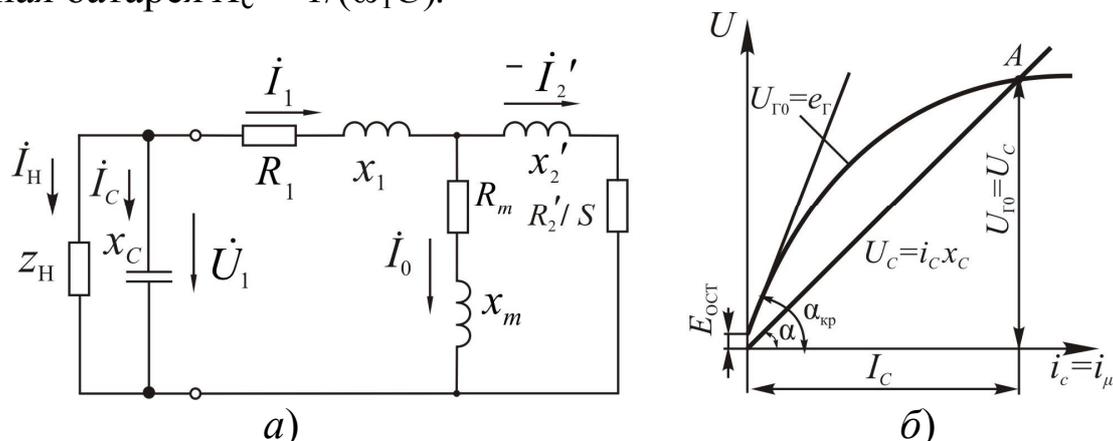


Рис. 4.3. Схема замещения автономного асинхронного генератора с возбуждением от конденсаторной батареи (а); б – характеристика холостого хода генератора и вольтамперная характеристика конденсатора

Процесс самовозбуждения асинхронного генератора, работающего на автономную сеть, можно представить себе следующим образом. При вращении короткозамкнутого ротора генератора с помощью механического двигателя за счет остаточного магнитного потока ротора в обмотках статора наводится ЭДС $E_{ост}$ (рис. 4.3, б). ЭДС $E_{ост}$ создает в цепи статора и конденсаторной батареи емкостный ток I_c , который, в свою очередь, создает вращающийся магнитный поток, совпадающий по фазе с остаточным магнитным потоком ротора и усиливающий его действие.

Далее токи и МДС возрастают пока их значения не установятся в точке A пересечения характеристики холостого хода генератора с вольтамперной характеристикой (ВАХ) конденсаторной батареи $I_c x_c = e_r = F(I_c)$ (рис. 4.3, б).

Следовательно, ЭДС генератора зависит от емкости конденсаторной батареи и вида характеристики холостого хода асинхронной машины. При уменьшении емкости батареи угол наклона ВАХ возрастает и ЭДС E_1 уменьшается. При малой емкости ВАХ батареи конденсаторов не пересекает х.х.х. асинхронного генератора ($\alpha > \alpha_{кр}$) и машина не возбуждается. Следовательно, при постоянной скорости вращения ротора $\omega_p = const$ регулирование напряжения генератора возможно за счет изменения емкости конденсатор-

ной батареи либо за счет изменения характеристики холостого хода генератора путем подмагничивания спинки статора генератора постоянным током. При этом частота вырабатываемого напряжения зависит как от частоты вращения ротора n_2 , так и от параметров генератора и элементов автономной системы. Это существенно усложняет расчет режимов работы автономной системы и проектирование асинхронного генератора. Следует иметь в виду, что габариты и масса необходимой конденсаторной батареи соизмеримы с весогабаритными показателями асинхронного генератора, для которого она предназначена.

На рис. 4.4 приведены зависимости требуемой емкости (мкФ) батареи на 1 кВт активной мощности от $\cos\varphi_r$ для генератора с напряжением на емкости 220 В при частоте f_1 50 Гц и 400 Гц.

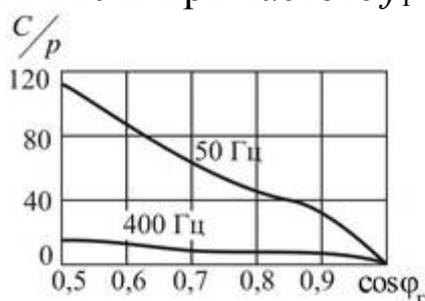


Рис. 4.4. Зависимость удельной емкости конденсаторов, обеспечивающих самовозбуждение автономного асинхронного генератора, от $\cos\varphi_r$ и частоты

Величина емкости, необходимой для возбуждения генератора, зависит и от частоты тока статора f_1 , которая в свою очередь определяется скоростью вращения ротора генератора $f_1 = pn_2/60$. Характер этой зависимости показан на рис. 4.5.

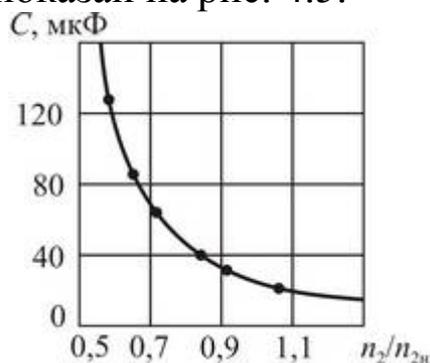


Рис. 4.5. Зависимость емкости конденсаторной батареи, необходимой для самовозбуждения генератора, от относительной частоты вращения генератора для машин мощностью 4,5 кВт·А при холостом ходе

Поэтому в качестве автономных асинхронных генераторов желательно иметь высокоскоростные машины. Например, асинхронные генераторы с массивными роторами, выполненными в виде стальных цилиндров без обмоток, изготавливаются на высокие частоты вращения – до 100 000 об/мин.

Достоинства асинхронных генераторов:

- асинхронные генераторы отличаются простотой конструкции и высокой надежностью в эксплуатации;

- возможность устойчивой параллельной работы неограниченного числа асинхронных генераторов;

- электрическая система, укомплектованная неограниченным числом параллельно работающих асинхронных генераторов АГ, отличается значительно более устойчивой и надежной работой по сравнению с системой с синхронными генераторами;

- применение асинхронных генераторов повышает устойчивость в работе электроприводов механизмов и качество электроэнергии в сети, а именно:

- а) асинхронные генераторы выравнивают асимметрию линейных и фазных напряжений, а также асимметрию токов нагрузки;

- б) асинхронные генераторы при параллельной работе с сетью не вносят искажений в форму кривой линейных и фазных напряжений, а наоборот, улучшают её за счет демпфирования высших гармонических составляющих тока и напряжения, создаваемых насыщенными дросселями, трансформаторами, тиристорными преобразователями и выпрямителями, персональными компьютерами, т. е. улучшают электромагнитную совместимость оборудования и сети;

- в) в случае параллельной работы электроагрегатов с асинхронными генераторами отпадает необходимость применения сложных автоматических систем синхронизации.

В диапазоне изменения мощностей 5–100 кВт масса автономного асинхронного генератора (ААГ) примерно в 1,3–1,4 раза меньше классического синхронного генератора и в 2–3 раза меньше массы бесконтактного синхронного генератора (например, индукторного).

4.3. Тормозные режимы работы асинхронной машины

Кроме *рекуперативного торможения* при работе в режиме генератора параллельно с сетью, асинхронная машина позволяет реализовать ещё два тормозных режима: *торможение противовключением* (электромагнитное торможение) и *динамическое торможение*.

При торможении противовключением ротор асинхронной машины под действием активного момента рабочей машины вращается в сторону, противоположную вращению магнитного поля статора. В этом режиме (рис. 4.1) $s > 1$.

Режим противовключения может возникнуть как под воздействием активного механического момента со стороны вала рабочей машины при $M_c > M_{д.кр}$, так при воздействии со стороны сети, а именно при изменении направления вращения магнитного поля статора за счет изменения последовательности включения фаз питающего напряжения на статоре работающего двигателя. Особенностью режима электромагнитного тормоза является то, что как электрическая, так и механическая мощность, потребляемая электрическим двигателем и преобразуются в тепло. Это один из самых тяжелых тепловых режимов работы любой электрической машины. Напомним, что количество тепловой энергии выделяющейся в асинхронной машине при электромагнитном торможении от скорости холостого хода до полной остановки, пропорционально утроенному запасу кинетической энергии всех тормозящихся масс электромеханической системы:

$$A_{теп}^{ад} = 3 \frac{J\omega_0^2}{2} .$$

Тем не менее, режим противовключения широко применяется в крановых электроприводах, является составным элементом стандартных режимов работы электрических машин (S5, S7). Наиболее устойчиво асинхронная машина работает и допускает регулирование скорости в режиме противовключения на искусственных механических характеристиках, имеющих критическое скольжение $s_k \approx 4 \div 5$.

Режим динамического торможения. По сути, это автономный генераторный режим работы асинхронной машины без рекуперации

энергии в сеть. Количество тепловой энергии, выделяющейся в двигателе при динамическом торможении, равно запасу кинетической энергии тормозящихся масс привода.

В зависимости от способа создания магнитного потока в обмотке статора различают режим *динамического торможения с независимым возбуждением от источника постоянного тока* (рис. 4.6, а) и другой – с *самовозбуждением от конденсаторной батареи*, который в технической литературе часто называют *конденсаторным торможением* асинхронного двигателя (рис. 4.6, б).

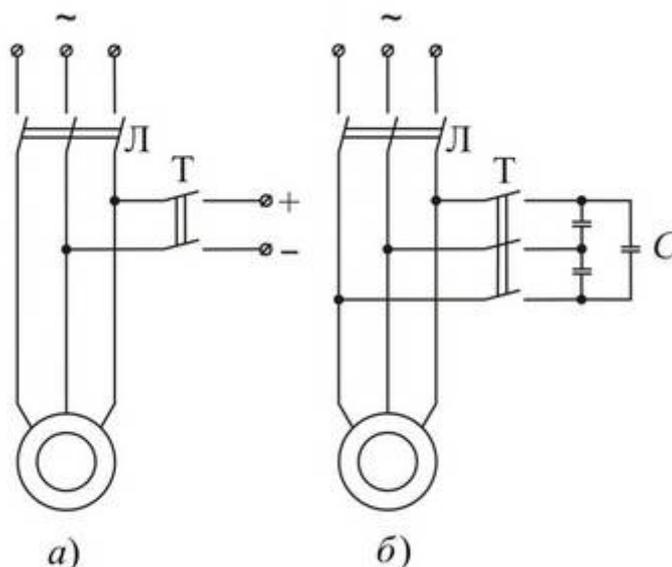
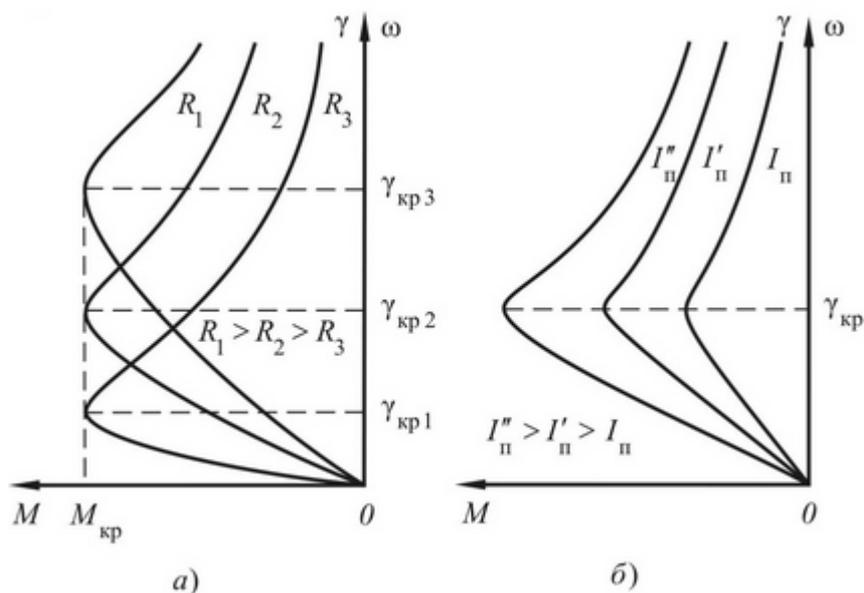


Рис. 4.6. Схемы включения асинхронного двигателя при динамическом торможении

В режиме динамического торможения с независимым возбуждением обмотка статора вращающегося асинхронного двигателя отключается от сети переменного тока и подключается к источнику постоянного тока. Протекая по обмоткам статора, постоянный ток создает неподвижное магнитное поле, под действием которого во вращающихся замкнутых обмотках ротора возникает переменная ЭДС и ток с амплитудой и частотой, пропорциональной скорости вращения ротора.

Взаимодействие вращающегося магнитного поля ротора, созданного этим переменным током, с неподвижным полем статора и создает тормозной электромагнитный момент. Здесь надо помнить, что скорость вращения поля ротора ω_2 равна механической скорости вращения ротора ω_r и направлена в противоположную сторону. В результате магнитные поля статора и ротора оказываются

ся неподвижны относительно друг друга. При неподвижном роторе двигателя, когда ЭДС и ток ротора равны нулю, магнитный поток ротора и тормозной момент также исчезают. Этот режим широко используется на практике благодаря простоте реализации (рис. 4.7).



$$I_{\text{п}} = \text{const}; \quad R_{\text{р}} = \text{var}; \quad R_{\text{р}} = \text{const}; \quad I_{\text{п}} = \text{var}$$

Рис. 4.7. Механические характеристики асинхронного двигателя при динамическом торможении с независимым возбуждением от источника постоянного тока: *а* – при введении в цепь фазного ротора добавочного сопротивления; *б* – при изменении постоянного тока в цепи статора

Из условия равенства намагничивающих сил фазной обмотки статора при протекании по ней постоянного тока и переменного фазного тока величина постоянного тока составляет: $I_{\text{п}} = 1,23I_{1\phi}$. Максимальную величину постоянного тока по условиям нагрева обмоток не следует принимать больше 2,5-кратного номинального переменного тока фазы двигателя. Механические характеристики асинхронного двигателя в режиме динамического торможения с независимым возбуждением представлены на рис. 4.7.

Значение относительной скорости ротора $\gamma_{\text{кр}} = \frac{\omega}{\omega_0}$, при которой момент имеет критическое значение (критическое скольжение $s_{\text{к}}$).

Как видно на рис. 4.7, *а*, регулировать тормозной момент можно изменением сопротивления в цепи ротора (только для двигателя с фазным ротором) и изменением постоянного тока в цепи статора (рис. 4.7, *б*) для всех типов двигателей.

Статическая характеристика асинхронной машины в режиме динамического торможения с независимым возбуждением (т. е. нерегулируемым постоянным током в обмотке статора) описывается упрощенным уравнением Клосса (3.8а).

При динамическом торможении с самовозбуждением (в технической литературе этот вид торможения часто встречается под названием «конденсаторное торможение») к обмотке статора вращающегося асинхронного двигателя после ее отключения от сети подключают конденсаторы, а обмотку фазного ротора замыкают накоротко или на сопротивление, и машина работает асинхронным генератором с самовозбуждением (рис. 4.6, *б*). (Принцип действия асинхронного генератора с самовозбуждением рассмотрен выше в п. 4.2).

При скорости вращения ротора равной примерно 40 % от номинальной частота тока в статоре снижается, машина выходит из режима самовозбуждения и тормозной момент падает практически до нуля. Из этого следует, что для получения тормозного эффекта на малых скоростях вращения ротора необходима большая удельная емкость конденсаторов (см. рис. 4.3, *б* и 4.5, *б*). Поэтому динамическое торможение с самовозбуждением широкого применения не получило ввиду сложности реализации.

4.4. Трансформаторный режим работы асинхронной машины

В трансформаторном режиме асинхронная машина работает при $s = 1$ (рис. 3.1). В этом энергетическом режиме машина является электромагнитным преобразователем и не преобразует электрическую энергию в механическую или обратно. Однако на ротор действует пусковой момент, который можно определить по выражению:

$$M_{\text{пуск}} = \frac{pm_1 U_1^2 r_2'}{2\pi f_1 [(r_1 + r_2')^2 + x_k^2]} = \frac{pm_1 U_1^2 r_2'}{2\pi f_1 z_k^2}.$$

Для работы в трансформаторном режиме используются машины с фазным ротором. При этом между обмотками статора и ротора возможна трансформаторная или автотрансформаторная связь.

4.4.1. Фазорегулятор

Конструктивно фазорегулятор – это асинхронная машина с заторможенным фазным ротором, обмотки статора и ротора которой имеют между собой трансформаторную связь и могут поворачиваться относительно друг друга на электрический угол 360° (рис. 4.8).

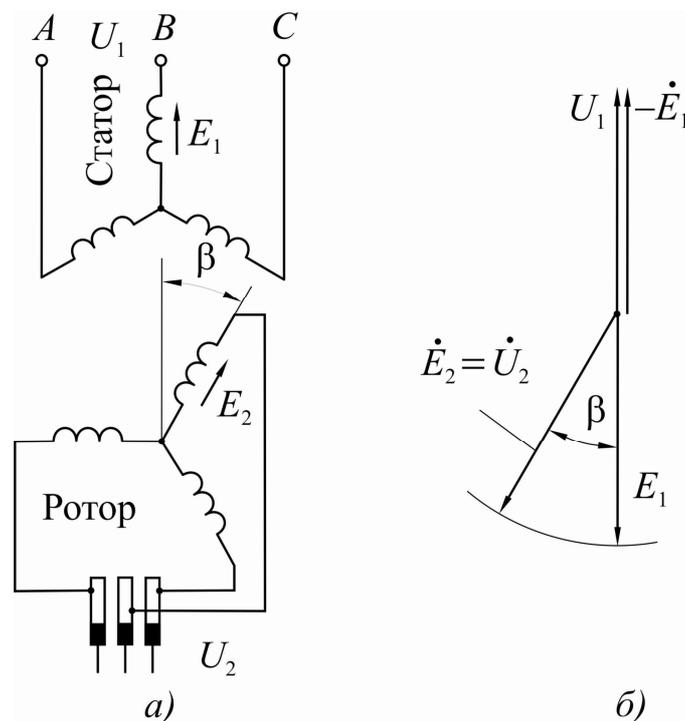


Рис. 4.8. Схема (а) и векторная диаграмма (б) фазорегулятора при $p = 1$

При повороте ротора относительно статора амплитуда ЭДС на роторе \dot{E}_2 не изменится, т. к. ЭДС в фазных обмотках ротора наводится вращающимся полем, а фаза (временной сдвиг между первичным и вторичным напряжением) изменится. Принимая активные и индуктивные сопротивления фазных обмоток ротора равными нулю, можно считать $\dot{U}_2 = \dot{E}_2$. При повороте ротора относительно статора на угол β изменяется и временной угол между напряжениями статора и ротора на величину $p\beta$.

Ротор относительно статора поворачивается вручную или с помощью привода. Как было сказано выше, на ротор действует пусковой момент, что следует учитывать при расчете самостопорящегося поворотного редуктора ротора фазорегулятора.

Промышленность выпускает трехфазные фазорегуляторы серии *ФР*, *ФРО* напряжением 220/380 В и мощностью до 18 кВ·А.

4.4.2. Индукционный регулятор

Конструктивно индукционный регулятор – это заторможенная асинхронная машина с фазным ротором, обмотки статора и ротора которой имеют автотрансформаторную связь (рис. 4.9).

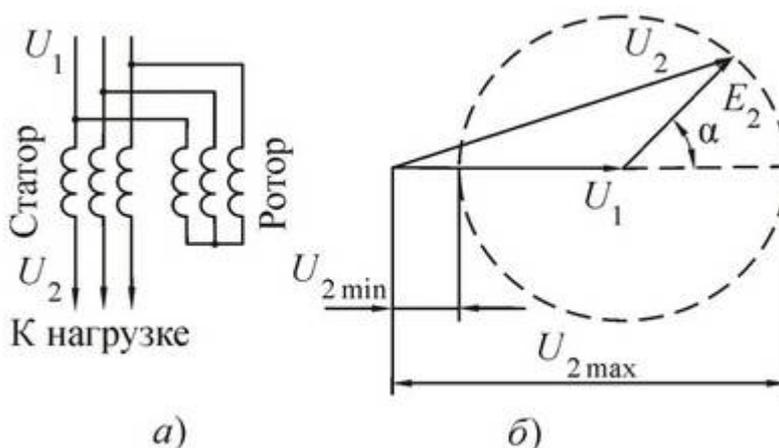


Рис. 4.9. Электрическая схема (а) и векторная диаграмма (б) индукционного регулятора

$$\dot{E}_2 = \frac{w_2 k_{об2}}{w_1 k_{об1}} \dot{E}_1,$$

где $\dot{E}_1 \approx \dot{U}_1$, $w_1; w_2$ – число витков обмоток статора и ротора; $k_{об1}, k_{об2}$ – коэффициенты обмоток статора и ротора.

Индукционный регулятор применяется для регулирования амплитуды переменного напряжения 2-, 3- и многофазных систем под нагрузкой. Напряжение на нагрузке \dot{U}_2 зависит от напряжения сети \dot{U}_1 и ЭДС \dot{E}_2 , наводимой в обмотке статора вращающимся магнитным потоком, создаваемым обмоткой ротора.

На векторной диаграмме (рис. 4.9, б) α – электрический угол между полюсами обмотки статора и ротора. При повороте полюсов обмотки ротора относительно полюсов статора конец вектора \dot{U}_2

перемещается по окружности и на выходе индукционного регулятора напряжение изменяется от $\dot{U}_{2\min}$ до $\dot{U}_{2\max}$. Следует различать *внешнюю* и *внутреннюю мощность* индукционного регулятора.

Внешняя мощность – мощность, которую мы отводим во внешнюю сеть (мощность нагрузки).

Внутренняя мощность – часть внешней мощности, трансформируемая внутри регулятора с обмотки ротора на обмотку статора. Ею и определяются геометрические размеры индукционного регулятора.

Рассмотренный нами регулятор называется *одиночным*. Напряжения \dot{U}_1 и \dot{U}_2 этого регулятора отличаются друг от друга по амплитуде и по фазе. Поэтому процесс регулирования напряжения при параллельной работе одиночного индукционного регулятора с обычным трансформатором не возможен. Для устранения этих недостатков два одиночных регулятора, имеющих одинаковые параметры, соединяют в один *сдвоенный индукционный регулятор* по схеме (рис. 4.10, а). Роторы закрепляют на одном валу, а их обмотки включены в сеть параллельно.

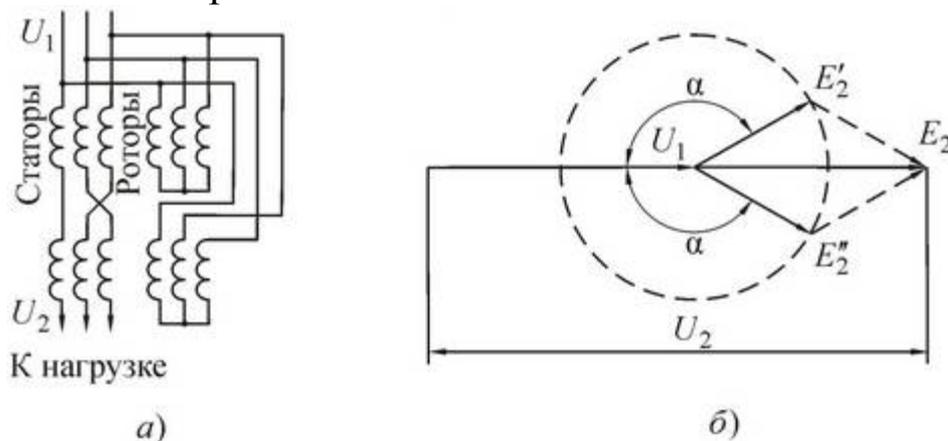


Рис. 4.10. Схема (а) и векторная диаграмма (б) сдвоенного индукционного регулятора

Порядок следования фаз обмоток ротора и статора одного из регуляторов изменяют на обратный путем переключения концов двух фаз таким образом, что при повороте ротора одного из регуляторов по направлению вращения поля ротор другого регулятора поворачивается против направления вращения своего поля. При повороте роторов в какую-нибудь сторону ЭДС статоров будет сдвигаться в противоположных направлениях. Если пренебречь падени-

ем напряжения в регуляторе, то напряжение \dot{U}_2 всегда будет совпадать по фазе с напряжением \dot{U}_1 .

Механические моменты, создаваемые каждым из одиночных регуляторов, направлены в противоположные стороны, и, следовательно, суммарный вращающий момент на валу сдвоенного регулятора будет стремиться к нулю.

По условиям электрической прочности изоляции обмоток статора и ротора ограничивают применение индукционных регуляторов сетями с напряжением до 6–12 кВ, но в отдельных случаях они встречаются и на 18 кВ.

Промышленностью серийно выпускаются индукционные регуляторы напряжения серии ИР с пределом регулирования напряжения 0–11 кВ и мощностью до 2000 кВ·А. Регуляторы большой и средней мощности чаще всего выполняются с масляным охлаждением. При этом регулятор ставят вертикально, чтобы использовать естественное движение масла в вертикальных каналах для целей охлаждения, как и в трансформаторах.

4.5. Асинхронная машина двойного питания

Асинхронная машина с фазным ротором может работать в режиме *машины двойного питания* (рис. 4.11). В этом случае обмотка статора подключается к питающей сети непосредственно, а обмотка ротора – к преобразователю частоты (ПЧ).

Для выполнения третьего принципа электромеханического преобразования энергии векторы МДС статора и ротора должны быть взаимно неподвижны, т. е.

$$\omega_p = \omega_c \pm \omega_2 = \frac{2\pi f_1}{p_1} \pm \frac{2\pi f_2}{p_2},$$

где ω_2 – скорость вращения вектора МДС поля ротора относительно самого ротора; знак «+» означает, что векторы МДС ротора и статора вращаются в разные стороны, а знак «–» – в одном направлении.

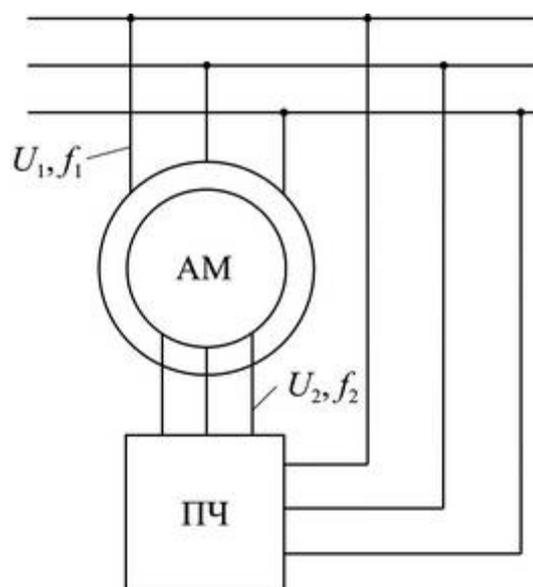


Рис. 4.11. Принципиальная схема асинхронного двигателя двойного питания

Машина двойного питания, хотя и имеет конструкцию асинхронной машины с фазным ротором, работает в режиме *синхронной скорости* и вращается под воздействием синхронного момента. Если момент сопротивления вращению на валу M_c превышает синхронный вращающий момент машины двойного питания, машина выпадает из синхронизма и возникает режим *асинхронной скорости*, при котором машина двойного питания переходит в режим асинхронного генератора частоты и выдает в первичную и вторичную сеть токи с частотой скольжения, вредно отражающиеся на работе как сети, так и питающих ее генераторов.

Асинхронная машина двойного питания может работать в двигательном и в тормозном режиме в широком диапазоне частот вращения. Она обладает высокими регулировочными свойствами и позволяет, кроме всего прочего, регулировать реактивную мощность, потребляемую машиной из сети, или даже отдавать ее в сеть. На основе машины двойного питания созданы различные *каскадные схемы* включения асинхронных машин с фазным ротором, рассмотренные нами ниже.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. В каких генераторных режимах может работать асинхронная машина?

2. Назовите условия самовозбуждения асинхронного генератора в автономном режиме работы.

3. Изобразите векторную диаграмму асинхронной машины при работе в режиме генератора параллельно с сетью.

4. Назовите тормозные режимы работы асинхронной машины.

5. Изобразите схему включения асинхронной машины в режиме конденсаторного торможения.

6. Изобразите механические характеристики асинхронного двигателя при динамическом торможении.

7. Изобразите схему включения и векторную диаграмму асинхронной машины, работающей в режиме фазорегулятора.

8. Изобразите схему включения и векторную диаграмму асинхронной машины, работающей в режиме индукционного регулятора.

9. Чем отличается двоярный индукционный регулятор от одиночного?

10. Изобразите схему и поясните работу асинхронного преобразователя частоты.

5. ПУСК ТРЕХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

5.1. Общие замечания

Пуск электромеханической системы заключается в подсоединении двигателя к источнику энергии и разгоне его до требуемой скорости. Режим пуска является переходным процессом в электромеханической системе. Пуск в ход сопровождается увеличением запаса кинетической энергии движущихся элементов установки (механический переходной процесс), увеличением электромагнитной энергии в обмотках двигателя (электромагнитный переходной процесс) и повышением температуры элементов конструкции двигателя (тепловой переходной процесс).

Основными характеристиками пуска электрического двигателя являются величина пускового момента и величина пускового тока.

Все способы пуска асинхронного двигателя должны удовлетворять ряду требований:

- двигатель должен развивать пусковой момент больший, чем статический момент сопротивления на валу;
- пусковой ток должен быть ограничен по величине и во времени (схема пуска должна быть снабжена максимальной защитой и защитой от затяжного пуска);
- схема пуска должна быть по возможности простой, надежной и дешевой.

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором составляют основную массу асинхронных электрических машин, находящихся в эксплуатации. Среди существующих способов пуска асинхронных двигателей мы выделим следующие:

- прямое включение в сеть;
- пуск при пониженном напряжении;
- реакторный и автотрансформаторный пуск;
- пуск переключением схемы соединения обмотки статора со звезды на треугольник;
- «мягкий» пуск с помощью тиристорного регулятора напряжения;
- пуск асинхронного двигателя с фазным ротором с помощью пускового реостата в цепи ротора.

Рассмотрим названные способы пуска АД в ход более подробно.

5.2. Прямой пуск асинхронного двигателя

Способ прямого пуска заключается в том, что обмотка статора асинхронного двигателя включается непосредственно в сеть (рис. 5.1), на номинальное напряжение обмотки статора.

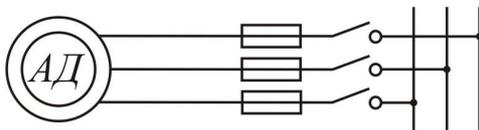


Рис. 5.1. Прямой пуск асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

В связи с тем, что современные электрические сети имеют достаточно большую мощность, в настоящее время это наиболее

распространенный способ пуска асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором малой и средней мощности.

Пусковой ток при прямом пуске определится как:

$$I_{\text{пуск}} = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r'_2)^2 + (x_1 + x'_2)^2}}.$$

Тепловая энергия, выделяющаяся в обмотке ротора асинхронного двигателя при прямом пуске на холостом ходу, количественно равна кинетической энергии, запасаемой в приводимых им во вращение маховых массах:

$$A_{\text{теп}}^{\text{рот}} = A_{\text{кин}} = \frac{(J_{\text{пр}} + J_{\text{рот}})\omega^2}{2},$$

где $J_{\text{рот}}, J_{\text{пр}}$ – моменты инерции ротора и приведенный момент инерции маховых масс рабочей машины соответственно.

При пуске под нагрузкой количество выделяемой тепловой энергии соответственно увеличивается.

С учетом потерь в статоре (обычно несколько больших, чем потери в роторе) полные потери энергии при пуске асинхронного двигателя в первом приближении составят:

$$A_{\text{теп}}^{\text{полн}} = A_{\text{кин}} \left(1 + \frac{r_1}{r'_2}\right),$$

где r_1 – активное сопротивление фазы обмотки статора; r'_2 – активное сопротивление фазы обмотки ротора, приведенное к статору.

Допустимое по условиям нагрева число пусков в час асинхронного двигателя, как правило, уменьшается с увеличением мощности двигателя и коэффициента инерции FI , характеризующего соотношение величин моментов инерции соединенных с валом маховых масс рабочей машины и ротора самого двигателя.

5.3. Эффект вытеснения тока в обмотке ротора асинхронного двигателя

Недостатки короткозамкнутых асинхронных двигателей – большие пусковые токи и малые пусковые моменты – привели к необходимости создания двигателей с улучшенной формой механических характеристик (рис. 5.2).

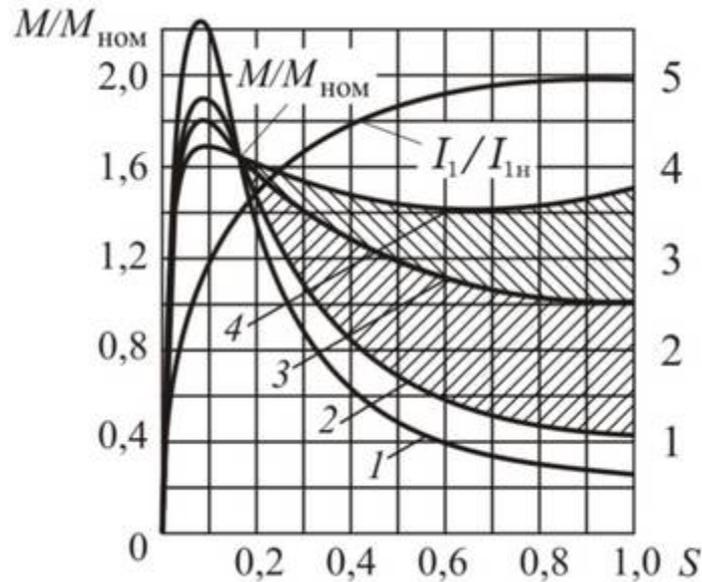


Рис. 5.2. Механические характеристики асинхронных двигателей с различным исполнением пазов на роторе: 1 – круглый паз; 2 и 3 – трапецеидальные пазы и глубокопазные; 3 и 4 – двойная беличья клетка и пазы колбообразной формы

Подобный вид характеристик достигается за счет специальной формы паза на короткозамкнутом роторе асинхронного двигателя (глубокий паз или двойная беличья клетка). Двухклеточный ротор, использующий эффект вытеснения тока для улучшения пусковых свойств асинхронного двигателя, был изобретен М. О. Доливо-Добровольским еще в 1893 году, но широкое практическое применение получил только через 30 лет.

Известно, что индуктивное сопротивление обмотки неподвижного ротора определяется как

$$x_2 = 2\pi s f_1 L_{\delta 2},$$

где $L_{\delta 2}$ – индуктивность, определяемая потоком рассеяния вторичной (роторной) обмотки.

Глубокий паз короткозамкнутой обмотки ротора схематически показан на рис. 5.3, а. Здесь же нанесена картина магнитного поля рассеяния при неподвижном роторе.

Все магнитные силовые линии, создаваемые токами, проходящими по сечению проводника, лежащего в данном пазу, замыкаются по пути наименьшего магнитного сопротивления через толщу сердечника ротора под дном паза.

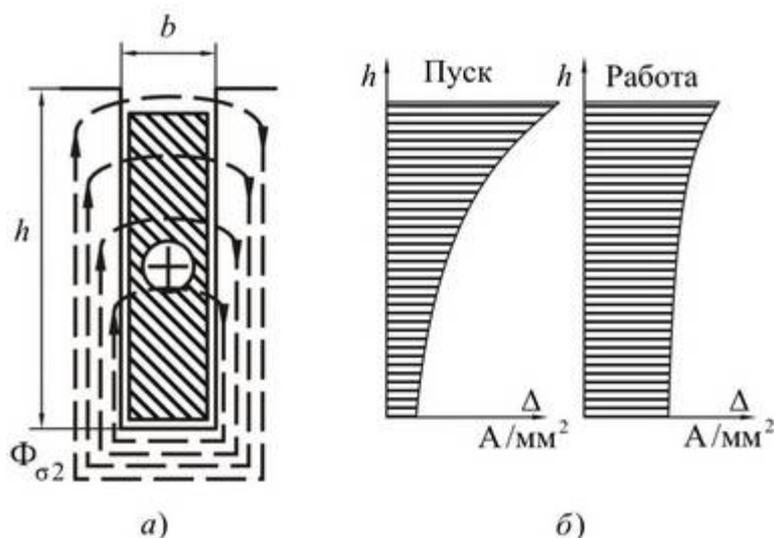


Рис. 5.3. Распределение силовых линий магнитного поля рассеяния в обмотке ротора с глубоким пазом (а); б – изменение плотности тока в обмотке по высоте паза при пуске ($s = 1$) и при работе асинхронной машины ($s = s_n$)

При этом отдельные элементы проводника в пазу, в зависимости от удаления от дна паза, охвачены различным числом силовых линий потока рассеяния: нижние элементы проводника охвачены большим числом силовых линий, и, соответственно, их индуктивность, а следовательно, и индуктивное сопротивление x_2 существенно больше, чем верхних. В итоге ток $I_2 = \frac{E_2}{r_2 + jx_2}$ в проводнике, лежащем в пазу, вытесняется к открытой поверхности паза магнитопровода ротора и распределяется по сечению проводника неравномерно (рис. 5.3, б).

По мере повышения скорости вращения ротора частота тока в его обмотке начинает снижаться $f_2 = f_1 s$, соответственно снижается и индуктивное сопротивление обмотки x_2 . При скорости вращения ротора близкой к номинальной, когда частота f_2 составляет всего несколько герц, индуктивное сопротивление x_2 становится

мало и плотность тока $I_2 = \frac{E_2}{r_2 + jx_2}$ по высоте паза выравнивается

(рис. 5.3, б).

Вытеснение тока происходит в роторных обмотках двигателей любого исполнения. Но при обычной глубине паза h , порядка $10 \div 12$ мм, оно малозаметно. Наоборот, в глубокопазных (и двухкле-

точных) двигателях, при высоте стержня 20÷50 мм, оно проявляется весьма сильно и заметно изменяет параметры ротора. Вытеснение тока происходит практически только в той части проводника, которая заложена в паз (т. е. там, где проводник охвачен с трех сторон сталью), и не имеет места в лобовых частях обмотки ротора.

В обмотках роторов асинхронных машин явление вытеснения тока по направлению к воздушному зазору используется для получения положительного технического эффекта – улучшения пусковых характеристик при сохранении высоких энергетических показателей в номинальном режиме. В двухклеточном роторе для усиления эффекта вытеснения тока верхнюю клетку делают из материала с большим удельным сопротивлением (например, латуни), а нижнюю клетку из материала с меньшим удельным сопротивлением (например, из красной меди) и с большей площадью поперечного сечения, чем верхнюю клетку. В результате активное сопротивление верхней (пусковой) клетки получается в 5–6 раз больше сопротивления нижней (рабочей) клетки. При пуске, когда за счет эффекта вытеснения тока работает верхняя (пусковая) клетка, двигатель развивает большой пусковой момент:

$$M_{\text{пуск}} = \frac{p m_1 U_1^2 r_2'_{\text{верх.клетка}}}{2\pi f_1 [(r_1 + r_2')^2 + x_k^2]}, \quad (5.1)$$

(рис. 5.2, кривая 4). По мере разгона ротора двигателя эффект вытеснения тока снижается и в работу вступает нижняя (рабочая) клетка с малым активным сопротивлением, которое обеспечивает низкое критическое скольжение:

$$s_k = \frac{r_2'_{\text{(нижн.клетка)}}}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}}, \quad (5.2)$$

и, соответственно, жесткий рабочий участок механической характеристики (рис. 5.2, кривая 4). В верхней (пусковой) клетке при тяжелых условиях пуска (если электромеханическая система имеет высокий коэффициент инерции FI и пуск производится под нагрузкой) может выделяться большое количества тепла, и стержни верхней клетки за счет теплового расширения при пуске сильно удлиняются, а стержни нижней клетки могут оставаться еще холодными и не удлиняться. Поэтому, во избежание разрушения конструкции за счет тепловой деформации, стержни верхних и нижних клеток замыка-

ются отдельными короткозамыкающими кольцами, механически не связанными друг с другом.

Увеличение пускового момента асинхронного двигателя за счет углубления паза ротора ведет к повышению индуктивного сопротивления обмотки ротора x'_2 , что приводит, при прочих равных условиях, к уменьшению на 15÷20 % критического момента асинхронного двигателя M_{\max} , который обратно пропорционален $x_k = x_1 + x'_2$ (см. рис. 5.2):

$$M_{\max} = \pm \frac{pm_1 U_1^2}{4\pi f_1 \left[\pm r_1 + \sqrt{r_1^2 + x_k^2} \right]}.$$

Явление вытеснения тока проявляет себя и в обмотках статора, но здесь оно ведет только к снижению момента из-за увеличения сопротивления обмотки статора r_1 (5.1), является вредным и с ним уже приходится бороться. Для уменьшения эффекта вытеснения тока в обмотках статора отношение высоты и ширины параллельных проводников обмотки делают близким к единице. Кроме того, в машинах большой мощности выполняют транспозицию проводников обмоток статора. Напомним, что транспозиция проводников состоит в их переплетении таким образом, чтобы каждый проводник занимал на протяжении длины паза поочередно все положения по высоте паза составного проводника.

Применение закрытых пазов для укладки обмоток также позволяет устранить эффект вытеснения тока.

5.4. Пуск АД при пониженном напряжении

Пуск асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором при пониженном напряжении применяют в тех случаях, когда прямой пуск их вызывает большое падение напряжения в сети, а также при необходимости уменьшения пускового момента с целью снижения ударов в механических передачах при пуске. Снижение напряжения осуществляется включением в цепь статора активных или реактивных сопротивлений, а также за счет подключения двигателя к сети в период пуска через автотрансформатор. При пуске двигателей небольшой мощности на напряжение ниже 1000 В в цепь об-

мотки статора обычно включают активное сопротивление. Но при этом пропорционально квадрату напряжения на зажимах обмотки статора понижается также и пусковой момент (5.1), что является основным недостатком всех способов пуска при пониженном напряжении. Поэтому эти способы пуска применимы, когда двигатель пускается на холостом ходу или при неполной нагрузке (например, пуск вентиляторов, турбокомпрессоров). Для двигателей с напряжением питания выше 1000 В применяют реакторы, представляющие собой индуктивное сопротивление. Реакторный пуск осуществляют согласно схеме (рис. 5.4).

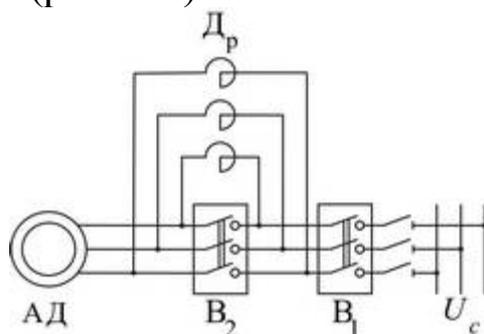


Рис. 5.4. Реакторный способ пуска асинхронного короткозамкнутого двигателя

Сначала включается выключатель B_1 , и двигатель получает питание через трехфазный реактор (реактивную или индуктивную катушку) D_p , сопротивление которого x_p ограничивает значение пускового тока. По достижении скорости вращения ротора близкой к номинальной включается выключатель B_2 , который шунтирует реактор, в результате чего на двигатель подается номинальное напряжение сети. Пусковые реакторы строятся обычно с ферромагнитным сердечником и рассчитываются по нагреву только на кратковременную работу. Это позволяет снизить их массу и стоимость. Если составляющие сопротивления короткого замыкания двигателя равны r_k и x_k , то начальный пусковой ток при реакторном пуске, при пренебрежении активным сопротивлением реактора, составит:

$$I_{п.р} = \frac{U_H}{\sqrt{r_k^2 + (x_k + x_p)^2}}.$$

Для двигателей значительной мощности при тяжелом режиме пуска применяют автотрансформаторный пуск, например схема (рис. 5.5).

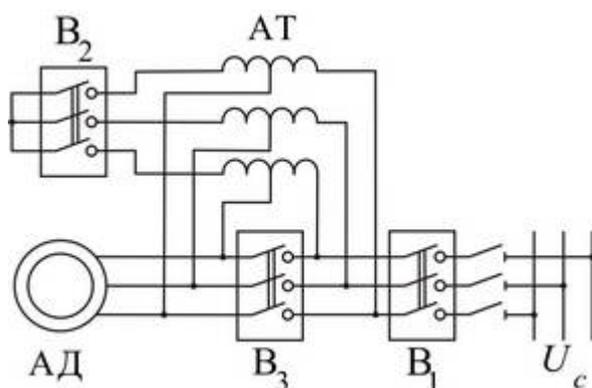


Рис. 5.5. Автотрансформаторный пуск асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Первыми включаются выключатели V_1 и V_2 , и на двигатель через автотрансформатор АТ подается пониженное напряжение. После достижения двигателем определенной скорости выключатель V_2 отключается и двигатель получает питание через часть обмотки трансформатора АТ, который в этом случае работает как реактор. Затем включается выключатель V_3 , в результате чего двигатель получает полное напряжение. Пусковые автотрансформаторы рассчитываются на кратковременную работу и обычно имеют ответвления, соответствующие значениям вторичного напряжения равным 73, 64 и 55 % от первичного при прямой схеме включения.

В каждом конкретном случае выбирается подходящая ступень включения. Автотрансформаторный пуск обеспечивает при одинаковом пусковом токе больший пусковой момент, но это преимущество автотрансформаторного пуска достигается ценой значительно усложнения и удорожания пусковой аппаратуры. Поэтому автотрансформаторный пуск применяется реже реакторного, при более тяжелых условиях, когда реакторный пуск не обеспечивает необходимого пускового момента.

5.5. Пуск асинхронного двигателя переключением схемы соединения обмотки статора со звезды на треугольник

Может применяться в случаях, когда выведены все шесть концов обмотки статора и двигатель нормально работает с соединением обмотки статора в треугольник, например, когда двигатель на напряжение 380/220 В и с соединением обмоток Y/Δ работает от сети 220 В (рис. 5.6).

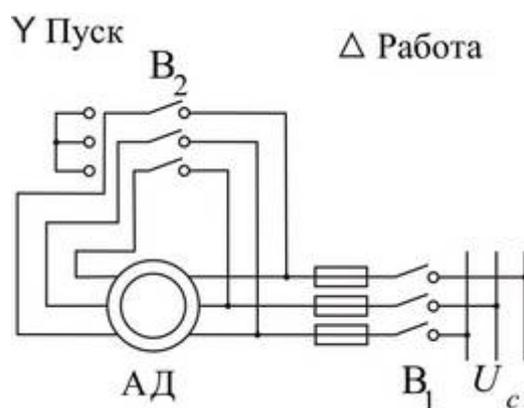


Рис. 5.6. Схема пуска двигателя с короткозамкнутым ротором с переключением со звезды на треугольник

При таком способе пуска обмотка статора переключателем Π включается в звезду, а при достижении номинальной скорости вращения переключается в треугольник. В этом случае, по сравнению с прямым включением, при соединении обмотки в треугольник напряжение фаз обмоток уменьшается в $\sqrt{3}$ раз, пусковой момент уменьшается в $(\sqrt{3})^2 = 3$ раза, пусковой ток в фазах обмоток уменьшается в $\sqrt{3}$ раз, а в сети в 3 раза. Рассматриваемый способ пуска эквивалентен автотрансформаторному пуску при коэффициенте трансформации $k_{ат} = \sqrt{3}$.

Недостатком этого способа пуска по сравнению с реакторным и автотрансформаторным является то, что при пусковых переключениях цепь двигателя разрывается, что связано с возникновением коммутационных перенапряжений. Посредством специальных переключателей (без разрыва тока) несколько усложненной конструкции этот недостаток можно устранить.

Способ переключения обмоток статора, но только в обратном порядке, т. е. Δ/Y , иногда применяется для улучшения энергетических показателей асинхронных двигателей при нагрузках, не превышающих 30–40 % от номинальной. Кривые зависимостей η , $\cos \varphi$ и $I_1 = f(P_2)$ при соединении обмоток статор по схеме Δ и Y показаны на рис. 5.7.

Мы видим, что переключение Δ/Y при малых нагрузках весьма благотворно влияет на величину $\cos \varphi$ и η асинхронных двигателей и является важным мероприятием по экономии энергоресурсов на предприятии.

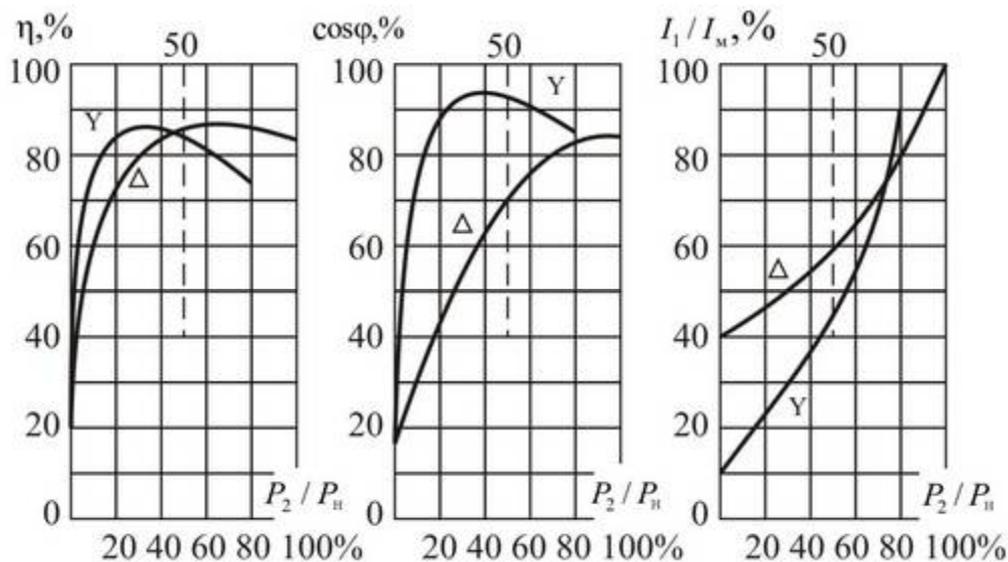


Рис. 5.7. Рабочие характеристики асинхронного двигателя при соединении обмотки статора по схеме Δ и Y

5.6. Пуск асинхронного двигателя с фазным ротором с помощью пускового реостата

В электромеханических системах с большой частотой пусков и для получения больших пусковых моментов применяют двигатели с фазным ротором. Пуск двигателей с фазным ротором производится с помощью пускового реостата в цепи ротора (рис. 5.8).

Асинхронные двигатели с фазным ротором используются в следующих случаях:

1) когда двигатели с короткозамкнутым ротором неприемлемы по условиям регулирования скорости вращения;

2) когда статический момент сопротивления на валу при пуске $M_{ст}$ велик и превышает пусковой момент $M_{пуск}$ асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с пуском при пониженном напряжении, а прямой пуск неприемлем по условиям воздействия больших пусковых токов на сеть;

3) когда приводимые в движение маховые массы настолько велики, что выделяющаяся во вторичной цепи двигателя тепловая энергия вызовет недопустимый нагрев обмотки короткозамкнутого ротора.

В качестве пусковых реостатов R применяют проволочные, масляные или жидкостные реостаты.

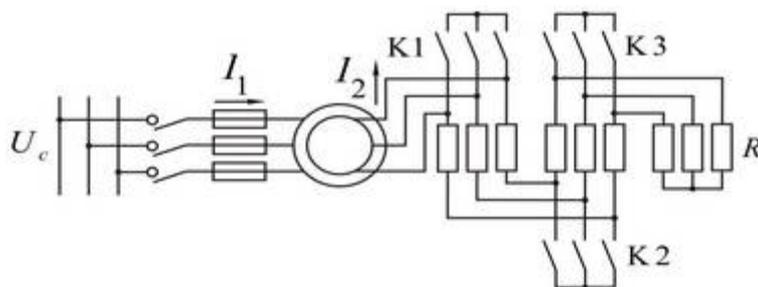


Рис. 5.8. Схема пуска асинхронного двигателя с фазным ротором с помощью пускового реостата R

Перед пуском щетки должны быть опущены на контактные кольца ротора, а все ступени реостата R включены. Далее в процессе пуска поочередно включаются контакторы $K3$, $K2$, $K1$. Зависимость вращающего момента двигателя $M = f(s)$ и вторичного тока $I_2 = f(s)$ от скольжения при работе на различных ступенях реостата изображена на рис. 5.9.

Предположим, что сопротивления ступеней пускового реостата и интервалы времени переключения ступеней реостата подобраны так, что момент двигателя M при пуске меняется в пределах от некоторого M_{\max} до M_{\min} и при включении в сеть $M_{\Pi} = M_{\max} > M_{\text{ст}}$ (кривая 3 на рис. 5.9, а).

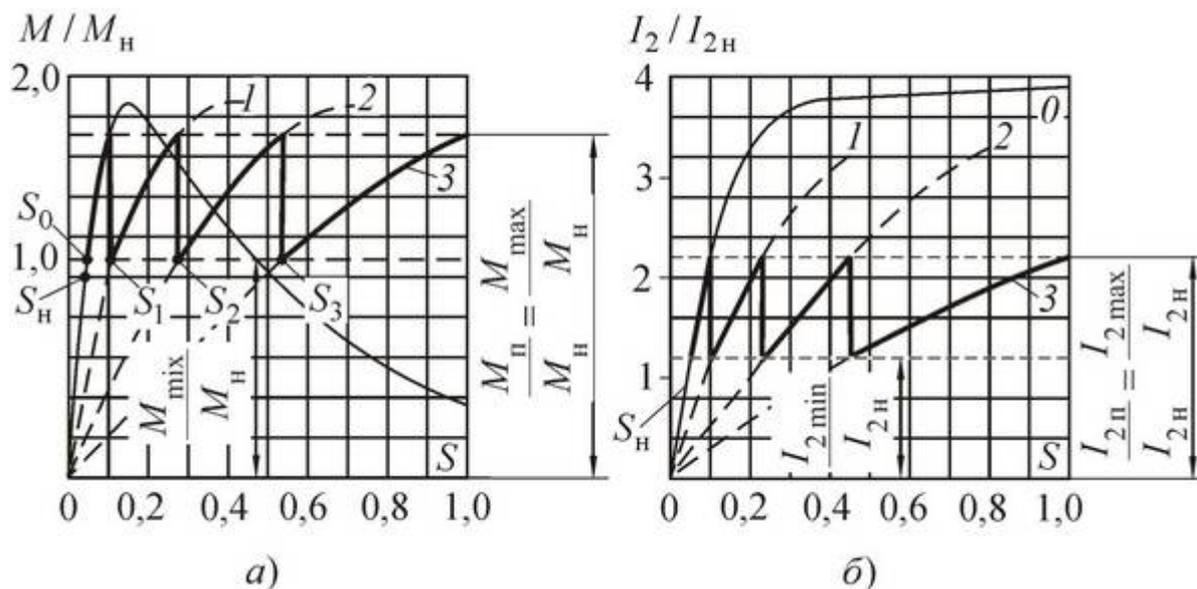


Рис. 5.9. Последовательное изменение при реостатном пуске асинхронного двигателя: а – вращающего момента; б – тока ротора

В начале пуска двигатель работает на характеристике 3, ротор приходит во вращение, скольжение S начинает уменьшаться, и при $s = s_3$, когда $M = \text{мин}$, происходит переключение реостата на вторую ступень. При этом будет двигатель работать на характеристике 2, и при дальнейшем разбеге двигателя скольжение уменьшится от $s = s_3$ до $s = s_2$, а момент – от значения $M = M_{\text{max}}$ до $M = M_{\text{min}}$. Затем производится переключение на первую ступень и т. д. После выключения последней ступени реостата двигатель переходит на работу по естественной характеристике и достигает установившейся скорости. Для пускового реостата с целью упрощения и удешевления схемы обычно выбирается 2÷3 ступени.

5.7. «Мягкий» пуск асинхронного двигателя с помощью тиристорного регулятора напряжения

Бурное развитие силовой электроники позволило снизить стоимость и габариты силовых тиристоров и транзисторов и создать на их основе полупроводниковые пусковые устройства (рис. 5.10).

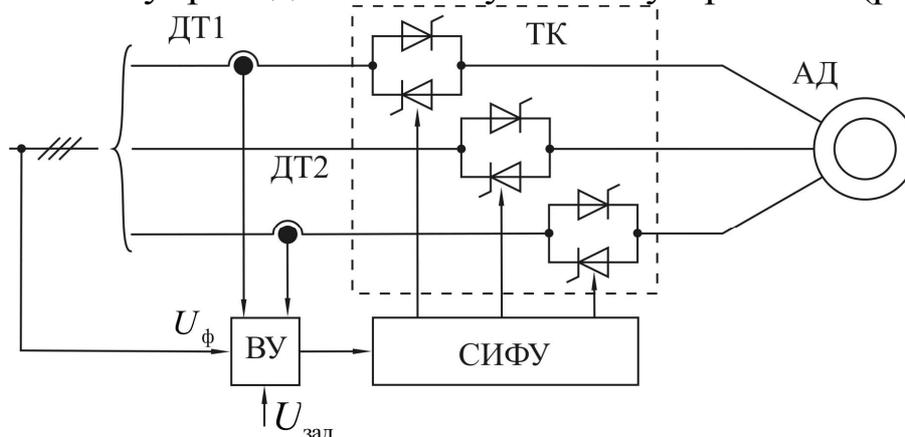


Рис. 5.10. Функциональная схема силовой части устройства мягкого пуска АД

Основным силовым элементом пускающего устройства является тиристорный (или транзисторный) ключ (ТК), представляющий собой в простейшем случае два встречно-параллельно включенных тиристора. Такой ключ включается в каждую из трех фаз статорной обмотки асинхронного двигателя (АД). Изменяя момент включения тиристоров, можно менять подводимое к статорной обмотке напряжение и, соответственно, регулировать величину пускового тока.

Наличие датчиков тока (ДТ1 и ДТ2) позволяет микропроцессорной системе управления поддерживать заданное значение пускового тока практически в течение всего времени разгона путем увеличения напряжения на обмотках статора. Устройство плавного пуска, позволяет также снизить тепловые потери в двигателе при пуске и, кроме основной задачи – плавного пуска позволяет обеспечить три варианта торможения асинхронного двигателя:

- выбегом, путем снятия управляющих импульсов с ТК и их запираания;
- скатом, путем плавного снижения подводимого к статорной обмотке напряжения;
- динамическим торможением, путем подачи на статорную обмотку асинхронного двигателя постоянного напряжения (перевод ТК в режим выпрямления тока).

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Назовите способы пуска асинхронных двигателей.
2. Какими показателями характеризуются пусковые свойства АД?
3. Назовите достоинства и недостатки прямого пуска АД.
4. Объясните реакторный и автотрансформаторный способ пуска АД.
5. Назовите достоинства и недостатки пуска АД путем переключения схемы соединения обмотки статора Y/Δ .
6. Поясните, почему при малой нагрузке АД (до 40 %) переключение схемы соединения обмотки статора с Δ на Y позволяет экономить энергию.
7. Покажите схему реостатного пуска АД с фазным ротором.
8. Поясните принцип действия устройства «мягкого пуска» асинхронного двигателя.

6. РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ТРЕХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором – самые распространенные и дешевые электрические машины, но системы регулирования частоты их вращения пока сложны и дороги.

Известно, что скорость вращения ротора ω_p (рад/с) зависит от скольжения s , частоты тока статора f_1 и числа пар полюсов обмотки статора p :

$$\omega_p = \omega_0(1-s) = \frac{2\pi f_1}{P}(1-s). \quad (6.1)$$

Исходя из приведенного выражения, все существующие способы регулирования скорости вращения ротора можно разделить на две группы.

Первую группу составляют способы, основанные на регулировании скорости вращения поля статора ω_0 , что достигается согласно (6.1):

- изменением числа пар полюсов (p) обмотки статора;
- изменением частоты питающего напряжения (f_1).

В этом случае КПД двигателя остается высоким во всем диапазоне регулирования скорости.

Ко второй группе относятся способы, основанные на регулировании скорости путем изменения скольжения s при постоянной скорости вращения поля статора $\omega_0 = \text{const}$:

- параметрические способы регулирования скорости АД;
- каскадные схемы включения АД.

При этом способе регулирования скорости АД КПД асинхронного двигателя изменяется в широких пределах и зависит от величины скольжения s , которое определяет величину электромагнитной мощности, передаваемой на ротор через воздушный зазор:

$$P_s = sP_{\text{эм}}.$$

Рассмотрим основные способы регулирования скорости вращения асинхронных двигателей более подробно.

6.1. Регулирование скорости вращения ротора путем изменения числа пар полюсов обмотки статора

Некоторые производственные механизмы по ходу технологического процесса должны работать с различными скоростями вращения, но при этом не требуют ее плавного регулирования, а достаточно иметь двигатель с дискретным, ступенчатым изменением скорости вращения. К таким механизмам относятся некоторые металлообрабатывающие станки, насосы, вентиляторы, подъемные и другие механизмы. Ограниченное число фиксированных скоростей

вращения может быть получено с помощью асинхронных двигателей, в которых обмотка статора переключается на различное число пар полюсов. Для этого способа регулирования скорости обычно используют двигателей с короткозамкнутым ротором, т. к. при этом требуется изменять число пар полюсов P только обмотки статора, а беличья клетка короткозамкнутого ротора автоматически образует число полюсов, равное числу полюсов обмотки статора.

Используются две конструкции статорных обмоток многополюсных двигателей:

- несколько независимых обмоток на статоре (чаще всего две), уложенных в общих пазах и имеющих различное число пар полюсов;
- одну специальную обмотку, которая позволяет получить различное число пар полюсов путем изменения (переключения) схемы соединения секций обмотки.

Многоскоростные двигатели с несколькими независимыми обмотками на статоре по техническим и экономическим показателям уступают однообмоточным. У них неэффективно используется обмотка статора (в каждый момент времени работает только одна из обмоток), более низкий КПД и $\cos\phi$. Поэтому основное распространение получили двухскоростные однообмоточные двигатели с переключением секций обмотки на различное число пар полюсов.

Обычно многоскоростные двигатели выпускаются на 2, 3 и 4 скорости вращения. Причем двухскоростные двигатели изготавливаются с одной обмоткой на статоре и переключением числа пар полюсов в отношении 2 : 1, трехскоростные двигатели – с двумя обмотками на статоре, из которых одна выполняется с переключением $p_2 : p_1 = 2 : 1$, четырехскоростные двигатели – с двумя независимыми обмотками на статоре, каждая из которых выполняется с переключением числа пар полюсов в отношении 2 : 1. Например, двигатель на $f_1 = 50$ Гц с синхронными скоростями вращения 1500/1000/750/500 об/мин имеет одну обмотку с переключением на $2p = 4$ и 8 и другую обмотку с переключением на $2p = 6$ и 12.

Каждая фаза обмотки с переключением числа пар полюсов в отношении 2 : 1 (рис. 6.1) состоит из двух частей или половин с одинаковым количеством катушечных групп в каждой части.

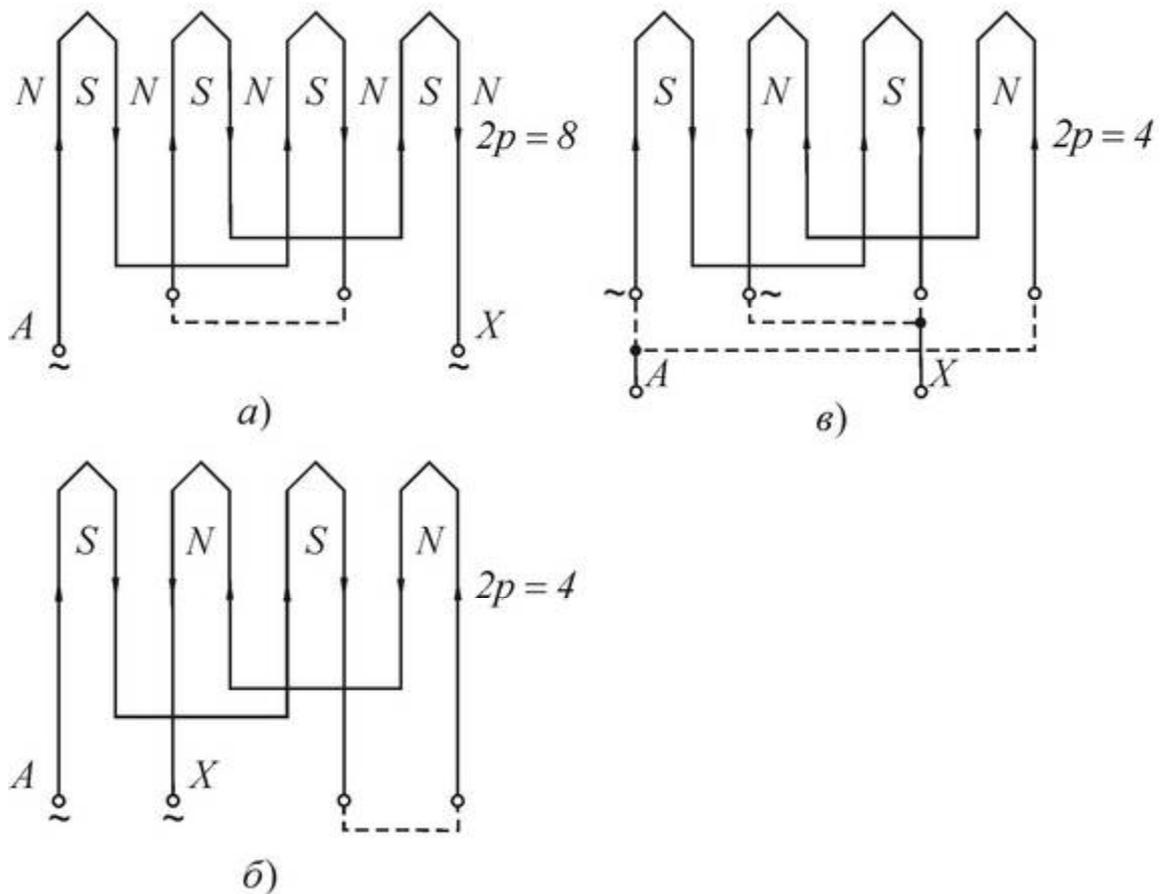


Рис. 6.1. Переключение секций фазной обмотки статора на различное число пар полюсов

Когда обе части обмотки обтекаются токами одинакового направления, обмотка создает магнитное поле с большим числом полюсов (рис. 6.1, а; $2p = 8$), а при изменении направления тока в одной части обмотки на обратное число полюсов уменьшается вдвое (рис. 6.1, б; $2p = 4$). Такие переключения производятся одновременно, и переключаемые части обмотки могут соединяться последовательно (рис. 6.1, а и б) или параллельно (рис. 6.1, в).

Ширина фазной зоны, занимаемой сторонами катушек катушечной группы, и шаг обмотки в зубцовых делениях одинаковы при обоих числах полюсов. Поскольку, при переключении числа пар полюсов в отношении 2 : 1 полюсное деление изменяется в два раза, то величина фазной зоны в электрических градусах и относительный шаг обмотки при этом тоже изменяются в два раза.

Механические характеристики для двухскоростного двигателя с переключением секций обмотки статора представлены на рис. 6.2.

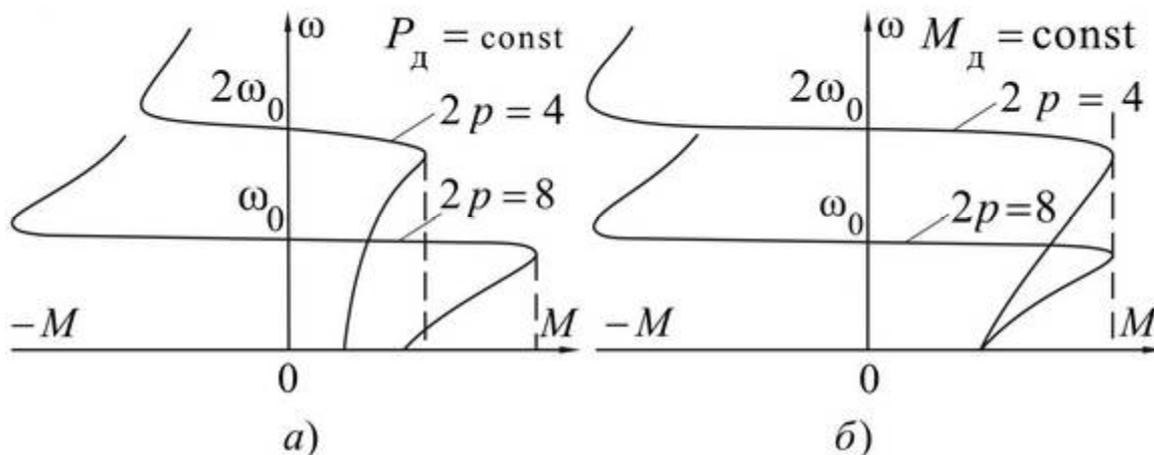


Рис. 6.2. Механические характеристики асинхронного двигателя при переключении обмотки статора на различное число пар полюсов: *а* – при переключении от схемы (рис. 6.1, *а*) к схеме (рис. 6.1, *б*) с сохранением постоянной мощности; *б* – при переключении от схемы (рис. 6.1, *а*) к схеме (рис. 6.1, *в*) при сохранении постоянным момента

На рис. 6.3 и 6.4 представлены наиболее часто применяемые схемы обмоток с переключением числа пар полюсов в отношении 2 : 1.

Определим мощности и моменты двигателей с такими схемами обмоток при одинаковом линейном напряжении сети $U_{л1}$ и номинальных токах в полуфазах обмоток I_{ϕ} . Считаем, что условия охлаждения, КПД и $\cos\varphi$ при одинаковых I_{ϕ} для обеих скоростей вращения также одинаковы.

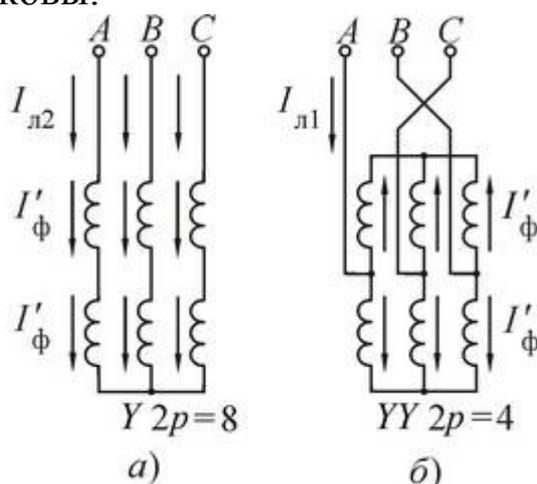


Рис. 6.3. Принципиальная схема включения обмоток $Y/Y\bar{Y}$ с переключением числа полюсов в отношении 2 : 1 при постоянном моменте

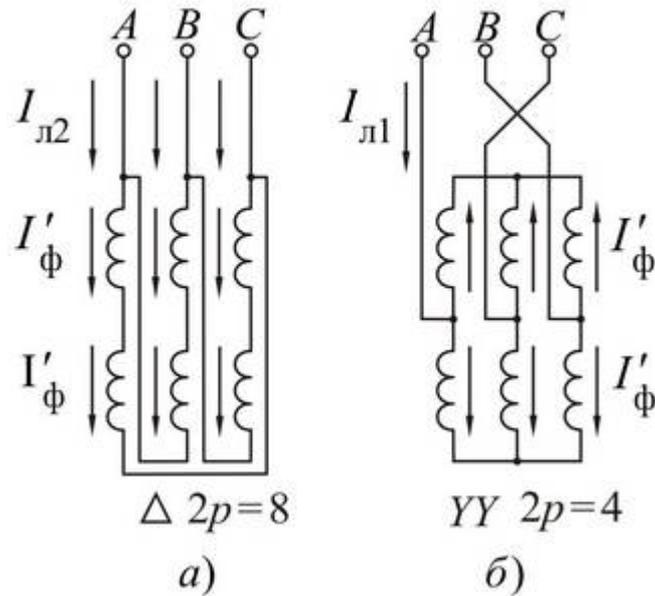


Рис. 6.4. Переключение обмоток по схеме Δ/YY при постоянной мощности

При указанных условиях механические мощности для схем (рис. 6.3, а; 6.3, б) соответственно равны:

$$P'_1 = \sqrt{3}U_{л1}I'_\phi\eta\cos\varphi_1; \quad P''_1 = \sqrt{3}U_{л1}2I'_\phi\eta\cos\varphi_1.$$

Таким образом:

$$\frac{P''_1}{P'_1} = 2$$

и, следовательно, при переходе от меньшей скорости вращения (рис. 6.3, а) к большей (рис. 6.3, б) допустимая мощность на валу увеличивается в два раза.

Момент вращения при этом, очевидно, остается постоянным, и поэтому схема переключения Y/YY (рис. 6.3) называется также *схемой переключения с постоянным моментом*. Механические характеристики асинхронного двигателя со схемой Y/YY переключения приведены на рис. 6.2, б.

При схемах соединения (рис. 6.4, а и б) получаем соответственно:

$$P'''_1 = \sqrt{3}U_{л1}\sqrt{3}I'_\phi\eta\cos\varphi_1; \quad P''_1 = \sqrt{3}U_{л1}2I'_\phi\eta\cos\varphi_1,$$

откуда:

$$\frac{P''_1}{P'''_1} = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1,15.$$

Обычно при использовании схемы (рис. 6.4) для обеих скоростей вращения указывается одинаковая номинальная мощность $P'''_1 \approx P''_1$

и схема переключения $\Delta Y Y$ называется *схемой переключения с постоянной мощностью*.

Вид механических характеристик АД представлен на рис. 6.2, а, что соответствует схемам переключения обмоток (рис. 6.4).

Масса и стоимость многоскоростных двигателей несколько больше, чем у двигателей нормального исполнения такой же мощности.

6.2. Регулирование скорости вращения асинхронного двигателя изменением частоты питающего напряжения

Это наиболее перспективный и экономически целесообразный способ регулирования скорости вращения асинхронного двигателя. Для его осуществления необходимо питание асинхронного двигателя от специальных установок – преобразователей частоты. Практически частотное управление начало развиваться с появлением полупроводниковых приборов.

Сложность практической реализации частотного способа регулирования скорости вращения асинхронного двигателя состоит в том, что наряду с изменением частоты возникает еще и необходимость одновременно с частотой регулировать амплитуду фазного напряжения, подаваемого на обмотки статора.

В асинхронной машине, как и у трансформатора, на холостом ходу фазное напряжение сети уравнивается ЭДС взаимной индукции фазной обмотки:

$$U_1 = 4,44 f_1 w_1 k_{об1} \Phi, \quad \text{или} \quad U_1 \equiv f_1 \Phi.$$

Один из первых законов частотного управления был разработан М. П. Костенко и заключался он в том, что при частотном регулировании скорости вращения ротора асинхронного двигателя отношение относительных значений частоты $f_1^* = f_1 / f_{1н}$ амплитуды питающего фазного напряжения $u_1^* = U_1 / U_{1н}$ должно быть постоянным:

$$\frac{U_1^*}{f_1^*} = \text{const}.$$

В настоящее время электромеханики предлагают более 12 зависимостей (законов управления) между частотой, напряжени-

ем, моментом, магнитным потоком, током статора и другими параметрами, позволяющими оптимизировать работу асинхронной машины при частотном управлении по различным критериям качества ее функционирования. На рис. 6.5 показаны механические характеристики асинхронного двигателя при питании напряжением регулируемой частоты и постоянном магнитном потоке.

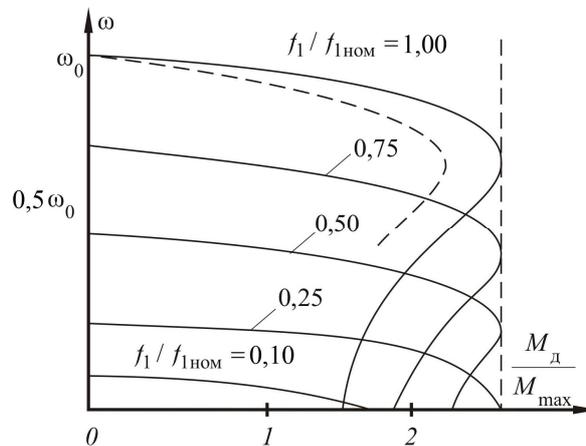


Рис. 6.5. Механические характеристики асинхронного двигателя при питании напряжением регулируемой частоты и постоянном магнитном потоке

Системы частотного регулирования скорости вращения асинхронного двигателя обычно имеют обратные связи по регулируемым параметрам, т. е. строятся как замкнутые системы управления. В технике используются различные типы преобразователей частоты с несинусоидальным выходным напряжением.

Возникающие в этом случае высшие временные гармоники напряжения и тока вызывают дополнительные потери мощности и несколько снижают энергетические показатели регулируемого асинхронного двигателя. Для частотного регулирования часто применяют обычные серийные асинхронные двигатели, предназначенные для работы при постоянной частоте. Однако такой электропривод нельзя считать оптимальным. В отечественных сериях асинхронных двигателей для этой цели предусмотрена специальная модификация электрических машин, при разработке которой в той или иной степени учитываются следующие особенности работы частотно-регулируемых асинхронных двигателей:

1. Частотно-регулируемым двигателям не требуются глубокие пазы короткозамкнутого ротора для увеличения пускового момента (см. гл. 5.3), так как преобразователь частоты реализует «мягкий

пуск» с постепенным увеличением частоты. Алгоритм управления преобразователем должен обеспечивать такое соотношение частоты и напряжения при пуске, при котором двигатель развивает максимально возможный пусковой момент при допустимом пусковом токе.

2. Число полюсов частотно-регулируемого двигателя должно быть согласовано с диапазоном регулирования частоты и передаточным числом редуктора. Отыскание оптимального соотношения этих величин представляет собой сложную технико-экономическую задачу.

3. Преобразователи частоты подключаются к сети стандартного уровня напряжения, а их наиболее простые схемы имеют на выходе отличные от предусмотренных стандартом значения напряжений. Поэтому оптимальный асинхронный двигатель для комплектного частотно-регулируемого привода может быть рассчитан на нестандартное номинальное напряжение.

4. При несинусоидальном питающем напряжении (токе) нет необходимости стремиться к гармоническому распределению магнитного поля в воздушном зазоре асинхронного двигателя. Там присутствуют временные гармоники порядков i , пространственные гармоники порядков ν и их комбинации, вращающиеся со скоростями $n_{\nu,i} = 60if/(vp)$. При $i = \nu$ скорость $n_{\nu,i} = n_1$ и комбинационная гармоника может вращаться в направлении основной, добавляя свою составляющую в полезный вращающий момент двигателя.

Из этого следует, что при конструировании обмоток частотно-регулируемых двигателей надо критически относиться к способам борьбы с высшими гармониками принятых при проектировании стандартных частотно-нерегулируемых машин.

5. Из-за низкой эффективности собственных вентиляторов при работе на малых частотах частотно-регулируемые двигатели должны снабжаться автономными вентиляторами – наездниками, снабженными своими собственными двигателями.

6. При частотах f_1 значительно выше номинальных, высоким скоростям вращения ротора частотно-регулируемого двигателя должны соответствовать его подшипники, их смазочный материал, уплотнения и балансировка ротора.

7. В лучших современных преобразователях частоты используют широтно-импульсную модуляцию (ШИМ). При этом из прак-

тически прямоугольных импульсов с частотой порядка десятков килогерц формируется низкочастотная кривая рабочего напряжения (тока) статора двигателя. Крутые фронты импульсов вызывают волновые переходные процессы и импульсные перенапряжения в системе преобразователь-двигатель, для защиты от которых используют фильтры, заземление и усиление межвитковой изоляции и изоляции обмотки статора относительно корпуса статора.

8. При работе асинхронных двигателей от преобразователя частоты их КПД и $\cos \varphi_1$ меньше, чем при работе от сети с синусоидальным напряжением. КПД ниже в среднем на 2...3 %, а $\cos \varphi_1$ – на 5 %.

9. Несинусоидальность питающего напряжения приводит к возникновению добавочных высокочастотных потерь, что увеличивает нагрев двигателя и требует снижения в результате этого примерно на 10...25 % величины выходной мощности на валу двигателя.

Преобразователи частоты позволяют регулировать скорость асинхронного двигателя в очень широком диапазоне, сохраняя при этом его высокие энергетические показатели.

Однако наличие в электромеханической системе преобразователя частоты существенно повышает ее стоимость, требует наличия высококвалифицированного обслуживающего персонала и при определенном соотношении мощности преобразователя и мощности питающей сети требует рассмотрения вопросов их электромагнитной совместимости.

6.3. Параметрические способы регулирования скорости асинхронного двигателя

При параметрическом регулировании скорости за счет изменения критического скольжения возможно воздействие на четыре параметра асинхронной машины: r_1 , x_1 и соответственно r_2 , x_2 .

$$s_k = \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}}, \quad (6.2)$$

$$M_{\max} = M_{\text{кр}} = \pm \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_1 \left[\pm r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2} \right]}. \quad (6.3)$$

Влияние параметров первичной цепи статора можно проследить по выражениям (6.2) и (6.3) для критического скольжения и максимального момента в двигательном режиме. Критическое скольжение слабо зависит от активного сопротивления цепи статора. При введении дополнительного сопротивления в цепь статора значение s_k несколько уменьшается. Максимальный же момент может уменьшиться существенно и механическая характеристика приобретает вид, показанный на рис. 6.6.

Сопоставляя ее с естественной характеристикой двигателя (кривая 1 на рис. 6.6), можно сделать вывод, что введение активного сопротивления (кривая 2 на рис. 6.6) в цепь статора и индуктивного (кривая 3 на рис. 6.6) сопротивления в цепь статора и ротора мало влияет на скорость вращения ротора на рабочем участке механической характеристики.

Поэтому эти способы параметрического регулирования скорости малоэффективны и на практике в таком простейшем варианте не используются.

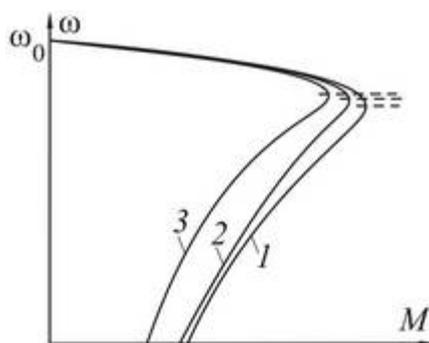


Рис. 6.6. Механическая характеристика асинхронного двигателя при изменении параметров первичной и вторичной цепи

Наиболее эффективный способ параметрического регулирования скорости – введение добавочного активного сопротивления в цепь ротора. Как было показано в предыдущей главе, при этом мы получаем семейство механических характеристик с постоянным максимальным моментом (рис. 6.7). Уже отмечалось, что эти же характеристики используются для ограничения пускового тока и поддержания постоянного момента, а также могут применяться для управления скоростью вращения ротора.

На рис. 6.7 показано, что изменяя r_2 , вводя в цепь ротора $r_{доб}$, можно при некотором значении статического момента M_c изменять скорость в широких пределах – от номинальной до нуля.

Однако практически можно регулировать скорость лишь при достаточно больших значениях статического момента. При малых значениях M_0 в режиме, близком к холостому ходу, диапазон регулирования скорости существенно сокращается и для заметного снижения скорости пришлось бы вводить весьма большие добавочные сопротивления. К недостаткам реостатного регулирования скорости следует отнести то, что скорость вращения двигателя нестабильна, т. к. из-за малой жесткости механических характеристик незначительные колебания момента будут вызывать существенные изменения скорости, а на холостом ходу регулирование скорости практически невозможно. Параметрическое регулирование скорости, естественно, связано с большими потерями энергии.

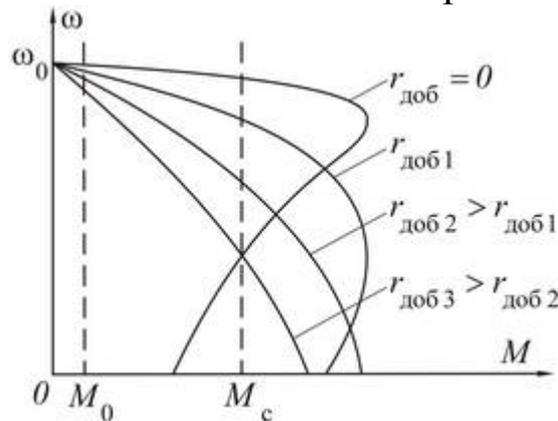


Рис. 6.7. Механические характеристики асинхронного двигателя при параметрическом регулировании скорости вращения ротора путем введения в цепь ротора добавочного сопротивления

Электромагнитная энергия, передаваемая через воздушный зазор со статора на ротор, преобразуется в механическую энергию с некоторыми потерями, пропорциональными скольжению s , и при $s = 1$ вся энергия преобразуется в тепло.

Поэтому параметрическое регулирование в основном используется только для кратковременного снижения скорости по ходу технологического процесса.

6.4. Регулирование скорости вращения ротора асинхронного двигателя путем изменения напряжения, подводимого к статору

Искусственные механические характеристики асинхронного двигателя, полученные при изменении напряжения питания, представлены на рис. 6.8.

Как видно из рисунка, в случае использования двигателей обычного исполнения диапазон регулирования скорости весьма ограничен и составляет несколько процентов от номинальной скорости ротора.

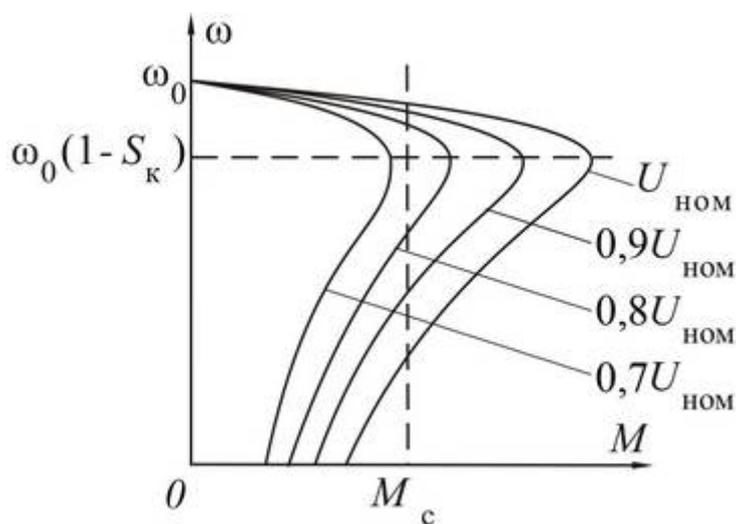


Рис. 6.8. Механические характеристики асинхронного двигателя при изменении напряжения в цепи статора

Несколько большим диапазоном регулирования скорости обладает двигатель с повышенным критическим скольжением. Однако в этом случае механические характеристики имеют малую жесткость (рис. 6.9).

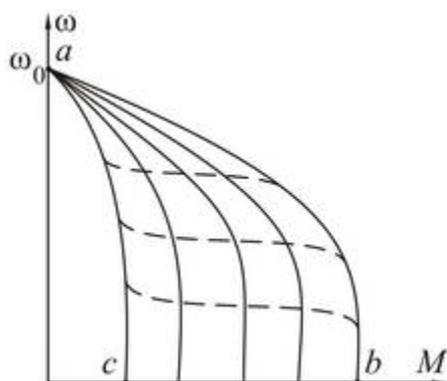


Рис. 6.9. Механические характеристики при регулировании скорости ротора изменением напряжения в цепи статора в замкнутой системе автоматического регулирования

Принципы работы замкнутых систем управления электрическими машинами рассматриваются в курсе электропривода.

6.5. Регулирование скорости вращения асинхронного двигателя посредством введения добавочной ЭДС в цепь фазного ротора

Регулирование скорости вращения асинхронного двигателя путем увеличения скольжения s всегда связано с выделением в цепи ротора двигателя значительной электрической мощности скольжения

$$P_s = sP_{эм},$$

большая часть, которой при реостатном регулировании теряется в реостате. Поэтому, естественно, возникает желание полезно использовать мощность скольжения P_s , повышая таким образом КПД всей установки.

Источником добавочной ЭДС, частота которой должна быть равна частоте тока ротора ($f_2 = sf_1$), может служить вспомогательный электромашинный или тиристорный преобразователь, включенный в цепь фазного ротора.

Такие схемы включения асинхронных двигателей с фазным ротором называют *каскадными*. Каскадная схема включения фактически представляет собой асинхронную *машину двойного питания*.

По способу реализации энергии скольжения P_s различают следующие схемы каскадных соединений:

- электромеханический каскад;
- электрический каскад;
- асинхронно-вентильный каскад.

В электромеханических каскадах энергия скольжения, исключая потери в промежуточных элементах системы, возвращается на вал асинхронного двигателя; в электрических каскадах энергия скольжения после соответствующего преобразования возвращается в питающую сеть.

На рис. 6.10, *а* и *б* представлены схемы электрического и электромеханического каскадов с указанием направлений главных потоков энергии и взаимной связи элементов этих систем. Ток ротора асинхронного двигателя имеет частоту, пропорциональную скольжению $f_2 = sf_1$, т. е. изменяющуюся при изменении скорости вращения ротора главного двигателя; ЭДС ротора также пропорциональна скольжению.

Для возвращения энергии в сеть необходимо, чтобы частота ЭДС была равна частоте сети, следовательно, в роторной цепи

главного двигателя необходим преобразователь частоты, ведомый сетью.

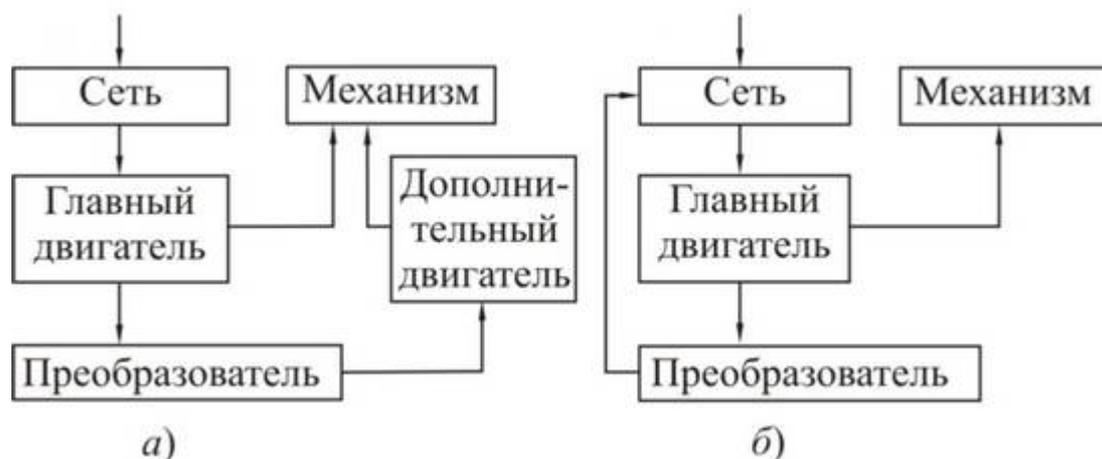


Рис. 6.10. Блок-схемы электромеханического (а) и электрического (б) каскадов

Возвращение энергии скольжения на вал главного двигателя возможно только с помощью дополнительного электрического двигателя. Если в качестве последнего применяется двигатель постоянного тока, то переменный ток в цепи ротора необходимо преобразовать в энергию постоянного тока, которая и будет реализована вспомогательным двигателем.

Преимущество каскадных схем заключается также в том, что мощность преобразовательного устройства выбирается, исходя только из мощности скольжения P_s , в отличие от других схем регулирования скорости (например, путем изменения частоты питающего напряжения статора), где преобразовательное устройство рассчитывается из условия пропускания полной мощности АД.

Это обстоятельство особенно важно при регулировании скорости мощных и сверхмощных двигателей.

Исторически классической схемой электромеханического каскада с промежуточным звеном постоянного тока является схема Крамера, а примером электрического каскадного соединения с промежуточным звеном постоянного тока – каскад Шербиуса. В этих системах в качестве преобразовательного устройства использовался одноякорный преобразователь (см. далее гл. 13, рис. 13.1). В свое время к практическому использованию каскадных схем включения асинхронных двигателей вновь обратились в связи с развитием си-

ловой полупроводниковой техники. На их базе были созданы так называемые вентильно-машинные каскады (рис. 6.11).

В этих каскадах вместо электромашинного преобразовательного устройства (рис. 6.10) используются полупроводниковый выпрямитель и инвертор.

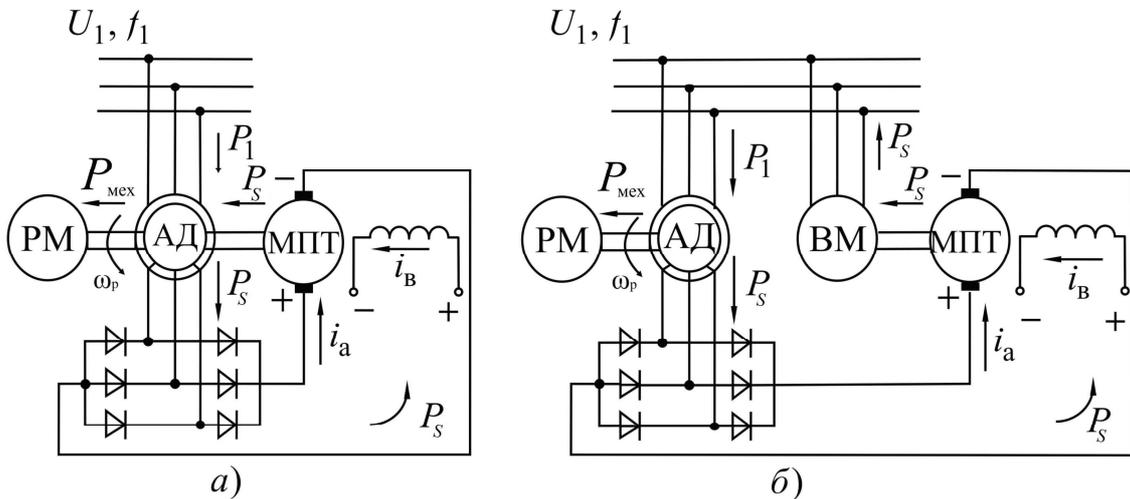


Рис. 6.11. Схемы электромеханического (а) и электрического (б) вентильно-машинных каскадов

Цепь якоря машины постоянного тока независимого возбуждения (МПТ) приключена к контактным кольцам асинхронного двигателя через полупроводниковый выпрямитель B , соединенный по трехфазной мостовой схеме.

Выпрямитель преобразовывает переменный ток частоты скольжения $f_2 = sf_1$ во вторичной цепи АД в постоянный ток в цепи якоря МПТ.

ЭДС якоря МПТ в данном случае является регулируемой добавочной ЭДС $E_{доб}$, которая (в данном случае с помощью выпрямителя B) вводится во вторичную цепь двигателя АД. Изменение ЭДС $E_{доб}$, а следовательно, и скорости вращения ротора АД производится путем регулирования тока возбуждения МПТ.

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_{2s} - \dot{E}_{доб}}{r_2 + jsx_{\sigma 2}} = \frac{s\dot{E}_2 - \dot{E}_{доб}}{r_2 - jsx_{\sigma 2}} \quad (6.4)$$

ЭДС $E_{доб}$ вводится во вторичную цепь встречно ЭДС скольжения sE_2 , наводящейся в этой цепи.

В первый момент времени ток \dot{I}_2 уменьшится, поэтому развиваемый двигателем момент $M_{дв}$ также уменьшится, двигатель нач-

нет тормозиться, а его скольжение s увеличится. При этом, согласно равенству (6.4), ток \dot{I}_2 , а вместе с ним и момент $M_{\text{дв}}$ будут увеличиваться до тех пор, пока опять не наступит равенство моментов $M_{\text{дв}} = M_{\text{ст}}$. Двигатель при этом будет работать с новым значением скорости ротора, тока \dot{I}_2 и с увеличенным скольжением s . Очевидно, что посредством регулирования величины ЭДС $E_{\text{доб}}$ можно регулировать величину s и, следовательно, скорость вращения ротора асинхронного двигателя АД.

На схеме рис. 6.11, *a* вал якоря машины постоянного тока МПТ жестко соединен с валом асинхронного двигателя АД. МПТ преобразовывает мощность скольжения P_s , получаемую из роторной цепи АД, в механическую мощность, которая через общий вал вместе с механической мощностью $P_{\text{мех}}$ двигателя АД передается рабочей машине РМ. Если при регулировании скорости вращения обеспечить полное использование мощности АД ($P_1 = P_H = \text{const}$) и пренебречь потерями в электрических машинах каскада, то в электромеханическом каскаде мощность, передаваемая рабочей машине РМ из электрической сети:

$$P_{\text{р.м}} = P_{\text{мех}} + P_s = (1 - s) P_1 + s P_1 = P_1.$$

Равенство $P_{\text{р.м}} = P_1$ сохранится при любом изменении скорости (т. е. при всех значениях скольжения s от 0 до 1) постоянным и равным номинальной мощности асинхронной машины. В связи с этим электромеханический каскад иногда условно называют *каскадом постоянной мощности*. На рис. 6.12 изображены примерные механические характеристики электромеханического каскада.



Рис. 6.12. Механические характеристики электромеханического каскада при параметрическом управлении

Необходимая мощность вспомогательной машины каскада (в данном случае МПТ) зависит от требуемого диапазона регулиро-

вания скорости вращения ротора (т. е. от величины предельного значения скольжения s):

$$P_{\text{МПТ}} = sP_{\text{н}}$$

На рис. 6.11, б изображена схема электрического каскада, которая отличается от схемы на рис. 6.11, а тем, что вал МПТ соединен механически со вспомогательной асинхронной или синхронной машиной $ВМ$. В этом каскаде мощность скольжения P_s при $s > 0$ передается с помощью $ВМ$, работающей в режиме генератора, обратно в сеть переменного тока. В электрическом каскаде рабочей машине $РМ$ передается только механическая мощность двигателя АД

$$P_{\text{мех}} = (1 - s) P_{\text{эм}} \approx (1 - s) P_1,$$

которая при $P_1 = P_{\text{н}} = \text{const}$ уменьшается пропорционально снижению скорости вращения. Момент, создаваемый АД рис. 6.11, б, на валу $РМ$ при этом остается постоянным (см. механические характеристики рис. 6.13).

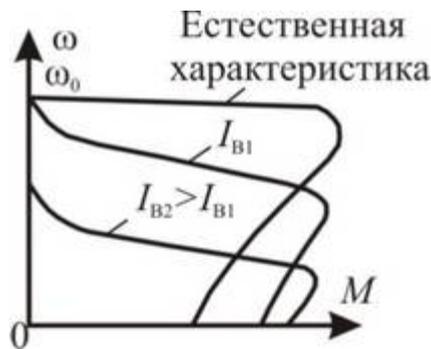


Рис. 6.13. Механические характеристики электрического каскада

Вследствие этого электрический каскад иногда называют *каскадом с постоянным моментом*.

Стремление заменить в рассмотренных выше вентиляльно-машинных каскадах вращающиеся электрические машины, реализующие энергию скольжения, статическими преобразователями привело к созданию *асинхронно-вентильного каскада* (рис. 6.14).

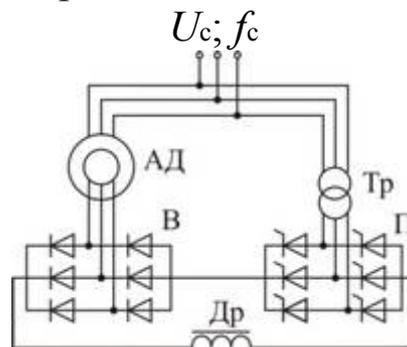


Рис. 6.14. Схема асинхронно-вентильного каскада

Эта схема относится к категории каскадов с промежуточным звеном постоянного тока и работает по тому же принципу, что и электрический вентиляно-машинный каскад (рис. 6.11, б).

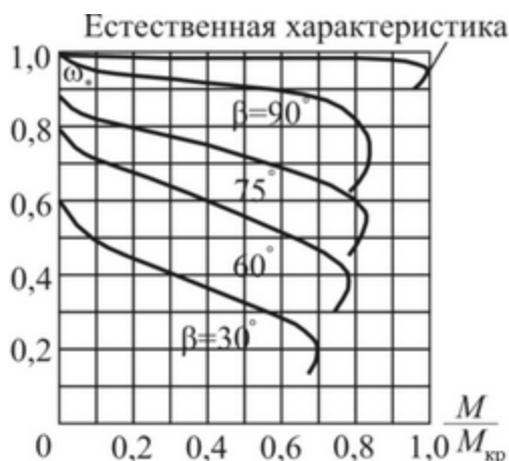


Рис. 6.15. Механические характеристики асинхронного двигателя в схеме асинхронно-вентильного каскада

Ток ротора, имеющий изменяющуюся частоту скольжения f_2 , выпрямляется выпрямителем В и через сглаживающий дроссель Др подается на инвертор, ведомый сетью П, где преобразуется в переменный ток с частотой, равной частоте сети f_c , и через согласующий трансформатор Тр возвращается в сеть. Асинхронно-вентильный каскад состоит из асинхронного двигателя АД, управляемого выпрямителя В, ведомого сетью инвертора П, и сетевого трансформатора Тр.

Принцип действия каскада заключается в следующем. В цепь выпрямленного тока ротора вводится с помощью инвертора П регулируемая добавочная ЭДС $E_{доб}$. Как и в ранее рассмотренных каскадах, ток фазы ротора определяется равенством (6.4).

При сравнительно высоком КПД коэффициент мощности асинхронно-вентильного каскада оказывается невысоким, что объясняется большим суммарным потреблением реактивной мощности АД и трансформатором Тр инвертора, а также из-за наличия высших гармоник тока, возникающих при коммутации вентилей управляемого выпрямителя и инвертора.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Поясните способы регулирования скорости вращения ротора АД, основанные на изменении скорости вращения поля статора.
2. Назовите способы регулирования скорости вращения ротора АД, основанные на изменении скольжения.
3. Поясните схему переключения числа пар полюсов обмотки статора с сохранением постоянного момента.
4. Поясните схему переключения числа пар полюсов обмотки статора с сохранением постоянной мощности.
5. Назовите параметрические способы регулирования скорости АД.
6. Поясните принцип частотного регулирования скорости АД.
7. С какой целью применяют асинхронные каскады?
8. Изобразите электрическую схему и механические характеристики электромеханического каскада.
9. Изобразите электрическую схему и механические характеристики электрического каскада.
10. Изобразите электрическую схему и механические характеристики асинхронно-вентильного каскада.
11. Дайте критическую оценку известных вам способов регулирования скорости вращения асинхронных двигателей.

7. СПЕЦИАЛЬНЫЕ АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

7.1. Работа трехфазного асинхронного двигателя от однофазной сети

Однофазные асинхронные двигатели уступают по своим технико-экономическим показателям трехфазным, но находят широкое применение, когда выполнение трехфазных сетей затруднено и используются однофазные электрические сети (жилые дома, малые торговые предприятия, железнодорожный транспорт и т. д.). Промышленность выпускает в год десятки миллионов штук однофазных асинхронных двигателей (правда, основная масса – это двигатели малой мощности, в основном бытовые).

Однофазный асинхронный двигатель имеет однофазную обмотку на статоре и короткозамкнутый ротор с обмоткой в виде бе-

личьей клетки. Однофазный асинхронный двигатель можно получить и из трехфазного, если отключить одну или две фазные обмотки (рис. 7.1). Механическая мощность трехфазного асинхронного двигателя:

$$P_{\text{мех}3} = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}3}\eta_3 \cos \varphi_3,$$

где η_3 и $\cos \varphi_3$ – КПД и коэффициент мощности двигателя в трехфазном режиме.

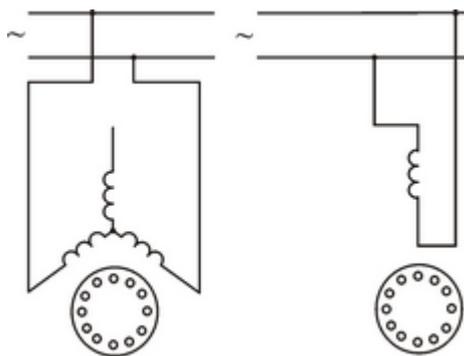


Рис. 7.1. Схемы однофазных двигателей

Мощность на валу того же асинхронного двигателя в однофазном режиме:

$$P_{\text{мех}1} = U_{\text{л}}I_{\text{л}1}\eta_1 \cos \varphi_1,$$

где η_1 и $\cos \varphi_1$ – КПД и коэффициент мощности асинхронного двигателя в однофазном режиме (по абсолютному значению эти параметры меньше, чем η_3 и $\cos \varphi_3$ у асинхронного двигателя при трехфазном включении). В тех же габаритах мощность однофазного двигателя составляет 40÷60 % мощности трехфазного.

При обрыве одной из фаз на работающем трехфазном двигателе двигатель автоматически переходит в однофазный режим работы. При этом момент сопротивления на валу двигателя, частота его вращения и механическая мощность на валу, как правило, остаются неизменными, а следовательно, и электрическая мощность, потребляемая двигателем из сети P_1 , при переходе на однофазный режим работы изменяется незначительно $P_{1.1\text{ф}} \approx P_{1.3\text{ф}}$.

Тогда значение тока $I_{1.1\text{ф}}$, протекающего по фазной обмотке статора «аварийного» однофазного асинхронного двигателя при обрыве одной из фаз трехфазного двигателя, составит

$$I_{1.1\phi} = I_{1.3\phi} \frac{\sqrt{3}\eta_3 \cos\phi_3}{\eta_1 \cos\phi_1} \gg I_{\phi.n}$$

и будет значительно больше номинального тока фазы двигателя в трехфазном режиме. При этом тепловые потери в фазной обмотке статора возрастут более чем в три раза, и двигатель быстро перегреется. Работа трехфазного двигателя с оборванной фазой является одной из причин преждевременного выхода из строя асинхронных двигателей при защите их плавкими предохранителями, так как ток перегорания плавкой вставки выбирают равным примерно $2,5I_n$, чтобы она не перегорала при пуске двигателя.

При работе от однофазного источника напряжения статор трехфазного двигателя создает не вращающееся, а пульсирующее магнитное поле, которое может быть представлено двумя вращающимися в противоположные стороны полями. Эти поля, взаимодействуя с полем ротора, создают противодействующие друг другу моменты прямой M_{11} , обратной M_{22} последовательности, а результирующий момент двигателя равен их разности (рис. 7.2):

$$M_{\text{эм}} = M_{11} - M_{22}.$$

При пуске, когда $\omega_p = 0$ ($s = 1$) и $M_{11} = M_{22}$, асинхронный двигатель, питающийся от однофазного напряжения, пусковой (результирующий) момент не развивает и его ротор не способен перейти во вращение. Отсутствие пускового момента – это основной недостаток однофазных двигателей.

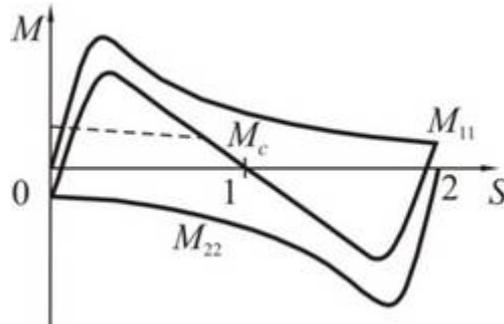


Рис. 7.2. Момент однофазного двигателя

Чтобы при однофазном напряжении асинхронный двигатель развивал пусковой момент, надо каким-либо образом уменьшить один из моментов, например момент M_{22} от обратного поля, и, наоборот, увеличить момент M_{11} от прямовращающегося магнитного поля, т. е. необходимо от пульсирующего магнитного поля статора

в воздушном зазоре перейти хотя бы к эллиптическому вращающемуся полю.

Наилучшие условия при пуске будут при круговом поле в воздушном зазоре, когда момент от обратного поля $M_{22} = 0$. Поэтому основные видоизменения конструкций однофазных асинхронных двигателей направлены на обеспечение удовлетворительных пусковых свойств путем уменьшения момента от обратного поля M_{22} хотя бы на время пуска двигателя.

Трехфазные асинхронные двигатели также могут быть использованы при питании от однофазного напряжения. Наиболее распространенные схемы включения трехфазных двигателей в однофазную сеть даны на рис. 7.3.

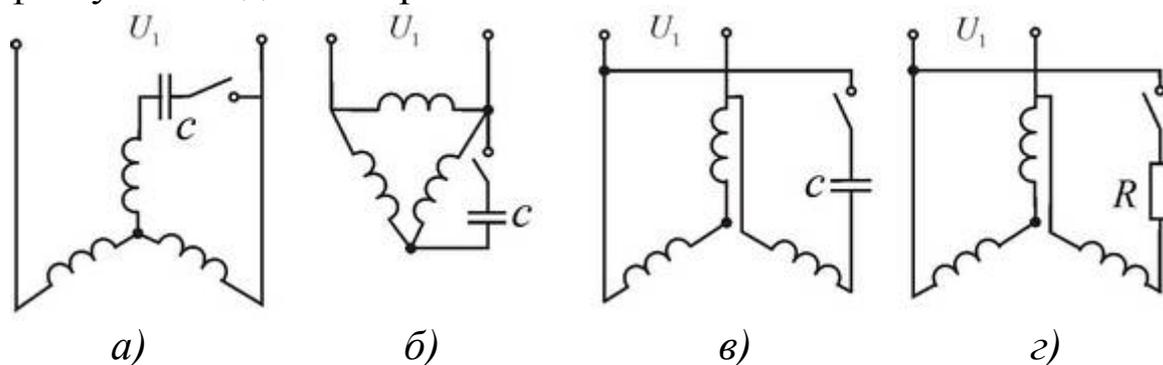


Рис. 7.3. Возможные схемы включения обмоток статора трехфазных асинхронных двигателей для работы от однофазной сети

Двигатели с соединением обмоток согласно схемам, приведенным на рис. 7.3, практически равноценны двигателям, которые спроектированы для работы как однофазные.

Номинальная мощность такого двигателя при однофазном включении составляет 40÷50 % от мощности в симметричном трехфазном режиме. Значение рабочей емкости C (мкФ) при частоте переменного тока 50 Гц можно ориентировочно определить по одной из формул:

- для схем (рис. 7.3, а и в) $C \approx 2800 I_{\text{н}} / U_{\text{с}}, \text{ мкФ};$

- для схемы (рис. 7.3, б) $C \approx 4800 I_{\text{н}} / U_{\text{с}}, \text{ мкФ},$

где $I_{\text{н}}$ – номинальный фазный ток в обмотке статора двигателя, A ;
 $U_{\text{с}}$ – напряжение однофазной сети, B .

При тяжелом пуске со значительной нагрузкой на валу расчетное значение емкости C должно быть увеличено в 3...8 раз.

После окончания пуска фаза с пусковым сопротивлением отключается.

7.2. Однофазные асинхронные двигатели с пусковой обмоткой

Двигатели с пусковой обмоткой (рис. 7.4) являются наиболее распространенными однофазными двигателями. У них, кроме рабочей обмотки P с фазной зоной 120° , на статоре имеется пусковая обмотка Π с фазной зоной 60° , сдвинутая в пространстве относительно рабочей обмотки на 90° .

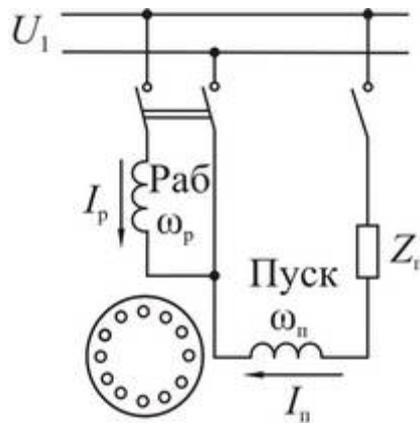


Рис. 7.4. Схема однофазного асинхронного двигателя с пусковой обмоткой

Последовательно с пусковой обмоткой включается фазосдвигающий элемент (сопротивление Z_{Π}) для создания временного сдвига фаз ψ между токами обмоток I_p и I_{Π} .

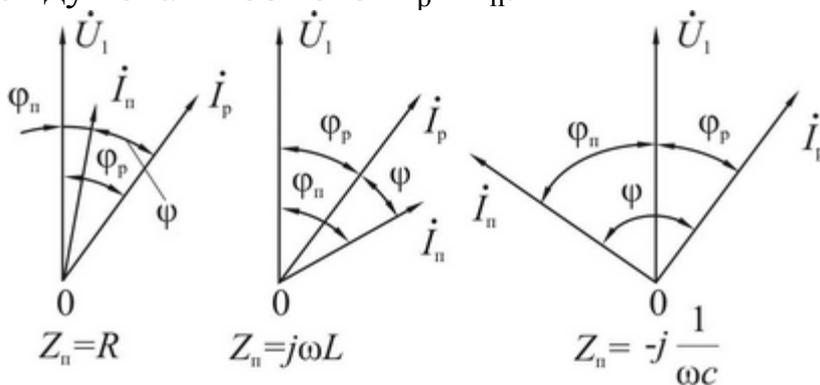


Рис. 7.5. Векторные диаграммы однофазного асинхронного двигателя с пусковой обмоткой

После того как двигатель при пуске достигнет определенной скорости вращения, пусковая обмотка отключается с помощью ка-

кого-либо коммутирующего устройства (центробежного реле скорости, реле времени, токового реле или вручную).

В качестве фазосдвигающего элемента в схеме (рис. 7.4) могут быть использованы активное сопротивление ($Z_{\text{п}} = R$), индуктивное ($Z_{\text{п}} = j\omega L$) и емкостное ($Z_{\text{п}} = 1/j\omega C$) сопротивления, а также управляемые полупроводниковые приборы.

Учитывая, что сопротивления самих обмоток имеют активные и индуктивные составляющие, можно заключить, что при $Z_{\text{п}} = R$ и $Z_{\text{п}} = 1/j\omega C$ ток $I_{\text{п}}$ будет опережать $I_{\text{р}}$, а при $Z_{\text{п}} = j\omega L$ ток $I_{\text{п}}$ будет отставать от $I_{\text{р}}$. Сдвиг $\psi = 90^\circ$ может быть достигнут только при включении емкости в пусковую фазу. В двух других случаях всегда создаются два поля, вращающиеся в разные стороны, но одно из них будет сильнее, в результате чего возникает пусковой момент $M_{\text{п}}$, и при $M_{\text{п}} > M_{\text{ст}}$ двигатель пойдет в ход. При $Z_{\text{п}} = j\omega L$ направление вращения будет обратным по сравнению с двумя другими случаями.

Пусковые условия будут наилучшими при включении емкости в пусковую фазу (рис. 7.6). Однако необходимая емкость C довольно велика, вследствие чего размеры и стоимость конденсатора также велики.

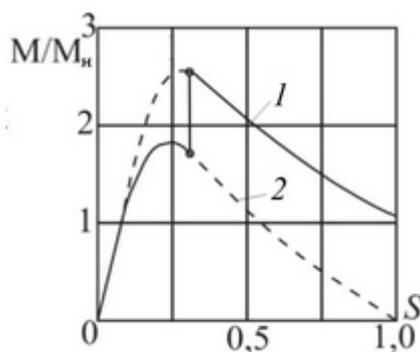


Рис. 7.6. Механическая характеристика однофазного асинхронного двигателя с пусковой обмоткой: 1 — при включенной пусковой обмотке; 2 — при отключенной пусковой обмотке

Поэтому конденсаторный пуск применяется сравнительно редко, лишь при необходимости получения большого пускового момента. Пуск с помощью индуктивного сопротивления дает худшие результаты и в настоящее время практически не применяется.

Двигатели с пусковым активным сопротивлением (АОЛБ) применяются в стиральных машинах и холодильниках, доильных

аппаратах, машинах для стрижки овец, центрифугах, для приводов малых станков и т. д. Двигатели с конденсаторным пуском (АОЛГ) используются при повышенном требовании к пусковому моменту (установки для кондиционирования воздуха, компрессоры и т. д.). Мощность однофазных двигателей с пусковой обмоткой обычно составляет $18 \div 600$ Вт.

7.3. Однофазные конденсаторные асинхронные двигатели

Однофазные конденсаторные асинхронные двигатели, предназначенные для включения в однофазную сеть, получили наибольшее распространение. Двигатель (рис. 7.7, а) имеет на статоре две обмотки, обе являются рабочими и сдвинуты в пространстве относительно друг друга на угол 90° . В одну из этих обмоток включается емкость C_p , значение которой рассчитывается так, что при номинальной нагрузке существует только вращающееся поле прямой последовательности.

Так как обмотка статора этого двигателя состоит из двух постоянно действующих фазных обмоток, конденсаторные двигатели в технической литературе иногда называют *двухфазными*.

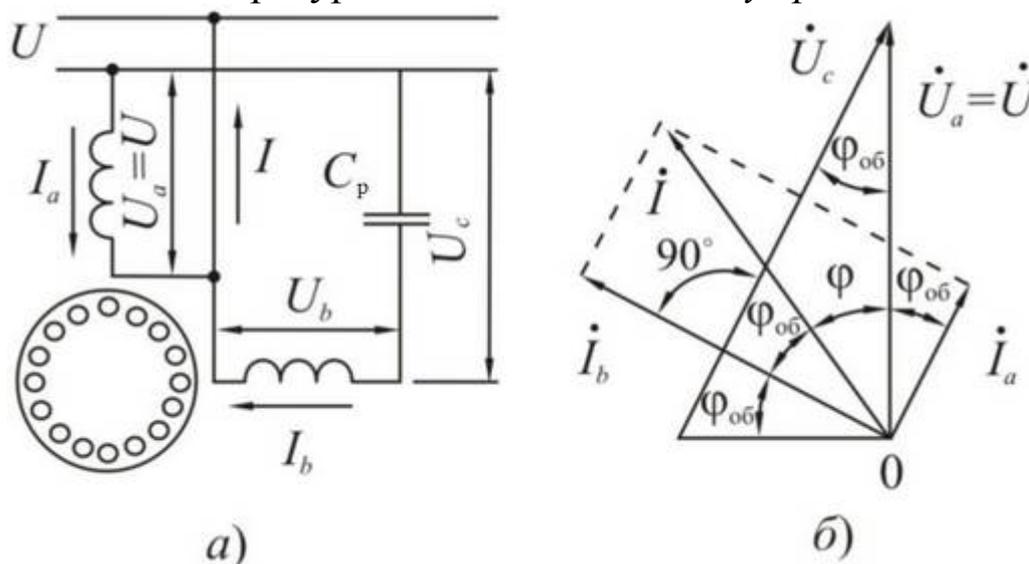


Рис. 7.7. Схема асинхронного конденсаторного двигателя (а) и его векторная диаграмма при круговом поле (б)

Емкость C_p , подобранная по рабочему режиму, иногда недостаточна для получения высокого пускового момента. Поэтому в не-

обходимых случаях параллельно C_p на время пуска включается добавочная, пусковая емкость $C_{п}$.

Для получения кругового поля во всех режимах работы емкость конденсатора должна изменяться. Рабочая емкость конденсатора C_p для номинального режима определяется из следующих условий.

Напряжения фаз, так же как и токи, сдвинуты по фазе на 90° , тогда углы сдвига фаз между напряжением и током каждой обмотки при круговом поле равны углу $\varphi_{об}$.

Векторная диаграмма (рис. 7.7, б) построена согласно условию:

$$\dot{U}_a = \dot{U}_b + \dot{U}_c = \dot{U},$$

и сдвиг фаз между током I_b и напряжением конденсатора U_c составляет 90° .

Напряжение на конденсаторе

$$U_c = \frac{U_b}{\sin \varphi_{об}}.$$

Необходимая для получения кругового поля емкость определится из соотношения:

$$I_b = \frac{U_c}{X_c} = \omega C \frac{U_b}{\sin \varphi_{об}},$$

откуда

$$C = \frac{I_b \sin \varphi_{об}}{\omega U_b}.$$

Мощность конденсатора, обеспечивающего круговое поле:

$$Q_c = U_c I_a = \frac{U_b I_b}{\sin \varphi_{об}},$$

совпадает с полной мощностью, потребляемой двигателем из сети:

$$S = U I = U_c I \cos \varphi_{об} = U_c I_b = \frac{U_b I_b}{\sin \varphi_{об}} = Q_c.$$

Рассчитанное значение емкости будет обеспечивать круговое поле только в одном режиме, соответствующем принятому расчетному значению тока I . При других нагрузках симметрия МДС нарушается и наряду с прямым полем появляется обратное.

Емкость конденсатора, необходимая для получения кругового поля при номинальной нагрузке, достаточно большая и габариты

конденсатора близки к объему самого двигателя, что является недостатком конденсаторных двигателей.

Энергетические показатели конденсаторного двигателя в номинальном режиме благодаря круговому полю в воздушном зазоре такие же, как и у трехфазного асинхронного двигателя одинаковой с ним мощности. Примерно в такой же степени используются и активные материалы машины.

7.4. Асинхронные двигатели с массивным ротором

Ротор асинхронного двигателя с массивным ротором изготавливают в виде сплошного массивного ферромагнитного цилиндра, выполняющего одновременно роль и магнитопровода, и токопровода.

Вращающееся магнитное поле, создаваемое обмоткой статора, проникает в тело ротора на определенную глубину и индуцирует в нем вихревые токи, образующие вращающееся магнитное поле ротора, которое, в свою очередь, при взаимодействии в воздушном зазоре с магнитным полем статора создает вращающий электромагнитный момент.

При пуске (когда $s = 1$, а $f_2 = f_1 = 50$ Гц) глубина проникновения магнитных силовых линий в сталь ротора составляет $1 \div 3$ мм; в рабочем режиме при скольжении $s = 0,05$ – примерно $5 \div 15$ мм. Вообще в линейном приближении глубина проникновения изменяется обратно пропорционально \sqrt{s} . Это приводит к изменению сечения слоя, по которому протекают вихревые токи, и, соответственно, активного сопротивления массивного ротора $R'_2 \equiv R'_{20} \sqrt{s}$, где R'_{20} – приведенное активное сопротивление ротора при $s = 1$. Поэтому при пуске R'_2 весьма велико, а с уменьшением скольжения сопротивление R'_2 уменьшается. В результате такого проявления поверхностного эффекта пусковой момент в двигателе с массивным ротором достаточно велик ($\frac{M_n}{M_H} = 1,5 - 2,0$), он уступает двигателю с коротко-

замкнутым ротором только по своим рабочим свойствам – КПД и коэффициенту мощности. С увеличением размеров машины, а также при увеличении номинальной частоты вращения рабочие характеристики двигателя улучшаются. В двигателях относительно не-

большой мощности с высокими частотами вращения для улучшения рабочих характеристик внешнюю поверхность массивного ротора иногда покрывают медью, а к торцевым поверхностям прикрепляют медные кольца, роль которых аналогична функции короткозамыкающих колец «беличьей клетки».

Двигатели с массивным ротором применяются в качестве *исполнительных* в САУ. Так как монолитный ротор обладает большой механической прочностью, эти асинхронные двигатели строят на скорости вращения 10000–100000 об/мин и более. Питаются они от источников повышенной частоты 400–1500 Гц и выше и находят применение в приводах гироскопов.

7.5. Асинхронный преобразователь частоты

Асинхронный преобразователь частоты (АПЧ) представляет собой асинхронную машину с фазным ротором *АМ*, к ротору которой присоединен приводной двигатель *Д* (рис. 7.8). Одна из обмоток асинхронной машины, например, статора, подключена к первичной сети с частотой f_1 , а вторичное выходное напряжение с частотой f_2 снимается с контактных колец фазного ротора, вращающегося от приводного двигателя. Частота тока ротора определяется как

$$f_2 = sf_1 = f_1 \frac{n_c \pm n_p}{n_c} = p \frac{n_c \pm n_p}{60},$$

где n_c – синхронная скорость асинхронной машины, об/мин; n_p – скорость вращения ротора, об/мин; p – число пар полюсов обмотки статора асинхронной машины.

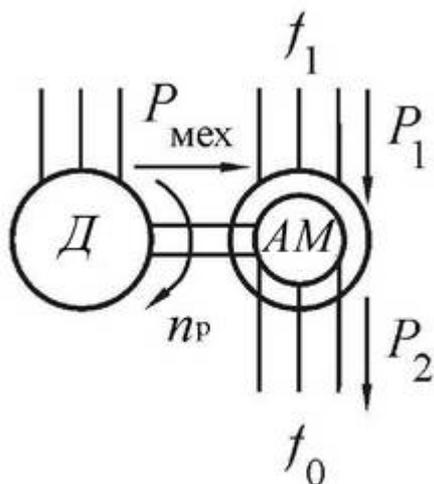


Рис. 7.8. Схема асинхронного преобразователя частоты

Знак «плюс» в этом выражении соответствует направлению вращения ротора *против* вращения поля статора АПЧ, а знак «минус» – *согласному* вращению ротора и поля статора АПЧ.

Изменение частоты f_2 выходного напряжения достигается за счет регулирования скорости вращения ротора n_p с помощью приводного двигателя D . Асинхронная машина AM работает либо в режиме противовключения $s > 1$ и $f_2 > f_1$, либо в режиме двигателя, когда $0 > s < 1$ и $f_2 < f_1$. Генераторный режим работы асинхронной машины в преобразователях частоты, как правило, не используется. Механическая мощность, развиваемая приводным двигателем D :

$$P_{\text{мех}} = P_2 - P_1 = (s - 1)P_1.$$

При $s > 1$, когда $f_2 > f_1$, приводной двигатель D работает в режиме двигателя и $P_{\text{мех}} > 0$. При $s < 1$ приводной двигатель D работает в режиме генератора и $P_{\text{мех}} < 0$. Если $f_2 > f_1$, то $P_2 > P_1$, и для облегчения условий работы контактных колец и щеток фазного ротора в качестве первичной обмотки с током частоты f_1 может использоваться обмотка ротора, а выходная мощность сниматься с обмотки статора.

Обычно АПЧ применяют для получения переменного тока частотой $f_2 = 200$ или 100 Гц. Ток такой частоты используется для питания электроинструмента.

7.6. Асинхронные двигатели с полым немагнитным ротором

Полый немагнитный ротор двигателя, показанного на рис. 7.9, представляет собой полый тонкостенный цилиндр 3, изготовленный из проводящего немагнитного материала (обычно сплава алюминия).

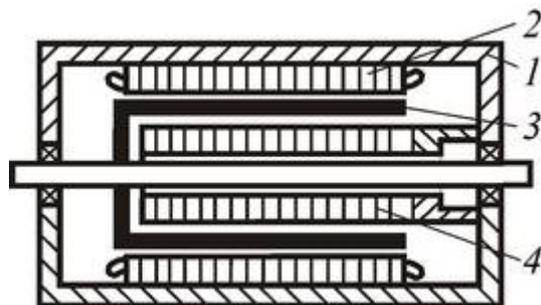


Рис. 7.9. Асинхронный двигатель с полым ротором

Полый ротор вращается в зазоре между магнитопроводами внешнего 2 и внутреннего 4 статоров, на одном из которых имеется однофазная или многофазная обмотка. Электромагнитный момент, действующий на ротор, образуется в результате взаимодействия вращающегося поля с индуцированными в роторе вихревыми токами. Такие двигатели используются в системах автоматики и выполняются на мощности от долей до 100 Вт и частоты от 50 до 1000 Гц.

Диапазон скорости вращения от 1500 до 30 000 об/мин, $\cos\varphi_n = 0,2 \div 0,4$; $\eta_n = 0,2 \div 0,4$. Намагничивающий ток I_0 составляет $(0,8 \div 0,9) I_n$.

7.7. Электромагнитные индукционные насосы

На рис. 7.10 представлен винтовой индукционный насос. Он имеет два статора: внешний 1 и внутренний 2.

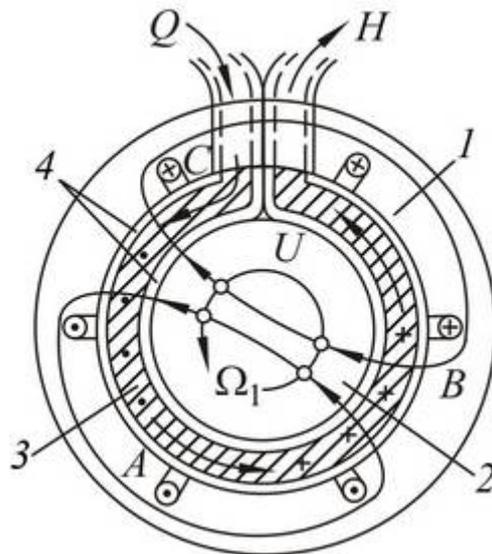


Рис. 7.10. Электромагнитный винтовой насос

В пазах магнитопровода внешнего статора размещается трехфазная обмотка, питающаяся от сети. В зазоре между статорами располагается плоская труба из немагнитной стали 4, по которой протекает жидкий металл 3.

Вращающееся поле индуцирует в жидком металле вихревые токи. За счет взаимодействия вихревых токов с полем создаются электромагнитные силы, заставляющие жидкий металл продвигаться с линейной скоростью V в сторону вращения поля. Электромагнитная мощность, передаваемая от статора жидкому металлу, равна:

$$P_{\text{эм}} = m_1 E_1 I_2',$$

где $E_1 = 4,44 f_1 w_1 k_{\text{обл}} \Phi_m$ – ЭДС взаимной индукции в обмотке статора; $I_2' = E_1 s / R_2'$ – приведенный ток в жидком металле; R_2' – приведенное активное сопротивление жидкого металла; p – число периодов поля (число пар полюсов).

$v_1 = 2\tau f_1 = \rho \omega_1$ – линейная скорость перемещения поля; τ – полюсное деление; ρ – радиус ротора; $s = \frac{v_1 - v}{v_1}$ – скольжение жидкого

металла по отношению к полю; Φ_m – амплитуда магнитного потока.

На жидкий металл действует электромагнитная сила:

$$N = \frac{M}{\rho} = \frac{P_{\text{эм}}}{v_1}.$$

Насос развивает давление: $H = N / l \cdot \Delta$, а механическая мощность насоса равна

$$P_{\text{мех}} = Nv = HQ,$$

где l и Δ – длина и площадь сечения трубопровода; $Q = v l \Delta$ – объемный расход насоса.

Если труба охватывает внутренний статор n -раз, то напор H увеличивается в n -раз, а расход из-за уменьшения сечения $l \cdot \Delta$ уменьшается в n раз.

7.8. Линейные и дуговые асинхронные двигатели

Линейные двигатели отличаются от обычных асинхронных тем, что они имеют разомкнутый магнитопровод, и вместо кругового – бегущее магнитное поле в воздушном зазоре.

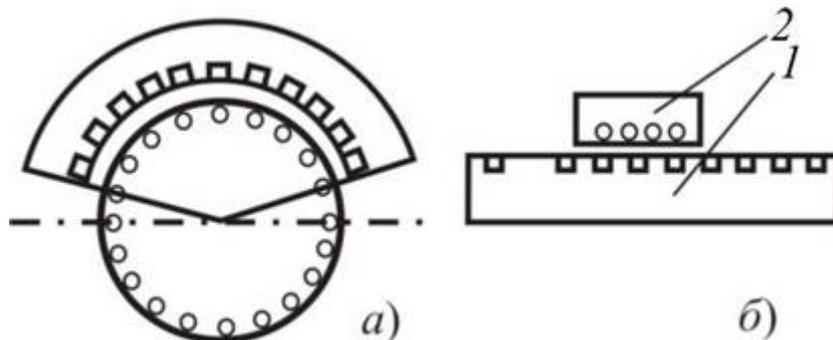


Рис. 7.11. Асинхронный двигатель с дуговым ротором (а) и линейный двигатель (б)

Принципиальным недостатком таких машин является появление в воздушном зазоре отраженных волн магнитного поля.

Линейные асинхронные машины применяются практически только в двигательном режиме работы (рис. 7.12).

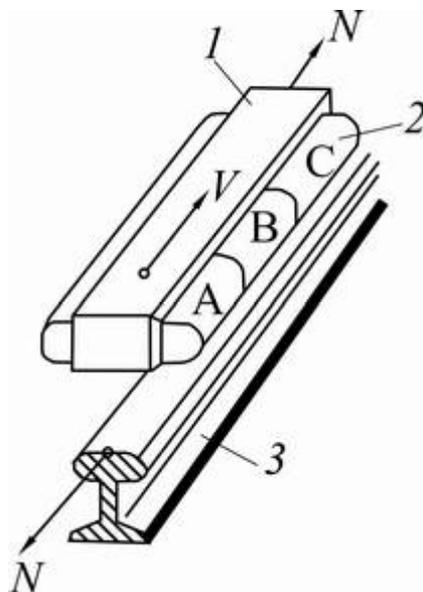


Рис. 7.12. Тяговый линейный двигатель

Скольжение линейных двигателей определяется как отношение разности линейной скорости поля статора и ротора $v_1 - v$ к скорости поля статора $v_1 = 2\tau f_1$:

$$s = \frac{v_1 - v}{v_1}$$

Наиболее перспективно использование линейных двигателей в электрической тяге для ускорения или торможения больших масс, движущихся прямолинейно. Например: электромагнитная пушка, монорельсовая железная дорога. На рис. 7.12 показана возможная схема применения линейного асинхронного двигателя на электрической тяге.

Магнитопровод статора 1 вместе с многофазной обмоткой 2 укреплен на электровозе и присоединен к сети переменного тока. Образуется бегущее поле, взаимодействующее с массивным ферромагнитным телом-рельсом 3 и стремящееся увлечь его за собой. Но так как рельс неподвижно закреплен, приходит в движение со скоростью v статор вместе с электровозом.

Дуговые машины применяются в тех случаях, когда ротор требуется привести во вращение со сравнительно небольшой угловой скоростью. Применение дугового двигателя особенно выгодно при использовании в качестве ротора массивного ферромагнитного цилиндра, являющегося частью машины, потребляющей механическую энергию.

7.9. Единые серии асинхронных двигателей

Асинхронные двигатели, как и другие электромеханические преобразователи, делятся на машины общего и специального назначения. Специальные машины выпускаются как отдельными сериями, так и мелкими партиями или даже единичными образцами.

Машины общего назначения проектируются и производятся едиными сериями – рядами, в которых номинальная мощность и размеры нарастают дискретно в строго определенной закономерности. Для всех машин каждой серии характерны одинаковые условия эксплуатации и подобные конструкции, т. е. взаимозаменяемость узлов и деталей, что существенно упрощает и удешевляет их изготовление и ремонт. В сериях стандартизированы конструктивные исполнения, габаритные и установочные размеры.

Серии традиционно называют едиными, так как по общему проекту они выпускаются многими заводами и используются во всех отраслях. На базе машин общего назначения разрабатываются и производятся также различные их модификации.

В технических установках до сих пор еще встречаются асинхронные двигатели старых серий, давно снятых с производства и замененных новыми, более современными.

Первая единая серия асинхронных двигателей была создана в конце сороковых годов прошлого столетия. Она имела два конструктивных исполнения: *A* – защищенное с внутренней вентиляцией и *AO* – закрытое, обдуваемое снаружи и с ребрами охлаждения на корпусе. Диапазон номинальных мощностей этой серии 0,6...100 кВт при различном числе полюсов.

Затем появились новые более качественные электротехнические материалы. Были выполнены новые теоретические исследования и на этой базе в СССР в 50-х гг. XX века была разработана новая более экономичная серия асинхронных двигателей *A2 (AO2)*. Эта серия включала в себя 20 типоразмеров машин с номинальными

мощностями от 0,4 до 125 кВт, с высотами оси вращения от 90 до 280 мм. Их габаритные размеры отличались внешним диаметром пакета магнитопровода статора, и каждому такому диаметру присваивался свой номер (габарит), отличающийся в марке двигателя. Двигатели серии имели 9 габаритов.

В серии *A2* была принята следующая система обозначений. *Например.* Двигатель типа *АО2-92-4У3* – двигатель закрытого обдуваемого исполнения со станиной и щитами из чугуна, 9-го габарита, 2-й длины сердечника статора, четырехполюсный, климатического исполнения *У*, категория размещения 3.

Но различать машины по наружному диаметру листа стали статора удобно их конструкторам, а не потребителям. Для последних более важным параметром является высота оси вращения, ибо именно её надо учитывать в конструкциях производственных машин и механизмов, стыкуемых с электродвигателями. Поэтому во всех последующих сериях двигатели маркируются и различаются по высоте оси вращения вала над опорами.

Неудачной оказалась попытка проектирования третьей по номеру серии асинхронных двигателей: она не отвечала требованиям по использованию активных материалов на единицу полезной мощности (удельным показателям) и перегревам обмоток. В производство она не запускалась.

В 70-х гг. XX века началась разработка и освоение серии асинхронных двигателей *4А* с 17 высотами осей вращения в интервале 45...355 мм и номинальными мощностями от 0,06 до 400 кВт. Шкала мощностей и установочные размеры этой серии были согласованы с международными стандартами, для оптимизационных расчетов и конструирования широко использовались ЭВМ. В этой серии удалось на две-три ступени по шкале мощностей увеличить номинальную мощность при тех же высотах осей вращения, что и в серии *A2* (*АО2*), и в среднем на 20 % уменьшить расход материалов. Этого удалось достичь за счет применения электротехнической стали с улучшенными магнитными свойствами и изоляции с более высокими классами нагревостойкости, а также благодаря усовершенствованию системы охлаждения двигателей.

Пример обозначения асинхронного двигателя серии *4А* основного исполнения. Двигатель типа *4АН280S2У3* – асинхронный двигатель серии *4А*, исполнение машины по способу защиты *IP23*, ста-

нина и щиты чугунные или стальные, высота оси вращения 280 мм, установочный размер по длине статора S (меньший), число полюсов 2, климатическое исполнение У, категория размещения 3. При разработке этой серии впервые была специально создана и внедрена компьютерная система автоматического проектирования (САПР) асинхронных двигателей.

В начале 80-х гг. XX в. была спроектирована единая серия *АИ* с двумя стандартными разновидностями: *АИР* и *АИС*. Серия *АИ* охватывает диапазон номинальных мощностей от 0,025 до 315 кВт (при 1500 об/мин). В варианте *Р* мощность двигателей при одной и той же высоте вращения в основном на одну ступень выше, чем при варианте *С*. Это позволяет максимально унифицировать между собой оба исполнения. Серия разработана на 18 высотах оси вращения от 45 до 355 мм. При каждой высоте оси вращения выполняются машины, отличающиеся длиной станины, им присвоены обозначения *S* – короткая, *M* – средняя, *L* – длинная. Машины малой мощности, т. е. с высотой оси вращения до 90 мм, выпускаются при одной длине станины, но отличаются длиной сердечника статора; они обозначаются буквами *A* и *B*. В серии предусмотрены два исполнения по степени защиты *IP54* или *IP44* (закрытое обдуваемое исполнение) и *IP23* (защитное исполнение). При тех же, что и в серии *4А*, высотах осей вращения и номинальных мощностях эта серия имела некоторое превосходство по надежности и другим эксплуатационным показателям. При разработке серии *АИ* учитывались все рекомендации стандартов Международной электротехнической комиссии (МЭК), а в конструкции использовались еще более качественные материалы. Машины этой серии имеют конструктивные исполнения, более узко специализированные по видам нагрузки, условиям окружающей среды при эксплуатации, областям применения и др. При этом соблюдается требование максимальной унификации узлов и деталей. Были внесены некоторые новшества в выбор таких показателей электродвигателей, как коэффициент загрузки, сервис-фактор и годовая наработка.

Структура обозначения типоразмеров машин серии *АИ* аналогична структуре обозначения машин серии *4А* и отличается первыми буквами: две первые буквы (*АИ*) обозначают вид двигателя (асинхронный) новой серии стран Интерэлектро.

В 90-х гг. XX в. начался выпуск асинхронных двигателей двух новых единых серий *5А* и *РА*.

Машины серии *5А* имеют высоты осей вращения от 80 до 315 мм и номинальные мощности на валу от 0,55 до 200 кВт; разработаны также двигатели с высотой оси 355 мм мощностью до 400 кВт. Машины серии *5А* обладают следующими преимуществами:

- повышен КПД и снижен нагрев за счет некоторого увеличения объема активных материалов и применения изоляции обмотки статора класса нагревостойкости *F*;

- увеличен пусковой момент и снижен пусковой ток благодаря специальной форме пазов короткозамкнутого ротора;

- понижены уровни шума электромагнитного происхождения (за счет рационального выбора подходящего числа пазов ротора) и аэродинамического (за счет рациональной конструкции вентиляторного узла и уменьшения размеров вентиляторов);

- средний ресурс двигателей с высотами осей вращения 80...250 мм составляет 30 тысяч часов, с остальными высотами – 40 тысяч часов;

- сервис-фактор составляет 1,1...1,15.

Это означает, что двигатель, работающий при номинальном напряжении и частоте, может быть перегружен до мощности, полученной путем умножения ее номинального значения на величину декларируемого изготовителем сервис-фактора.

Применение двигателей с объявленным изготовителем сервис-фактором позволяет:

- избежать переустановленной мощности для двигателей, работающих с систематическими перегрузками до 15 %;

- эксплуатировать двигатели в сетях с существенными колебаниями напряжения без снижения нагрузки;

- эксплуатировать двигатели при повышенной температуре окружающей среды без снижения нагрузки.

Серия *РА* включает в себя двигатели с высотами осей вращения от 71 до 315 мм и мощностями от 0,25 до 200 кВт основного исполнения и модификации. При создании этой серии решалась задача наибольшей адаптации машин к требованиям потребителя. При оптимизации конструкции удалось выполнить на одном диаметре несколько высот оси вращения, изготавливая станину (кор-

пус) из специального алюминиевого сплава методом экструзии. К станине затем привинчивали лапы и фланцы различных размеров. В серии использованы и другие технические новшества: чередующиеся специальные пазы на роторе, улучшенные однослойные и двухслойные обмотки, позволившие существенно снизить добавочные потери в стали, электромагнитный шум и вибрации. Были улучшены также дизайн, эстетические и экологические показатели машин.

С конца 90-х гг. XX в. разрабатывается и осваивается производство новой серии асинхронных двигателей – 6А, которая полностью соответствует европейским стандартам и потребительским требованиям рынка. Числа модификаций и специализированных исполнений в этой серии значительно расширены (до 50 % от общего выпуска). На первый план здесь вышли конструкторские и технологические решения, обеспечивающие экономию материалов, энергоносителей и трудозатрат, т. е. конкурентоспособность отечественных двигателей на внутреннем и мировом рынках. Широкий спрос на двигатели новых серий в России и за рубежом свидетельствует о мировом уровне их качества.

Отечественные асинхронные двигатели имеют высокую надежность и длительный срок службы. По энергопотреблению, материалоемкости и многим другим показателям они, как правило, превосходят машины иностранных фирм.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Как изменится мощность трехфазного двигателя при обрыве одной из фаз питающего напряжения во время его работы?

2. Назовите способы пуска однофазных асинхронных двигателей.

3. Поясните принцип работы конденсаторного асинхронного двигателя.

4. Поясните особенности работы и область применения асинхронного двигателя с массивным ротором.

5. Поясните особенности работы асинхронного двигателя с полым ротором.

6. Поясните принцип работы электромагнитного индукционного насоса.

7. Поясните принцип работы асинхронного линейного двигателя.

8. Какие серии асинхронных двигателей вы знаете?

9. Дайте краткую характеристику серии асинхронных двигателей 5А и РА.

8. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

8.1. Конструкция синхронных машин

Синхронной машиной называется двухобмоточная электрическая машина переменного тока, одна из обмоток которой подключена к сети переменного тока с постоянной частотой f_1 и называется *якорной*, а вторая обмотка возбуждается постоянным током, и часть машины, на которой она установлена, называется *индуктором*.

Наибольшее распространение получили синхронные машины с трехфазной разноименнополюсной обмоткой переменного тока, установленной на статоре (якоре). Такая схема синхронной машины считается основной и представлена на рис. 8.1, а и рис. 8.2.

Обмотка якоря 1 (обмотка переменного тока) у этих машин расположена в пазах статора, а обмотка возбуждения 2 питается постоянным током и размещена на вращающейся части машины – роторе. По конструкции, схеме соединения и назначению обмотка переменного тока синхронной машины (якорная обмотка) аналогична обмотке статора асинхронной машины (см. гл. 1 и 2). Синхронные машины небольшой мощности (2–5 кВт) изготавливают иногда в *обращенном исполнении*: с обмоткой возбуждения постоянного тока на статоре и с трехфазной якорной обмоткой переменного тока на роторе, питание которой осуществляется через три контактных кольца (рис. 8.1, б) и щетки.

Оба исполнения в электромагнитном отношении равноценны. Но в машине основного исполнения через два контактных кольца токосъемного устройства подводится только мощность возбуждения, которая составляет $0,3 \div 2$ % от полной мощности машины. Поэтому с увеличением мощности синхронной машины основная конструкционная схема становится более надежной, и ей отдается предпочтение. В синхронных микромашинах для создания поля возбуждения часто используются постоянные магниты.

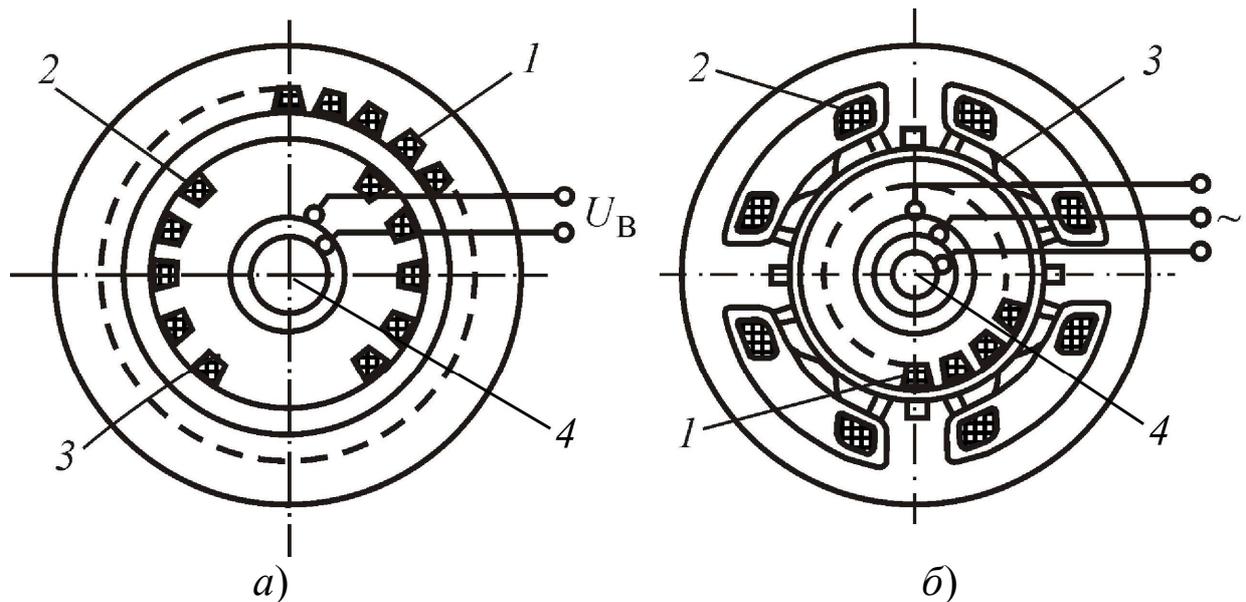


Рис. 8.1. Конструкционные схемы выполнения синхронных машин: *а* – основная; *б* – обращенная; 1 – обмотка якоря; 2 – обмотка возбуждения; 3 – магнитопровод индуктора; 4 – токосъемное устройство

По конструкции обмоток возбуждения (индукторов) синхронные машины делятся на: явнополюсные, т. е. машины с явно выраженными полюсами, и неявнополюсные – машины с неявно выраженными полюсами. Для наглядности обращенная синхронная машина (рис. 8.1, *б*) представлена в виде явнополюсной конструкции, которая в таком исполнении более распространена.

В синхронных машинах угловая скорость ротора равна синхронной угловой скорости вращающегося магнитного поля, созданного обмоткой переменного тока:

$$\omega_p = \omega_c = \frac{2\pi f_1}{p} \text{ рад/с}; \quad n_p = n_c = \frac{60 f_1}{p} \text{ об/мин}, \quad (8.1)$$

где f_1 – частота сети; p – число пар полюсов обмотки переменного тока.

Следовательно, скольжение синхронных машин в установившемся режиме работы s и частоту токов в роторе f_2 можно выразить как:

$$s = \frac{\omega_c - \omega_p}{\omega_c} = 0; \quad f_2 = s f_1 = 0. \quad (8.2)$$

Тип конструктивного исполнения ротора (индуктора) синхронной машины связан в основном со скоростью его вращения. При скорости вращения ротора 1500 и 3000 об/мин (линейная скорость на окружности ротора до 145÷185 м/с) применяют неявнополюсную конструкцию ротора. В этом случае из соображения механической прочности ротор изготавливают массивным, в особых случаях даже из одной цельной стальной поковки путем сложной механической и термической обработки.

Для изготовления роторов крупных машин применяют специальную высокопрочную легированную хромоникельмолибденовую сталь. Обмотку возбуждения выполняют как распределенную, уложенную в пазы, которые фрезеруются на поверхности ротора (рис. 8.1, а). Примерно третья часть полюсного деления остается свободной от пазов и образует так называемый *большой зубец*, через который проходит главная часть магнитного потока машины.

При числе пар полюсов $P \geq 3$ линейная скорость на поверхности ротора уменьшается, и синхронные машины выполняют обычно явнополюсными (рис. 8.2), так как изготовление таких роторов проще и дешевле.

Обмотка возбуждения 2 (см. рис. 8.2) создает магнитный поток возбуждения синхронной машины, который сцепляется с обмоткой якоря 1 и индуцирует в ней ЭДС.

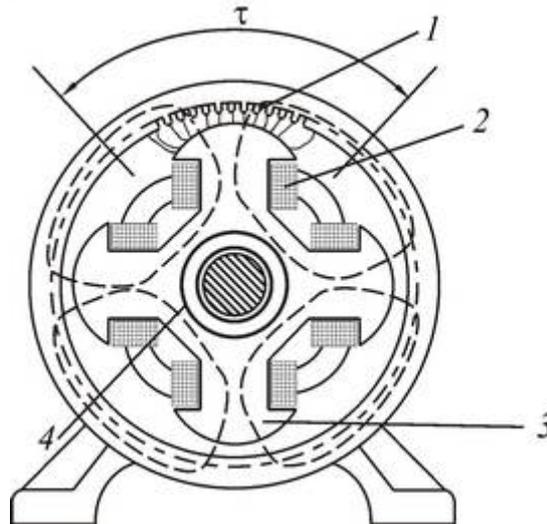


Рис. 8.2. Схема явнополюсной синхронной машины основного исполнения

Следует помнить, что скорость вращения магнитного поля статора, создаваемого якорной обмоткой переменного тока I , не за-

висит от числа полюсов обмотки возбуждения ротора – индуктора, (например, на рис. 8.2 индуктор 3 имеет четыре полюса, а на рис. 8.1, а – два полюса).

Кроме обмотки возбуждения, на полюсных наконечниках синхронных машин устанавливается неравношаговая короткозамкнутая *демпферная обмотка* (поз. 7 рис. 8.3).

Демпферная обмотка служит для улучшения переходных процессов, связанных с изменением электромагнитных величин и скорости вращения (при синхронизации, изменении нагрузки).

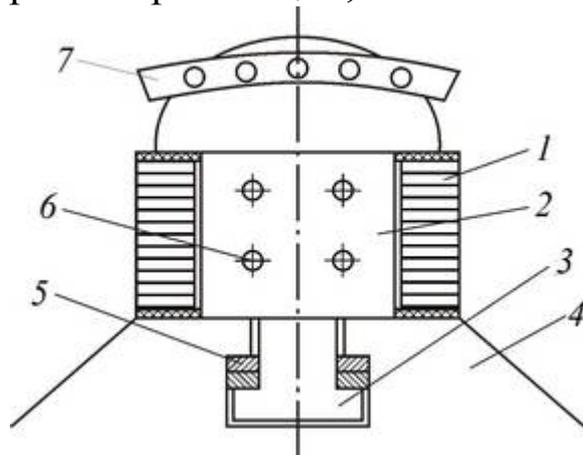


Рис. 8.3. Полюс индуктора явнополюсного синхронного генератора:

1 – проводники обмотки возбуждения; 2 – полюс; 3 – хвостовик полюса; 4 – корпус ротора; 5 – встречные клинья хвостового крепления; 6 – стяжная шпилька; 7 – сегмент демпферной обмотки

В синхронных двигателях и компенсаторах короткозамкнутая демпферная обмотка, кроме того, используется для пуска машины в ход и называется *пусковой обмоткой*.

На полюсных наконечниках имеются пазы, в которые укладываются стержни демпферной обмотки. Стержни с торцов замыкаются сегментами 7, к которым привариваются стержни короткозамкнутой обмотки (рис. 8.3).

Демпферные обмотки отдельных полюсов соединяют в общее короткозамкнутое кольцо с помощью гибких перемычек между сегментами. В машинах с неявнополюсным ротором с массивными полюсами демпферная обмотка не устанавливается, так как вихревые токи, индуцируемые в теле полюсов и пазовых клиньях, создают необходимое демпфирование колебаний поля и скорости ротора в переходных процессах.

8.2. История создания синхронной машины

Впервые однофазный многополюсный синхронный генератор был изобретен в 1832 г., всего через год после открытия Фарадеем явления электромагнитной индукции.

Анонимный изобретатель, скрывший свое имя под латинскими инициалами Р. М., предложил конструкцию однофазного синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов. Но так как в то время для практического применения требовались источники постоянного тока, дальнейшее развитие синхронных машин задержалось до 1863 г., когда англичанин Уайдль предложил для возбуждения синхронной машины использовать электромагниты.

Существенным стимулом для развития работ в области генераторов переменного тока и синхронных генераторов в частности явилось изобретение Яблочковым основного потребителя переменного тока тех лет – электрической лампочки. Сразу же после ее изобретения в 1876 г. однофазные синхронные генераторы стали выпускаться на заводе Гамма серийно, в то время как до этого они выпускались единицами на базе машин постоянного тока. В 1882 г. английским инженером Дж. Гордоном был построен двухфазный синхронный генератор с электрически не связанными фазами, предназначенный для питания свечей Яблочкова.

М. О. Доливо-Добровольский предложил в 1889 г. использовать для генерирования трехфазных токов барабанную обмотку машины постоянного тока, предварительно разбив ее на три части и соединив эти части в Δ или Y . Таким образом, была найдена конструкция генератора, необходимая для питания связанной трехфазной системы.

Первый трехфазный синхронный генератор был спроектирован фирмой «Эрликон» в сотрудничестве с М. О. Доливо-Добровольским в 1891 г. Мощность генератора, приводимого в движение гидротурбиной, составила $230 \text{ кВ}\cdot\text{А}$; $n = 150 \text{ об/мин}$; $f_1 = 40 \text{ Гц}$; $U_{\Delta} = 95 \text{ В}$. В этой машине были использованы все достижения в области конструирования машин постоянного тока, уже имеющиеся на этот момент времени.

Промышленники быстро оценили эффективность трехфазных синхронных машин. Уже в 1899 г. в немецком городе Эльберфельде

была построена тепловая электростанция, на которой установили синхронные турбогенераторы мощностью 1000 кВ·А .

8.3. Область применения синхронных машин

Синхронные машины работают в трех энергетических режимах: генераторном параллельно с сетью, двигательном и режиме синхронного компенсатора.

Генераторный режим параллельно с сетью – наиболее распространенный режим работы синхронных машин. Синхронные генераторы – это самые мощные электромеханические преобразователи энергии, созданные нашей цивилизацией. На тепловых и атомных электростанциях устанавливаются неявнополюсные быстроходные синхронные *турбогенераторы* мощностью до 1200 и 1600 МВ·А, имеющие скорость вращения 3000 и 1500 об/мин (в энергосистемах с частотой сети $f_c = 60$ Гц скорость вращения генераторов 3600 и 1800 об/мин). Мощность турбогенераторов за последние 50 лет практически в тех же габаритах увеличилась в 10 раз. Это увеличение мощности было достигнуто в основном за счет форсированного охлаждения машин. Применение внутреннего водяного охлаждения обмоток и магнитопровода позволит в ближайшее время довести мощность турбогенераторов до 2000 МВ·А.

На гидроэлектростанциях устанавливаются явнополюсные тихоходные синхронные *гидрогенераторы* мощностью до 800 МВ·А со скоростью вращения ротора 75÷150 об/мин.

Синхронные генераторы для *дизель-генераторных* автономных установок имеют мощность от единиц до десятков тысяч кВ·А.

Выпуск автотракторных синхронных трехфазных генераторов мощностью в сотни ватт, устанавливаемых на автомобилях, достигает десятков миллионов штук в год.

В качестве двигателей синхронные машины применяются в крупных установках (компрессоры, воздуходувки, гидронасосы), работающих с постоянной скоростью вращения ротора в режиме *S1*. Широкое применение синхронных двигателей ограничивают их плохие пусковые свойства и склонность к автоколебаниям. Синхронные микродвигатели, в которых для создания поля возбуждения используются постоянные магниты, широко применяются

в различных электроприводах контрольно-измерительных приборов и автоматических устройствах.

В отличие от асинхронных машин, потребляющих для создания магнитного поля реактивную энергию от питающей их сети, синхронные машины способны в зависимости от степени возбуждения как потреблять из сети, так и генерировать в сеть реактивную мощность.

В ряде случаев, оказывается, выгодно устанавливать возле крупных промышленных центров синхронные машины, предназначенные исключительно для генерирования реактивной мощности в сеть.

Синхронные машины, специально созданные для работы в режиме генераторов реактивной мощности, называются *синхронными компенсаторами*. Синхронные компенсаторы изготавливаются на базе явно- и неявнополюсных синхронных машин.

Согласно общему стандарту к числу номинальных данных синхронных машин относятся:

- номинальная мощность (для генераторов и компенсаторов полная энергетическая мощность кВ·А, для двигателей механическая, кВт);
- номинальный коэффициент мощности (при перевозбуждении);
- номинальный КПД (только для двигателей);
- схема соединения фаз обмотки статора;
- номинальное линейное напряжение обмотки якоря (статора) в вольтах;
- номинальная частота вращения об/мин;
- номинальная частота тока якоря Гц;
- номинальный линейный ток якоря;
- номинальный ток и напряжения обмотки возбуждения.

8.4. Математическое описание процесса преобразования энергии в синхронных машинах

Математическую модель синхронной машины получают на основании модели обобщенной машины [4; 9; 11, гл. 3].

С целью упрощения (снижения числа уравнений) модель трехфазной симметричной синхронной машины приводят к двухфазной.

Ввиду того, что скорость ротора $\omega_r = \text{const}$, а элементы конструкции статора и ротора машины считаются прогретыми до установившейся температуры (т. е. механический и тепловой процессы принимают стационарными), дифференциальное уравнение движения в системе уравнений динамической математической модели синхронной машины и уравнение теплового баланса превращаются в тождества.

Поскольку наиболее несимметричным участком магнитной системы синхронной машины является ротор, то при составлении уравнений математической модели двухфазной синхронной машины удобнее записывать их в системе координат d, q , связанных с ротором ($\omega_k = \omega_r$). «Наблюдатель», располагаясь на роторе машины, «видит» в воздушном зазоре неподвижное относительно ротора вращающееся магнитное поле, созданное переменными токами обмоток статора. Картина для «наблюдателя» не изменится, если остановить и ротор (индуктор), и вращающееся магнитное поле статора (якоря).

Чтобы в обмотках заторможенной машины токи остались теми же, что и во вращающейся машине, в уравнения обмотки якоря вводят ЭДС вращения, а частоту токов в обмотках принимают равной нулю. Система координат d, q удобна для синхронных машин еще и тем, что позволяет совместить ее с осями магнитной симметрии ротора синхронной машины: продольной $d - d$, направленной вдоль оси симметрии полюсов, и поперечной $q - q$, проходящей через середину межполюсного пространства.

Синхронные машины основного исполнения имеют на роторе демпферную обмотку и обмотку возбуждения. Поэтому математическую модель синхронной машины без учета вихревых токов можно рассматривать как обобщенную машину с одной обмоткой на статоре и двумя обмотками на роторе (рис. 8.4).

Так как характер электромагнитных процессов в синхронных машинах основного и обращенного исполнения одинаков, то чтобы в уравнениях математической модели синхронной машины было меньше членов, содержащих ЭДС вращения, удобнее при математическом описании рассматривать синхронную машину обращенно-

го исполнения, с вращающейся обмоткой якоря, установленной на роторе.

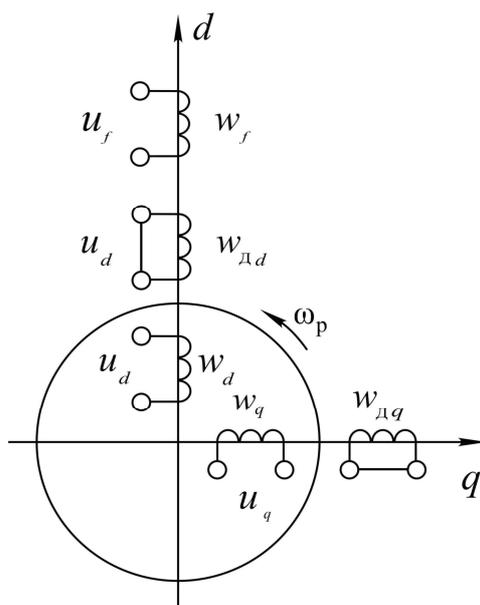


Рис. 8.4. Модель обобщенной синхронной машины с приведенными обмотками

На рис. 8.4 приняты обозначения: w_d и w_q – обмотки якоря по оси d и q , u_d и u_q – напряжения, приложенные к этим обмоткам; $w_{\Delta d}$ и $w_{\Delta q}$ – приведенные демпферные обмотки по осям d и q (обычно это короткозамкнутые обмотки и напряжения на них равны нулю); w_f – приведенная обмотка возбуждения; u_f – напряжение обмотки возбуждения. Обмотка возбуждения в синхронных машинах выполняется по одной оси, как правило, продольной d .

Для схемы синхронной машины (рис. 8.4) может быть записана следующая система уравнений напряжений:

$$\begin{aligned}
 u_d &= \frac{d\psi_d}{dt} - \psi_q \omega_p + r_a i_d; \\
 u_q &= \frac{d\psi_q}{dt} + \psi_d \omega_p + r_a i_q; \\
 u_f &= \frac{d\psi_f}{dt} + r_f i_f; \\
 0 &= \frac{d\psi_{\Delta d}}{dt} + r_{\Delta d} i_{\Delta d}; \\
 0 &= \frac{d\psi_{\Delta q}}{dt} + r_{\Delta q} i_{\Delta q},
 \end{aligned} \tag{8.3}$$

где r_a – активное сопротивление обмотки якоря; r_f – активное сопротивление обмотки возбуждения; $r_{Дd}$, $r_{Дq}$ – активные сопротивления демпферной обмотки по осям d и q ; i_d и i_q – токи в обмотках якоря по продольной и поперечной осям; i_f – ток в обмотке возбуждения; $i_{Дd}$ и $i_{Дq}$ – токи в демпферной обмотке по продольной и поперечной осям машины; $\omega_p = \omega_c$ – угловая скорость ротора.

Потокосцепления обмоток в системе (8.3) определяются в виде:

$$\begin{aligned}\psi_d &= L_d i_d + M_{ad} i_f + M_{ad} i_{Дd}; \\ \psi_q &= L_q i_q + M_{aq} i_{Дq}; \\ \psi_f &= L_f i_f + M_{ad} i_d + M_{ad} i_{Дd}; \\ \psi_{Дd} &= L_{Дd} i_{Дd} + M_{ad} i_d + M_{ad} i_f; \\ \psi_{Дq} &= L_{Дq} i_{Дd} + M_{aq} i_q,\end{aligned}\tag{8.4}$$

здесь L_d , L_q – индуктивности обмоток якоря по продольной и поперечной осям машины; L_f – индуктивность обмотки возбуждения; $L_{Дd}$, $L_{Дq}$ – индуктивности демпферной обмотки по продольной и поперечной осям машины; M_{ad} , M_{aq} – взаимные индуктивности между обмотками по продольной и поперечной осям.

Электромагнитный вращающий момент можно определить через токи в обмотках

$$M_{эм} = M(i_f i_q + i_q i_{Дd} - i_d i_{Дq}),\tag{8.5}$$

где M – коэффициент взаимной индукции обмоток статора и ротора; в неявнополюсной машине имеет место $M = M_{ad} = M_{aq}$.

При определении механического момента явнополюсной синхронной машины необходимо учитывать реактивный момент, который появляется за счет различия магнитных проводимостей магнитной системы по продольной и поперечной осям.

Через потокосцепления и токи в относительных единицах электромагнитный вращающий момент определяется следующим образом:

$$M_{эм} = \psi_d i_q - \psi_q i_d.\tag{8.6}$$

Совокупность уравнений напряжений (8.3), уравнения момента (8.5) или (8.6) описывает динамический процесс электромеханического преобразования энергии в синхронных машинах.

Математическое описание переходных процессов в синхронной машине сложнее, чем в асинхронной. Уравнения (8.3) можно

преобразовать, подставив в них значения потокосцеплений (8.4), и упростить, исключив из рассмотрения демпферную обмотку. Демпферная обмотка гасит колебания угловой скорости ротора в переходных процессах. В режиме работы, близком к установившемуся, когда $\omega_p = \text{const}$, влиянием демпферной обмотки на работу синхронной машины можно пренебречь. Без учета демпферной обмотки уравнения электрического равновесия обмоток имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} u_d &= L_d \frac{d}{dt} i_d + M_{ad} \frac{d}{dt} i_f - L_q i_q \omega_p + r_a i_d; \\ u_q &= L_d \frac{d}{dt} i_q + L_d i_d \omega_p + M_{ad} i_f \omega_p + r_a i_q; \\ u_f &= L_f \frac{d}{dt} i_f + M_{ad} \frac{d}{dt} i_d + r_f i_f. \end{aligned} \right\} \quad (8.7)$$

В системе уравнений (8.7) обозначим:

$$L_d = M_{ad} + L_{\sigma d}, \quad L_q = M_{aq} + L_{\sigma q}, \quad L_f = M_{ad} + L_{\sigma f}, \quad (8.8)$$

где $L_{\sigma d}$, $L_{\sigma q}$ и $L_{\sigma f}$ – индуктивности рассеяния обмотки якоря по продольной и поперечной осям машины и индуктивность рассеяния обмотки возбуждения. С учетом (8.8) уравнения (8.7) можно записать в виде:

$$\left. \begin{aligned} u_d &= L_{\sigma d} \frac{d}{dt} i_d + M_{ad} \frac{d}{dt} i_d + M_{ad} \frac{d}{dt} i_f - L_q i_q \omega_p + r_a i_d; \\ u_q &= L_{\sigma q} \frac{d}{dt} i_q + M_{aq} \frac{d}{dt} i_q + L_d i_d \omega_p + M_{ad} i_f \omega_p + r_a i_q; \\ u_f &= L_{\sigma f} \frac{d}{dt} i_f + M_{ad} \frac{d}{dt} (i_f + i_d) + r_f i_f. \end{aligned} \right\} \quad (8.9)$$

Представим ЭДС вращения в обмотках якоря по поперечной и продольной осям как:

$$E_q = L_q i_q \omega_p \quad \text{и} \quad E_d = L_d i_d \omega_p + M_{ad} i_f \omega_p.$$

Уравнения (8.9) после преобразования можно записать:

$$\left. \begin{aligned} u_d &= L_{\sigma d} \frac{d}{dt} i_d + M_{ad} \frac{d}{dt} (i_f + i_d) - E_q + r_a i_d; \\ u_q &= L_{\sigma q} \frac{d}{dt} i_q + M_{aq} \frac{d}{dt} i_q + E_d + r_a i_q; \\ u_f &= L_{\sigma f} \frac{d}{dt} i_f + M_{ad} \frac{d}{dt} (i_f + i_d) + r_f i_f. \end{aligned} \right\} \quad (8.10)$$

Полученные уравнения описывают переходные процессы в синхронной машине без учета демпферной обмотки.

Чтобы получить уравнения для описания установившегося режима работы синхронной машины, необходимо в системе уравнений (8.10), так же как это мы делали при описании процесса преобразования энергии в трансформаторах и асинхронных машинах, заменить оператор дифференцирования $d/dt \leftrightarrow j\omega$.

С учетом того, что в синхронных машинах в установившемся режиме работы ток в обмотке возбуждения постоянный ($i_f = \text{const}$), уравнения для установившегося режима имеют вид:

$$\begin{aligned} \dot{U}_d &= j\omega L_{\sigma d} \dot{I}_d + j\omega M_{ad} \dot{I}_d - \dot{E}_q + r_a \dot{I}_d; \\ \dot{U}_q &= j\omega L_{\sigma q} \dot{I}_q + j\omega M_{aq} \dot{I}_q + \dot{E}_d + r_a \dot{I}_q; \\ U_f &= i_f r_f. \end{aligned}$$

Представив реактивные сопротивления по продольной оси как $x_d = \omega L_{\sigma d} + \omega M_{ad}$, а по поперечной оси как $x_q = \omega L_{\sigma q} + \omega M_{aq}$, получим:

$$\begin{aligned} \dot{U}_d &= jx_d \dot{I}_d - \dot{E}_q + r_a \dot{I}_d; \\ \dot{U}_q &= jx_q \dot{I}_q + \dot{E}_d + r_a \dot{I}_q. \end{aligned} \quad (8.11)$$

Уравнения (8.11) описывают процесс электромеханического преобразования энергии в синхронной машине в установившемся режиме работы.

8.5. Параметры синхронных машин в установившемся режиме

Параметры синхронной машины – это коэффициенты перед переменными в уравнениях, описывающих процессы преобразования энергии: (8.2)–(8.11). Параметрами установившегося режима при симметричной нагрузке являются активные и реактивные сопротивления обмоток статора и ротора, а также демпферных обмоток. В некоторых случаях падение напряжения на реактивных сопротивлениях x_d и x_q удобнее представить как ЭДС, возникающие в этих обмотках.

Коэффициент пропорциональности между ЭДС E_{ad} и током I_d является *индуктивным сопротивлением реакции якоря по продольной оси* x_{ad} :

$$E_{ad} = x_{ad} I_d,$$

$x_{ad} = 2\pi f_1 L_{ad}$ – функция конструктивных параметров машины.

У неявнополюсной синхронной машины $E_{aq} = E_{ad}$ и полное индуктивное синхронное сопротивление обмотки якоря составит:

$$x_c = x_{\sigma a} + x_a.$$

В явнополюсных машинах индуктивные сопротивления по продольной и поперечным осям отличаются друг от друга

$$x_d = x_{\sigma a} + x_{ad}; \quad x_q = x_{\sigma a} + x_{aq},$$

и называются соответственно: *продольным x_d и поперечным x_q синхронными индуктивными сопротивлениями обмотки якоря*. Причем словом «синхронные» подчеркивают, что эти сопротивления соответствуют нормальному установившемуся синхронному режиму работы с симметричной нагрузкой фаз.

Величина $x_{\sigma a}$ определяемая потоками рассеяния обмоток, значительно меньше x_{aq} и x_{ad} . Величины x_d и x_q также определяются главным образом величиной воздушного зазора машины.

Обмотка возбуждения кроме основного поля в воздушном зазоре создает и поток рассеяния. Полная индуктивность обмотки возбуждения будет определяться как:

$$L_f = L_{\sigma f} + L_{f\delta},$$

где $L_{\sigma f}$ – индуктивность рассеяния обмотки возбуждения; $L_{f\delta}$ – индуктивность в воздушном зазоре.

8.6. Система относительных единиц синхронных машин

При сравнении синхронных машин различного конструктивного исполнения, напряжений и мощности удобно выражать их основные величины и параметры не в физических единицах, а в относительных величинах, которые могут исчисляться процентными или долевыми значениями от величин, принимаемых за единицу.

В теории установившихся и, в особенности, в теории переходных процессов синхронных машин широко пользуются относительными величинами. При этом за базисные величины тока, напряжения, сопротивления и индуктивности цепи якоря принимаются их номинальные фазные значения:

а) номинальная полная мощность машины $S_n = mU_{ф.н}I_{ф.н}$;

б) номинальное фазное напряжение при холостом ходе $U_{ф.н} = E_{f0}$;

в) номинальный фазный ток $I_{ф.н}$;

г) номинальное сопротивление $z_H = U_{\phi.H} / I_{\phi.H}$.

Указанные значения напряжения, тока и сопротивления являются базисными единицами для приведения соответствующих величин цепи статора (якоря). За базисную единицу тока цепи возбуждения принимается ток возбуждения $i_{в.н}$, который создаст в воздушном зазоре магнитный поток основной гармоника такой же величины, как и магнитный поток, создаваемый номинальным током якоря I_H в статорной обмотке $w_1 k_{об1}$ при симметричной нагрузке в случае, когда реакция якоря действует полностью по продольной оси:

$$i_{в.н} = \frac{m\sqrt{2}}{\pi} \frac{w_1 k_{об1}}{p w_B} k_{ad} I_H. \quad (8.12)$$

За единицу напряжения цепи возбуждения принимается напряжение $u_{в.н}$, определяемое через полную номинальную мощность синхронной машины S_H и единицу тока возбуждения:

$$u_{в.н} = \frac{S_H}{i_{в.н}} = \frac{m U_H I_H}{i_{в.н}} \text{ или с учетом (8.12) } u_{в.н} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \frac{p w_B}{w_1 k_{об1} k_{ad}} U_H.$$

Единица сопротивления цепи возбуждения равна отношению соответствующих единиц напряжения и тока:

$$z_{в.н} = \frac{u_{в.н}}{i_{в.н}} \text{ или } z_{в.н} = \frac{z_H}{k_{в.с}},$$

где $k_{в.с}$ – коэффициент приведения сопротивлений ротора к цепи статора.

Таким образом, при такой трактовке единичных базисных значений параметров цепи ротора одновременно с выражением параметров в относительных единицах осуществляется и приведение параметров цепи ротора и статора синхронной машины.

Диаграммы ЭДС, МДС, токов, а также характеристики синхронных генераторов обычно строят в относительных единицах:

$$z^\bullet = \frac{z}{z_H}; \quad u^\bullet = \frac{u}{u_H}; \quad i_f^\bullet = \frac{i_f}{i_{в.н}}; \quad E_{ad}^\bullet = \frac{E_{ad}}{U_H}; \quad x_{ad}^\bullet = \frac{x_{ad}}{z_H}; \quad I_d^\bullet = \frac{I_d}{I_H}.$$

Эту систему единиц в литературе называют также «системой индуктивного сопротивления реакции якоря по продольной оси (X_{ad})» или сокращенно «системой x_{ad} », так как при $i_f^\bullet = 1$ ЭДС статора в относительных единицах

$$E^{\bullet} = x_{ad}^{\bullet} i_f^{\bullet} = x_{ad}^{\bullet}.$$

Возможно применение и других систем относительных единиц для обмотки якоря с иными значениями коэффициентов приведения. Иногда используется, например, система единиц, в которой за базовое значение $i_{\text{баз.}f}$ берется такое значение тока возбуждения i_{f0} , которое при $n = n_n$ и отсутствии насыщения индуцирует ЭДС якоря $E = U_n$. Однако применение подобных систем относительных единиц с физической точки зрения менее оправданно.

В синхронных машинах, как и в других электромеханических преобразователях, концентрация энергии магнитного поля происходит в воздушном зазоре. Поэтому размеры зазора определяют характеристики и массогабаритные показатели машин. Чем меньше воздушный зазор, тем больше индуктивное сопротивление, меньше перегрузочная способность машины, но при прочих равных \square иаграммах при изготовлении такой машины потребуется меньше активных материалов, и цена ее будет ниже.

Увеличение воздушного зазора приводит к увеличению объема обмотки возбуждения, увеличению габаритов и удорожанию машины. Заниженный зазор приводит к снижению устойчивости и значительному влиянию нагрузки на характеристики машины.

8.7. Векторная диаграмма синхронного явнополюсного генератора при симметричной нагрузке

При работе синхронного генератора на внешнюю нагрузку его напряжение изменяется. Причинами этого могут быть: реакция якоря, падение напряжения, обусловленное потоками рассеяния, падение напряжения на активном сопротивлении обмотки якоря. \square иагрные всех этих факторов можно установить на основе диаграммы синхронной машины, предложенной А. Блонделем, Е. Арнольдом и Ю. ля Куром. Диаграмма построена для одной фазы обмотки якоря при симметричной нагрузке. Векторные диаграммы для других фаз имеют такой же вид, но сдвинуты по фазе на угол $\gamma_m = 2\pi/m$ у m -фазного генератора и на угол $\gamma_m = 2\pi/3$ – у трехфазного генератора.

На этой же диаграмме показан вектор внутренней ЭДС E_δ , который равен сумме векторов напряжения, падения напряжения

на активном r_a и на индуктивном x_σ сопротивлениях. ЭДС индуцируется в обмотке статора результирующим потоком, созданным геометрической суммой МДС обмотки возбуждения и МДС реакции якоря.

В соответствии с диаграммой (рис. 8.4) уравнение напряжения явнополюсного синхронного генератора можно записать:

$$\dot{U} = \dot{E}_f + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{\sigma a} - r_a \dot{I}. \quad (8.13)$$

Уравнение (8.13) можно прочесть так же, как: напряжение генератора \dot{U} равно ЭДС \dot{E}_f , индуцируемой током возбуждения, минус падение напряжения в индуктивных сопротивлениях реакции якоря x_{ad} и x_{aq} , индуктивном сопротивлении рассеяния якоря $x_{\sigma a}$ и активном сопротивлении якоря r_a .

Угол θ между векторами \dot{E}_f и \dot{U} называется *углом нагрузки*. В генераторном режиме работы ЭДС \dot{E}_f всегда опережает \dot{U} и угол θ при этом считается положительным.

В технической литературе векторная диаграмма (рис. 8.5) получила название диаграммы Blondеля.

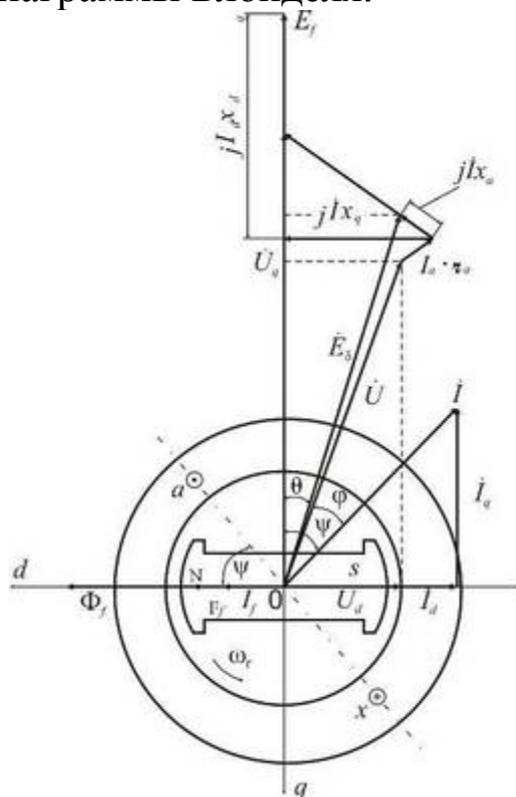


Рис. 8.5. Векторная диаграмма потоков, ЭДС, токов, явнополюсного генератора при активно-индуктивной нагрузке и при положении ротора в момент, когда ток в фазе равен максимальному значению

$E_\delta = -jx_\delta I$ – ЭДС рассеяния, индуцирована полем рассеяния обмотки якоря I ; U – фазное напряжение на выводах обмотки якоря. Измерить E_δ нельзя, но ее можно представить как напряжение на зажимах якоря плюс падение напряжения на внутреннем сопротивлении якорной обмотки.

Уравнение электрического равновесия якоря неявнополюсной машины, у которой благодаря магнитной симметрии ротора $x_d = x_q = x_c$, можно представить следующим образом:

$$\dot{U}_a = \dot{E}_f - jx_{ad}\dot{I}_a - jx_{\sigma a}\dot{I}_a - r_a\dot{I}_a, \quad (8.14)$$

здесь x_{ad} – индуктивное сопротивление реакции якоря; $\dot{E}_\delta = \dot{E}_f - jx_{ad}\dot{I}_a$ – ЭДС в обмотке якоря от результирующего магнитного по F_δ .

С учетом, что $x_c = x_d = x_{\sigma a} + x_{ad}$, уравнение напряжений (8.14) принимает более простой вид:

$$\dot{U}_a = \dot{E}_f - jx_c\dot{I}_a - r_a\dot{I}_a. \quad (8.15)$$

При холостом ходе напряжение на выходе генератора $\dot{U}_a = \dot{E}_f$. При нагрузке генератора напряжение изменяется согласно выражению (8.15), для которого может быть построена векторная диаграмма (рис. 8.6).

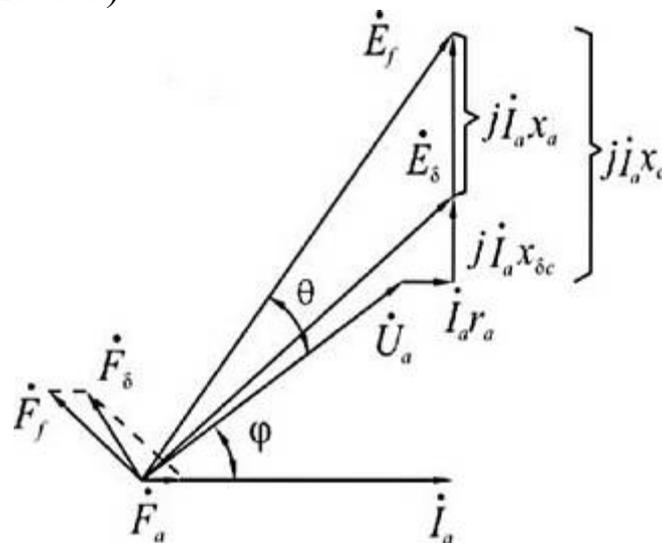


Рис. 8.6. Диаграмма напряжений неявнополюсного генератора

Векторные диаграммы при коротком замыкании являются частным случаем рассмотренных диаграмм, когда $U_a = 0$ (рис. 8.7).

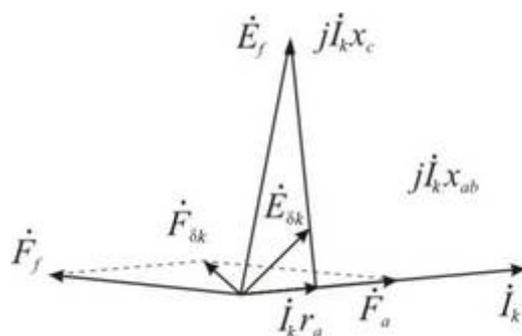


Рис. 8.7. Векторная диаграмма синхронной машины при коротком замыкании

Из диаграммы мы видим, что при коротком замыкании реакция якоря \dot{F}_a размагничивающая, и можно считать, что $\dot{F}_f \approx \dot{F}_a$, при этом поле в воздушном зазоре мало и магнитная система машины не насыщена.

Приведенные диаграммы не исчерпывают встречающихся в литературе вариантов построения векторных диаграмм синхронных машин. Однако все уточнения векторных диаграмм справедливы, если при этом изменяются уравнения, описывающие процессы преобразования энергии.

Общим недостатком всех векторных диаграмм является:

- то, что они строятся для синусоидальных токов и напряжений без строгого учета высших гармоник магнитного поля в воздушном зазоре машины;

- то, что они не учитывают наличия нескольких контуров на статоре и роторе по продольной и поперечной осям.

В последние годы, благодаря широкому применению ЭВМ, создаются всё более сложные математические модели процесса преобразования энергии в синхронных машинах, с учетом нелинейности их параметров, наличия нескольких контуров на статоре и роторе и высших гармоник магнитного поля в воздушном зазоре.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Назовите основные конструкционные схемы синхронных машин.
2. Опишите конструкцию явнополусной синхронной машины.
3. Опишите конструкцию неявнополусной синхронной машины.

4. Когда была создана трехфазная синхронная машина?
5. Почему роторы гидрогенераторов имеют многополюсную конструкцию, а турбогенераторов – двух- или четырехполюсную?
6. Назовите обмотки, установленные на роторе гидрогенератора.
7. Напишите уравнения, описывающие процесс электро-механического преобразования энергии в синхронной машине в установленном режиме работы.

9. РАБОТА СИНХРОННОЙ МАШИНЫ ПОД НАГРУЗКОЙ. РЕАКЦИЯ ЯКОРЯ

Рассмотрим принцип действия синхронного генератора основного исполнения (рис. 8.2). Если по обмотке возбуждения 2 пропустить постоянный ток, то индуктор 3 создаст постоянное во времени и неподвижное относительно ротора магнитное поле с чередующейся полярностью. При вращении ротора (индуктора) его магнитное поле будет перемещаться относительно неподвижной обмотки статора (якоря) 1 и наводить в ней переменную ЭДС.

Если на якоре уложена симметричная трехфазная обмотка (т. е. электрические сопротивления и число витков фазных обмоток одинаковы, а их магнитные оси сдвинуты в пространстве на 120°), то в якорной обмотке индуцируется симметричная система ЭДС (т. е. ЭДС равных по модулю и сдвинутых по фазе на 120°). При этом частота индуцируемых в фазных обмотках якоря ЭДС равна:

$$f_1 = \frac{pn_2}{60}, \quad (9.1)$$

где p – число пар полюсов индуктора; n_2 – скорость вращения ротора относительно неподвижного статора, об/мин.

Если к трехфазной обмотке якоря синхронного генератора подключить симметричное внешнее сопротивление, то по обмотке будет протекать симметричная система токов, создающих вращающееся магнитное поле якоря. Частота вращения поля якоря относительно статора:

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}. \quad (9.2)$$

Подставив в (9.2) вместо f_1 правую часть выражения (9.1), получим $n_1 = n_2$. Следовательно, третий принцип электромеханического преобразования энергии (см. 1 часть, п. 2) выполняется: магнитные поля индуктора и якоря неподвижны относительно друг друга и образуют в воздушном зазоре электромагнитный момент (8.5).

При работе синхронной машины в режиме двигателя симметричная трехфазная обмотка якоря присоединяется к трехфазной сети. При этом образующееся магнитное поле с частотой вращения n_1 , взаимодействуя с полем возбуждения, создает на роторе вращающий момент.

9.1. Реакция якоря синхронного генератора

В синхронной машине результирующее магнитное поле в воздушном зазоре получается путем наложения поля якоря на поле возбуждения. Изменения параметров и характеристик синхронной машины, вызванные воздействием магнитного поля якоря, называются *реакцией якоря*.

По своему действию на магнитный поток обмотки возбуждения вращающееся магнитное поле якоря синхронной машины аналогично реакции якоря машины постоянного тока. Но в отличие от машины постоянного тока реакция якоря в синхронной машине зависит как от нагрузки (величины тока якоря), так и от характера нагрузки (активная, индуктивная или емкостная), т. е. от ее коэффициента мощности $\cos\varphi$.

Рассмотрим реакцию якоря явнополюсной синхронной машины, работающей в генераторном режиме при активной нагрузке $\cos\varphi = 1$ (рис. 9.1, а).

Из-за несимметричного устройства индуктора явнополюсного генератора возникает необходимость рассматривать действие реакции якоря по продольной и поперечной осям в отдельности.

Такой метод изучения реакции якоря был предложен французским электротехником А. Блонделем в 1895 году и называется методом двух реакций. Метод двух реакций основан на принципе суперпозиции, при котором предполагается, что магнитная система линейна и магнитные потоки, действующие по продольной оси, не влияют на значения потоков, действующих по поперечной оси, и наоборот.

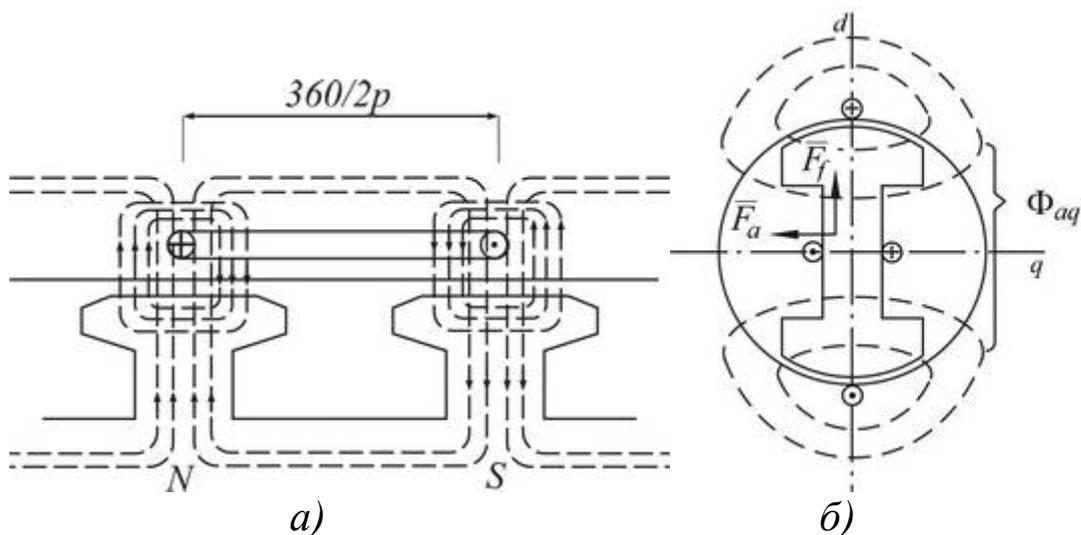


Рис. 9.1. Поле поперечной реакции якоря при активной нагрузке

Из исследования поперечной реакции якоря машин постоянного тока мы уже знаем, что при насыщении участков магнитной цепи это предположение не справедливо. Но на практике данной методикой пользуются до сих пор, внося дополнительные коррективы на влияние насыщения магнитной цепи.

При активной нагрузке машины поле якоря, накладываясь на поле обмотки возбуждения, ослабляет поле на набегающей половине полюса и усиливает его на сбегающей половине полюса. Магнитодвижущая сила поля реакции якоря \bar{F}_a в этом случае направлена перпендикулярно направлению МДС обмотки возбуждения \bar{F}_f . Такая реакция якоря называется *поперечной*. Она аналогична реакции якоря в машинах постоянного тока при размещении щеток на геометрической нейтрали.

В ненасыщенной машине поле поперечной реакции якоря изменяет форму поля в воздушном зазоре, но не изменяет результирующий поток. В насыщенной машине увеличение поля под сбегающим краем полюса сказывается меньше, чем уменьшение под набегающим.

Поэтому результирующее поле в насыщенной машине меньше, т. е. в насыщенной машине поперечная реакция якоря искажает и уменьшает результирующий магнитный поток.

При чисто индуктивной нагрузке ($\cos\varphi = 90^\circ$) реакция якоря продольная, размагничивающая – поток реакции якоря \bar{F}_a замыка-

ется по тем же путям, что и поток возбуждения, но направлен навстречу потоку возбуждения \bar{F}_f (рис. 9.2, а и 9.2, б).

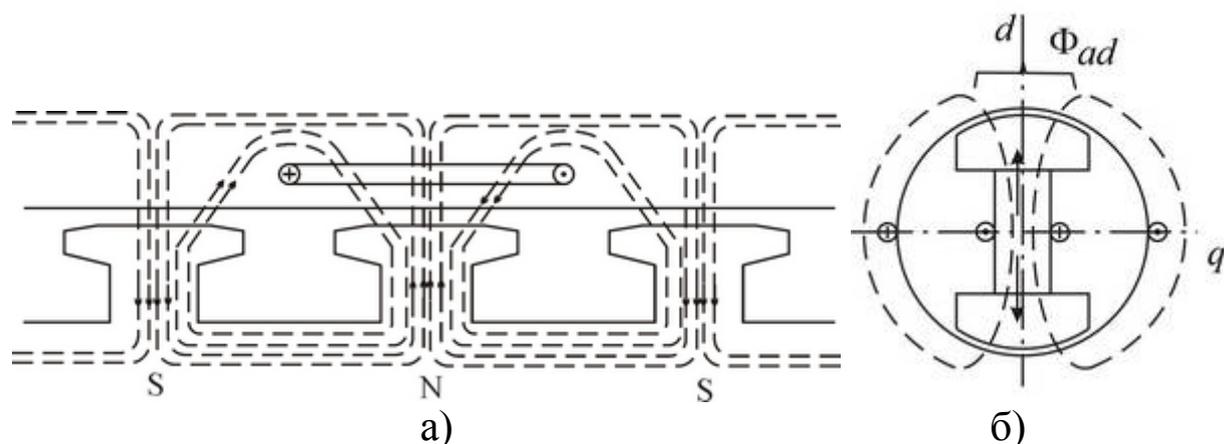


Рис. 9.2. Поле продольной реакции якоря при индуктивной нагрузке

Размагничивающее действие реакции якоря в этом случае проявляется сильнее, чем при поперечной реакции якоря.

При работе синхронного генератора на индуктивную нагрузку поле в зазоре уменьшается.

При чисто емкостной нагрузке (рис. 9.3) реакция якоря становится подмагничивающей, так как ток якоря опережает на 90° напряжение U_a , а МДС обмотки возбуждения \bar{F}_f и реакции якоря \bar{F}_a совпадают по направлению, образуя результирующее поле.

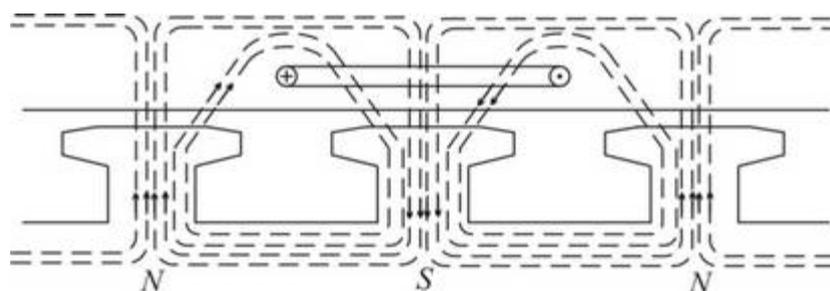


Рис. 9.3. Поле продольной реакции якоря при емкостной нагрузке

В этом случае продольная реакция якоря подмагничивающая.

9.2. Коэффициенты продольной и поперечной реакций якоря

В общем случае при смешанной нагрузке $Z_H = R_H + jX_H$ реакция якоря \bar{F}_a имеет две составляющие: продольную \bar{F}_d и поперечную \bar{F}_q . Продольная составляющая совпадает с продольной осью маши-

ны d , а поперечная – с поперечной осью q . При смешанной активно-емкостной нагрузке продольная составляющая реакции якоря совпадает с МДС обмотки возбуждения (рис. 9.4), а при активно-индуктивной нагрузке \overline{F}_d направлена навстречу \overline{F}_f .

В неявнополюсной машине воздушный зазор по продольной и поперечной осям d и q одинаков. Поэтому при повороте вектора реакции якоря \overline{F}_a относительно осей продольная \overline{F}_d и поперечная \overline{F}_q составляющая вектора реакции якоря не зависят от размеров воздушного зазора. В явнополюсной машине продольная \overline{F}_d и поперечная \overline{F}_q составляющие зависят не только от величины тока нагрузки, но и от положения вектора \overline{F}_a относительно осей d и q .

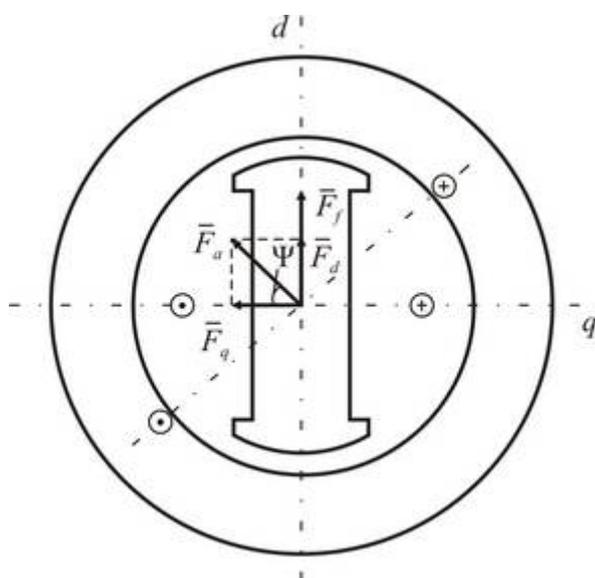


Рис. 9.4. Продольные и поперечные составляющие реакции якоря в явнополюсной синхронной машине

Для учета влияния магнитного сопротивления воздушного зазора по продольным и поперечным осям машины вводят коэффициенты приведения намагничивающей силы реакции якоря по продольной K_{ad} и по поперечной K_{aq} осям машины. Их называют *коэффициентами продольной и поперечной реакции якоря*. Значения коэффициентов K_{ad} и K_{aq} зависят от конструкции машины, степени насыщения и находятся в пределах:

$$K_{ad} = 0,938 \div 0,785; \quad K_{aq} = 0,129 \div 0,785.$$

Среднее значение коэффициентов K_{ad} и K_{aq} для явнополюсной машины составляет $K_{ad} \approx 0,85$, $K_{aq} \approx 0,5$; для неявнополюсной машины – $K_{ad} = K_{aq} = 1$.

С помощью коэффициентов K_{ad} и K_{aq} осуществляют так называемое приведение МДС якоря по продольной и поперечной осям машины. По существу, вся сложность описания процесса преобразования энергии в синхронной машине, обусловленная наличием спектра гармоник поля, несимметрией машины по продольной и поперечной осям, скрыта в алгоритме определения коэффициентов приведения K_{ad} и K_{aq} .

Приведенная продольная соответствующая реакции якоря:

$$F_{\alpha d} = K_{\alpha d} F_d = F_{\alpha} \sin \Psi K_{\alpha d}.$$

Приведенная поперечная составляющая реакции якоря:

$$F_{\alpha q} = K_{\alpha q} F_q = F_{\alpha} \cos \Psi K_{\alpha q}.$$

Вводя в описание процесса преобразования энергии в синхронных машинах приведенные продольные и поперечные составляющие реакции якоря, можно представить, что и ток якоря I_{α} состоит из продольной I_d и поперечной составляющих I_q .

$$I_q = I_{\alpha} \cos \psi; \quad I_d = I_{\alpha} \sin \psi.$$

Току I_d соответствует $F_d = F_{\alpha} \sin \psi$, а току I_q соответствует $F_q = F_{\alpha} \cos \psi$.

Угол Ψ определяется как:

$$\Psi = \operatorname{arctg} \frac{X_1 + X_n}{R_1 + R_n}.$$

Составляющие реакции якоря $F_{\alpha d}$ и $F_{\alpha q}$ будут создавать потоки основной гармоники $\Phi_{\alpha d}$ и $\Phi_{\alpha q}$, которые будут индуцировать ЭДС реакции якоря по продольной оси $E_{\alpha d}$ и поперечной оси $E_{\alpha q}$, причем, $E_{\alpha d}$ и $E_{\alpha q}$ имеют частоту основной гармоники.

При несимметричной нагрузке реакция якоря оказывает существенное влияние на работу синхронной машины. Например, при однофазном коротком замыкании обмотка фазы статора создает пульсирующую МДС, не вращающуюся в пространстве. Пульсирующую МДС можно разложить на две составляющие, вращающиеся в противоположных направлениях. Одна из них, вращающаяся в том же направлении, что и ротор (прямовращающаяся МДС),

неподвижна относительно ротора и оказывает на работу такое же влияние, как и МДС статора в симметричном режиме. Вторая МДС вращается в противоположном направлении (обратновращающаяся МДС), индуцирует в роторе – в обмотке возбуждения и в наконечниках полюсов – токи двойной частоты $2f_1$. Эти токи приводят к дополнительным потерям и соответственно увеличенному нагреву ротора, а также могут вызвать появление высших гармоник в кривой ЭДС статора. Для уменьшения влияния обратновращающегося поля на роторе размещают демпферную обмотку. Эта обмотка создает МДС, уравнивающую обратносинхронную составляющую.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что такое реакция якоря и как она влияет на работу синхронного генератора?
2. Какие оси симметрии выделяют в синхронных машинах и как эти оси связаны с конструкцией машины?
3. Какими магнитными потоками определяются индуктивные сопротивления обмотки якоря неявнополюсной синхронной машины?
4. Какими магнитными потоками определяются индуктивные сопротивления обмотки якоря явнополюсной синхронной машины?
5. Поясните порядок построения векторной диаграммы неявнополюсного синхронного генератора.
6. Поясните порядок построения векторной диаграммы явнополюсного синхронного генератора.
7. Как и зачем МДС обмотки якоря приводится к МДС обмотки возбуждения?

10. ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА, РАБОТАЮЩЕГО НА АВТОНОМНУЮ НАГРУЗКУ

Основными характеристиками синхронного генератора, работающего на автономную нагрузку, являются:

- характеристика холостого хода $U = f(i_f)$;
- внешняя характеристика $U = f(I_a)$;
- регулировочная характеристика $i_f = f(I_a)$;
- характеристика короткого замыкания $I_k = f(i_f)$.

Названные характеристики дают наглядное представление об основных свойствах синхронных генераторов и могут быть построены по расчетным данным, с помощью векторных диаграмм, по данным опытов или получены с помощью математического моделирования на ЭВМ.

10.1. Характеристика холостого хода синхронного генератора

Характеристика холостого хода (х.х.х.) (рис. 10.1) определяет зависимость $U = f(i_f)$ при токе якоря $I_a = 0$ и частоте $f = f_n$, снимается в восходящей и нисходящей ветвях. Очевидно, что в режиме холостого хода $U = E_f$.

Площадь, ограниченная между восходящей и нисходящей ветвью, определяется величиной гистерезиса магнитной цепи ротора. При использовании характеристики холостого хода для построения диаграмм напряжения и других характеристик рекомендуется брать нисходящую ветвь с нулем, помещенным в точку пересечения кривой с осью абсцисс (рис. 10.1, сплошная линия). Характеристика холостого хода для лучшей сравнительной оценки свойств машины может быть построена в относительных единицах. Однако при построении характеристики холостого хода за единицу обычно принимают не ток возбуждения i_{f_n} , как это было определено в параграфе 9.5, а ток возбуждения i_{f_0} , соответствующий по характеристике холостого хода номинальному напряжению U_n (рис. 10.1).

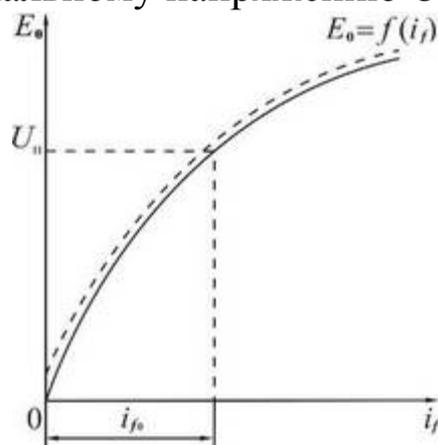


Рис. 10.1. Характеристика холостого хода синхронного генератора

Относительную величину тока возбуждения по отношению к току i_{B0} будем обозначать как i_{B0}^* :

$$i_{\text{BO}}^* = \frac{i_{\text{B}}}{i_{\text{BO}}}.$$

Выбор для характеристик холостого хода такой единицы тока возбуждения имеет то преимущество, что при этом характеристики холостого хода всех генераторов, построенных в относительных единицах, пересекаются в общей точке с координатами 1;1 (рис. 10.2).

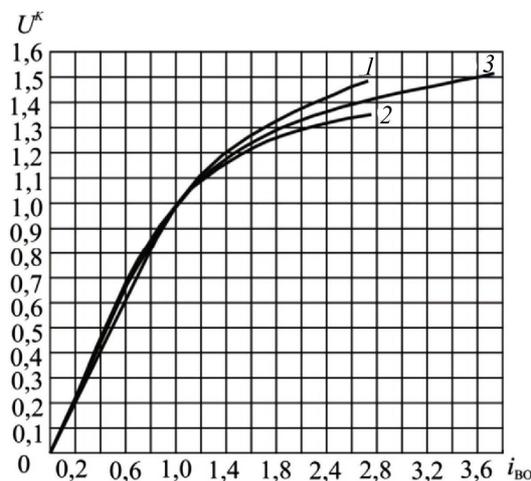


Рис. 10.2. Характеристики холостого хода синхронных генераторов в относительных единицах: 1 – х.х.х. турбогенератора 50000 кВА, $2p = 4$; 2 – х.х.х. гидрогенератора 57200 кВА, $2p = 96$; 3 – нормальная х.х.х.

Полученную в относительных единицах характеристику холостого хода исследуемой конкретной синхронной машины сопоставляют с нормальной средней характеристикой (рис. 10.2, кривая 3), полученной на основании усреднения большого количества характеристик ранее испытанных синхронных машин.

10.2. Характеристика короткого замыкания синхронного генератора

Характеристика короткого замыкания представляет собой зависимость $I_{\text{к}} = f(i_f)$ при неизменной частоте вращения ротора $n_2 = \text{const}$ и напряжении якоря равном нулю.

Из-за относительно малого активного сопротивления r_a обмотка якоря синхронной машины обладает практически только индуктивным сопротивлением. Следовательно, ток якоря при симметричном трехфазном коротком замыкании отстает от ЭДС на 90° и является чисто продольным, т. е. $\dot{I}_{\text{к}} = \dot{I}_d$. Этот ток создает в машине

продольную размагничивающую реакцию якоря. При коротком замыкании $\dot{U}_a = 0$, т. е. при $r_a = 0$ уравнение электрического равновесия якоря преобразуется к виду

$$\dot{E}_f = j\dot{I}_k x_d. \quad (10.1)$$

В опыте короткого замыкания результирующий поток машины мал, и магнитная система машины оказывается ненасыщенной. Характеристика короткого замыкания носит прямолинейный характер и имеет изгиб только при величине тока I_k , значительно превышающего номинальный I_n . Характеристика трехфазного симметричного короткого замыкания синхронного генератора приведена на (рис. 10.3, прямая 1).

Получающиеся при несимметричных двухфазном и однофазном коротком замыкании зависимости $I_{k2} = f(i_f)$, $I_{k1} = f(i_f)$, тоже носят линейный характер (линия 2 и 3, рис. 10.3). В случае двухфазного короткого замыкания обмотка якоря создает пульсирующее магнитное поле, которое можно разложить на прямо- и обратнорвращающиеся поля с половинной амплитудой.

При этом прямое поле неподвижно относительно ротора и создает размагничивающую реакцию якоря, а обратное поле вращается относительно ротора с двойной синхронной скоростью.

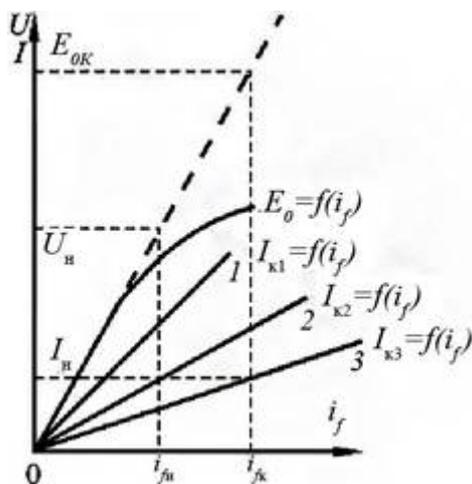


Рис. 10.3. Характеристики короткого замыкания синхронного генератора: 1 – трехфазного; 2 – двухфазного; 3 – однофазного

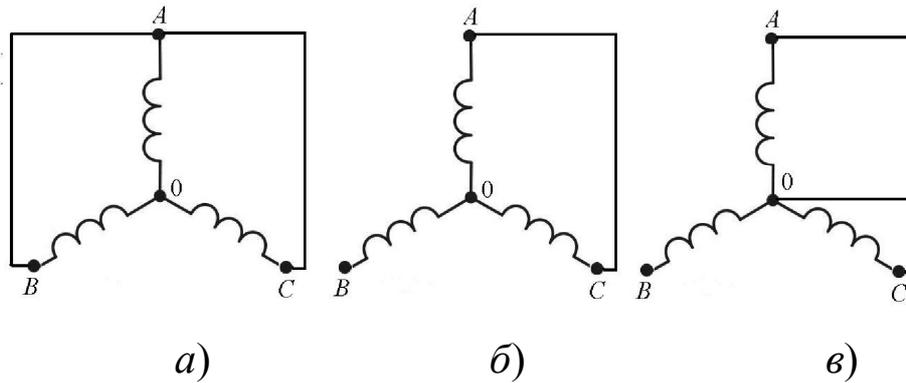


Рис. 10.4. Схемы короткого замыкания обмотки якоря:
a – трехфазного; *б* – двухфазного; *в* – однофазного

Поскольку при неизменном токе I_k МДС двухфазной обмотки существенно меньше МДС трехфазной обмотки, то и размагничивание в этом случае будет слабее, чем при трехфазном замыкании. Следовательно, магнитный поток и якорный ток двухфазного короткого замыкания $I_{к2} = f(i_f)$ будут больше при том же токе возбуждения i_f .

В случае однофазного короткого замыкания размагничивающее действие МДС обмотки якоря еще меньше, чем при двухфазном коротком замыкании, что в свою очередь обуславливает еще больший ток якоря $I_{к1} = f(i_f)$.

10.3. Отношение короткого замыкания

Большое значение для оценки свойств синхронной машины имеет отношение тока возбуждения $i_f = i_{f0}$, создающего номинальное напряжение на якоре $E_0 = U_H$ по характеристике холостого хода, к току возбуждения $i_f = i_{fk}$, создающего номинальный ток якоря $I_{к3} = I_{a.H}$ по характеристике трехфазного короткого замыкания.

Указанное отношение $\frac{i_{f0}}{i_{fk}}$ носит название *отношения короткого замыкания* (о.к.з.)

и характеризует главным образом влияние реакции якоря на обмотку возбуждения синхронной машины. Для расчета (о.к.з.) строим на одном графике (рис. 10.5) характеристику холостого хода 1 и характеристику трехфазного короткого замыкания 2. Затем, проведя касательную из начала координат к характе-

ристике холостого хода I , получаем спрямленную характеристику холостого хода 3 (х.х.х. без учета насыщения магнитной системы).

Согласно (10.1) при симметричном трехфазном установившемся коротком замыкании

$$x_d = \frac{E_f}{I_K} \quad (10.2)$$

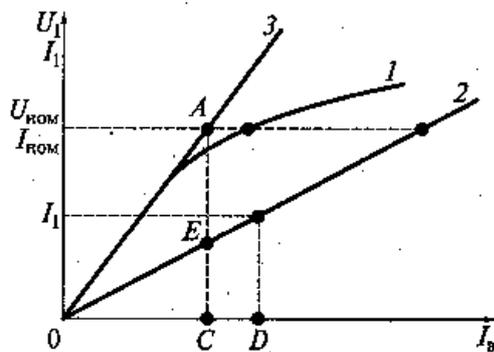


Рис. 10.5. Графические построения для определения о.к.з. синхронного генератора

Для ЭДС холостого хода, обычно соответствующей номинальному напряжению $U_{ном} = E_f$ (отрезку AC), по спрямленной характеристике холостого хода 3 находим соответствующий ей ток возбуждения (отрезок OC). Для этого тока возбуждения по характеристике трехфазного короткого замыкания 2 определяем соответствующий ток I_K (отрезок EC). Далее, подставив полученные значения E_f и I_K в выражение (10.2), находим значение продольного синхронного индуктивного сопротивления обмотки якоря x_d при ненасыщенной магнитной системе машины.

Из подобия треугольников OCE и ODB (рис. 10.5) отношение короткого замыкания может быть определено и как отношение тока короткого замыкания I_K (отрезок EC), соответствующего току возбуждения, при котором в режиме холостого хода ЭДС $E_f = U_{ном}$, к номинальному току якоря $I_{ном}$ (отрезок DB):

$$о.к.з. = \frac{I_K}{I_{ном}} = I_K^* \quad (10.3)$$

Ток I_K определяют по рис. 10.5 следующим образом. Сначала по спрямленной характеристике холостого хода 3 находят ток воз-

буждения (отрезок OC), при котором $E_f = U_{\text{НОМ}}$ (отрезок AC). Затем по характеристике короткого замыкания 2 определяют соответствующий этому току возбуждения ток короткого замыкания I_k (отрезок EC). Подставив полученное значение тока I_k в уравнение (10.3), находят значение *о.к.з.* Поскольку

$$x_d = \frac{AC}{EC}, \quad \text{а} \quad \text{о.к.з.} = \frac{EC}{AC},$$

то можно сделать вывод, что отношение короткого замыкания обратно пропорционально относительному значению продольного синхронного индуктивного сопротивления обмотки якоря x_d^* . Соотношение между *о.к.з.* и относительным сопротивлением x_d^* для насыщенной синхронной машины составляет:

$$\text{о.к.з.} \approx \frac{1,1 \dots 1,2}{x_d^*}.$$

Синхронные машины с малой величиной *о.к.з.* дают большее изменение напряжения при колебаниях нагрузки, являются менее устойчивыми при параллельной работе и имеют меньшую величину зарядного тока при работе на емкость разомкнутой линии электропередачи, но зато являются относительно более дешевыми, так как использование активных материалов в машинах с малым значением *о.к.з.* выше, чем в машинах с большим *о.к.з.*

Увеличение воздушного зазора приводит к увеличению *о.к.з.* и к снижению синхронного сопротивления, что улучшает параллельную работу генератора с другими станциями (особенно при наличии длинных линий передачи) и делает работу генератора более устойчивой при колебаниях нагрузки. Но увеличение воздушного зазора генератора приводит одновременно к увеличению его массы, цены и ухудшает использование активных материалов.

Для синхронных неявнополюсных турбогенераторов $\text{о.к.з.} = 0,4 \dots 0,8$. Для синхронных явнополюсных гидрогенераторов $\text{о.к.з.} = 0,8 \dots 1,8$.

10.4. Внешняя характеристика синхронного генератора

Зависимость напряжения на якоре синхронного генератора от тока якоря $U = f(I_a)$ при $i_f = \text{const}$; $f = \text{const}$; $\cos\varphi_2 = \text{const}$ называют *внешней характеристикой* синхронного генератора.

При индуктивной нагрузке $0 < \varphi < \frac{\pi}{2}$ размагничивающая реакция якоря и падение напряжения в обмотке якоря $r_a \dot{I} + jx_{\delta a} \dot{I}$ вызывают уменьшение напряжения генератора, поэтому внешняя характеристика имеет резкопадающий характер (рис. 10.6).

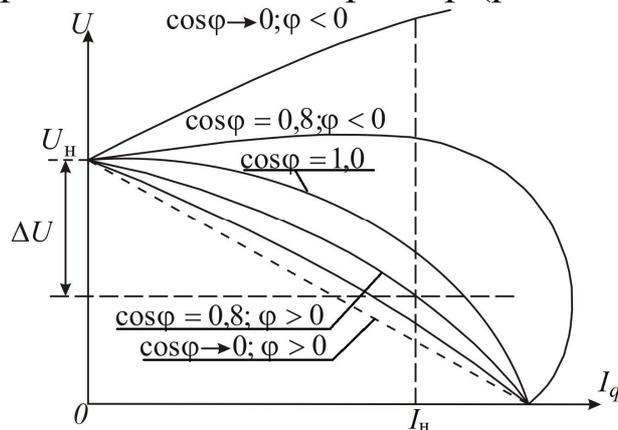


Рис. 10.6. Внешние характеристики синхронного генератора

Причем с уменьшением величины $\cos\varphi$ нагрузки возрастает и величина падения напряжения. При емкостной нагрузке $0 > \varphi > \frac{\pi}{2}$ с уменьшением $\cos\varphi$ нагрузки напряжение на выводах генератора за счет намагничивающей реакции якоря может увеличиваться. При трехфазном коротком замыкании все характеристики пересекаются в одной точке, соответствующей току трехфазного короткого замыкания.

В неявнополюсных синхронных машинах (турбогенераторы) относительная величина реакции якоря больше, чем в явнополюсных (гидрогенераторы), поэтому относительное падение напряжения при индуктивной нагрузке и повышении напряжения при емкостной нагрузке у неявнополюсных машин больше.

Важным показателем внешней характеристики является *номинальное изменение напряжения синхронного генератора* ΔU_n , то есть изменение его напряжения при изменении нагрузки от нуля до номинального значения при неизменном токе возбуждения.

$$\Delta U_{\text{H}} = \frac{E_0 - U_{\text{H}}}{U_{\text{H}}} 100\% = (25 \dots 35\%).$$

Для определения номинального изменения напряжения ΔU_{H} внешняя характеристика должна сниматься для $\cos\varphi = \cos\varphi_{\text{H}}$.

10.5. Регулировочная характеристика синхронного генератора

Регулировочные характеристики представляют собой зависимость тока возбуждения от тока якоря генератора $i_f = f(I_a)$ при $U = \text{const}$; $f = \text{const}$; $\cos\varphi = \text{const}$.

Для поддержания напряжения $U = \text{const}$ при возрастании индуктивной нагрузки потребуется увеличение тока возбуждения, а при емкостной нагрузке – уменьшение тока возбуждения, как это следует из рассмотрения внешних характеристик.

При уменьшении $\cos\varphi$ требуется соответственно большее изменение тока возбуждения, поэтому регулировочные характеристики для различных значений $\cos\varphi = \text{const}$ носят характер, представленный на рис. 10.7.

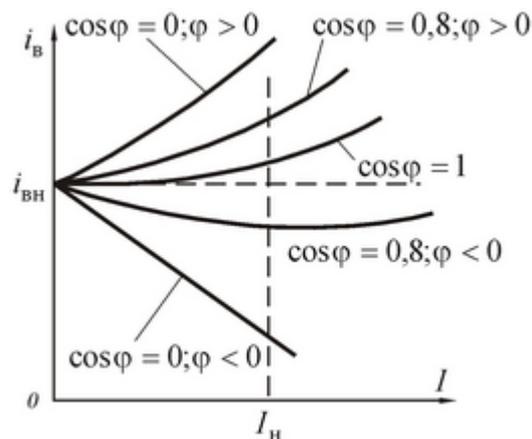


Рис. 10.7. Регулировочные характеристики синхронного генератора

10.6. Потери и КПД синхронных машин

Потери при преобразовании энергии в синхронных машинах аналогичны по виду и характеру потерям в асинхронных машинах, с учетом того, что по обмотке ротора (индуктора) протекает постоянный ток.

Потери в синхронных машинах, как и у всех электромеханических преобразователей, условно можно разделить на две группы:

- а) основные;
- б) добавочные.

К основным относят потери, возникающие при передаче электрической, магнитной и механической энергии в узлах и деталях при работе синхронной машины. Такими потерями являются:

- потери в меди статора, меди обмотки возбуждения и на щеточном контакте:

$$P_{\text{эл}} = m_1 I_1^2 r_1; \quad P_{\text{в}} = I_f^2 r_{\text{в}} + \Delta U_{\text{щ}} I_f;$$

- потери в активной стали статора, состоящие из потерь от гистерезиса и вихревых токов;

- потери на трение и вентиляционные потери:

$$P_{\text{мех}} \approx 3,68 p \left[\frac{v_2}{40} \right]^3 \sqrt{10^3 l_1},$$

где v_2 – окружная скорость на поверхности полюсного наконечника ротора, м/с; l_1 – конструкционная длина сердечника статора, мм.

Добавочные потери возникают в результате проявления вторичных процессов электромагнитного характера. Определяются в процентах от мощности, развиваемой синхронной машиной. Их причинами являются:

- а) потоки рассеяния статора;
- б) высшие гармоники намагничивающих сил статора и ротора;
- в) потери, обусловленные зубчатостью статора и ротора.

Для синхронных машин мощностью до 1000 кВт добавочные потери составляют 0,5 % от мощности нагрузки, а для машин мощностью более 1000 кВт от 0,25 до 0,4 %.

КПД синхронной машины определяется как:

$$\eta = 1 - \frac{\sum P_{\text{п}}}{P + \sum P_{\text{п}}},$$

где P – полезная мощность; $\sum P_{\text{п}}$ – сумма всех потерь.

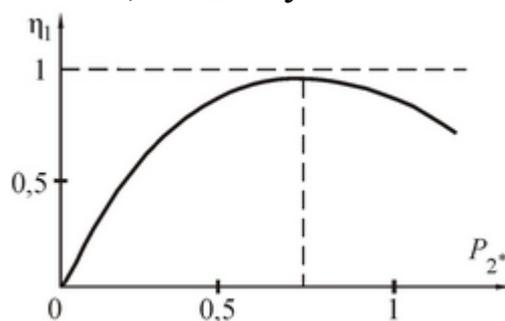


Рис. 10.8. Зависимость КПД синхронной машины от нагрузки

Мощные синхронные машины, как и трансформаторы, имеют очень высокий КПД, достигающий 98–99 %.

10.7. Параллельное включение синхронных генераторов

С целью повышения надежности снабжения электроэнергией крупных промышленных центров последние обычно питаются от нескольких электростанций. Электрические станции объединяются в единую энергетическую систему, и все синхронные генераторы в такой системе подключены через трансформаторы к общим шинам, к которым также через трансформаторы подключены и потребители – синхронные и асинхронные двигатели. Такими общими шинами являются высоковольтные линии электропередачи.

При параллельной работе синхронных генераторов на общую сеть все они должны иметь строго одну и ту же частоту и фазу, т. е. работать синхронно (рис. 10.9).

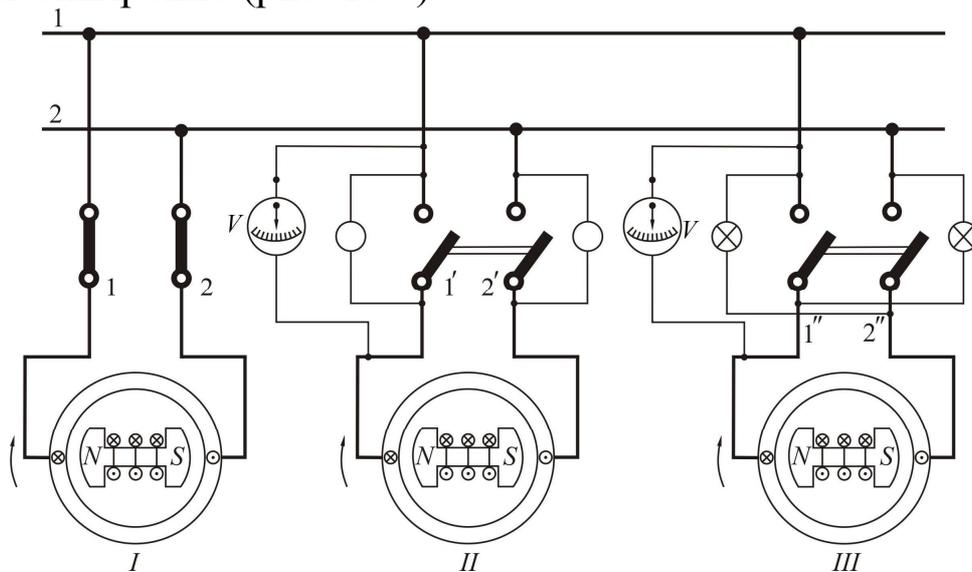


Рис. 10.9. Параллельное включение однофазного синхронного генератора

При этом частота вращения синхронной машины определяется числом полюсов:

$$n = \frac{60 f_1}{p} \text{ об/мин.}$$

Рассмотрим синхронную машину, работающую вхолостую. Механические двигатели, вращающие синхронные генераторы, чаще всего не обладают способностью точно поддерживать одну и ту

же скорость вращения. Синхронная работа генераторов была бы невозможна, если бы они не удерживались в этих условиях автоматически с помощью появляющегося при параллельной работе синхронных машин синхронизирующего момента вращения.

При параллельной работе возможны колебания (качания) перемещения ротора в пределах допустимых значений угла θ . Для параллельного подключения синхронного генератора к сети (рис. 10.9) должны быть выполнены следующие условия:

1. ЭДС подключаемого генератора должна быть равна напряжению сети $E_a = U_c$.

2. Полярность подключаемого генератора соответствует полярности сети.

3. Частоты соединяемых систем должны быть равны.

4. Порядок следования фаз в соединяемых токах должен быть одинаков.

Для контроля выполнения указанных условий требуется применение специальных синхронизирующих устройств, простейшим аналогом которых могут являться лампы накаливания. Лампы могут быть соединены двумя способами:

- на потухание (генератор *II* на рис. 10.9);
- на горение (генератор *III* на рис. 10.9).

Подходящий момент для параллельного соединения генераторов подбирается следующим образом.

Подключаемому генератору задают частоту вращения, соответствующую:

$$f_{2,3} = f_1 \pm \Delta f .$$

Напряжение сети e_1 имеет частоту f_1 , и ЭДС подключаемых генераторов e_2 и e_3 имеют равные частоты, меньшие f_1 : $f_2 = f_3 < f_1$.

В момент яркого загорания ламп у генератора *II* имеется наибольшее расхождение по фазе ЭДС e_2 и напряжения сети e_1 , а в момент потухания ламп будет иметь место совпадение по фазе ЭДС e_2 и напряжения e_1 , т. е. наиболее благоприятный момент для подключения генератора *II* к сети.

Для генератора *III*, наоборот, в момент яркого загорания ламп имеет место совпадение по фазе ЭДС e_3 и напряжения e_1 , т. е. наиболее благоприятный момент для подключения генератора *III* к се-

ти, а в момент полного потухания ламп будет наибольшее расхождение ЭДС генератора и сети по фазе.

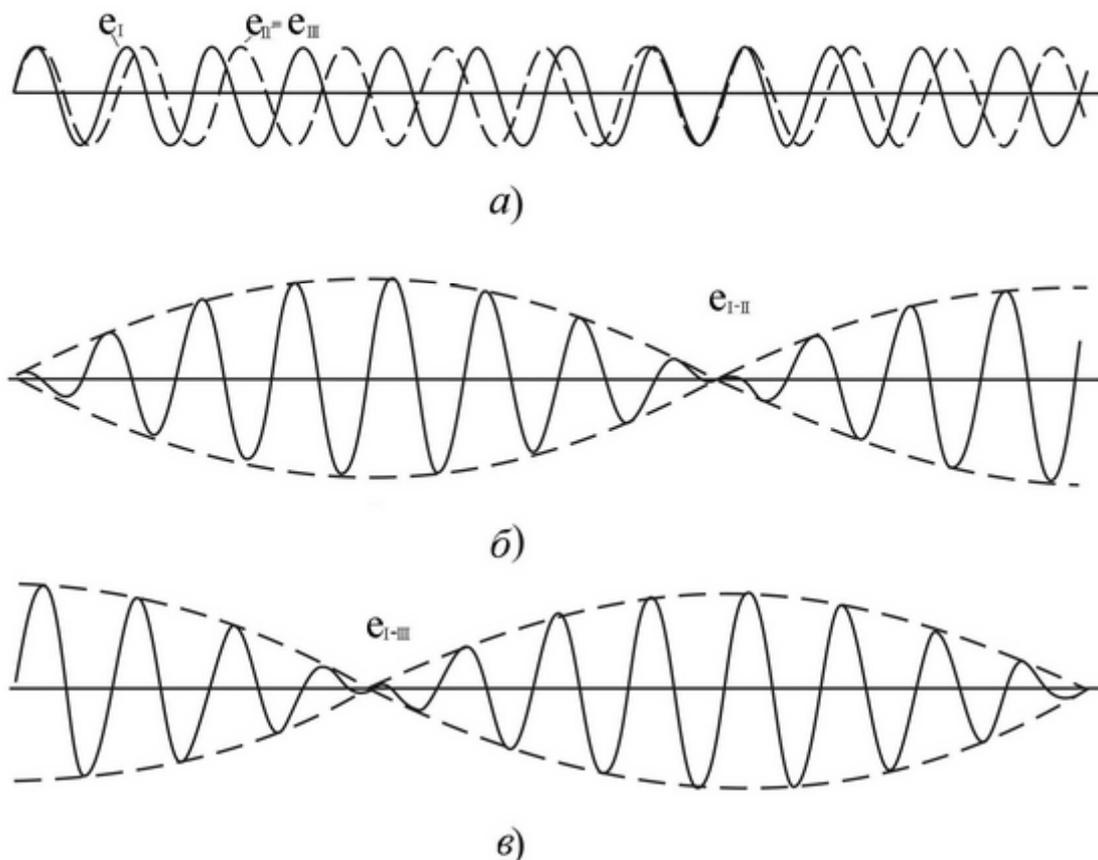


Рис. 10.10. Изменение напряжения на лампах при синхронизации

Синхронизация трехфазных машин принципиально производится по тому же методу, что и однофазных, с той разницей, что здесь потребуется три фазные лампы.

На современных электростанциях применяются более совершенные приборы – синхроскопы, а также автоматические приборы синхронизации, которые проводят весь процесс синхронизации и подключение генератора в автоматическом режиме без участия человека.

В последнее время для увеличения быстроты и надежности синхронизации применяется *самосинхронизация генераторов*. Суть метода самосинхронизации заключается в том, что невозбужденный синхронный генератор приводится во вращение со скоростью примерно равной синхронной и обмотка якоря синфазно подключается к сети, при этом цепь индуктора обесточена и зашунтирована со-

противлением. Затем на обмотку возбуждения подается постоянный ток.

Возбужденный генератор сам втягивается в синхронизм подобно синхронному двигателю при асинхронном пуске. Обмотка возбуждения предварительно замыкается через добавочное сопротивление для уменьшения толчка тока статора, так как поток реакции якоря, возрастая при включении генератора в сеть от нуля до некоторой величины, индуцирует ЭДС в замкнутой обмотке возбуждения. Этот процесс аналогичен процессу подключения к сети трехфазного двухобмоточного трансформатора с замкнутой вторичной цепью.

При внутренних аварийных межвитковых и междуфазных замыканиях генератор отключается от сети, причем одновременно необходимо быстро утилизировать («погасить») магнитное поле возбуждения, чтобы ограничить длительность разрушающего действия тока внутреннего короткого замыкания в обмотке статора. Однако выключение тока возбуждения каким-либо быстродействующим аппаратом недопустимо, так как при быстром уменьшении магнитного потока индуктора в его обмотке будет индуцироваться большая ЭДС, опасная для изоляции обмотки возбуждения генератора. Поэтому обмотку возбуждения сначала шунтируют сопротивлением, равным 5÷10-кратному внутреннему сопротивлению обмотки возбуждения, а уже вслед за этим отключают возбудитель.

При этом ток в обмотке будет затухать до нуля (т. е. поле возбуждения генератора «гасится») с некоторой постоянной времени.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Чем отличаются внешние характеристики синхронного генератора при различном характере нагрузки?
2. Сопоставьте регулировочные характеристики синхронного генератора при различном характере нагрузки.
3. Что называют «отношением короткого замыкания» *о.к.з.*?
4. Как влияет величина *о.к.з.* на свойства синхронного генератора?
5. Почему характеристика короткого замыкания синхронной машины имеет вид прямой линии?
6. Какие виды потерь имеют место в синхронной машине?

7. Назовите способы синхронизации синхронных генераторов при включении их в параллельную работу.

8. Назовите условия самосинхронизации синхронных машин с сетью и поясните необходимость выполнения этих условий.

11. УГЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННЫХ МАШИН

11.1. Регулирование активной мощности синхронных машин

При изучении характеристик синхронных машин, работающих параллельно с сетью бесконечной мощности, следует иметь в виду, что они принципиально отличаются от характеристик синхронной машины, работающей автономно. Особенностью работы синхронной машины параллельно с сетью бесконечной мощностью является неизменность амплитуды и частоты напряжения якоря при любых изменениях в режиме работы самой машины.

В общем случае активная мощность синхронной машины выражается через электрические величины, измеряемые на зажимах статора машины, при помощи общеизвестного соотношения

$$P = mU_{\phi} I_{\phi} \cos\varphi.$$

При исследовании синхронной машины, работающей параллельно с сетью (т. е. параллельно с другими синхронными машинами), удобнее выразить мощность исследуемой машины через величины, характеризующие воздействие на ее режим работы внешних по отношению к обмотке якоря факторов. Такими величинами являются:

- напряжение сети U ;
- индуцируемая током возбуждения в обмотке статора ЭДС E_f ;
- угол θ между векторами \dot{U} и \dot{E}_f , определяемый угловым положением ротора относительно вращающегося магнитного потока статора.

Эти величины полностью определяют режим работы обмотки статора, вследствие чего и активная мощность P должна однозначно определяться через параметры машины E_f , U и θ :

$$P = f(E_f, U, \theta). \quad (11.1)$$

При $U = \text{const}$, $f = \text{const}$ (бесконечно мощная сеть) и $E_f = \text{const}$ (постоянное возбуждение) мощность машины P зависит только от угла

θ , и зависимость $P = f(\theta)$ называется *угловой характеристикой синхронной машины*.

В современных энергетических системах активные сопротивления обмоток статора синхронных машин и линий обычно значительно меньше их индивидуальных сопротивлений, и их влияние на режимы работы генераторов и сети мало. Поэтому, в первом приближении, для упрощения задачи определим зависимость (11.1), пренебрегая сопротивлением обмоток статора.

Упрощенная векторная диаграмма напряжений явнополюсного генератора при активном сопротивлении статора $r_a = 0$ и индуктивном сопротивлении рассеяния якоря обмотки $x_{\sigma a} = 0$, изображена на рис. 11.1.

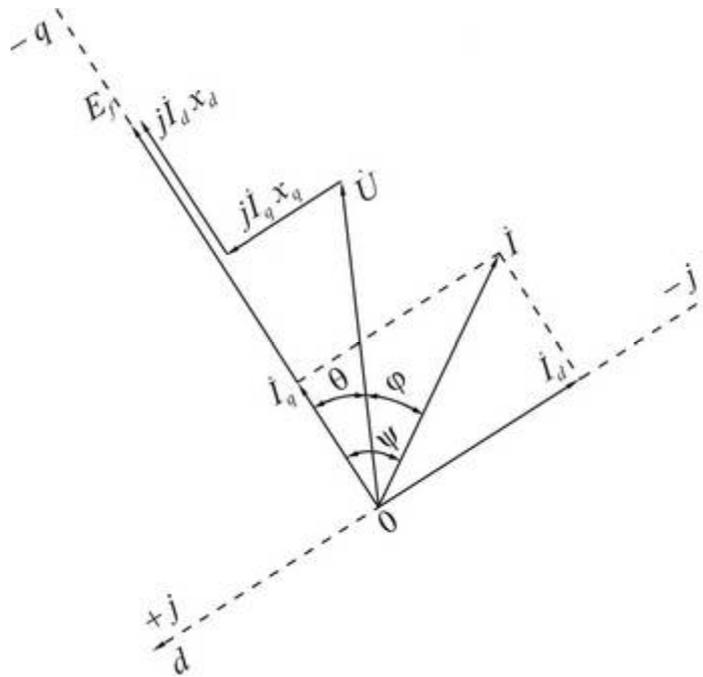


Рис. 11.1. Диаграмма напряжений явнополюсного синхронного генератора

Проектируя напряжения и ЭДС на направления осей q и d , получим:

$$\dot{E}_f = \dot{U} \cos \theta + \dot{I}_d x_d;$$

$$0 = \dot{U} \sin \theta - \dot{I}_q x_q,$$

откуда:

$$\begin{aligned} \dot{I}_d &= \frac{\dot{E}_f - \dot{U} \cos \theta}{x_d}; \\ \dot{I}_q &= \frac{U \sin \theta}{x_q}. \end{aligned} \quad (11.2)$$

Принимая плоскость диаграммы (рис. 11.1) за комплексную плоскость, можно написать:

$$\begin{aligned} \dot{U} &= \dot{U} \cos \theta - j \dot{U} \sin \theta; \\ \dot{I} &= \dot{I}_q - j \dot{I}_d. \end{aligned} \quad (11.3)$$

Комплекс мощности генератора:

$$S = m \dot{U}^* \dot{I}, \quad (11.4)$$

где \dot{U}^* – сопряженный комплекс напряжения \dot{U} . Подставляя в равенство (11.4) значения \dot{U} и \dot{I} по равенству (11.3), получаем:

$$\begin{aligned} S &= m(\dot{U} \cos \theta + j \dot{U} \sin \theta)(\dot{I}_q - j \dot{I}_d) = \\ &= m(\dot{U} \dot{I}_q \cos \theta + \dot{U} \dot{I}_d \sin \theta) - jm(\dot{U} \dot{I}_d \cos \theta - \dot{U} \dot{I}_q \sin \theta). \end{aligned} \quad (11.5)$$

Действительная часть мощности S определяет активную мощность машины:

$$P = m(U I_q \cos \theta + U I_d \sin \theta). \quad (11.6)$$

Подставляя в равенство (11.6) значения I_d и I_q из (11.2), получаем:

$$P = \frac{m E_f U}{x_d} \sin \theta + \frac{m U^2}{x_q} \sin \theta \cos \theta - \frac{m U^2}{x_d} \sin \theta \cos \theta,$$

или:

$$P = \frac{m E_f U}{x_d} \sin \theta + \frac{m U^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta. \quad (11.7)$$

Первый член выражения (11.7) определяет основную составляющую активной мощности синхронной машины, зависящую и от напряжения сети U , и от тока возбуждения:

$$P_e = \frac{m E_f U}{x_d} \sin \theta, \quad (11.8)$$

а второй член

$$P_u = \frac{m U^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta \quad (11.9)$$

определяет дополнительную составляющую активной мощности, не зависящую от тока в обмотке возбуждения машины.

Отсюда следует, что при отсутствии возбуждения ($E_f = 0$) явнополюсная машина (при $x_q \neq x_d$) может развивать дополнительную мощность P_u , так как ротор способен в этих условиях вращаться и развивать вращающий момент потому, что поток реакции якоря стремится пройти через ротор по пути с наименьшим магнитным сопротивлением, т. е. по продольной оси.

Это свойство синхронной машины использовано в синхронном реактивном двигателе, в конструкции которого отсутствует обмотка возбуждения.

В неявнополюсной машине (при $x_q = x_d$) дополнительная мощность отсутствует $P_u = 0$ и полная активная мощность равна:

$$P = \frac{mE_f U}{x_d} \sin \theta. \quad (11.9a)$$

На рис. 11.2 представлены зависимости обеих составляющих P_u и P_e и результирующей активной мощности явнополюсного генератора от угла при $E_f = \text{const}$, $U = \text{const}$. При этом принято считать, что в первом приближении параметры x_q и x_d постоянны.

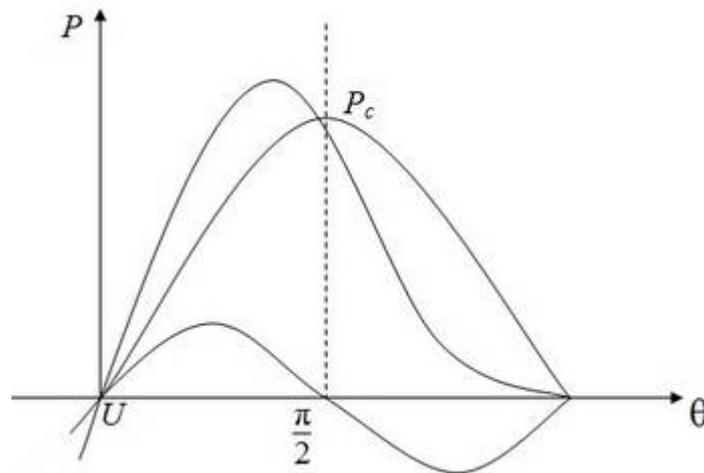


Рис. 11.2. Угловая характеристика мощности явнополюсного синхронного генератора при $r_a = 0$

Максимальная мощность неявнополюсного генератора достигается при угле $\theta = \pi/2$. Под влиянием реактивной мощности P_u максимум полной мощности явнополюсного генератора несколько сдвигается в сторону значений угла $\theta < \pi/2$ и значение максимальной мощности несколько увеличивается.

При рассмотрении отрицательных значений угла θ и значений $\theta > \pi$ кривая мощности P представляет собой периодическую кривую с положительными и отрицательными участками P . Участки с положительными значениями P ($\theta < \pi$, $2\pi < \theta < 3\pi$ и т. д.) соответствуют генераторным режимам работы, а участки с отрицательными значениями P ($-\pi < \theta < 0$, $\pi < \theta < 2\pi$ и т. д.) соответствуют двигательным режимам. При этом режимы работы с углами θ , отличающимися на угол 2π и кратными ему, равноценны. В случае вращения ротора с постоянной несинхронной скоростью, угол θ непрерывно растет, и машина переходит поочередно из генераторного режима работы в двигательный и обратно.

Мощность, передаваемую электромагнитным путем через воздушный зазор с ротора синхронного генератора на статор, называют *электромагнитной мощностью*. Часть ее тратится на потери в стали генератора, а остальная превращается в электрическую мощность обмотки статора. Если принять во внимание, как мы это сделали при выводе формулы (11.7), что активное сопротивление обмоток статора равно нулю и, следовательно, потери в ней отсутствуют, то электромагнитная мощность $P_{эм}$ равна активной мощности P , отдаваемой генератором в сеть:

$$P_{эм} = \frac{mE_f U}{x_d} \sin \theta + \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta. \quad (11.10)$$

11.2. Механическая характеристика синхронной машины

Величина электромагнитного момента, действующего на ротор, определяется электромагнитной мощностью $P_{эм}$ и угловой скоростью вращения ротора, равной синхронной скорости вращения поля ротора:

$$M_{эм} = \frac{P_{эм}}{\omega_c} = \frac{mE_f U}{\omega_c x_d} \sin \theta + \frac{mU^2}{2\omega_c} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta. \quad (11.11)$$

Как видно из выражения (11.11), электромагнитный момент явнополюсной синхронной машины также имеет две составляющие: основной момент

$$M_{эм.е} \frac{mE_f U}{\omega_c x_d} \sin \theta,$$

и добавочный, параметрический

$$M_{эм.и} = \frac{mU^2}{2\omega_c} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta. \quad (11.12)$$

Примерный вид угловой характеристики $M = f(\theta)$ показан на рис. 11.3.

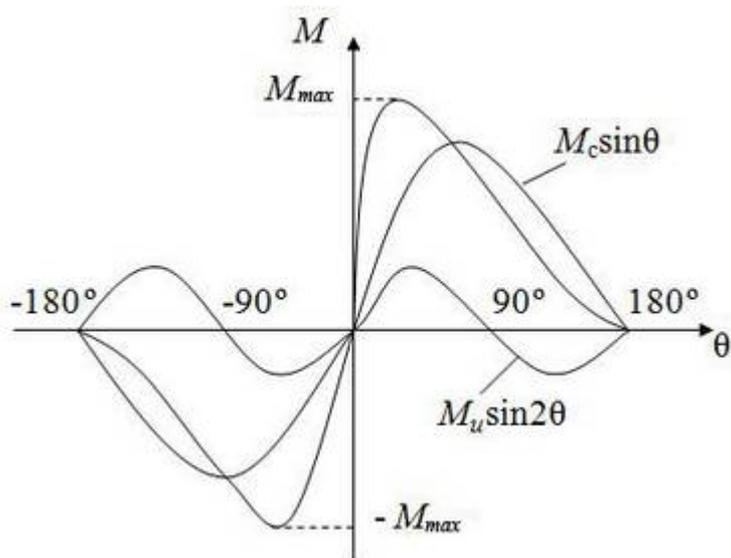


Рис. 11.3. Угловая характеристика момента $M = f(\theta)$ синхронной машины

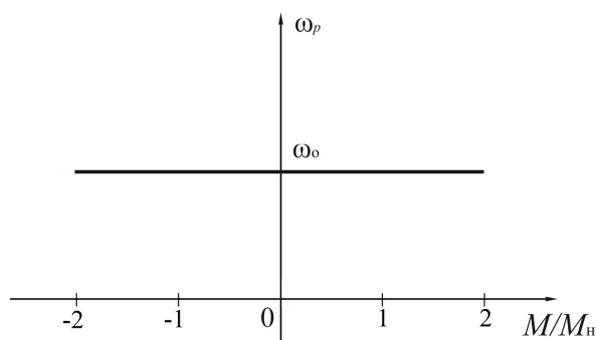


Рис. 11.4. Механическая характеристика синхронной машины

Без учета явнополюсного ротора максимум электромагнитного момента наступает при $\theta = 90^\circ$; в номинальном режиме работы, когда синхронная машина развивает номинальный электромагнитный момент, угол θ составляет $20 \div 30^\circ$. Этим обстоятельством определяется перегрузочная способность синхронной машины:

$$\lambda = \frac{M_{\max}}{M} = \frac{M_{\max} \sin 90^\circ}{M_{\max} \sin 30^\circ} = \frac{1}{\sin 30^\circ} = 2. \quad (11.13)$$

В приведенных выше формулах под напряжением U можно понимать не только напряжение на зажимах, но и напряжение в любой точке линии, при помощи которой машина связана с сетью.

11.3. Статическая устойчивость работы синхронной машины в составе энергосистемы

В реальных условиях работы синхронного генератора на какую-либо сеть его нагрузка никогда не остается строго постоянной, а подвергается непрерывным изменениям вследствие включений и отключений различных приемников, изменения их нагрузки и ряда других причин. При изменениях режима работы синхронной машины в ней имеют место различные переходные процессы.

Рассмотрим условия параллельной работы неявнополюсного генератора с неизменным возбуждением ($E_f = \text{const}$) с сетью бесконечной мощности ($U = \text{const}; f = \text{const}$). Мощность, развиваемую первичным двигателем (паровой или гидравлической турбиной) на валу, за вычетом механических потерь и потерь в стали, обозначим через $P_{\text{мех}}$. Поскольку мы пренебрегаем потерями в цепи статора, то при установившемся режиме работы электромагнитная мощность генератора $P_{\text{эм}}$ будет также равна $P_{\text{мех}}$. Мощность первичного двигателя $P_{\text{мех}}$ не зависит от угла θ и изображается поэтому на рис. 11.5 горизонтальной прямой.

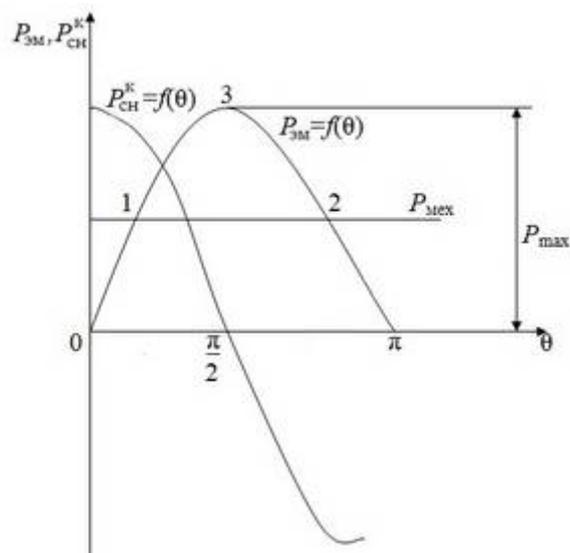


Рис. 11.5. Угловая характеристика и коэффициент синхронизирующей мощности неявнополюсного генератора при $E_f = \text{const}$, $U = \text{const}$ и $f = \text{const}$

Пересечение прямой $P_{\text{мех}}$ и кривой $P_{\text{эм}}$ (см. рис. 11.5) определяет два возможных установившихся режима работы, соответствующих точкам 1 и 2, однако только режим, соответствующий точке 1, является устойчивым. В результате неизбежных колебаний режима работы ротор генератора получит некоторое ускорение и угол θ возрастет на некоторую малую величину $\Delta\theta$, в точке 1 этому изменению угла будет соответствовать положительное приращение мощности генератора $\Delta P_{\text{эм}}$, а турбина сохранит при этом свою мощность.

Генератор будет отдавать в сеть большую мощность, чем получит от турбины, поэтому ротор будет затормаживаться, угол θ уменьшится, и генератор снова вернется к прежнему режиму работы, соответствующему точке 1. Наоборот, в точке 2 положительному приращению $\Delta\theta$ соответствует отрицательное приращение мощности $-\Delta P_{\text{эм}}$, угол θ будет возрастать еще больше, и генератор выпадет из синхронизма.

Таким образом, критерием устойчивой работы синхронной машины в указанных условиях будет соблюдение условия

$$\frac{dP_{\text{эм}}}{d\theta} > 0. \quad (11.14)$$

Если рассматривать отрицательные приращения угла θ , то не трудно заметить, что будут те же результаты.

11.4. Синхронизирующая мощность и синхронизирующий момент синхронной машины

При малом отклонении $\Delta\theta$ от установившегося режима небаланс мощности $\Delta P_{\text{эм}}$, обуславливающий возврат машины к исходному режиму, будет тем больше, чем круче подъем кривой $P_{\text{эм}}$ при изменении угла θ :

$$P_{\text{сн}}^{\text{к}} = \frac{dP_{\text{эм}}}{d\theta}. \quad (11.15)$$

Величину $P_{\text{сн}}^{\text{к}}$ называют *коэффициентом синхронизирующей мощности*, а величину, равную произведению коэффициента синхронизирующей мощности $P_{\text{сн}}^{\text{к}}$ на отклонение угла $\Delta\theta$, – *синхронизирующей мощностью*:

$$\Delta P = \frac{dP_{\text{ЭМ}}}{d\theta} \Delta\theta = P_{\text{СН}}^{\text{К}} \Delta\theta. \quad (11.16)$$

Для неявнополюсных машин согласно равенству (11.9а) коэффициент синхронизирующей мощности равен:

$$P_{\text{СН}}^{\text{К}} = \frac{mE_f U}{x_d} \cos\theta, \quad (11.17)$$

а для явнополюсной машины согласно соотношению (11.10):

$$P_{\text{СН}}^{\text{К}} = \frac{mE_f U}{x_d} \cos\theta + mU^2 \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cos 2\theta. \quad (11.18)$$

Зависимость коэффициента синхронизирующей мощности от угла θ $P_{\text{СН}}^{\text{К}} = f(\theta)$ для неявнополюсного генератора представлена на рис. 11.5.

Синхронизирующей мощности ΔP , равной небалансу мощностей генератора и турбины, соответствует действующий на ротор генератора синхронизирующий момент

$$\Delta M = \frac{\Delta P}{\omega} = \frac{P_{\text{СН}}^{\text{К}}}{\omega} \Delta\theta,$$

обусловленный разностью электромагнитного момента генератора и механического момента, создаваемого турбиной.

Величину

$$M_{\text{СН}}^{\text{К}} = \frac{P_{\text{СН}}^{\text{К}}}{\omega} \quad (11.19)$$

будем называть *коэффициентом синхронизирующего момента*.

Для неявнополюсной машины:

$$M_{\text{СН}}^{\text{К}} = \frac{mE_f U}{\omega x_d} \cos\theta, \quad (11.20)$$

для явнополюсной:

$$M_{\text{СН}}^{\text{К}} = \frac{mE_f U}{\omega x_d} \cos\theta + \frac{mU^2}{\omega} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cos 2\theta. \quad (11.21)$$

Коэффициент синхронизирующей мощности $P_{\text{СН}}^{\text{К}}$ и коэффициент синхронизирующего момента $M_{\text{СН}}^{\text{К}}$ положительны для устойчивых областей работы машины на угловой характеристике

$(0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2})$ (рис. 11.5) и отрицательны на неустойчивом участке характеристики $(\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \pi)$.

Величина коэффициентов $P_{\text{сн}}^{\text{к}}$ и $M_{\text{сн}}^{\text{к}}$ характеризует степень статической устойчивости машины: чем больше $P_{\text{сн}}^{\text{к}}$ и $M_{\text{сн}}^{\text{к}}$, тем больше силы, стремящиеся вернуть ротор синхронной машины в исходный установившийся режим работы. На пределе статической устойчивости эти коэффициенты равны нулю:

$$P_{\text{сн}}^{\text{к}} = M_{\text{сн}}^{\text{к}} = 0.$$

11.5. Регулирование реактивной мощности синхронной машины

Реактивная мощность синхронной машины, работающей параллельно с сетью при $U_a = \text{const}$, $f = \text{const}$ и $P = \text{const}$, регулируется изменением тока в обмотке возбуждения.

Рассмотрим параллельную работу синхронной машины с сетью бесконечной мощности при $P = 0$, полагая в целях упрощения, что это неявнополюсный генератор с сопротивлением обмотки якоря $r_a = 0$. В этом случае ток якоря, согласно (11.6), определяется зависимостью

$$i_a = \frac{\dot{E}_f - \dot{U}_a}{jx_c} = \frac{\Delta U}{jx_c}. \quad (11.22)$$

После включения генератора в сеть и точной синхронизации напряжение якоря уравнивается напряжением сети $\dot{U}_a = \dot{U}_c = \dot{E}_f$ и ток в цепи якоря согласно (11.22) равен нулю (см. рис. 11.6, а).

Если теперь увеличить ток возбуждения (т. е. перевозбудить машину), то ЭДС E_f возрастет, а $\Delta \dot{U} \neq 0$. Под действием разности напряжений $\Delta \dot{U}$ в цепи якоря возникнет размагничивающий ток продольной реакции якоря $\dot{I}_a = -j \frac{\Delta U}{x_c}$ (рис. 11.6, б), который будет

отставать от $\Delta \dot{U}$ на угол 90° и опережать напряжение \dot{U}_a на тот же угол. При этом токе электромагнитная мощность $P_{\text{эм}} = 0$ (угол $\theta = 0$) и генератор вырабатывает только реактивную мощность, которую и отдает в сеть. С ростом тока возбуждения будут увеличиваться ЭДС

E_f , разность напряжений $\Delta\dot{U}$ и ток продольной реакции якоря \dot{I}_a , являющийся по отношению к напряжению сети U_c опережающим (емкостным).

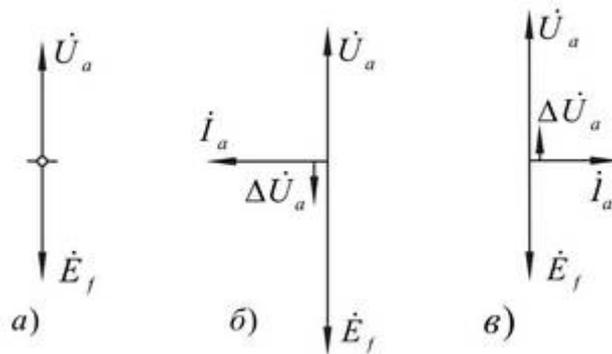


Рис. 11.6. Упрощенные векторные диаграммы неявнополюсного генератора, работающего параллельно с сетью при $P_{эм} = 0$:
 а – при $I_a = 0$; б – при перевозбужденной машине и опережающем реактивном токе якоря I_a ; в – при недовозбужденной машине и отстающем реактивном токе якоря I_a

Другими словами, при избыточной индукции магнитного поля, создаваемого обмоткой постоянного тока (индуктором), машина будет генерировать в сеть переменного тока, подключенную к якорной обмотке статора, реактивную электрическую энергию. При этом механическая энергия, поступающая в машину со стороны вала, а также активная электрическая энергия сети и источника постоянного тока в цепи обмотки возбуждения будут расходоваться только на потери в машине: механические, магнитные, электрические и добавочные.

Если после точной синхронизации, т. е. при $\Delta\dot{U} = 0$ (см. рис. 11.6, а), уменьшать ток возбуждения (недовозбуждать индуктор машины), то ЭДС E_f уменьшится и вектор $\Delta\dot{U}$ изменит свое направление (рис. 11.6, в). Следовательно, ток якоря \dot{I}_a , отставая от $\Delta\dot{U}$ на угол 90° , будет отставать от напряжения сети U_c на угол 90° . При этом реактивная мощность изменит свое направление и будет потребляться якорной обмоткой генератора из сети для увеличения ослабленного магнитного поля индуктора. При дальнейшем уменьшении тока возбуждения разность напряжения будет увеличиваться, а индуктивный ток якоря – возрастать.

Таким образом, изменение тока возбуждения синхронной машины при отсутствии активной нагрузки вызывает лишь изменение реактивной составляющей тока якоря.

В общем случае изменение реактивной составляющей тока якоря при изменении тока возбуждения i_f индуктора происходит не только при холостом ходе, но и при активной нагрузке генератора. Зависимость тока якоря I_a от тока возбуждения i_f при неизменной активной нагрузке генератора выражается графически в виде U-образной характеристики (рис. 11.7).

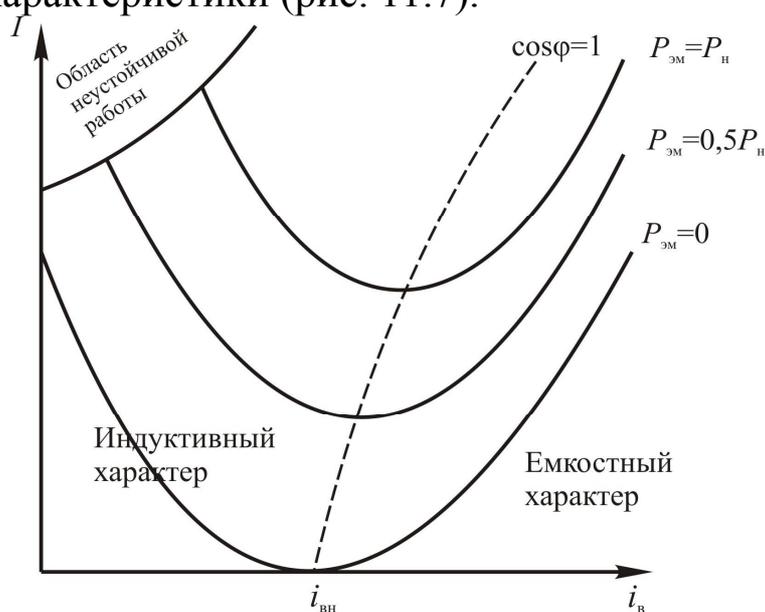


Рис. 11.7. U-образные характеристики синхронной машины

U-образные характеристики явнополюсных и неявнополюсных генераторов имеют аналогичный вид.

Линия, соединяющая точки экстремумов характеристик, в которых $\cos\varphi = 1$, разделяет пространство U-образных характеристик на две области. Слева от пунктирной линии находится область недовозбуждения машины, при работе в которой машина потребляет из сети реактивную энергию, справа — область перевозбуждения, при работе в которой машина отдает реактивную энергию в сеть.

Если соединить все точки минимально допустимых значений тока возбуждения i_f на U-образных характеристиках (линия в левой части рис. 11.7), то получим линию предела устойчивой работы синхронной машины при недовозбуждении. С точки зрения минимизации электрических потерь в синхронной машине наиболее выгодным является возбуждение, соответствующее минимальному току якоря, т. е. когда $\cos\varphi = 1$. Но в большинстве случаев нагрузка

генератора имеет индуктивный характер, и для компенсации индуктивных токов (отстающих от напряжения сети) приходится несколько перевозбудить синхронную машину, создавая условия, при которых ток якоря I_a опережает по фазе напряжение сети.

Синхронные двигатели обычно проектируются для работы при номинальной мощности с перевозбуждением (опережающим током) и $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,9$. Работа с перевозбуждением предпочтительна также и для повышения перегрузочной способности синхронного двигателя. Уменьшение тока возбуждения приводит к уменьшению максимального момента синхронного двигателя (11.11).

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Изобразите угловую характеристику электромагнитной мощности явнополюсного синхронного генератора.
2. Изобразите угловую характеристику электромагнитной мощности неявнополюсного синхронного генератора.
3. Изобразите угловую характеристику момента синхронной машины.
4. Изобразите механическую характеристику синхронной машины.
5. Как определяется перегрузочная способность и критический момент синхронного двигателя?
6. Дайте определение синхронизирующей мощности синхронной машины.
7. Покажите на угловой характеристике область устойчивой работы генератора и поясните условия его устойчивой работы.
8. Изобразите U-образную характеристику синхронной машины.
9. Какой характер имеет реакция якоря в синхронном двигателе при перевозбуждении машины?

12. СИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

12.1. Энергетические режимы работы синхронной машины

Синхронные машины, как и другие электромеханические преобразователи, обратимы, т. е. они могут при параллельной работе

с сетью переходить из генераторного режима работы в двигательный и обратно. Кроме того, синхронная машина может работать в режиме синхронного компенсатора, производя (или потребляя) реактивную энергию сети. Электротехническая промышленность выпускает специализированные синхронные машины, предназначенные для работы только в качестве генератора, двигателя или компенсатора.

Синхронные двигатели чаще работают в пусковых режимах и должны развивать больший пусковой момент, чем генераторы. В якорных обмотках синхронных компенсаторов протекают малые активные токи и создаются малые электродинамические силы, и, следовательно, конструкция их может быть облегченная. Это накладывает определенные условия на конструкцию машин: демпферные (пусковые) обмотки синхронных двигателей рассчитывают на большие токи и более длительный режим работы. Системы возбуждения синхронных машин, предназначенных для работы в различных энергетических режимах, принципиально не отличаются друг от друга.

Математическое описание синхронного двигателя отличается от уравнений синхронного генератора (8.2)–(8.4) лишь тем, что в них изменяется знак механического момента. Чтобы из генераторного режима перейти в двигательный, надо изменить знак момента M_c , приложенного к валу синхронной машины (рис. 11.4). Тогда изменится знак угла θ и направление потока активной мощности, и машина начнет потреблять активную мощность из сети. Направление потока реактивной мощности определяется степенью перевозбуждения синхронного двигателя, т. к. U -образные характеристики синхронных двигателей имеют тот же вид, что и у генераторов (рис. 11.7). Синхронные машины имеют предельно жесткие механические характеристики (рис. 11.4), не имеющие пересечения с осью момента, и, следовательно, у них отсутствует пусковой момент.

У синхронных машин, в отличие от асинхронных, отсутствует режим динамического торможения и противовключения, а также трансформаторный режим работы.

Преимущества синхронных двигателей по сравнению с асинхронными машинами состоят в следующем:

1) благодаря возбуждению постоянным током синхронные двигатели могут работать с $\cos\varphi = 1$ и не потреблять при этом реактивной мощности от сети, а при работе с перевозбуждением даже отдавать реактивную мощность в сеть. В результате улучшается коэффициент мощности сети, в которую включены синхронные двигатели, и уменьшаются падение напряжения и потери в ней;

2) максимальный момент синхронного двигателя пропорционален напряжению сети U , а у асинхронного двигателя пропорционален U^2 . Поэтому при понижении питающего напряжения синхронный двигатель сохраняет большую нагрузочную способность, чем асинхронный. Кроме того, за счет регулирования тока возбуждения синхронных двигателей можно увеличивать надежность их работы при аварийных понижениях напряжения в сети и улучшать в этих случаях условия работы энергосистемы в целом;

3) вследствие большего воздушного зазора добавочные потери в стали и в клетке ротора синхронных двигателей меньше, чем у асинхронных, благодаря чему и КПД синхронных двигателей обычно выше.

С другой стороны, конструкция синхронных двигателей сложнее, чем асинхронных с короткозамкнутым ротором, синхронные двигатели должны иметь возбудитель или иной источник постоянного тока для питания обмотки возбуждения. Вследствие этого синхронные двигатели дороже асинхронных машин с короткозамкнутым ротором. Кроме того, пуск и регулирование скорости вращения синхронных двигателей значительно сложнее, чем асинхронных.

Тем не менее, преимущество синхронных двигателей при мощности $P > 200\div 300$ кВт настолько велико, что их следует применять всюду, где не требуется частых пусков и остановок (режим работы $S1$), нет регулирования скорости вращения (насосы, вентиляторы, мельницы, дизель-генераторы, дробилки и т. д.).

12.2. Способы пуска синхронных двигателей

Существуют три способа пуска синхронных двигателей:

- пуск с помощью вспомогательного двигателя;
- частотный пуск;
- асинхронный пуск.

1. Асинхронный пуск.

Это основной метод пуска синхронных двигателей в настоящее время. Благодаря наличию на роторе короткозамкнутых контуров (демпферная или пусковая обмотка – у явнополюсных машин и массивные наконечники – у неявнополюсных) при включении в сеть обмотки якоря ротор, под воздействием вращающегося магнитного поля, разгоняется до частоты вращения близкой к синхронной, аналогично как асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Если в начальный момент пуска подать на обмотку возбуждения индуктора постоянный ток, то наличие полюсов неизменной полярности вызовет сильные периодические качания момента и скорости ротора относительно его средней скорости.

Поэтому обмотка возбуждения синхронного двигателя при асинхронном пуске во время разгона ротора до подсинхронной скорости должна быть замкнута накоротко или на активное балластное сопротивление, составляющее $R_{\text{бал}} = (5 \div 10) R_{\text{обм}}$.

Если бы обмотка возбуждения при пуске двигателя была разомкнута, то на ее зажимах из-за большого числа витков обмотки возбуждения при пуске наводилось бы большое напряжение, что могло бы привести к пробое изоляции.

При асинхронном пуске обмотка статора синхронного двигателя включается в сеть трехфазного переменного тока. В двигателе возникает вращающий момент (см. п. 1.4), разгоняющий ротор до скорости близкой к синхронной. Ротор синхронного двигателя вращается подобно ротору асинхронного двигателя с некоторым скольжением или отставанием скорости ротора по отношению к скорости вращающегося магнитного поля статора. Если теперь включить постоянный ток в обмотку возбуждения, то наличие полюсов неизменной полярности вызовет сильные периодические качания скорости ротора относительно средней скорости, в результате чего возможно не только достижение в некоторые моменты синхронной скорости, но и кратковременные превышения ее.

Если ротор синхронного двигателя достигнет такой скорости, то после нескольких затухающих качаний около синхронной скорости он втягивается в синхронизм. Чем менее нагружен двигатель, тем меньше его скольжение относительно синхронной скорости и тем легче при подобных качаниях он достигает синхронизма. Явнополюсные двигатели на холостом ходу и при небольшой нагрузке

нередко втягиваются в синхронизм даже без подачи возбуждения за счет реактивного момента. Наоборот, при нагрузке ротора тормозным моментом скольжение, которого достигает ротор, возрастает и двигатель труднее входит в синхронизм. Поэтому существует предельный тормозной момент (и соответствующее ему скольжение), при котором двигатель способен войти в синхронизм.

Рассмотрим процесс втягивания двигателя в синхронизм более подробно (рис. 12.1).

При подаче постоянного тока на обмотку возбуждения в момент времени, когда ротор достигает подсинхронной скорости, уравнение движения ротора имеет вид:

$$J \frac{d\omega_p}{dt} = M_{\text{эм}} + M_a - M_c \quad \text{или} \quad J \frac{d^2\theta}{dt^2} = M_m \sin\theta + K_a \frac{d\theta}{dt} - M_c.$$

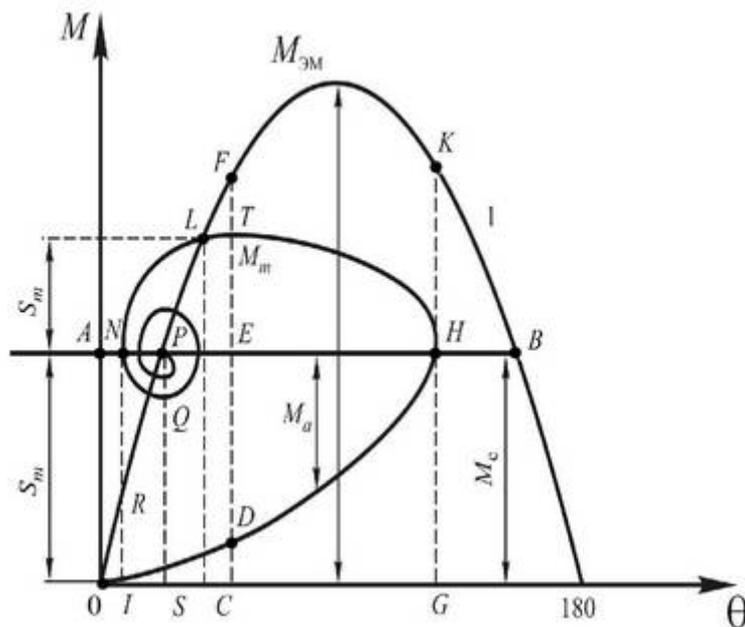


Рис. 12.1. Процесс вхождения синхронного двигателя в синхронизм при наличии на валу механической нагрузки

Здесь обозначено: J – момент инерции ротора; $\frac{d\omega_p}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2}$ – угловое ускорение ротора; $M_{\text{эм}} = M_m \sin\theta$ – синхронный электромагнитный момент от взаимодействия магнитного потока тока возбуждения с магнитным потоком, созданным током статора; $M_c = \text{const}$ – тормозящий статический момент, на рис. 12.1 изображен прямой AB ; M_a – асинхронный момент, созданный пусковой

(демпферной) обмоткой и зависящий от скольжения s . Когда $s = 0$, то угол $\theta = \text{const}$, и наоборот, чем больше s , тем быстрее изменяется угол θ , т. е. скольжение s пропорционально $\frac{d\theta}{dt}$, и поскольку при малых скольжениях s момент M_a изменяется практически пропорционально s , то выражение для этого момента можно записать в виде:

$$M_a = K_a \frac{d\theta}{dt}.$$

Предположим, что до подачи постоянного тока в обмотку возбуждения двигатель имеет некоторое постоянное скольжение s , развивая асинхронный момент M_a , уравновешивающий статический момент сопротивления на валу M_c . Включение постоянного тока может произойти в момент времени $t = 0$, соответствующий любому мгновенному положению ротора относительно оси результирующего потока. Для упрощения рассуждений рассмотрим наиболее благоприятный момент времени включения, соответствующий совпадению указанных осей, т. е. $\theta = 0$. В этих условиях при $t = 0$ электромагнитный момент $M_{эм} = M_m \sin\theta = 0$ и ротор двигателя в начальное мгновение не получает дополнительного ускорения. Но так как двигатель вращается не синхронно, а скольжение $s \neq 0$, в последующие моменты времени ротор, предположим, начнет отставать от результирующего потока и угол θ соответственно возрастет, что приводит к появлению момента $M_{эм} > 0$. Например, когда угол $\theta = OC$, то момент $M_{эм} = CF$. Появившийся положительный динамический момент $J \frac{d\omega_p}{dt}$ придаст ротору двигателя ускорение, скорость ротора возрастет и скольжение будет уменьшаться еще больше. Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока двигатель не достигнет синхронной скорости в точке H при $\theta = OG$, в которой электромагнитный момент $M_{эм} = GK$, асинхронный момент $M_a = 0$ и динамический момент $J \frac{d\omega_p}{dt} = HK$. Поскольку динамический момент в этой точке остается положительным, он продолжит действовать на ротор ускоряющим образом, поэтому скорость ротора возрастет и превысит синхронную. Вследствие этого угол θ начнет теперь уже уменьшаться, а скольжение s и соответственно асинхронный момент M_a изменят знак, и момент M_a начнет оказывать тормозящее действие на ротор.

При возвращении ротора в положение, когда угол θ снова станет равным OS , электромагнитный момент $M_{эм} = CF$, асинхронный момент $M_a = ET$, а динамический момент еще будет действовать ускоряющим образом, пока в точке L на кривой электромагнитного момента при угле $\theta = OS$ не наступит новое равновесие моментов и динамический момент не станет равным $J \frac{d\omega_p}{dt} = 0$. Однако в этой точке, поскольку ротор имеет некоторое отрицательное скольжение, угол θ будет продолжать уменьшаться, пока в точке N ротор не достигнет снова синхронной скорости.

Повторяя подобные рассуждения далее, можно получить спиральную кривую $ODHTLNQ$ (рис. 12.1), заканчивающуюся в точке P , в которой устанавливается равновесие между электромагнитным моментом синхронной машины и статическим моментом сопротивления вращению ротора, но уже при синхронной скорости ротора и при асинхронном моменте, равном $M_a = 0$.

$$M_c = M_m \sin \theta.$$

Втягивание синхронного двигателя в синхронизм всегда обеспечено, если при асинхронном пуске скольжение в установившемся асинхронном режиме, предшествующем включению обмотки возбуждения, не превышает значения:

$$s_{уст} = 0,04 \sqrt{\frac{\lambda_m P_H i_{fc}}{GD^2 n_H^2 i_{fH}}},$$

где λ_m – перегрузочная способность синхронного двигателя при номинальном токе возбуждения i_{fH} ; P_H – номинальная мощность, кВт; i_{fc} – ток возбуждения при синхронизации, А; GD^2 – приведенный маховый момент двигателя и механизма, кг·м²; n_H – номинальная скорость вращения двигателя, об/мин; i_{fH} – номинальный ток возбуждения, А.

Время самосинхронизации синхронной машины (и двигателей, и генераторов) обычно ограничивают 10...15 секундами, а ток якоря в этот момент достигает $(2...3)I_{ан}$.

Обычно производится прямой асинхронный пуск синхронных двигателей путем включения на полное напряжение сети. При тяжелых условиях пуска способы ограничения тока при асинхронном пуске синхронного двигателя аналогичны способам ограничения тока при пуске асинхронных двигателей:

- введение реакторов в цепь статора;
- включение в цепь статора автотрансформаторов.

2. Пуск в ход синхронных машин с помощью вспомогательного двигателя.

Суть способа: на одном валу с синхронным двигателем устанавливается асинхронный двигатель с тем же числом пар полюсов, что и синхронный двигатель. Пусковой асинхронный двигатель разгоняет синхронный двигатель до подсинхронной скорости, т. е. скорости близкой к синхронной, при которой возможно произвести синхронизацию машины с сетью методом самосинхронизации, который рассмотрен выше.

Иногда вспомогательный асинхронный двигатель имел на одну пару полюсов меньше, чем синхронный. Тогда ротор синхронной машины мог разогнаться выше синхронной скорости. При отключении вспомогательного двигателя от сети агрегат начинал замедляться, проходя плавно через синхронную скорость, что позволяло произвести в нужный момент включение синхронной машины в сеть. Другими словами, при данном способе пуска вспомогательный двигатель выполняет роль пусковой обмотки ротора обычного синхронного двигателя.

Недостаток этого способа – невозможность пуска двигателя под нагрузкой, так как в этом случае мощность пускового асинхронного двигателя сравнима с мощностью основного синхронного, что не рационально.

Данный способ сохранил применение для пуска мощных синхронных компенсаторов, обладающих малым моментом сопротивления на валу. В этом случае требуется асинхронный двигатель значительно меньшей мощности, чем запускаемый синхронный компенсатор.

3. Частотный пуск синхронного двигателя.

В этом случае частоту подводимого к якорной обмотке напряжения необходимо плавно менять от нуля до номинального значения с помощью управляемого преобразователя частоты. При частотном пуске синхронный двигатель входит в синхронизм при малых частотах тока в якоре, а затем ротор постепенно разгоняется до синхронной скорости, следуя за плавно изменяющейся частотой преобразователя с отставанием скорости вращения ротора на $1\div 3\%$ от скорости вращения поля статора. При скорости вращения ротора,

близкой к синхронной (около 95 %), обмотка якоря отключается от преобразователя частоты и подключается к сети. Далее синхронный двигатель с раскрученным ротором втягивается в синхронизм рассмотренным выше способом, уже при питании обмотки якоря от сети.

Большое значение для исследования процессов преобразования энергии в синхронных двигателях имеют рабочие характеристики (рис. 12.2).

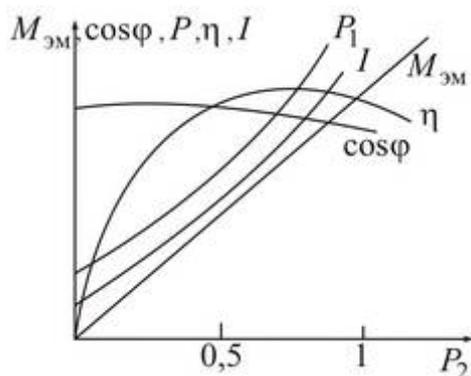


Рис. 12.2. Рабочие характеристики синхронного двигателя

Особой разновидностью синхронных двигателей являются *синхронизированные двигатели*, напоминающие по своему устройству асинхронные двигатели с фазным ротором. От последних они отличаются тем, что имеют большой воздушный зазор и увеличенное сечение проводников трехфазной обмотки ротора.

При пуске обмотка ротора синхронизированного двигателя замыкается на пусковой реостат как обмотка фазного ротора асинхронного двигателя. Затем, при разгоне ротора до подсинхронной скорости, фазная обмотка ротора подключается к источнику постоянного тока как индуктор синхронного двигателя, и ротор, втягиваясь в синхронизм с высоким пусковым моментом, достигает синхронной скорости.

Таким образом, *синхронизированный* двигатель обладает пусковыми характеристиками асинхронного двигателя с фазным ротором и рабочими свойствами синхронного двигателя. Область их применения — установки с постоянной частотой вращения и тяжелыми условиями пуска, требующие высокого коэффициента мощности (большие компрессоры и насосы).

12.3. Синхронные компенсаторы

Синхронный двигатель облегченной конструкции, работающий без нагрузки и потребляющий по отношению к напряжению сети реактивный опережающий или отстающий ток, носит название *синхронного компенсатора*.

Синхронные компенсаторы предназначены для улучшения $\cos\varphi$ и для регулирования напряжения линий передачи и сетей. Нормальным является перевозбужденный режим работы синхронного компенсатора, когда он отдает в сеть реактивную мощность.

В связи с этим компенсаторы, как и служащие для этих целей батареи конденсаторов, устанавливаемые на подстанциях, называют также *генераторами реактивной мощности*. В часы максимальных нагрузок синхронные компенсаторы работают как источники реактивной мощности, а в часы минимума нагрузок – как её потребители. Кроме того, синхронные компенсаторы включаются в конце линии электропередачи непосредственно у потребителя, так как, компенсируя частично реактивную составляющую тока, они уменьшают общий ток в линии и соответственно потери в ней. Для этого каждый синхронный компенсатор снабжается автоматическим регулятором возбуждения, стремящимся поддерживать напряжение на зажимах компенсатора и сети постоянным.

Наиболее важная характеристика синхронного компенсатора – U-образная характеристика $I_a = f(I_f)$ при $U_a = \text{const}$. Эта характеристика ничем не отличается от соответствующей характеристики синхронной машины при активной мощности равной нулю (рис. 11.7).

Компенсаторы строятся на мощность от 2,8 до 100 МВ·Ар и имеют явнополюсную конструкцию, обычно с $2p = 6$ или 8. При работе компенсатор потребляет из сети активную мощность в размере 2–4 % от номинальной мощности машины.

Основной способ пуска – асинхронный прямой пуск. В случае необходимости применяют реакторный пуск. Иногда мощные компенсаторы снабжаются пусковым асинхронным двигателем, укрепленным на одном валу. Для синхронизации с сетью обычно используется метод самосинхронизации.

Так как синхронные компенсаторы не развивают активной мощности, то вопрос статической устойчивости работы для них те-

ряет остроту. Поэтому они изготавливаются с меньшим воздушным зазором, чем генераторы и двигатели, и соответственно этому величины x_d и x_q у них больше. Уменьшение зазора позволяет облегчить обмотку возбуждения и удешевить машину.

Номинальная полная мощность синхронного компенсатора при работе с перевозбуждением:

$$S_{CH} = mU_H I_H.$$

Наибольшее значение реактивной мощности в недовозбужденном режиме, когда ток возбуждения равен 0:

$$S_{LB} = \frac{mU_H^2}{x_d}.$$

В случаях, когда требуется большой индуктивный ток, синхронный компенсатор может устойчиво работать с небольшим отрицательным возбуждением. Для разработанных в РФ серий синхронных компенсаторов мощность машины в перевозбужденном режиме S_{CB} соотносится с мощностью в недовозбужденном режиме S_{LB} как $\frac{S_{LB}}{S_{CB}} = 0,5 - 0,66$.

В ряде случаев в маловодные периоды для работы в режиме компенсаторов используют также синхронные генераторы гидроэлектростанций.

В настоящее время от применения синхронного компенсатора для регулирования напряжения в сетях начинают отказываться, так как при повышении напряжения сети компенсатор приходится недовозбуждать, вследствие чего ухудшается коэффициент мощности сети, поэтому для этой цели применяют трансформаторы с регулировкой напряжения под нагрузкой.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Назовите энергетические режимы работы синхронной машины.
2. Назовите способы пуска синхронных двигателей и дайте их краткую характеристику.
3. Поясните порядок переключения обмотки возбуждения при асинхронном пуске синхронного двигателя.
4. Каково назначение синхронных компенсаторов?

5. В чем заключается конструктивное отличие синхронного компенсатора от синхронного двигателя.

13. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИНХРОННЫХ МАШИНАХ

Переходные процессы в синхронных машинах возникают при включении машины в работу, изменении нагрузки, синхронизации и отключении машины, а также при аварийных режимах: одно-, двух- и трехфазных коротких замыканиях, обрывах фаз и других видах несимметрии фазной нагрузки. Переходные процессы в синхронной машине связаны не только с электромагнитными, но и электромеханическими процессами, сопровождающимися колебаниями частоты вращения ротора. Изучение и анализ переходных процессов позволяет оценить принятые конструктивные решения при проектировании и выработать рациональные режимы эксплуатации синхронных машин.

В настоящее время теория переходных процессов в синхронных машинах разработана достаточно хорошо. Решение численными методами системы уравнений математической модели синхронной машины в системе координат d, q на ЭВМ дает ответы практически на все вопросы, возникающие при анализе переходных процессов в синхронной машине. Имеются стандартные программы, позволяющие исследовать динамику синхронной машины с учетом нескольких полей в воздушном зазоре, нелинейности магнитной системы и нескольких контуров намагничивания. Исследование переходных процессов синхронных машин – вопрос сложный и рассматривается в спецкурсах.

13.1. Схемы замещения для индуктивных сопротивлений синхронной машины при внезапном коротком замыкании

Часто, при исследовании процессов в электрических сетях, к которым подключены синхронные машины, переходные процессы в синхронных машинах рассматриваются качественно, без привлечения дифференциальных уравнений. В этом случае используются схемы замещения синхронных машин. В теории синхронных машин при определении динамических параметров их схем замещения принято считать равными нулю активные сопротивления каждой из

замкнутых обмоток, другими словами, считать эти обмотки *сверхпроводниками*. При таких допущениях численные значения получаемых эквивалентных динамических параметров будут точно соответствовать лишь началу любого переходного процесса, когда все реальные электрические контуры проявляют себя как сверхпроводящие в силу принципа магнитной инерции. Это означает, что полученные значения эквивалентных динамических параметров могут быть использованы при анализе переходных процессов в синхронных машинах, но при этом следует учитывать, что результаты анализа будут соответствовать только начальному интервалу времени, и тем точнее, чем меньше этот интервал.

Отмеченная специфика эквивалентных динамических параметров схем замещения нашла свое отражение и в их названиях. Так, динамические индуктивности (или индуктивные сопротивления) называют *переходными*, если на роторе имеется только одна обмотка возбуждения. Такие параметры обозначаются штрихом в качестве надстрочного индекса над соответствующим символом. Схемы замещения для продольного x'_d и поперечного x'_q переходных индуктивных сопротивлений обмотки якоря представлены на рис. 13.1. Здесь сопротивление $x_{\sigma f}$ представляет собой индуктивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения, приведенное к обмотке якоря.

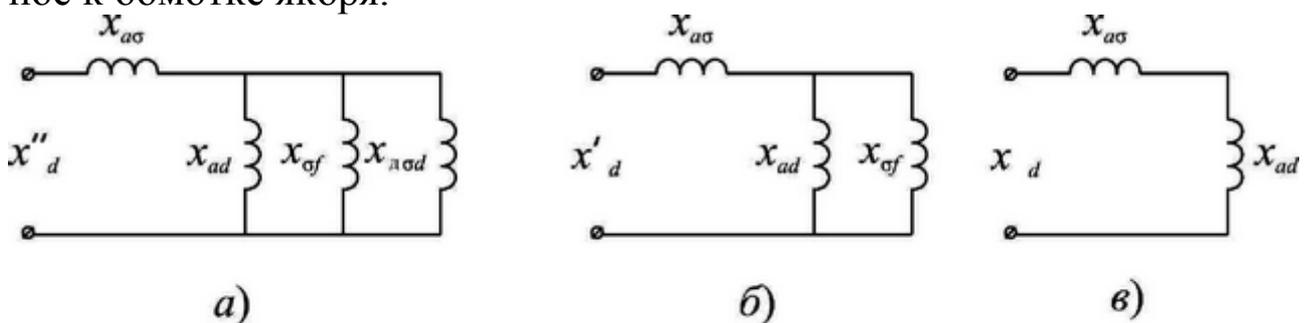


Рис. 13.1. Схемы замещения, характеризующие состояние машины в переходном процессе по продольной оси d

Эквивалентные динамические индуктивности (или индуктивные сопротивления) для синхронных машин с успокоительными (демпферными) обмотками на роторе называются *сверхпереходными*. Они обозначаются соответствующими символами, но только с двумя надстрочными штрихами. При их определении предполагается, что реальная успокоительная (демпферная) обмотка может быть

представлена двумя эквивалентными контурами $w_{дd}$ и $w_{дq}$, расположенными симметрично относительно продольной и поперечной осей ротора соответственно. В таких условиях магнитосвязанными контурами в продольной оси оказываются контуры w_{ad} , w_f и $w_{дd}$, а в поперечной w_{aq} и $w_{дq}$, как показано на рис. 13.2.

Такие связи эквивалентны трех- и двухобмоточным трансформаторам соответственно. Следовательно, сверхпереходные индуктивные сопротивления обмотки якоря – продольное x_d'' и поперечное x_q'' – могут быть представлены схемами замещения, аналогичными, соответственно, трехобмоточному и двухобмоточному трансформаторам. Такие схемы показаны на рис. 13.1 и рис. 13.3, где сопротивления $x_{дσd}$ и $x_{дσq}$ представляют собой индуктивные сопротивления рассеяния соответствующих демпферных контуров, приведенные к обмотке якоря по осям d и q .

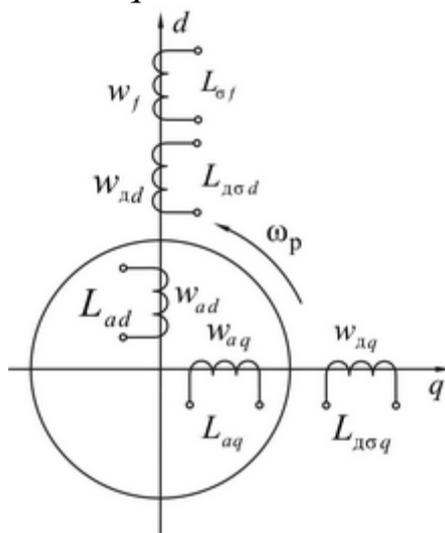


Рис. 13.2. Магнитные связи обмоток статора и ротора обращенной синхронной машины с демпферными обмотками

Сопротивления $x_{σf}$ и $x_{дσd}$ значительно меньше x_{ad} , поэтому $x_d'' < x_d' < x_d$. В относительных единицах $x_d'' = 0,1 \dots 0,3$; $x_d' = 0,25 \dots 0,4$.

По поперечной оси машины при активном токе в обмотке якоря процессы изменения тока в обмотках протекают подобно тому, как они протекают по продольной оси. Поэтому для сверхпереходного и переходного сопротивлений по поперечной оси также могут быть предложены эквивалентные схемы замещения (рис. 13.3).

В начальный момент переходного процесса машина с демпферной обмоткой характеризуется сверхпереходным индуктивным сопротивлением x''_q . Переходное индуктивное сопротивление по поперечной оси машины x'_q характеризует машину в переходном процессе без демпферной обмотки (рис. 13.3, б). Сопротивление $x_{дсq}$ характеризует демпфирующее влияние демпферной обмотки по оси q . Хотя $x_d > x_q$, обычно $x''_d \leq x''_q$. Это объясняется тем, что по поперечной оси меньше демпфирующих контуров.

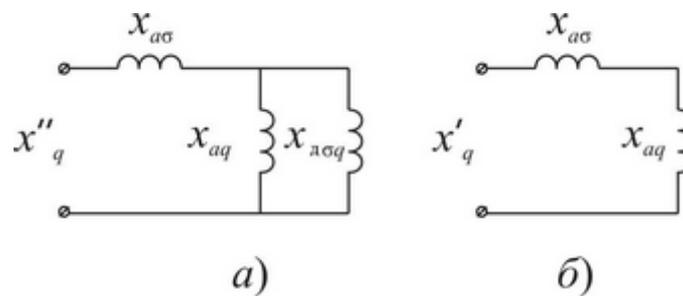


Рис. 13.3. Схемы замещения, характеризующие состояние синхронной машины в переходном процессе по поперечной оси q

Отметим, что на представленных схемах замещения обмотка якоря выступает в качестве первичной обмотки трансформатора. Если же необходимо определить переходные (x'_f) или сверхпереходные (x''_f ; $x''_{дd}$; и $x''_{дq}$) индуктивные сопротивления других магнитных контуров, то и для них можно построить аналогичные схемы замещения, а все остальные, магнитосвязанные с ним, считать короткозамкнутыми.

При коротком замыкании в токах обмотки якоря возникают периодические I и аperiodические 2 составляющие (рис. 13.4).

Периодические составляющие (i_n) создают вращающееся поле, неподвижное относительно ротора. Аperiodические составляющие тока ($I_{ан}$) создают неподвижное магнитное поле относительно обмоток статора, которое в обмотках ротора наводит переменные токи частоты сети.

Наиболее опасно для синхронной машины ударное значение тока короткого замыкания $I_{уд}$, которое для машины с демпферной обмоткой согласно ГОСТ 183-66 может быть принято равным:

$$I_{уд} = 1,8 \frac{\sqrt{2} \cdot 1,05 U_{НОМ}}{x_d''}, \quad (13.1)$$

а для машин без демпферной обмотки

$$I_{уд} = 1,8 \frac{\sqrt{2} \cdot 1,05 U_{НОМ}}{x_d'}. \quad (13.2)$$

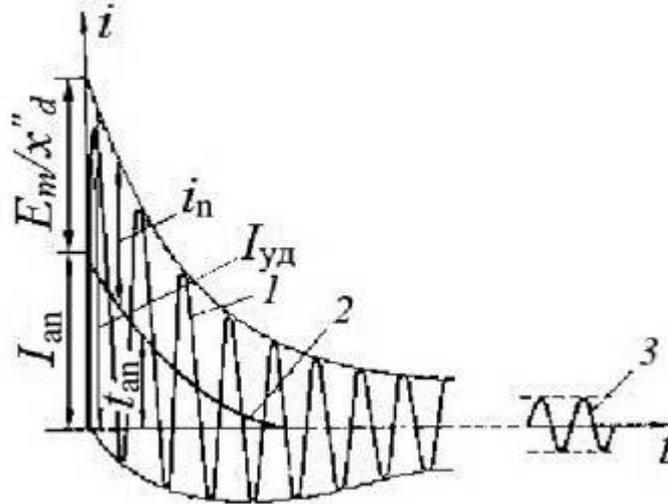


Рис. 13.4. Токи статора синхронного генератора при трехфазном коротком замыкании

В приведенных выше зависимостях коэффициент 1,8 учитывает затухание апериодической составляющей и принимается на 5 % завышенное значение номинального напряжения.

Кроме теплового воздействия токи короткого замыкания создают в обмотках и электродинамические механические усилия, пропорциональные квадрату тока. Наибольшему воздействию механических сил подвергаются лобовые части обмоток статора, которые имеют большую длину. Эти усилия стремятся отогнуть лобовые части обмотки к торцевым частям магнитопровода. ГОСТ ограничивает амплитуду токов короткого замыкания $I_{уд}$. Для машин мощностью больше 2МВт $I_{уд}$ не должно быть больше $15I_n$. На валу синхронной машины при коротком замыкании возникают знакопеременные моменты, периодически ускоряющие и замедляющие ротор. Так же как и электромагнитный момент в установившемся режиме, ударный момент приложен к ротору и статору, поэтому болты крепления машины к фундаменту должны быть рассчитаны на эти усилия.

Следует помнить, что механические воздействия при коротком замыкании более опасны для машины, чем тепловые.

13.2. Несимметричные установившиеся режимы работы трехфазной синхронной машины

Несимметричная нагрузка трехфазного синхронного генератора возникает при неравномерном распределении однофазных приемников нагрузки в питающей сети, что приводит к несимметричному распределению токов по отдельным обмоткам фаз статора генератора. Так же как и при несимметричной нагрузке трехфазного трансформатора, в общем случае, если генератор имеет заземленную нейтраль, несимметричные токи в фазах якорной обмотки могут быть представлены в виде трех симметричных составляющих: прямой I_1 , обратной I_2 и нулевой последовательности I_0 .

Согласно ГОСТ допускается длительная несимметричная нагрузка турбогенераторов при разности токов в отдельных фазах до 10 % и для всех других генераторов и синхронных компенсаторов до 20 %, причем токи в фазах не должны превышать номинального значения. Разнице токов в фазах в 10–20 % соответствует максимальная величина токов обратной последовательности приблизительно 6–12 %. Наличие несимметрии, обуславливающей токи обратной последовательности порядка 10–15 % и выше, приводит к ощутимой несимметрии напряжений, что неблагоприятно отражается на работе асинхронных двигателей, у которых появляется обратно вращающееся поле, производящее тормозящее действие на движение ротора.

Действие обратносинхронного поля, создаваемого токами обратной последовательности, протекающими по обмоткам якоря, на систему обмоток ротора синхронной машины будет иным, чем действие синхронного поля реакции якоря. В то время, как последнее является неподвижным относительно поля возбуждения полюсов и образует вместе с ним результирующий поток, вращающийся также синхронно с ротором и определяющий результирующую ЭДС прямого следования синхронной машины, обратносинхронное поле индуктирует в обмотках ротора токи двойной частоты, препятствующие проникновению этого поля в систему цепей ротора. Вследствие этого обратносинхронное поле в воздушном зазоре становится в ос-

новном как бы потоком рассеяния обмоток некоторого накоротко замкнутого трансформатора.

Индуктивное и активное сопротивление прямой последовательности. Система токов прямой последовательности создает в трехфазной синхронной машине МДС якоря, первая гармоническая которой вращается синхронно с ротором и поэтому не индуцирует в его обмотках никаких ЭДС, что соответствует работе генератора в режиме трехфазной симметричной нагрузки или работе генератора в режиме трехфазного короткого замыкания. Отсюда следует, что индуктивное сопротивление прямой последовательности x_1 равно значению синхронного продольного индуктивного сопротивления x_d , в зависимости от характера нагрузки, и угловому положению МДС реакции относительно ротора.

Активное сопротивление прямого следования равно активному сопротивлению статорной обмотки: $r_1 = r_a$.

Индуктивное сопротивление обратной последовательности x_2 синхронной явнополюсной машины не является постоянным и зависит от мгновенного положения оси полюсов по отношению к неподвижной системе статорных обмоток, так как индуктивные сопротивления рассеяния ротора и индуктивные сопротивления взаимной индукции по продольной (x_{ad}) и поперечной (x_{aq}) осям ротора синхронной явнополюсной в общем случае не являются одинаковыми.

Наиболее просто сопротивления обратной последовательности фаз статорной обмотки синхронной машины x_2 и r_2 могут быть определены экспериментально, путем предварительного определения так называемых «сверхпереходных сопротивлений» z_d'' , z_q'' , r_d'' и r_q'' методом питания двух фаз обмотки статора от однофазного источника переменного тока при неподвижной машине и замкнутой накоротко обмотке возбуждения (рис. 13.5). В этом опыте через обмотку статора пропускают ток порядка $I \approx 0,25I_n$ номинальной частоты и поддерживают постоянную амплитуду напряжения на зажимах при различных положениях ротора. В данном случае синхронная машина работает в режиме статического трансформатора с замкнутой накоротко вторичной цепью, у которого трансформаторные связи первичной и вторичной цепей будут меняться вместе с поворотом ротора.

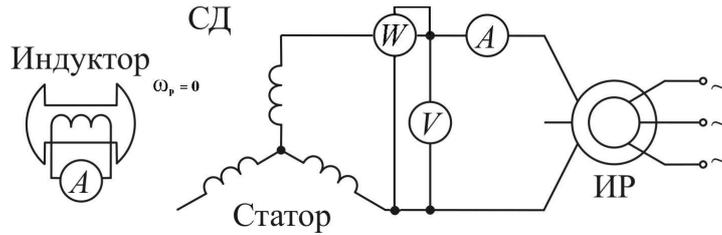


Рис. 13.5. Схема опытного определения продольных и поперечных сверхпереходных сопротивлений (x_d'' и x_q'') при неподвижном роторе; ИР – индукционный регулятор

При постоянной амплитуде напряжения ток на зажимах статора не остается постоянным, а достигает максимального значения, когда при медленном вращении ротора ось обмотки возбуждения совпадает с осью результирующего потока статорной обмотки, т. е. когда угол между этими осями $\theta = 0$, и минимального значения, когда эти оси становятся перпендикулярными, т. е. при $\theta = 90^\circ$. Ток в обмотке возбуждения соответственно также будет максимальным при $\theta = 0$ и минимальным при $\theta = 90^\circ$. Искомые параметры по данным опыта вычисляются так же, как и в случае опыта короткого замыкания трансформатора, по значениям фазного напряжения, тока и мощности в обмотке якоря:

$$z_d'' = \frac{U}{2I_{\max}}; z_q'' = \frac{U}{2I_{\min}}; r_d'' = \frac{P_d}{2I_{\max}^2}; r_q'' = \frac{P_q}{2I_{\min}^2};$$

$$x_d'' = \sqrt{z_d''^2 - r_d''^2}; x_q'' = \sqrt{z_q''^2 - r_q''^2}; x_2 = \frac{1}{2}(x_d'' + x_q''); r_2 = \frac{1}{2}(r_d'' + r_q'').$$

В общем случае x_2 может находиться в пределах $x_{ca} < x_2 < x_d$, а r_2 в первом приближении можно считать $r_2 \approx r_a$.

В машине без демпферной обмотки таким же способом определяются x_d' и x_q' .

Индуктивное и активное сопротивление нулевой последовательности. Если привести ротор синхронной машины во вращение с синхронной скоростью при замкнутой накоротко обмотке возбуждения, а к обмотке статора, включенной по схеме открытого треугольника (рис. 13.6), подать с помощью индукционного регулятора ИР регулируемое однофазное напряжение номинальной частоты, то по обмоткам всех трех фаз будет протекать одинаковый по величине

не и фазе ток, который согласно определению будет являться током нулевой последовательности I_0 .

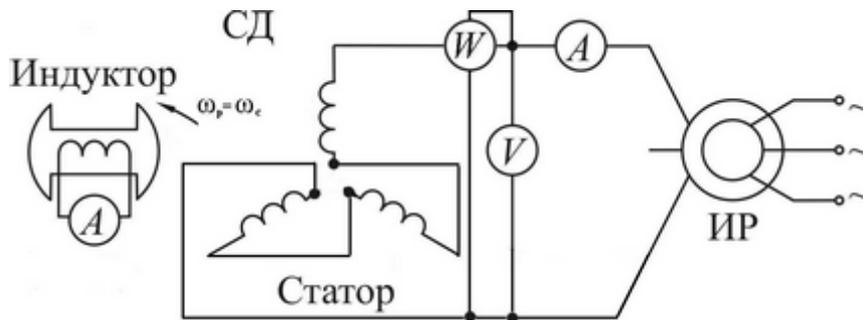


Рис. 13.6. Схема опыта с токами нулевой последовательности в якорной обмотке синхронной машины

Токи фазных обмоток статора машины равны по величине и совпадают по фазе, поэтому сдвинутые в пространстве на 120° и синхронно пульсирующие основные гармонические МДС всех трех фаз не образуют вращающегося магнитного поля, а полностью компенсируют друг друга таким образом, что их результирующее поле основной гармоники в воздушном зазоре становится равным нулю. Следовательно, основные гармонические МДС токов нулевой последовательности не могут создавать поля реакции якоря, а вызывают лишь поля рассеяния статорной обмотки. Аналогично и МДС гармонических порядка 5, 7, 11, 13 и т. д. трех фаз взаимно уравновешивают друг друга. Третьи гармонические МДС токов нулевой последовательности трех фаз складываются друг с другом и создают небольшие потоки, которые сцепляются с обмоткой возбуждения и при синхронной скорости ротора индуцируют в ней ЭДС удвоенной и учетверенной частоты. Аналогично обстоит дело и с МДС гармонических, кратных трем. Так как в синхронной машине воздушный зазор достаточно велик, то потоки гармонических, кратных трем, относительно невелики, а взаимоиндуктивная связь их с контурами ротора не имеет сколько-нибудь заметного значения. Поэтому активное сопротивление нулевой последовательности r_0 можно принять равным активному сопротивлению статорной обмотки r_a и, следовательно, равным также активному сопротивлению прямой последовательности:

$$r_0 = r_1 = r_a.$$

Приложенное к последовательно соединенным обмоткам якоря напряжение U_0 будет уравниваться падением напряжения на сопротивлении нулевой последовательности:

$$z_0 = \frac{U_0}{3I_0}; \quad r_0 = \frac{P_0}{3I_0^2}; \quad x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}.$$

В общем случае x_0 находится в пределах $0 < x_0 < x_{ca}$, где x_{ca} – сопротивление рассеяния обмотки якоря.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Поясните термин «переходные индуктивные сопротивления».
2. Поясните термин «сверхпереходные индуктивные сопротивления».

14. СПЕЦИАЛЬНЫЕ СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Одноякорный преобразователь представляет собой вращающуюся машину, служащую для преобразования переменного тока в постоянный или обратно. Одноякорный преобразователь конструктивно выполняется в виде машины постоянного тока, снабженной не только коллектором, присоединенным к сети постоянного тока, но и ответвлениями от обмотки якоря к контактными кольцам, соединяемым с сетью переменного тока (как это сделано в фазном роторе асинхронной машины) (рис. 14.1).

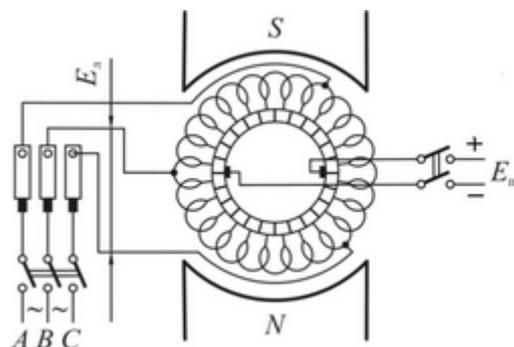


Рис. 14.1. Схема устройства одноякорного преобразователя

Принцип действия одноякорного преобразователя основан на том, что в секциях обмотки якоря машины постоянного тока индук-

тируется переменное напряжение, выпрямляемое при помощи коллектора. С другой стороны, при присоединении обмотки якоря непосредственно к контактным кольцам между ними возникает напряжение переменного тока. Поэтому машина может быть соединена через контактные кольца с сетью переменного тока (подобно фазному ротору асинхронного двигателя).

При преобразовании переменного тока в постоянный одноякорный преобразователь работает по отношению к сети переменного тока синхронным двигателем, а по отношению к сети постоянного тока – генератором постоянного тока. При преобразовании постоянного тока в переменный одноякорный преобразователь работает по отношению к сети постоянного тока двигателем постоянного тока, а по отношению к сети переменного тока – синхронным генератором.

Если не считаться с потерями в самом преобразователе, то в обоих случаях мощность, забираемая из сети переменного тока или отдаваемая в эту сеть, равна мощности, отдаваемой в сеть постоянного тока или забираемой из неё. Поэтому одноякорный преобразователь не предназначен для создания механического момента на валу, а лишь преобразует один вид электрической энергии в другой.

Пуск одноякорного преобразователя может производиться от источника как постоянного, так и переменного тока. Пуск постоянным током возможен, когда имеется источник постоянного тока, например аккумуляторная батарея. В этом случае преобразователь пускается в качестве двигателя постоянного тока и доводится до синхронной скорости, после чего производится синхронизация преобразователя и его подключение к сети переменного тока. При этом способе пуска преобразователь всегда получает правильную полярность по отношению к сети постоянного тока.

Пуск от источника переменного тока может осуществляться несколькими методами, из которых основными являются:

- метод асинхронного пуска синхронного двигателя;
- метод вспомогательного двигателя.

Одноякорные преобразователи имели широкое применение в электрической тяге для преобразования переменного тока в постоянный, но были вытеснены более надежными и экономичными полупроводниковыми выпрямителями.

Применяются также в качестве генераторов двойного тока – переменного и постоянного. В этом случае они приводятся во вращение первичными двигателями, чаще всего внутреннего сгорания. В подобном конструктивном исполнении изготавливаются синхронные генераторы малой мощности, в которых якорная обмотка постоянного тока используется для питания обмотки возбуждения, и таким образом отпадает надобность в отдельном возбудителе.

Машина двойного питания. Если в асинхронной машине с фазным ротором обмотку статора и ротора подключить к сети переменного тока с частотой f_1 таким образом, чтобы поля ротора и статора вращались в противоположные стороны, то, при выполнении условия взаимной неподвижности магнитных полей статора и ротора при электромеханическом преобразовании энергии, можно получить механическую частоту вращения ротора выше синхронной частоты поля статора:

$$\omega = \frac{2\pi f_1}{p} \mp \frac{2\pi f_1}{p} = \frac{2\pi}{p} (f_1 \mp f_1),$$

где ω – частота вращения ротора; знак «+» относится к случаю, когда МДС ротора и статора вращаются в разных направлениях, а сам ротор вращается с удвоенной частотой; знак «–» – когда вращение МДС ротора и статора происходит в одну сторону и сам ротор остается неподвижным.

Машина двойного питания может работать в режиме двигателя и генератора и, хотя и имеет конструкцию асинхронной машины, работает как синхронная машина. Поэтому при ее пуске необходимо довести угловую скорость ротора до удвоенной угловой скорости поля статора, а затем включить напряжение на обмотке возбуждения ротора и синхронизировать частоту вращения ротора и поля статора машины. В общем случае машина двойного питания может работать от сетей с разными напряжениями и частотами и иметь статор и ротор с различными параметрами обмоток.

Машины двойного питания, как трехфазные, так и особенно однофазные, имеют широкое применение в системах синхронной связи.

Гистерезисные двигатели. Недостатком синхронных двигателей являются их плохие пусковые свойства. Гистерезисные двигатели сочетают в себе положительные качества асинхронных (хорошие пусковые характеристики) и синхронных двигателей – высокие

энергетические показатели в установившемся режиме. Сочетание положительных качеств синхронных и асинхронных машин достигается в гистерезисных двигателях за счет применения специальных материалов, из которых выполняется ротор двигателя. Стали типа викаллой и альни ведут себя при высоких частотах как магнитомягкие, а при подходе ротора к синхронной частоте вращения, когда частота снижается, как магнитотвердые. Поэтому при пуске потери в стали ротора небольшие и за счет вихревых токов двигатель развивает асинхронный момент. При низких частотах в роторе образуются области намагничивания и ротор втягивается в синхронизм.

Недостатком гистерезисных двигателей является то, что при нагрузках, близких к номинальным, эти области намагничивания могут смещаться по ротору. При этом машина выпадает из синхронизма. Гистерезисные двигатели выполняются на мощности до десятков ватт. Конструкция статора, создающего вращающееся магнитное поле, обычная. Ротор (рис. 14.2) выполняется в виде диска или цилиндра, состоящего из насаженной на вал ротора втулки 1, изготовленной из магнитомягкого материала, и закрепленного на ней магнитопровода 2, изготовленного из стали типа викаллой или другого магнитного материала со сходными свойствами.

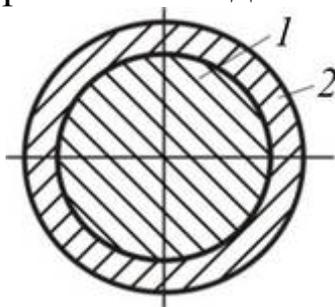


Рис. 14.2. Ротор гистерезисного двигателя

Гистерезисный двигатель обладает сравнительно высоким КПД (50÷60 %) и коэффициентом мощности (0,3÷0,4).

Синхронные машины с «когтеобразным» ротором. Стремление упростить конструкцию и технологию изготовления синхронных машин малой мощности массового производства привело к созданию машин с клювообразным (или когтеобразным) ротором. Клювообразные полюсные наконечники позволяют при одной катушке возбуждения, расположенной по оси машины, превратить аксиальное направление магнитного поля возбуждения в воздушном зазоре в радиально направленные потоки отдельных полюсов и по-

лучать многополюсную конструкцию синхронного генератора при относительно небольшом диаметре ротора. Такая конструкция дает значительную экономию меди обмотки возбуждения. Синхронные машины с когтеобразным ротором мощностью 300÷800 Вт широко применяются как автотракторные генераторы.

Реактивный двигатель. В этом синхронном двигателе ротор не имеет ни обмотки возбуждения, ни постоянных магнитов. Магнитный поток в нем создается за счет реактивной составляющей тока статора. Ротор при этом обязательно имеет явнополюсную структуру. Принцип работы двигателя может быть пояснен рис. 14.3.

Вращающий момент реактивного двигателя равен второй составляющей момента синхронного двигателя в формуле

$$M_{\text{эм}} = \frac{mU^2}{2\omega_c} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta. \quad (14.1)$$

Вращающий момент обусловлен неравенством магнитных сопротивлений по продольной и поперечной осям.

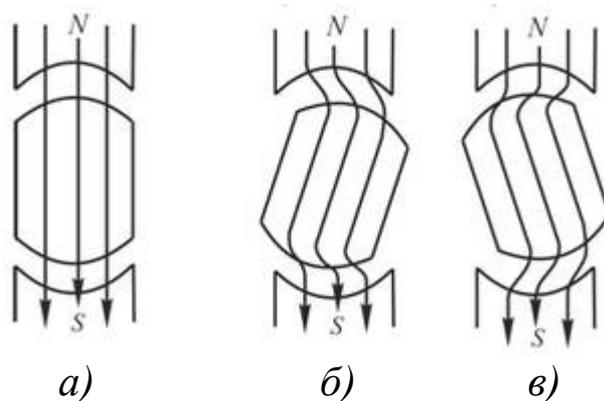


Рис. 14.3. Принцип работы реактивного синхронного двигателя

Если продольная ось ротора совпадает с осью, по которой ориентирована МДС статора, т. е. угол $\theta = 0$, то картина магнитного поля будет соответствовать рис. 14.3, а. При повороте ротора по часовой стрелке (или, что то же самое, что при повороте оси МДС статора) магнитные линии, стремясь замкнуться по пути наименьшего сопротивления, деформируются и магнитное поле примет вид, представленный на рис. 14.3, б. При этом ротор испытывает реактивный момент (14.1), который заставит его вернуться в исходное соосное положение (или следовать за МДС статора). Максимальный момент, действующий на ротор, возникнет при $\theta = 45^\circ$.

При дальнейшем увеличении угла θ деформация магнитных линий будет ослабевать и момент, пройдя максимум, будет убывать до 0 при угле $\theta = 90^\circ$. При повороте ротора в другую сторону – против часовой стрелки – знак момента меняется на обратный (рис. 14.3, в).

Для обеспечения требуемых пусковых свойств в ротор обычно закладывается пусковая обмотка типа беличьей клетки. Если ротор выполнен сплошным из ферромагнитного материала, то пусковая обмотка необязательна. В этом случае пусковой момент создается за счет токов, возникающих в массивном роторе. КПД синхронного реактивного двигателя малый, обычно $0,2 \div 0,3 \%$.

Индукторные синхронные машины. При математическом описании процесса преобразования энергии в синхронной машине системой уравнений (10.2), (10.3) нами было отмечено, что под знаком производной находятся как независимые переменные – токи, так и коэффициенты перед переменными – параметры L , M (рис. 14.4).

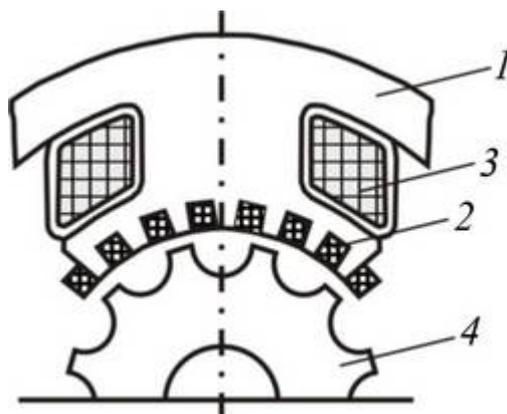


Рис. 14.4. Схема высокочастотного индукторного генератора:
 1 – полюс обмотки возбуждения, размещенной на статоре явнополюсного генератора; 2 – обмотка переменного тока, расположенная в пазах полюсного наконечника; 3 – обмотка возбуждения;
 4 – массивный ротор индукторного генератора

с числом зубцов $z_2 = \frac{z_1}{2}$; z_1 – число зубцов статора

В большинстве электрических машин по гармоническим законам изменяются и токи, и параметры. Преобразование энергии происходит, если изменяются токи, а коэффициенты перед ними – постоянные. Электромеханическое преобразование также возможно, если периодически изменять значения индуктивности L и взаимной индуктивности M обмоток, а токи остаются постоянными. Электри-

ческие машины, реализующие этот принцип преобразования энергии, называют *параметрическими*.

В индукторной машине преобразование энергии происходит вследствие изменения взаимной индуктивности между обмотками ротора и статора. В индукторной машине все обмотки 2 и 3 (см. рис. 14.4) неподвижны, а изменение магнитного потока, пронизывающего обмотку статора, вызывается перемещением ферромагнитной массы.

Ротор в виде звездочки вызывает изменение проводимости зазора под зубцом статора от максимального значения, когда зубец ротора совпадает с зубцом статора, до минимального, когда впадина (паз) ротора совпадает с зубцом статора (рис. 14.5).

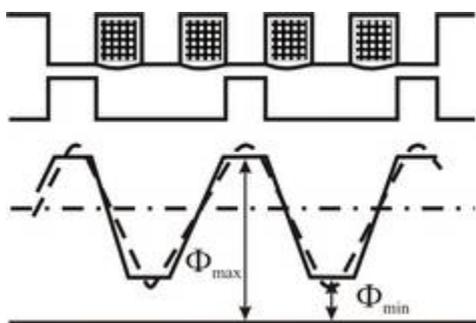


Рис. 14.5. Изменение магнитного потока в воздушном зазоре индукционного генератора

Соответственно меняется индукция в воздушном зазоре и магнитный поток от максимального Φ_{\max} до минимального Φ_{\min} . Следовательно, индукторной машиной можно называть электрическую машину переменного тока, у которой в режиме холостого хода магнитная индукция в любой точке внутренней поверхности статора изменяется только по амплитуде, не изменяясь по знаку.

Действующее значение ЭДС в обмотке переменного тока:

$$E = 2,22 \frac{z_2 n}{60} w (\Phi_{\max} - \Phi_{\min}). \quad (14.2)$$

Высокочастотные индукторные генераторы выполняются частотой в десятки килоггерц и мощностью в сотни киловатт. Такие мощности и высокие частоты требуются для электротермических установок, для питания радиолокационных установок и высокоскоростного электропривода.

Как и все электромеханические преобразователи, индукторные машины обратимы. В двигательном режиме они применяются в качестве тихоходных высокочастотных и шаговых двигателей. Синхронная частота вращения индукторного двигателя зависит от частоты питающего напряжения и числа зубцов на роторе z_2 :

$$n = \frac{f_c}{z_2} \text{ об/с}.$$

При больших диаметрах ротора и мелких зубцах можно получить частоту вращения до одного оборота в сутки.

Индукторные двигатели изготавливают двух-, трех- и однофазными. Обмотка возбуждения питается выпрямленным напряжением, но могут применяться и постоянные магниты. Для пуска индукторных двигателей применяются все известные нам способы пуска синхронных машин.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Поясните, как работает индукторный генератор.
2. Поясните принцип действия реактивного синхронного двигателя.
3. Каковы достоинства и недостатки синхронного гистерезисного двигателя?
4. Поясните конструкцию и принцип действия одноякорного преобразователя.
5. Поясните конструкцию и принцип действия машины двойного питания.

15. КОЛЛЕКТОРНЫЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

15.1. Общие сведения о коллекторных машинах переменного тока

Первые попытки использовать двигатель последовательного возбуждения постоянного тока для работы от сети однофазного переменного тока были сделаны еще в середине 80-х гг. XVIII в. К тому времени был разработан однофазный репульсионный двигатель, в котором, так же как в асинхронной бесколлекторной машине, статор и ротор соединены только магнитным полем, но который,

тем не менее, сохраняет все свойства однофазного двигателя последовательного возбуждения.

Изобретение М. О. Доливо-Добровольским трехфазного асинхронного бесконтактного двигателя открыло новое направление в электромашиностроении и на время приостановило развитие коллекторных машин переменного тока. Начавшаяся в начале прошлого века интенсивная электрификация железнодорожного транспорта потребовала от промышленности создания мощного электрического двигателя с регулируемой скоростью вращения. Выявленные к этому времени недостатки бесконтактных асинхронных машин: трудности экономичного регулирования скорости вращения и потребление реактивной мощности из питающей сети – стимулировали разработку коллекторных двигателей переменного тока. Конструкторы, придав асинхронному двигателю коллектор, получили совершенно новый тип электрической машины, приближающейся по своим характеристикам к двигателям постоянного тока.

Асинхронная коллекторная машина нашла наибольшее применение в электротяге в виде однофазного двигателя последовательного возбуждения. Опыт эксплуатации электрифицированных магистральных железнодорожных линий показал, что они могут успешно работать как на постоянном токе повышенного напряжения (3300 В), так и на переменном однофазном токе.

В начале прошлого века развитие коллекторных машин переменного тока шло в следующих направлениях:

а) как двигателей последовательного и параллельного возбуждения, позволяющих плавно и в широких пределах регулировать скорость вращения;

б) как двигателей с улучшенным коэффициентом мощности;

в) как фазокомпенсаторов, включаемых в цепь ротора асинхронных бесколлекторных машин с целью улучшения коэффициента мощности;

г) как генераторов переменного тока в каскадных и специальных установках.

В период 1880–1925 гг. были разработаны все основные типы коллекторных машин переменного тока, которые и сейчас используются в промышленности, на транспорте и в быту. Однако в целом их широкое применение сдерживается рядом недостатков:

- трудности коммутации (этот фактор ограничивает мощность коллекторных машин переменного тока);
- относительная сложность их устройства (требуется постоянное обслуживание коллекторно-щеточных переходов персоналом высокой квалификации);
- высокая стоимость (в 4–6 раз больше стоимости асинхронных двигателей с к.з. ротором и в 1,5–2 раза выше стоимости двигателей постоянного тока аналогичной мощности).

Таким образом, в настоящее время коллекторную машину переменного тока следует рассматривать как отдельный тип электрической машины, не являющийся массовым, но который находит достаточно широкое и многообразное применение в ряде специальных случаев.

Наибольшее распространение коллекторные машины переменного тока получили в некоторых странах Европы: в Германии, Словакии, Чехии, Швейцарии. В других странах их применение очень ограничено, в частности в США, в России.

Схема коллекторной машины переменного тока, рассматриваемая с позиций обобщенного электромеханического преобразователя, показана на рис. 15.1.

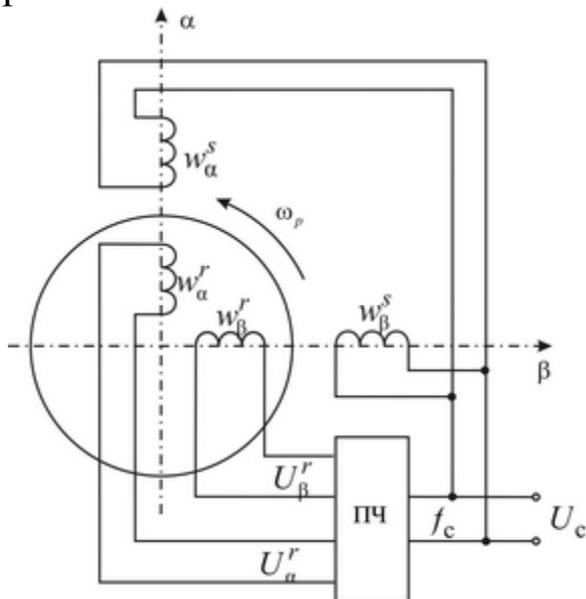


Рис. 15.1. Схема коллекторной машины переменного тока

В коллекторных машинах переменного тока в обмотках статора и ротора протекают переменные токи, а преобразователь частоты (коллектор) работает в режиме преобразования переменного тока частоты сети в переменный ток частоты скольжения. Как и во всех

электрических машинах, основные гармоники поля статора и поля ротора неподвижны относительно друг друга.

При питании от сети переменного тока коллектор (преобразователь частоты) работает в более тяжелых условиях, чем при питании от постоянного тока, что сказывается на коммутации и проявляется в большом искрении под щетками.

15.2. Однофазные коллекторные двигатели переменного тока

Основная область применения однофазных коллекторных двигателей в промышленности – электрифицированные железные дороги постоянного и однофазного переменного тока. Однофазные коллекторные двигатели переменного тока малой мощности получили широкое применение в бытовых электрических приборах. Обычно их мощность не превышает сотен ватт, а частота вращения может достигать 30 000 об/мин.

Однофазные коллекторные двигатели (рис. 15.2, а) имеют сосредоточенную последовательную обмотку возбуждения ОВ, добавочные полюсы ДП и компенсационную обмотку КО, расположенные на явно выраженных полюсах и соединенные последовательно с якорной обмоткой Я, секции которой присоединены к коллектору.

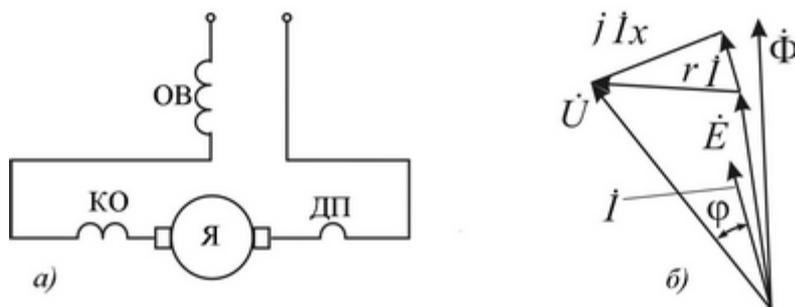


Рис. 15.2. Однофазный коллекторный двигатель переменного тока последовательного возбуждения: а – схема включения; б – векторная диаграмма работы

Для снижения потерь в стали от вихревых токов статор и ротор изготавливаются из шихтованной электротехнической стали. Конструкция однофазных коллекторных двигателей сходна с конструкцией двигателей постоянного тока последовательного возбуждения. Поэтому промышленностью выпускаются универсальные

коллекторные двигатели, работающие как на постоянном, так и на переменном токе.

Для однофазного коллекторного двигателя уравнение электрического равновесия якорной цепи запишется в следующем виде:

$$\dot{U} = \dot{E} + r\dot{I} + jx\dot{I}, \quad (15.1)$$

где r и x – суммарные активные и индуктивные сопротивления всех последовательно включенных обмоток.

На основании уравнения (15.1) может быть построена векторная диаграмма (рис. 15.2, б).

В общем случае в якоре коллекторной машины переменного тока индуцируется ЭДС \dot{E} двоякого рода:

а) трансформаторная ЭДС $\dot{E}_{\text{тр}}$, поскольку обмотки возбуждения и якоря связаны между собой переменным полем, пульсирующим с частотой f ;

б) ЭДС вращения $\dot{E}_{\text{вр}}$, развиваемая в каждой секции обмотки якоря при его вращении в магнитном поле и имеющая частоту $f_{\text{вр}} = pn$.

В первом приближении будем считать, что поток Φ , создаваемый обмоткой возбуждения, изменяется синусоидально во времени, и примем для простоты, что поток синусоидально распределен по окружности якоря.

В этом случае ЭДС $\dot{E}_{\text{тр}}$ тоже изменяется во времени синусоидально, причем ее действующее значение

$$E_{\text{тр}} = \pi\sqrt{2}fw_a k_{\text{об}}\Phi_m, \quad (15.2)$$

где Φ_m – амплитуда магнитного потока.

При заданной скорости вращения n ЭДС $E_{\text{вр}} \equiv \Phi_m$. Следовательно, ЭДС $E_{\text{вр}}$ изменяется во времени тоже синусоидально и одновременно с потоком Φ_m проходит через нуль и достигает максимума. При изменении скорости ЭДС $E_{\text{вр}}$ изменяется только по величине, тогда как ее частота по-прежнему остается равной частоте пульсирующего потока f .

При положении щеток на линии геометрической нейтрали

$$E_{\text{вр}} = \pi\sqrt{2}f_{\text{вр}}w_a k_{\text{об}}\Phi_m. \quad (15.3)$$

Таким образом, в каждой секции обмотки якоря возникает ЭДС E , являющаяся результатом наложения двух ЭДС: ЭДС вращения $E_{вр}$, имеющая частоту вращения $f_{вр} = pn$, и трансформаторной ЭДС $E_{тр}$, имеющей частоту f .

Механические характеристики однофазного коллекторного двигателя переменного тока сходны с механическими характеристиками двигателя постоянного тока последовательного возбуждения. Регулирование частоты вращения осуществляется путем изменения подводимого напряжения (рис. 15.3, б) или шунтирования обмотки возбуждения или якоря.

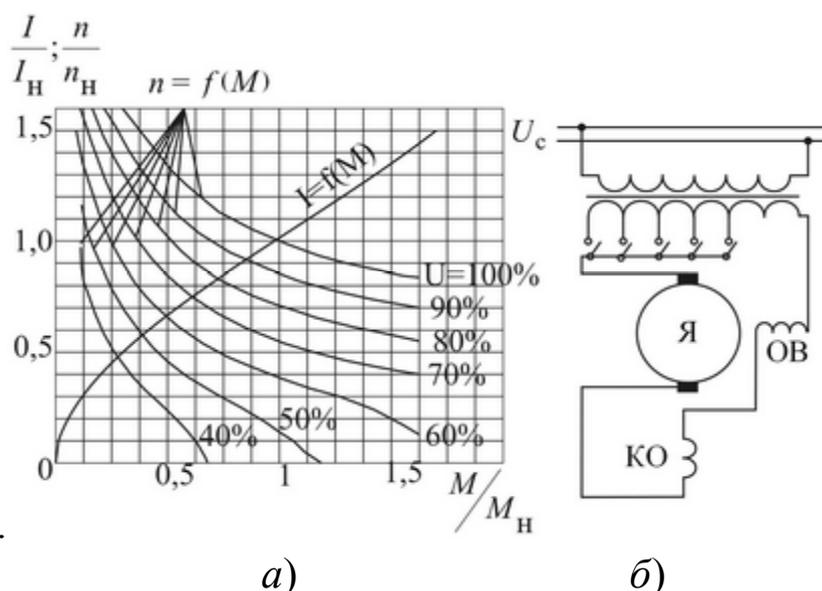


Рис. 15.3. Механические характеристики однофазного двигателя последовательного возбуждения при $U = \text{const}$ и $f = \text{const}$ (а) и схема регулирования частоты вращения однофазного двигателя путем изменения подводимого напряжения (б)

Для улучшения коммутации коллекторные двигатели выполняются с компенсационной обмоткой и добавочными полюсами. Добавочные полюса в коллекторных машинах переменного тока не могут скомпенсировать реактивную ЭДС в коммутируемых секциях во всех режимах работы, и коммутация в коллекторных двигателях переменного тока протекает хуже, чем в машинах постоянного тока. Двигатели небольшой мощности выполняются без добавочных полюсов. Компенсационная обмотка уменьшает индуктивное сопротивление машины, так как она компенсирует поток реакции якоря и

уменьшает потокосцепление. В двигателях небольшой мощности компенсационная обмотка выполняется как сосредоточенная, а в двигателях большой мощности как распределенная.

15.3. Репульсионные двигатели

Репульсионными называются однофазные коллекторные двигатели переменного тока, в которых обмотка ротора (якоря) не имеет электрической связи со статором и питающей сетью. Щетки этих двигателей замкнуты накоротко, и передача электрической энергии ротору происходит только трансформаторным путем через магнитное поле.

Регулирование скорости вращения этих двигателей осуществляется путем поворота щеток, а их пуск производится прямым включением обмотки статора на полное напряжение сети. Простота пуска и регулирование скорости вращения обусловили определенное распространение репульсионных двигателей небольшой мощности (до $20 \div 30$ кВт) в промышленности. Существует несколько конструкций репульсионных двигателей:

- с двумя обмотками на статоре и одним комплектом короткозамкнутых щеток (двигатель Аткинсона);
- с одной обмоткой на статоре и одним комплектом щеток (двигатель Томсона);
- с двумя комплектами короткозамкнутых щеток и одной обмоткой на статоре (двигатель Дери).

На рис. 15.4 представлен репульсионный двигатель Томсона с одной обмоткой на статоре и одним подвижным комплектом щеток (двигатель Томсона) при различных положениях щеток.

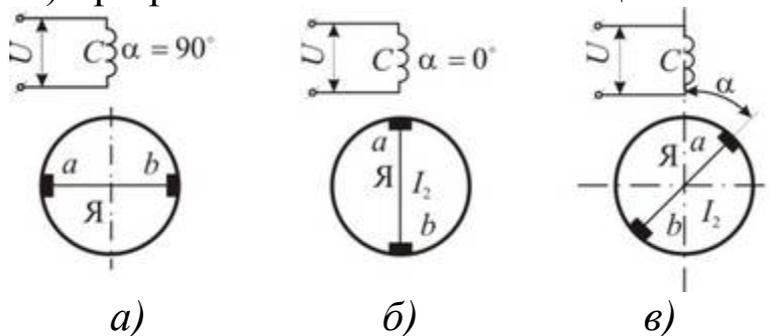


Рис. 15.4. Репульсионный двигатель Томсона: *a* – положение щеток при холостом ходе; *б* – то же при коротком замыкании; *в* – промежуточное положение щеток

Ось щеток ($a - в$) может занимать по отношению к оси обмотки статора C положение под любым углом α . На рис. 15.4, б угол α между осью обмотки статора и осью щеток якоря равен нулю. В этом положении при $n = 0$ в якоре индуцируется максимальный ток I_2 , но момент $M = 0$.

Это положение щеток называется положением короткого замыкания. При $\alpha = 90^\circ$ (рис. 15.4, а) ток в обмотке якоря при $n = 0$ не индуцируется, и это положение щеток называется положением холостого хода. При $\alpha \neq 90^\circ$ и $\alpha \neq 0^\circ$ двигатель развивает пусковой момент $M \neq 0$ и направление вращения двигателя совпадает с направлением поворота щеток из положения $\alpha = 0^\circ$. Зависимости пускового момента и пускового тока двигателя в относительных величинах от угла поворота щеток α изображены на рис. 15.5.

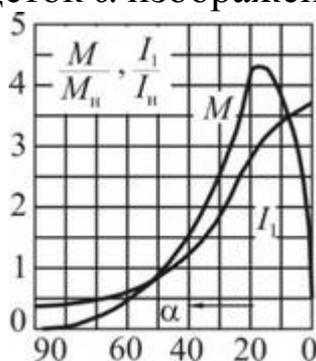


Рис. 15.5. Зависимость пускового момента и тока репульсионного двигателя Томсона от угла поворота щеток α

При $\alpha = \text{const}$ механические характеристики репульсионного двигателя мягкие, и по своим электромеханическим свойствам репульсионные двигатели аналогичны двигателям последовательного возбуждения постоянного и переменного тока (рис. 15.3, а). Улучшение условий коммутации возможно за счет использования щеток с повышенным переходным сопротивлением и путем уменьшения реактивной ЭДС, за счет снижения числа витков секций обмотки якоря.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Поясните принцип работы коллекторных машин переменного тока.
2. Назовите область применения коллекторных машин переменного тока.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копылов, И. П. Электрические машины : учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. – М. : Высш. шк. ; Логос ; 2004. – 607 с.
2. Вольдек, А. И. Электрические машины. Машины переменного тока : учеб. для вузов / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – СПб. : Питер, 2007. – 350 с.
3. Гольдберг, О. Д. Электромеханика : учеб. для вузов. – М. : Издат. центр «Академия», 2007. – 512 с.
4. Беспалов, В. Я. Электрические машины : учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений / В. Я. Беспалов, Н. Ф. Котеленец. – М. : Издат. центр «Академия», 2006. – 320 с.
5. Костенко, М. П. Электрические машины / М. П. Костенко ; Л. М. Пиотровский : в 2 ч. Ч. 2 : Машины переменного тока : учеб. для студентов высш. техн. учеб. заведений. – 3-е изд., перераб. – Л. : Энергия, 1973. – 648 с.
6. Иванов-Смоленский, А. В. Электрические машины : учеб. для вузов. – М. : Энергия, 1980. – 928 с.
7. Радин, В. И. Электрические машины. Асинхронные машины : учеб. для студентов электромех. спец. вузов / В. И. Радин, Д. Э. Брускин, А. Е. Захарович / под ред. И. П. Копылова. – М. : Высш. шк., 1988. – 328 с.
8. Справочник по электрическим машинам : в 2 т. / под общ. ред. И. П. Копылова, Б. К. Клокова. Т. 2. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.
9. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин : учеб. для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 2001. – 327 с.
10. Шпаннеберг, Х. Электрические машины: 1000 понятий для практиков : справочник : пер. с нем. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 252 с.
11. Филимонов, С. Г. Электромеханика : учеб. пособие. Ч. 1 / Кузбас. гос. техн. ун-т. – Кемерово, 2009. – 323 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
1. Асинхронные машины	4
1.1. История создания асинхронной машины	4
1.2. Конструкция асинхронной машины	5
1.3. Асинхронная машина с фазным ротором	8
1.4. Принцип действия асинхронной машины	10
2. Математическое описание процесса преобразования энергии в асинхронных машинах	11
2.1. Описание динамических и установившихся режимов работы асинхронной машины	11
2.2. Приведение параметров асинхронной машины	15
2.3. Векторная диаграмма и схема замещения асинхронной машины	17
3. Электромеханические свойства асинхронной машины	21
3.1. Энергетические режимы работы асинхронной машины при питании от сети переменного тока	21
3.2. Энергетическая диаграмма асинхронной машины	24
3.3. Уравнение механической характеристики асинхронной машины	27
3.4. Искусственные механические характеристики асинхронной машины	33
4. Генераторные режимы работы асинхронной машины	37
4.1. Генераторный режим работы асинхронной машины параллельно с сетью	37
4.2. Работа асинхронной машины в режиме автономного асинхронного генератора	39
4.3. Тормозные режимы работы асинхронной машины	43
4.4. Трансформаторный режим работы асинхронной машины	46
4.4.1. Фазорегулятор	47
4.4.2. Индукционный регулятор	48
4.5. Асинхронная машина двойного питания	50
5. Пуск трехфазных асинхронных двигателей	52
5.1. Общие замечания	52
5.2. Прямой пуск асинхронного двигателя	53

5.3.	Эффект вытеснения тока в обмотке ротора асинхронного двигателя	54
5.4.	Пуск АД при пониженном напряжении	58
5.5.	Пуск асинхронного двигателя переключением схемы соединения обмотки статора со звезды на треугольник	60
5.6.	Пуск асинхронного двигателя с фазным ротором с помощью пускового реостата	62
5.7.	«Мягкий» пуск асинхронного двигателя с помощью тиристорного регулятора напряжения	64
6.	Регулирование скорости вращения трехфазных асинхронных двигателей	65
6.1.	Регулирование скорости вращения ротора путем изменения числа пар полюсов обмотки статора	66
6.2.	Регулирование скорости вращения асинхронного двигателя изменением частоты питающего напряжения	71
6.3.	Параметрические способы регулирования скорости асинхронного двигателя	74
6.4.	Регулирование скорости вращения ротора асинхронного двигателя путем изменения напряжения, подводимого к статору	76
6.5.	Регулирование скорости вращения асинхронного двигателя посредством введения добавочной ЭДС в цепь фазного ротора	78
7.	Специальные асинхронные двигатели	84
7.1.	Работа трехфазного асинхронного двигателя от однофазной сети	84
7.2.	Однофазные асинхронные двигатели с пусковой обмоткой	88
7.3.	Однофазные конденсаторные асинхронные двигатели	90
7.4.	Асинхронные двигатели с массивным ротором	92
7.5.	Асинхронный преобразователь частоты	93
7.6.	Асинхронные двигатели с полым немагнитным ротором	94
7.7.	Электромагнитные индукционные насосы	95
7.8.	Линейные и дуговые асинхронные двигатели	96
7.9.	Единые серии асинхронных двигателей	98
8.	Синхронные машины	103
8.1.	Конструкция синхронных машин	103
8.2.	История создания синхронной машины	107

8.3.	Область применения синхронных машин	108
8.4.	Математическое описание процесса преобразования энергии в синхронных машинах	109
8.5.	Параметры синхронных машин в установившемся режиме	114
8.6.	Система относительных единиц синхронных машин	115
8.7.	Векторная диаграмма синхронного явнополюсного генератора при симметричной нагрузке	117
9.	Работа синхронной машины под нагрузкой. Реакция якоря	121
9.1.	Реакция якоря синхронного генератора	122
9.2.	Коэффициенты продольной и поперечной реакций якоря	124
10.	Характеристики синхронного генератора, работающего на автономную нагрузку	127
10.1.	Характеристика холостого хода синхронного генератора	128
10.2.	Характеристика короткого замыкания синхронного генератора	129
10.3.	Отношение короткого замыкания	131
10.4.	Внешняя характеристика синхронного генератора	134
10.5.	Регулировочная характеристика синхронного генератора	135
10.6.	Потери и КПД синхронных машин	135
10.7.	Параллельное включение синхронных генераторов	137
11.	Угловые характеристики синхронных машин	141
11.1.	Регулирование активной мощности синхронных машин	141
11.2.	Механическая характеристика синхронной машины	145
11.3.	Статическая устойчивость работы синхронной машины в составе энергосистемы	147
11.4.	Синхронизирующая мощность и синхронизирующий момент синхронной машины	148
11.5.	Регулирование реактивной мощности синхронной машины	150
12.	Синхронные двигатели	153
12.1.	Энергетические режимы работы синхронной машины	153
12.2.	Способы пуска синхронных двигателей	155
12.3.	Синхронные компенсаторы	162
13.	Переходные процессы в синхронных машинах	164

13.1.	Схемы замещения для индуктивных сопротивлений синхронной машины при внезапном коротком замыкании	164
13.2.	Несимметричные установившиеся режимы работы трехфазной синхронной машины	169
14.	Специальные синхронные машины	173
15.	Коллекторные машины переменного тока	180
15.1.	Общие сведения о коллекторных машинах переменного тока	180
15.2.	Однофазные коллекторные двигатели переменного тока	183
15.3.	Репульсионные двигатели	186
	Список рекомендуемой литературы	188

Филимонов Сергей Гаврилович

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Учебное пособие

Редактор З. М. Савина

Подписано в печать 14.12.2010

Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе

Уч.-изд. л. 11,00. Тираж 200 экз. Заказ

Кузбасский государственный технический университет

650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28

Типография Кузбасского государственного технического университета

650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4а