



**Министерство образования и науки
Российской Федерации
Рубцовский индустриальный институт (филиал)
ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический
университет им. И.И. Ползунова»**

Н.И. Задоя

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

**Часть 2. Асинхронные машины переменного тока.
Синхронные машины переменного тока**

Учебное пособие для бакалавров направления
«Электроэнергетика и электротехника»

Рубцовск 2014

УДК 621.313

Задоя Н.И. Электрические машины. Часть 2: Асинхронные машины переменного тока. Синхронные машины переменного тока. Учебное пособие для бакалавров направления «Электроэнергетика и электротехника» / Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2014. – 67 с.

В учебном пособии рассмотрены физические и теоретические основы электромеханического преобразования энергии в асинхронных и синхронных электрических машинах переменного тока, особенности их конструкции, методологические основы их исследования и принципы управления, параметры и характеристики преобразователей. Содержит две главы: асинхронные машины и синхронные машины переменного тока.

Учебное пособие предназначено для бакалавров направления «Электроэнергетика и электротехника».

Рассмотрено и одобрено
на заседании НМС РИИ.
Протокол №6 от 01.09.14.

Рецензент: профессор, к.ф.-м. н.

В.В. Борисовский

© Рубцовский индустриальный институт, 2014

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1. АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ	7
1.1. Конструкция, принцип действия и режимы работы асинхронной машины	7
1.2. Схемы замещения и энергетическая диаграмма асинхронной машины	12
1.3. Механические характеристики	16
1.4. Коэффициент полезного действия асинхронного двигателя	18
1.5. Устойчивость работы асинхронного двигателя	19
1.6. Рабочие характеристики асинхронного двигателя	20
1.7. Генераторный режим	20
1.8. Режим противовключения	21
1.9. Режим динамического торможения	21
1.10. Способы пуска асинхронных двигателей	22
1.10.1. Прямой пуск	22
1.10.2. Реакторный пуск	23
1.10.3. Автотрансформаторный пуск	24
1.10.4. Пуск переключением – «звезда» – «треугольник»	25
1.10.5. Пуск двигателя с фазным ротором с помощью пускового реостата	26
1.10.6. Самозапуск асинхронных двигателей	28
1.11. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором	29
1.11.1. Регулирование частоты вращения изменением первичной частоты	29
1.11.2. Регулирование частоты вращения изменением числа пар полюсов	30
1.11.3. Регулирование частоты вращения уменьшением напряжения	31
1.11.4. Импульсное регулирование частоты вращения	32
1.12. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей с фазным ротором	33
1.12.1. Регулирование частоты вращения с помощью реостата в цепи ротора	33
1.12.2. Регулирование частоты вращения введением добавочной ЭДС во вторичную цепь двигателя	34

Глава 2. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ	37
2.1. Конструкция синхронных машин	37
2.2. Работа синхронного генератора при холостом ходе	38
2.3. Реакция якоря в синхронной машине	40
2.4. Принцип действия синхронных машин	43
2.4.1. Работа на пассивную, автономную нагрузку	43
2.4.2. Работа синхронной машины на жесткую сеть	47
2.5. Энергетическая диаграмма и КПД синхронной машины	49
2.6. Электромагнитная мощность и момент синхронной машины	50
2.7. Рабочие характеристики синхронного двигателя	52
2.8. Определение индуктивных сопротивлений синхронной машины	53
2.9. Способы пуска синхронных двигателей	54
2.10. Включение синхронных генераторов на параллельную работу	56
2.10.1. Условия синхронизации генераторов	56
2.10.2. Синхронизация с помощью лампового синхроскопа	57
2.10.3. Другие методы синхронизации	59
2.11. Синхронные режимы параллельной работы синхронных машин	59
2.11.1 Изменение реактивной мощности. Режим синхронного компенсатора	60
2.11.2. Изменение активной мощности. Режимы генератора и двигателя	61
2.12. Несимметричные режимы работы синхронных генераторов	62
2.12.1. Физические особенности несимметричных режимов	62
2.12.2. Токи и сопротивления прямой последовательности	64
2.12.3. Токи и сопротивления обратной последовательности	64
2.12.4. Токи и сопротивления нулевой последовательности	66
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	67

ВВЕДЕНИЕ

Использование природных ресурсов немислимо без преобразования одних видов энергии в другие. Устройства для такого преобразования энергии, выполняющие механические движения, называются энергетическими машинами. Например, при помощи тепловой машины преобразуют тепловую энергию, высвобождающуюся при сгорании топлива, в механическую энергию. Тот же термин применяется для устройств, которые преобразуют энергию с одними параметрами в энергию того же вида с другими параметрами. Так, гидравлической называют машину, которая служит для преобразования механической энергии поступательно перемещающегося потока жидкости в механическую энергию, передаваемую через вращающийся вал.

Значительная часть энергии, запасенной в природе в виде химической энергии, ядерной энергии, энергии движения рек и морей, энергии ветра и энергии излучения солнца, преобразуется в современном мире в электрическую энергию. Целесообразность такого преобразования связана с тем, что электрическую энергию с малыми затратами можно передать на большие расстояния, распределить между потребителями и снова преобразовать в механическую, тепловую или химическую энергию.

Машины, совершающие преобразование механической энергии в электрическую энергию или обратное преобразование, называются электрическими машинами.

Электрическая машина, предназначенная для преобразования механической энергии в электрическую энергию, носит название «генератор». Электрическая машина, предназначенная для обратного преобразования, называется «двигателем». Электрические машины обратимы. При помощи любой электрической машины может совершаться электромеханическое преобразование в двух возможных направлениях. Если к подвижной части электрической машины подводится механическая энергия, она работает в режиме генератора электрической энергии. Если к машине подводится электрическая энергия, ее подвижная часть совершает механическую работу.

Электрическая машина представляет собой электромагнитную систему, которая состоит из взаимосвязанных магнитных и электрических цепей. Магнитная цепь включает неподвижный и подвижный магнитопроводы из магнитного материала и немагнитный воздушный зазор, отделяющий их друг от друга. Электрические цепи в виде двух или нескольких обмоток могут перемещаться одна относительно другой совместно с магнитопроводами, на которых они размещены.

Электромеханическое преобразование энергии в электрических машинах основано на явлении электромагнитной индукции. Электрические машины, действие которых основано на законе электромагнитной индукции, называются индуктивными.

Наряду с индуктивными электрическими машинами существуют так называемые емкостные электрические машины, в которых электромеханическое преобразование энергии основано на явлении

электростатической индукции и связано с периодическим изменением электрического поля в конденсаторе с взаимно перемещающимися электродами. Однако такие машины по своим массогабаритным и стоимостным показателям не могут конкурировать с индуктивными машинами и в промышленном электромеханическом преобразовании энергии не используются.

Электрическая машина как преобразователь энергии является важнейшим элементом любой энергетической или промышленной установки. Она находит широкое применение в качестве генератора, двигателя или преобразователя на электрических станциях, промышленных и сельскохозяйственных объектах, в железнодорожном, автомобильном и электрифицированном городском транспорте, в авиации. Все более расширяется применение электрических машин в системах автоматического управления и регулирования. Электрические машины могут быть рассчитаны для работы с сетью переменного или постоянного тока. В соответствии с этим они разделяются на машины переменного тока и машины постоянного тока.

Машины переменного тока делятся на синхронные и асинхронные (несинхронные). В синхронных машинах угловая скорость ротора ω_p и угловая скорость магнитного поля ω_c равны. В асинхронных машинах угловая скорость ротора не равна угловой скорости поля: $\omega_p \neq \omega_c$. При этом ω_p может быть меньше или больше угловой скорости поля. Направления вращения ротора и поля статора могут быть противоположными.

По режиму работы электрические машины делятся на генераторы и двигатели. В генераторах механическая энергия, подводимая к валу машины, преобразуется в электрическую энергию. В двигателях электрическая энергия преобразуется в механическую энергию. Одна и та же электрическая машина может работать и двигателем, и генератором. Однако у генераторов и двигателей обычно имеются конструктивные отличия, поэтому на заводском щите машины указывается режим работы.

Синхронные машины могут работать в режиме потребления или отдачи в сеть реактивной мощности. Такие машины называются синхронными компенсаторами.

Глава 1. АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

1.1. Конструкция, принцип действия и режимы работы асинхронной машины

Асинхронной машиной называют электромеханический преобразователь, в котором возникновение момента на валу ротора возможно лишь при различных скоростях вращения магнитного поля и ротора. Различают одно-, двух-, трех- и многофазные асинхронные машины. Трехфазные асинхронные машины с короткозамкнутым ротором благодаря своей технологичности, надежности, низкой стоимости и большому сроку службы составляют основную долю мирового парка электрических машин.

Основными элементами конструкции асинхронной машины являются статор и ротор (рис. 1.1).

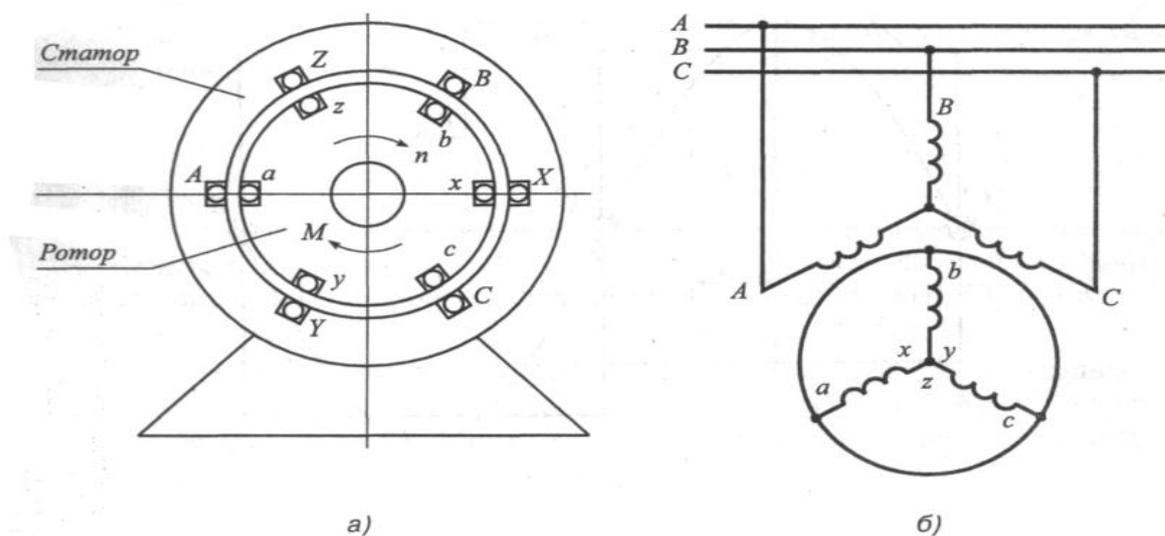


Рис. 1.1. Конструкция асинхронной машины (а) и схема ее подключения к трехфазной сети (б)

В пазах статора и ротора размещены соответствующие обмотки. Число пазов, приходящихся на одну фазу питающей сети, определяет тип обмотки: сосредоточенную или распределенную. При сосредоточенной обмотке статора (рис. 1.2, а) кривая распределения намагничивающей силы (НС) или магнитной индукции вдоль рабочего зазора машины имеют прямоугольный характер (рис. 1.2, б, кривая 1).

Для того чтобы получить в рабочем зазоре синусоидально распределенное магнитное поле и улучшить условия охлаждения обмотки, она, как правило, выполняется распределенной. Кривая НС имеет в этом случае синусоидальный характер (рис. 1.2, б, кривая 2):

$$F_x = F_{\max} \cos \frac{\pi x}{\tau}, \quad (1.1)$$

где F_x – НС в точке x воздушного зазора;

F_{\max} – максимальное значение НС;

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

– полюсное деление (D, p – диаметр внутренней расточки статора и число пар полюсов).

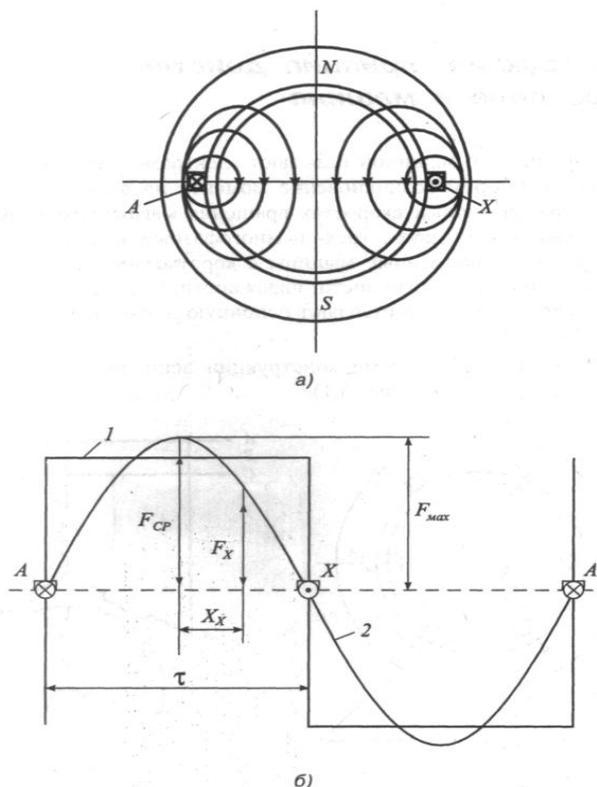


Рис. 1.2. Распределение намагничивающей силы в зазоре асинхронной машины при сосредоточенной (а) и распределенной (б, кривая 2) обмотках

При питании обмотки синусоидальным напряжением НС распределенной обмотки определится выражением

$$F_x = F_{\max} \sin \omega t \cdot \frac{\pi x}{\tau}. \quad (1.2)$$

Такое поле, оставаясь неподвижным в зазоре, пульсирует во времени. Пульсирующий характер магнитного поля в рабочем зазоре машины, имеющий место при питании синусоидальным напряжением лишь одной из фаз, можно выразить зависимостью:

$$F_x = F_{\text{cp}} \cos \frac{\pi x}{\tau} = \frac{1}{2} F_{\max} \sin \left(\omega t - \frac{\pi x}{\tau} \right) + \frac{1}{2} F_{\max} \sin \left(\omega t + \frac{\pi x}{\tau} \right). \quad (1.3)$$

Анализ ее позволяет сделать вывод о том, что пульсирующее магнитное поле можно представить в виде суммы двух бегущих в противоположные стороны и одинаковых по амплитуде волн НС (индукции) или в виде двух круговых полей: прямого и обратного.

Нетрудно показать, что в двухфазной обмотке с фазами, сдвинутыми в пространстве на половину полюсного деления, создается круговое магнитное поле, если по ее фазам протекают токи, обеспечивающие равенство НС и сдвиг во времени 90° :

$$F_x^{(2)} = F_{\max} \sin\left(\omega t - \frac{\pi x}{\tau}\right). \quad (1.4)$$

Аналогично, для трехфазной машины с одинаковыми НС обмоток, со сдвигом в пространстве и времени на 120° будем иметь:

$$F_x^{(3)} = \frac{3}{2} F_{\max} \sin\left(\omega t - \frac{\pi x}{\tau}\right). \quad (1.5)$$

В общем случае, когда число фаз электрической машины равно m и сдвиг в пространстве и времени составляет величину, определяемую соотношением $360/m$, можно записать

$$F_x = \frac{m}{2} F_{\max} \sin\left(\omega t - \frac{\pi x}{\tau}\right). \quad (1.6)$$

Анализ выражения для бегущей волны НС показывает, что она за период изменения питающей сети пробегает расстояние, равное

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

(p – число пар полюсов). Следовательно, один оборот кругового вращающегося магнитного поля произойдет за pT периодов, а в течение одной минуты мы будем иметь $\frac{60}{pT}$ оборотов вектора НС (индукции) поля, что позволяет представить выражение для скорости вращения кругового поля в виде

$$n_1 = \frac{60}{pT} = \frac{60f_1}{p} \text{ (об/мин.)}, \quad (1.7)$$

где f_1 – частота питающей цепи.

Это выражение показывает, что для обеспечения электрической редукции скорости вращения выходного вала машины достаточно увеличить число пар полюсов p . По конструктивным соображениям значение p не превышает 6.

Основным параметром при исследовании асинхронной машины является скольжение

$$s = \frac{n_1 \pm n_2}{n_1}, \text{ или } s = \frac{\omega_c \pm \omega_p}{\omega_c}, \quad (1.8)$$

где n_1, n_2 – скорости вращения магнитного поля и ротора.

В режиме работы трехфазной асинхронной машины с заторможенным ротором электромагнитные процессы, протекающие в ее обмотках, описываются такой же системой уравнений, что и процессы в трехфазном трансформаторе при симметричной нагрузке.

Однако это еще не позволяет использовать для асинхронной машины схему замещения трансформатора, т.к. при вращении ротора величина ЭДС в его обмотке зависит от скольжения:

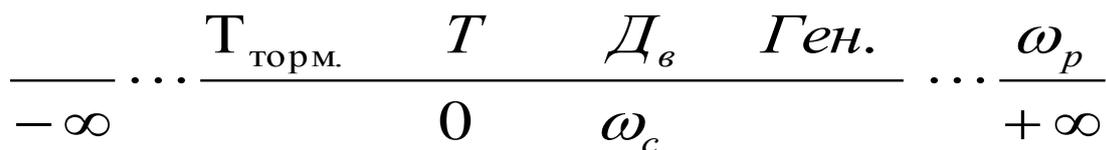
$$E_2' = s E_2, \quad (1.9)$$

где E_2' – величина ЭДС роторной обмотки заторможенной электрической машины.

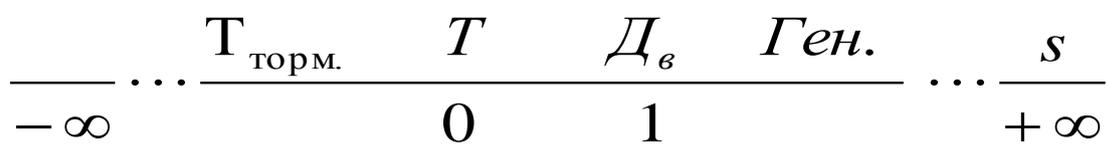
Результатом взаимодействия бегущих волн намагничивающих сил статора и ротора является возникновение магнитного поля в рабочем зазоре машины, посредством которого и обеспечивается электромеханическое преобразование энергии: электрической в механическую энергию и обратно.

В асинхронных (несинхронных) машинах частота вращения ротора не равна частоте вращения поля в воздушном зазоре ($\omega_r \neq \omega_c$). Механическая частота вращения ротора асинхронных машин в установившемся режиме может быть ниже и выше синхронной частоты вращения поля, при этом ротор может вращаться в сторону, противоположную вращению поля.

В зависимости от частоты вращения и направления вращения ротора по отношению к полю различают четыре режима работы асинхронных машин (рис. 1.3). Когда $0 < \omega_r < \omega_c$, имеет место двигательный режим, при $\omega_c < \omega_r < +\infty$ – генераторный режим. В этом режиме ротор вращается в ту же сторону, что и поле, но с большей частотой вращения. В тормозном режиме ротор асинхронной машины вращается в сторону, противоположную вращению поля. Когда асинхронная машина эксплуатируется при неподвижном роторе ($\omega_r = 0$), имеет место трансформаторный режим работы асинхронной машины (рис. 1.3, а).



a



б

Рис. 1.3. Режимы работы асинхронной машины:
a) на шкале частоты вращения; *б*) на шкале скольжения

В теории асинхронных машин широко применяется понятие скольжения – относительной частоты вращения (см. формулу (1.8)). Режимы работы асинхронной машины в функции скольжения представлены на рис. 1.3, б. В двигательном режиме при $0 < s < 1$ асинхронная машина преобразует электрическую энергию в механическую. В генераторном режиме, когда $0 > s > -\infty$, ротор асинхронной машины вращается в сторону вращения поля с частотой, большей синхронной. При этом механическая энергия преобразуется в электрическую энергию. В тормозном режиме механическая и электрическая энергии преобразуются в тепло. Этот режим, как правило, может быть кратковременным и используется для быстрого останова. Трансформаторный режим, когда $s = 1$, используется для регулирования амплитуды и фазы напряжения.

Асинхронные машины получили наибольшее распространение как двигатели. Это основной двигатель, применяемый в промышленности, сельском хозяйстве и в быту. Только асинхронных двигателей единых серий мощностью от 0,06 до 400 кВт в нашей стране ежегодно выпускается несколько миллионов.

Электротехническая промышленность выпускает асинхронные двигатели в большом диапазоне мощностей. Предельная мощность асинхронных двигателей – несколько десятков мегаватт. В индикаторных системах применяются асинхронные двигатели мощностью от долей ватта до сотен ватт. Частота вращения двигателей общего назначения – от 3000 до 500 об/мин.

В генераторном режиме асинхронные машины применяются редко. Для создания поля в зазоре асинхронной машины необходима реактивная мощность, которая забирается из сети или от других источников реактивной мощности. Асинхронные двигатели не могут работать с $\cos \varphi = 1$. Это существенный недостаток асинхронных машин, ограничивающий их применение в генераторном режиме.

При электромеханическом преобразовании энергии в асинхронных машинах, как и в других машинах, происходит преобразование энергии в тепло. Электрические потери в роторе асинхронной машины пропорциональны скольжению:

$$P_{э2} = P_{эм} s, \quad (1.10)$$

где $P_{эм}$ – электромагнитная мощность (мощность в воздушном зазоре машины).

Чаще всего асинхронные машины используются в электроприводах, где допустимо небольшое скольжение ($s = 1 - 4\%$). При глубоком скольжении ($s = 10 - 50\%$) асинхронные машины используются редко, так как в этом случае большая часть мощности, забираемой из сети, преобразуется в тепло, что приводит к низкому КПД и увеличению габаритов асинхронной машины из-за трудностей, связанных с отводом тепла от активных частей машины. Наличие в роторе потерь, пропорционально зависящих от скольжения, – одна из особенностей асинхронных машин, обуславливающих их отличие от других типов электрических машин.

Если обмотки ротора представляют собой замкнутые контуры, то при скольжении $s = 1$ вся мощность, поступающая на ротор, преобразуется в тепло. При скольжении $s = 0$ мощность из сети на ротор не поступает. При скольжениях, отличных от 0 и 1, электромагнитная мощность преобразуется в двигательном режиме в механическую мощность и в тепло, а в генераторном режиме – в электрическую и в тепло.

В конструктивном исполнении асинхронные двигатели наиболее простые, поэтому они получили наибольшее распространение.

1.2. Схемы замещения и энергетическая диаграмма асинхронной машины

Для изображения токов статора и ротора на общих векторных диаграммах в режиме вращения машины нельзя пользоваться их реальными величинами, так как частота изменения тока статора равна частоте питающей сети, а частота тока ротора зависит от скольжения. Поэтому необходимо привести режим работы вращающейся асинхронной машины к эквивалентному режиму при неподвижном роторе. Указанное приведение правомочно, т.к., как было показано выше, бегущие волны НС статора и ротора имеют одну и ту же частоту вращения n_1 , определяемую лишь частотой питающей сети f_1 и числом пар полюсов машины p .

Условием приведения является равенство токов, НС обмоток статора и ротора, а также их фазных сдвигов относительно друг друга. В этом случае сохраняются величины результирующих магнитных потоков, потерь в ферромагнитном сердечнике и активном сопротивлении обмотки статора, величины передаваемой электромагнитным путем мощности и т.д. В неподвижной машине не происходит электромеханического преобразования энергии. Поэтому механическая мощность реальной машины должна быть представлена равной ей электрической мощностью.

Параметры каждой из фаз роторной обмотки можно считать одинаковыми. Это позволяет, используя указанные выше условия приведения, преобразовать схему фазы роторной обмотки асинхронной машины (рис. 1.4, а):

$$x_{p2s} = \omega L_{p2} = 2p f_2 L_{p2} = s 2p f_1 L_{p2} = s x_{p2}, \quad (1.11)$$

здесь x_{p2s} , x_{p2} – индуктивные сопротивления цепи рассеяния ротора в режиме вращения и торможения ротора.

Из этой схемы можно определить ток ротора.

Модуль тока в цепи ротора с учетом (1.9, 1.11) определяется выражением

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{\sqrt{R_2^2 + (s x_{p2})^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + x_{p2}^2}}. \quad (1.12)$$

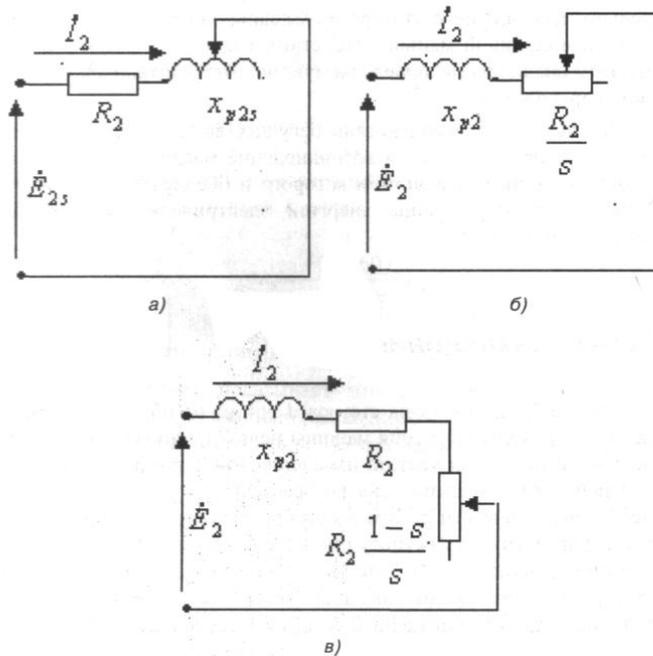


Рис. 1.4. Схемы замещения роторной цепи асинхронной машины

С учетом этого выражения схему замещения роторной цепи асинхронной машины можно представить в виде последовательного соединения

индуктивного сопротивления и активного сопротивления $\frac{R_2}{s}$ (рис. 1.4, б). Здесь ЭДС E_2 и индуктивное сопротивление x_{p2} неизменны, а активное сопротивление меняется в зависимости от скольжения. Это сопротивление можно представить как сумму двух сопротивлений, одно из которых не зависит от скольжения, а другое является функцией скольжения (рис. 1.4, в).

$$\frac{R_2}{s} = R_2 + R_2' \frac{1-s}{s}. \quad (1.13)$$

При этом схема замещения асинхронной машины представляется в виде

рис. 1.5. Электрическая мощность, выделяемая в сопротивлении, равна механической мощности на валу асинхронной машины.

Так же, как и в трансформаторе, штрихи у всех величин свидетельствуют о приведении числа витков ротора к числу витков статора.

На практике, как правило, используется Г-образная схема замещения, в которой контур намагничивания вынесен к цепи источника питания (рис. 1.6).

Коэффициент C , учитывающий замену Г-образной схемы замещения Г-образной, для асинхронных двигателей общего применения равен 1,01-1,05. Очень часто полагают $C = 1$, что существенно облегчает расчеты и мало сказывается на точности результатов.

Схема замещения (рис. 1.6) используется при расчете характеристик асинхронной машины.

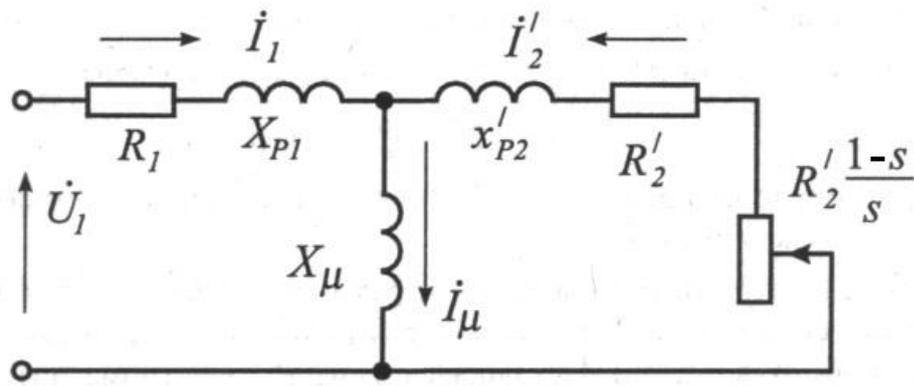


Рис. 1.5. Схема замещения асинхронной машины

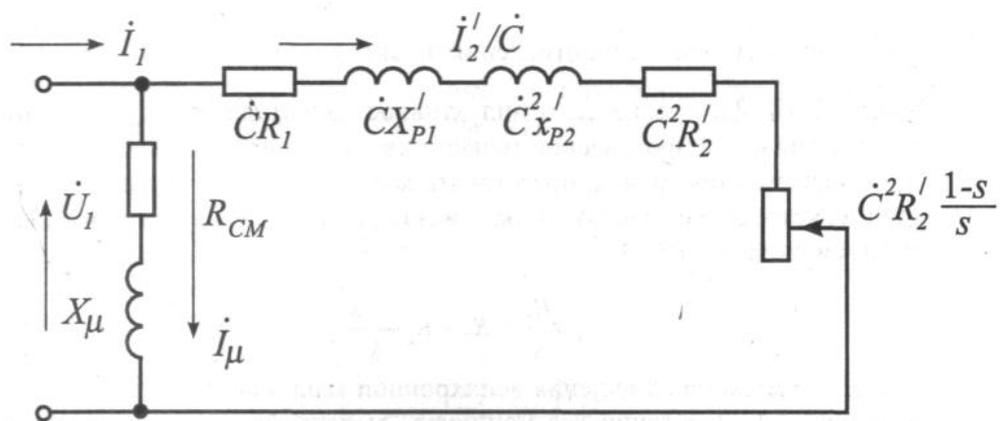


Рис. 1.6. Г-образная схема замещения асинхронной машины

Энергетическая диаграмма работы машины в режиме двигателя изображена на рис. 1.7.

В двигательном режиме происходит электромеханическое преобразование электрической энергии, потребляемой из питающей сети, в механическую энергию на валу ротора двигателя. Передача энергии в схеме рис. 1.7, а происходит слева направо.

Мощность, потребляемая двигателем из сети, равна

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1 \quad (1.14)$$

(m_1 – число фаз двигателя; u_1 , I_1 , φ_1 – напряжение, ток фазы и угол сдвига между ними).

Часть потребляемой мощности расходуется на потери в ферромагнитном сердечнике $P_{см}$, другая часть расходуется на активные потери $P_{эл}$ в обмотке статора. Оставшаяся часть $P_{эм}$ электромагнитным путем передается в ротор, где за вычетом потерь в активном сопротивлении ротора и механических потерь (определяемых трением в подшипниках и потерями на вентиляцию машины), обеспечивает выходную мощность P_2 на валу двигателя.

Мощность потерь в ферромагнитном сердечнике ротора не учитывается, т.к. она пренебрежимо мала вследствие низкой величины частоты изменения ЭДС и тока ротора, определяемой выражением

$$f_2 = s f_1, \quad (1.15)$$

f_1 – частота питающей сети).

Энергетическая диаграмма позволяет получить выражение для момента машины:

$$P_{эл2} = P_{эм} - P_{мех} = M \omega_1 - M \omega_2 = s M \omega_1 ;$$

$$M = \frac{P_{эл2}}{s \omega_1} = \frac{m I_2^{*2} R_2}{s \omega_1}. \quad (1.16)$$

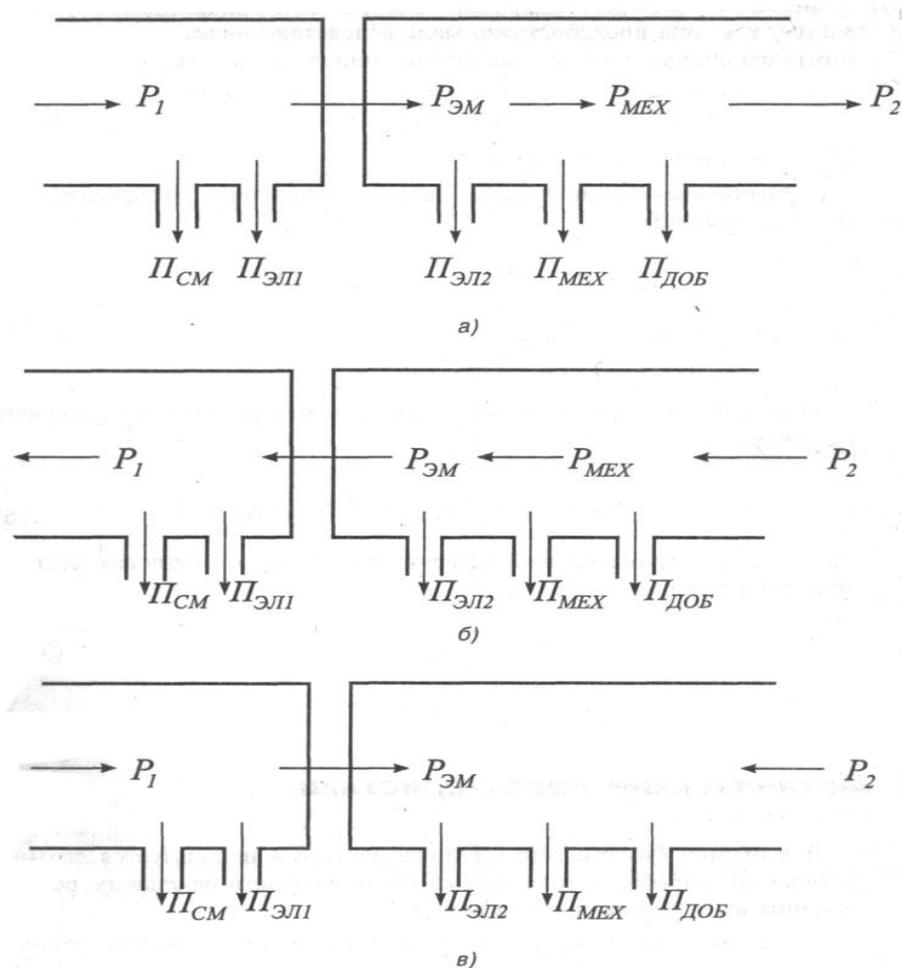


Рис. 1.7. Энергетическая диаграмма работы асинхронной машины в режимах: двигателя (а), генератора (б) и противовключения (в)

Очевидно, что механическая мощность может быть представлена выражением

$$P_{мех} = P_2 = m_2 I_2^{*2} R_2' \frac{1-s}{s} M \omega, \quad (1.17)$$

где M – электромагнитный момент двигателя, ω – угловая частота вращения ротора:

$$\omega = \frac{\pi n_2}{30} = (1-s)2\pi f_1. \quad (1.18)$$

1.3. Механические характеристики

Для оценки свойств асинхронного двигателя используется его механическая характеристика (зависимость скорости вращения ротора машины n_2 от вращающего момента M).

Из схемы замещения (рис. 1.6) находим выражение для тока ротора:

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{CR_2'}{s}\right) + (x_{p1} + Cx_{p2}')^2}}. \quad (1.19)$$

Подставив (1.19) в (1.16), получим

$$M = \frac{m_2 U_1^2 R_2'}{s \omega_1 \left[\left(R_1 + \frac{CR_2'}{s} \right) + (x_{p1} + Cx_{p2}')^2 \right]}. \quad (1.20)$$

Для машин с мощностью более 10 кВт величину C можно считать равной 1, тогда

$$M = \frac{m_2 U_1^2 R_2'}{s \omega_1 \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right) + (x_{p1} + x_{p2}')^2 \right]}. \quad (1.21)$$

Скольжение, при котором момент достигает максимального значения, называется критическим и обозначается через $s_{кр}$. Величины максимального момента и критического скольжения можно определить, взяв производную от момента по скольжению.

$$M_{\max} = \frac{m_2 U_1^2}{2\omega_1 (x_{p1} + x_{p2}')}; \quad (1.22)$$

$$s_{кр} = \frac{R_2'}{\sqrt{R_2'^2 + (x_{p1} + x_{p2}')^2}}. \quad (1.23)$$

Часто при анализе пользуются формулой Клосса, которая устанавливает связь между искомым значением момента асинхронной машины, ее максимальным значением $M_{\text{макс}}$, критическим скольжением $s_{\text{кр}}$ и скольжением s :

$$M = M_{\text{макс}} = \frac{2 + as_{\text{кр}}}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s} + as_{\text{кр}}}, \quad (1.24)$$

где $a = 2R_1/CR_2'$ – коэффициент, учитывающий соотношение активных сопротивлений статорной и роторной обмоток асинхронной машины.

При значениях $s_{\text{кр}}$, не выходящих за пределы диапазона значений 0,15-0,3, можно воспользоваться упрощенной формулой Клосса (ошибка при этом составляет 10-17%):

$$M = \frac{2M_{\text{макс}}}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}}. \quad (1.25)$$

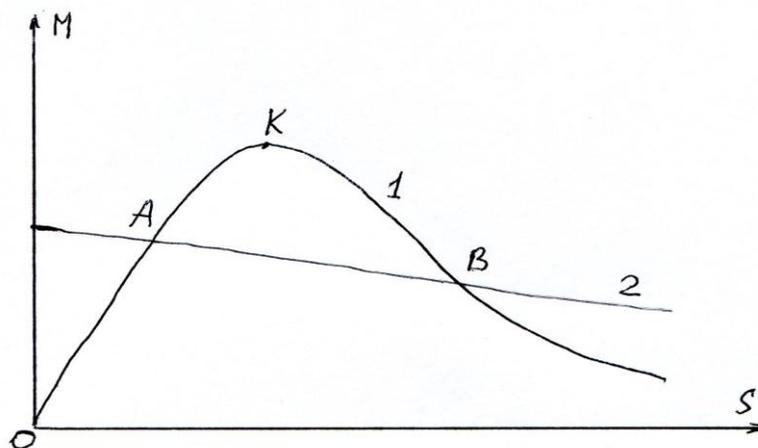


Рис. 1.8. Зависимость момента от скольжения: 1 – механическая характеристика двигателя; 2 – механическая характеристика нагрузки

Построив кривую $M = f(s)$ (рис. 1.8) и используя выражение для скольжения (1.8), можно получить механическую характеристику $n_2 = f(M)$ (рис. 1.9, а).

Из уравнений (1.22, 1.23) следует, что максимальный момент машины не зависит от сопротивления цепи ротора, тогда как критическое скольжение является функцией этого сопротивления. Отмеченная зависимость позволяет регулировать пусковой момент асинхронного двигателя с фазным ротором, изменяя добавочное сопротивление $R_{\text{д}}$, включенное последовательно с сопротивлением обмотки ротора (рис 1.9, б).

При $R_d = 0$ механическую характеристику асинхронной машины с фазным ротором называют естественной, при $R_d \neq 0$ – искусственной.

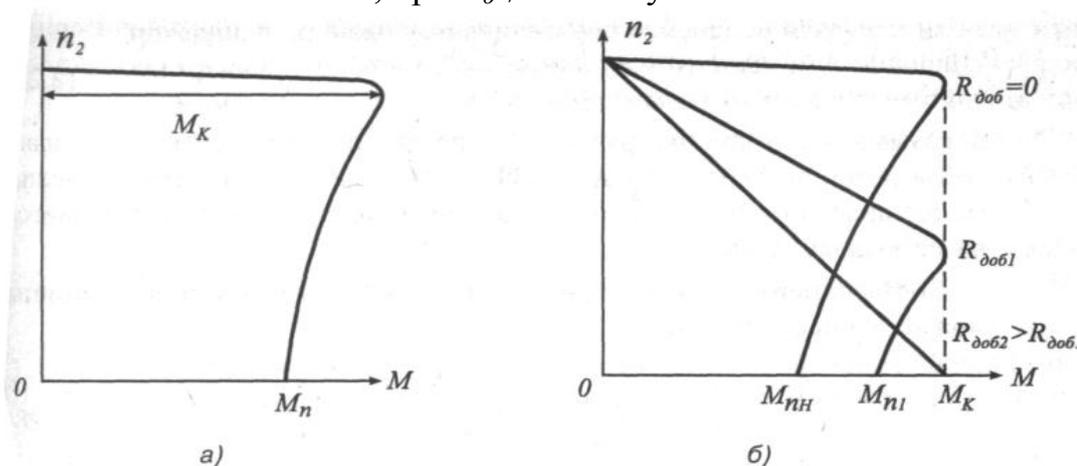


Рис. 1.9. Механическая характеристика асинхронной машины (а) и механические характеристики асинхронной машины с фазовым потоком (б)

Из выражения (1.20) следует, что величина момента асинхронной машины пропорциональна квадрату питающего напряжения. При снижении питающего напряжения на 30% величина момента падает почти в 2 раза, а при его увеличении на такую же величину токи статора и ротора (вследствие расположения рабочей точки вблизи насыщения основной кривой намагничивания машины) возрастают настолько, что электрическая машина перегревается и выходит из строя даже в режиме холостого хода. Поэтому, согласно ГОСТ 13109-97, изменение напряжения в электрических сетях, питающих силовое оборудование, должно быть в пределах $\pm 5\%$. При изменении частоты питающего напряжения согласно выражению (1.22) максимальный момент асинхронной машины падает.

1.4. Коэффициент полезного действия асинхронного двигателя

Электромагнитная мощность связана с параметрами цепи ротора следующим образом:

$$P_{эм} = m_2 E_2 I_2 \cos \varphi_2 = m_2 \frac{E_2}{s} I_2 \cos \varphi_2. \quad (1.26)$$

С учетом выражения $E_{2s} \cos \varphi_2 = I_2 R_2$ можно записать

$$P_{эм} = m_2 \frac{E_2^2 I_2}{s}. \quad (1.27)$$

$$\frac{P_{мех}}{P_{эл2}} = \frac{1-s}{s}. \quad (1.28)$$

Соотношение между механической мощностью и потерями в сопротивлении ротора показывает, что при заторможенном роторе вся мощность, передаваемая в ротор электромагнитным путем, превращается в тепло. В режиме же вращения ротора машины большая часть мощности передается на ее выходной вал.

Коэффициент полезного действия (КПД) асинхронной машины можно записать в виде

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\sum \Pi}{P_2 + \sum \Pi}. \quad (1.29)$$

Полные потери определяются из выражения

$$\sum \Pi = \Pi_{эл1} + \Pi_{эл2} + \Pi_{см} + \Pi_{мех}. \quad (1.30)$$

Составляющие потерь $\Pi_{эл1}$, $\Pi_{эл2}$, $\Pi_{см}$ аналогичны потерям в трансформаторе. Потери $\Pi_{мех}$ соответствуют потерям мощности на трение в подшипниках и на вентиляцию электрической машины.

Согласно ГОСТ для номинального режима работы машины механические потери составляют 0,1-0,5% выходной мощности.

1.5. Устойчивость работы асинхронного двигателя

Устойчивость работы двигателя – его способность восстанавливать свое первоначальное состояние при воздействии возмущений по сети и по нагрузке.

Согласно уравнению динамики электромеханической системы,

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1.31)$$

(M_c , J , ω – статический момент нагрузки на валу машины, ее момент инерции и скорость вращения).

Машина находится в состоянии покоя либо вращения с постоянной скоростью при условии $M = M_c$. Из зависимости $M = f(s)$ (рис. 1.8) видно, что электромеханическая система имеет две точки равновесия, А и В. При этом в точке В она находится в неустойчивом равновесии, т.к. даже незначительное изменение нагрузки на валу машины приведет либо к ее остановке ($n = 0$), либо к увеличению скорости до момента, пока положение системы не будет соответствовать точке А, которая характеризует устойчивое состояние (при кратковременном изменении нагрузки система будет стремиться вернуться к своему первоначальному состоянию).

Нетрудно заметить, что участок ОК обладает свойством саморегулирования, остальная же часть кривой таким свойством не обладает.

Максимальный момент двигателя принято называть опрокидывающим моментом, т.к., когда двигатель работает при величинах момента нагрузки, меньших максимального момента, но близких к нему, случайная перегрузка двигателя приведет к его остановке. Поэтому на практике выбирают двигатель такой мощности, при которой выполняется неравенство

$$\frac{M_{\text{макс}}}{M_n} \geq 1,7, \quad (1.32)$$

т.е. при выборе мощности двигателя предусматривается запас по мощности не менее 70%.

1.6. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

В качестве рабочих характеристик приняты зависимости (рис. 1.10):

- скорости вращения ротора $n_2 = f(P_2)$;
- вращающего момента на валу машины $M_2 = f(P_2)$;
- тока статора $I_1 = f(P_2)$;
- коэффициента полезного действия $\eta = f(P_2)$;
- коэффициента мощности $\cos \varphi_1 = f(P_2)$.

Диапазон рабочих характеристик асинхронного двигателя соответствует его зоне устойчивой работы $0 \leq s \leq 1,2$.

Эти характеристики позволяют находить все основные величины, которые определяют режим работы двигателя при различных нагрузках. Их можно получить либо расчетным путем по схеме замещения, либо экспериментально.

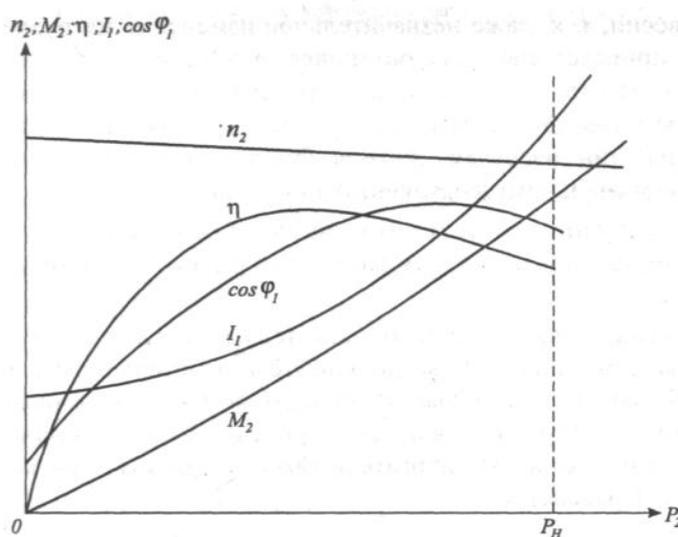


Рис. 1.10. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

1.7. Генераторный режим

Асинхронная машина работает в генераторном режиме, если вал ее ротора вращать каким-либо другим двигателем (постоянного или переменного тока, внутреннего сгорания и т.п.) в направлении и со скоростью, превышающей скорость вращения магнитного поля. Величина скольжения машины, очевидно, в этом случае будет отрицательной. По условиям механической прочности, ограничения потерь, нагрева и сохранения высокого КПД в генераторном

режиме возможны значения абсолютных величин скольжения такого же порядка, как и в двигательном. Энергетическая диаграмма асинхронной машины в генераторном режиме представлена на рис. 1.7, б.

Асинхронная машина в генераторном режиме отдает активную мощность $P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1 < 0$ в сеть, преобразуя механическую энергию приводного двигателя в электрическую энергию питающей сети.

Реактивная мощность асинхронного генератора положительна $Q_1 = m_1 U_1 I_1 \sin \varphi_1 > 0$.

Это означает, что как в режиме двигателя, так и в режиме генератора асинхронная машина потребляет реактивную мощность из питающей сети, что указывает на необходимость использования в этих случаях источника реактивной мощности (синхронные генераторы, компенсаторы, или конденсаторы).

1.8. Режим противовключения

В этом случае подводимая из первичной сети электрическая энергия обеспечивает вращение кругового магнитного поля против направления вращения вала ротора машин, вследствие чего $1 < s < \infty$. Практически величина скольжения лежит в пределах $1 < s < 2$. Электрическая машина в режиме противовключения потребляет как электрическую мощность из питающей сети, так и механическую мощность с вала ротора. Поэтому температурный режим является самым напряженным, что говорит о необходимости использования режима противовключения лишь в короткие промежутки времени, до перегрева машины. Сказанное иллюстрируется энергетической диаграммой (рис. 1.7, в). Этот режим наблюдается при реверсе двигателя, а также в тех случаях, когда необходимо замедлить либо быстро остановить вращение производственного механизма. Механическая мощность в данном случае развивается за счет кинетической энергии вращающихся масс производственного механизма и ротора машины.

1.9. Режим динамического торможения

Так же, как и режим противовключения, режим динамического торможения используется для ускорения процесса превращения запасенной во всех движущихся частях электропривода кинетической энергии в энергию тепловую. В отличие от режима противовключения в этом случае в рабочем зазоре создается неподвижное в пространстве магнитное поле, для чего статорную обмотку асинхронной машины подключают к источнику постоянного напряжения. При вращении ротора в неподвижном поле в его обмотках наводится ЭДС и протекает ток. Взаимодействие этого тока и потока статора приводит к появлению тормозного момента. Очевидно, что величину тормозного момента можно регулировать либо включением в цепь ротора регулировочного реостата, либо изменением величины постоянного тока, протекающего по обмоткам статора.

1.10. Способы пуска асинхронных двигателей

При рассмотрении возможных способов пуска в ход асинхронных двигателей необходимо учитывать следующее.

1. Двигатель должен развивать при пуске надлежащий пусковой момент, который должен быть больше статического момента сопротивления на валу, чтобы ротор двигателя мог прийти во вращение и достичь номинальной частоты вращения.

2. Пусковой ток должна быть ограничен таким значением, чтобы не происходило повреждения двигателя и нарушения нормального режима работы сети.

3. Схема пуска должна быть по возможности простой, а количество и стоимость пусковых устройств – малыми.

При пуске асинхронного двигателя на холостом ходе к ротору подключается значительная электромагнитная энергия, преобразуемая в кинетическую энергию вращающихся масс агрегата. При пуске под нагрузкой количество подключаемой электромагнитной энергии соответственно увеличивается. Естественно, что при этом оказывается значительным тепловыделение от электрических потерь в обмотках статора и ротора. При частых пусках, а также при тяжелых условиях пуска, когда маховые массы приводимых в движение механизмов велики, возникает опасность перегрева обмоток двигателя. Число пусков асинхронного двигателя в час, допустимое по условиям его нагрева, тем больше, чем меньше номинальная мощность двигателя и чем меньше соединенные с его валом маховые массы. Двигатели мощностью 3...10 кВт в обычных условиях допускают до 5...10 включений в час.

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором проще по устройству и обслуживанию, а также дешевле и надежнее в работе, чем фазные двигатели. Поэтому подавляющее большинство находящихся в эксплуатации асинхронных двигателей – это двигатели с короткозамкнутым ротором.

1.10.1. Прямой пуск

Наиболее простым способом пуска асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором является включение обмотки его статора непосредственно в сеть, на номинальное напряжение обмотки статора (рис. 1.11, а). Такой пуск называется *прямым*. При этом пусковой ток двигателя $I_{\pi} = (4...7) I_{н}$.

Современные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором проектируются с таким расчетом, чтобы они по величине возникающих при пуске электродинамических усилий, действующих на обмотки, и по условиям нагрева обмоток допускали прямой пуск. Поэтому прямой пуск всегда возможен, когда сеть достаточно мощна и пусковые токи двигателей не вызывают недопустимо больших падений напряжений в ней (не более 10...15%). Современные энергетические системы, сети и сетевые трансформаторные подстанции обычно имеют такие мощности, так что в

подавляющем большинстве случаев прямой пуск асинхронных двигателей возможен.

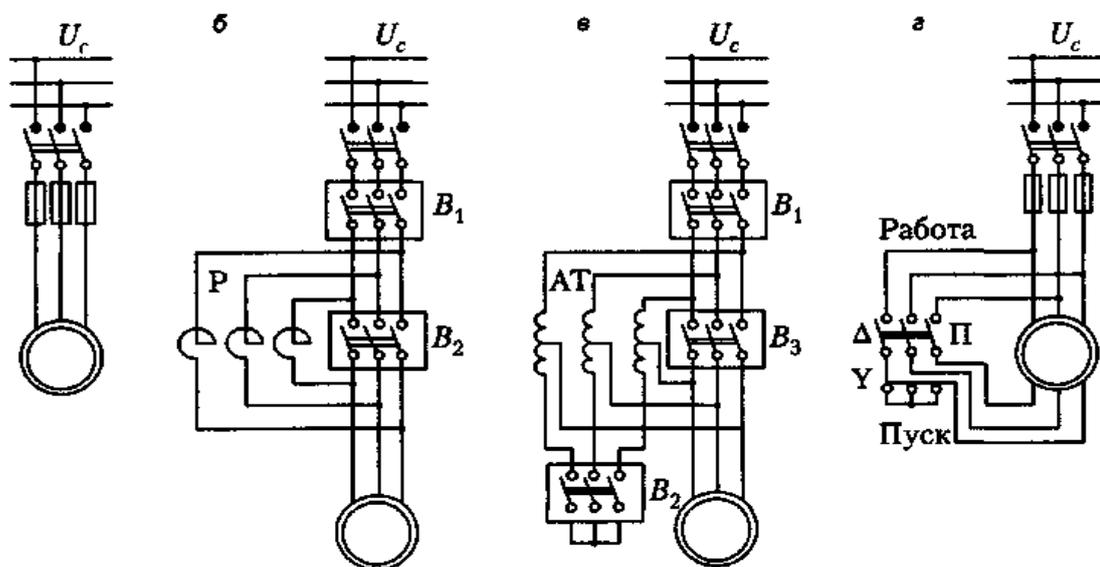


Рис. 1.11. Схемы способов пуска асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором: а) прямой; б) реакторный; в) автотрансформаторный; г) с переключением со «звезды» на «треугольник»

Если по условиям падения напряжения в сети прямой пуск асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором невозможен, то применяются различные способы пуска двигателя при пониженном напряжении (рис. 1.11, б, в и г). Однако при этом пропорционально квадрату напряжения на зажимах обмотки статора двигателя понижается также пусковой момент, что является недостатком пуска при пониженном напряжении. Поэтому эти способы пуска применимы, когда возможен пуск двигателя на холостом ходу или под неполной нагрузкой. Необходимость пуска при пониженном напряжении встречается чаще всего у мощных высоковольтных двигателей.

1.10.2. Реакторный пуск

Осуществляется согласно схеме, приведенной на рис. 1.11, б. Сначала включается выключатель B_1 , и двигатель получает питание через трехфазный реактор (реактивную или индуктивную катушку) P , сопротивление которого x_p ограничивает величину пускового тока. По достижении нормальной частоты вращения включается выключатель B_2 , который шунтирует реактор, в результате чего на двигатель подается нормальное напряжение сети.

Пусковые реакторы строятся обычно с ферромагнитным сердечником и рассчитываются по нагреву только на кратковременную работу, что позволяет снизить их массу и стоимость. В двигателях большой мощности применяются также реакторы без ферромагнитного сердечника с обмотками, укрепленными на бетонном каркасе. Выключатель B_1 выбирается на такую отключающую

мощность, которая позволяет отключить двигатель при глухом коротком замыкании за выключателем, а выключатель B_2 может иметь низкую отключающую мощность.

Если составляющие сопротивления короткого замыкания двигателя равны r_k и x_k , то начальный пусковой ток при прямом пуске

$$I_{п.п} = \frac{U_n}{\sqrt{r_k^2 + x_k^2}}, \quad (1.33)$$

а при реакторном пуске (активным сопротивлением реактора пренебрегают)

$$I_{п.р} = \frac{U_n}{\sqrt{r_k^2 + (x_k + x_p)^2}}. \quad (1.34)$$

Следовательно, при реакторном пуске начальный пусковой ток уменьшается в

$$\frac{I_{п.п}}{I_{п.р}} = \sqrt{\frac{r_k^2 + (x_k + x_p)^2}{r_k^2 + x_k^2}} \quad (1.35)$$

раз. Во столько же раз уменьшается напряжение на зажимах двигателя в начальный момент пуска. Начальный пусковой момент при реакторном пуске $M_{п.р}$ уменьшается по сравнению с моментом при прямом пуске $M_{п.п}$ в

$$\frac{M_{п.п}}{M_{п.р}} = \frac{r_k^2 + (x_k + x_p)^2}{r_k^2 + x_k^2} \quad \text{раз.} \quad (1.36)$$

1.10.3. Автотрансформаторный пуск

Осуществляется по схеме, приведенной на рис. 1.11, в, в следующем порядке. Сначала включаются выключатели B_1 и B_2 , и на двигатель через автотрансформатор АТ подается пониженное напряжение. По достижении двигателем определенной частоты вращения выключатель B_2 отключается, и двигатель получает питание через часть обмотки автотрансформатора АТ, который в этом случае работает как реактор. Наконец включается выключатель B_3 , в результате чего двигатель получает полное напряжение.

Выключатель B_1 должен быть рассчитан на отключающую мощность при коротком замыкании, а выключатели B_2 и B_3 могут иметь меньшие отключающие мощности. 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 и 45, 36 и 27% при обратной схеме включения (рис. 1.12).

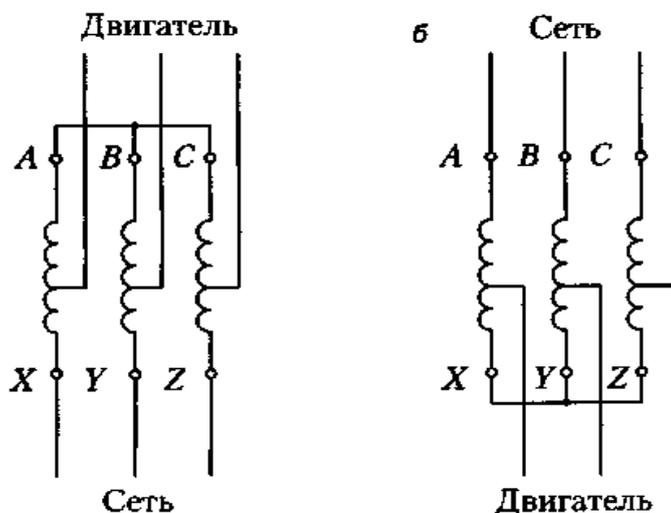


Рис. 1.12. Схемы включения пусковых автотрансформаторов:
а) прямая; б) обратная

Если пусковой автотрансформатор понижает пусковое напряжение двигателя в $k_{ат}$ раз, то пусковой ток в двигателе или на стороне низкого напряжения трансформатора $I_{п.д}$ уменьшается также в $k_{ат}$ раз, а пусковой ток на стороне высокого напряжения автотрансформатора или в сети $I_{п.с}$ уменьшается в $k_{ат}^2$ раз. Пусковой момент $M_{п}$, пропорциональный напряжению на зажимах двигателя, уменьшается также в $k_{ат}^2$ раз.

Таким образом, из-за разницы в величинах $I_{п.с}$ и $I_{п.д}$ ($I_{п.с} < I_{п.д}$) автотрансформаторный пуск оказывается более благоприятным для сети, чем реакторный, если сравнение пусков производится при одинаковых $M_{п}$. Если же сравнивать условия пуска при одинаковых значениях $I_{п.с}$, то пусковой момент $M_{п.ат}$ при автотрансформаторном пуске будет в $k_{ат}^2$ раз больше, чем при реакторном.

Однако это преимущество автотрансформаторного пуска достигается ценой значительного усложнения и удорожания пусковой аппаратуры. Поэтому автотрансформаторный пуск применяется реже реакторного, при более тяжелых условиях, когда реакторный пуск не обеспечивает необходимого пускового момента.

1.10.4. Пуск переключением – «звезда» – «треугольник»

Пуск переключением – «звезда» – «треугольник» (рис. 1.11, з) 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 380/220 В, с соединением обмоток Y/A, работает от сети 220 В. В этом случае при пуске обмотка статора включается в «звезду»

(нижнее положение переключателя П), а при достижении нормальной частоты вращения переключается в «треугольник» (верхнее положение переключателя П). При таком способе пуска по сравнению с прямым пуском 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 обмотки уменьшается в $\sqrt{3}$ раз, а в сети – в $\sqrt{3} \cdot \sqrt{3} = 3$ раза. Таким образом, рассматриваемый способ пуска равноценен автотрансформаторному пуску при $k_{ат} = \sqrt{3}$.

Недостатком этого способа пуска по сравнению с реакторным и автотрансформаторным является то, что при пусковых переключениях цепь двигателя разрывается, а это связано с возникновением коммутационных перенапряжений. Этот способ ранее широко применялся при пуске низковольтных двигателей, однако с увеличением мощности сетей потерял свое прежнее значение и в настоящее время используется довольно редко.

1.10.5. Пуск двигателя с фазным ротором с помощью пускового реостата

Двигатели с фазным ротором применяются значительно реже асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Они используются в следующих случаях:

- 1) когда асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором неприемлемы по условиям регулирования их частоты вращения;
- 2) когда статический момент сопротивления на валу при пуске M_{cm} велик, и поэтому асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором с пуском при пониженном напряжении неприемлем, а прямой пуск такого двигателя недопустим по условиям воздействия больших пусковых токов на сеть;
- 3) когда приводимые в движение массы настолько велики, что выделяемая во вторичной цепи двигателя тепловая энергия вызывает недопустимый нагрев обмотки ротора асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.

Пуск фазных двигателей производится с помощью пускового реостата в цепи ротора. Применяются проволочные, с литыми чугунными элементами, а также жидкостные реостаты. По условиям нагрева реостаты рассчитываются на кратковременную работу.

Сопротивления металлических реостатов для охлаждения обычно помещают в бак с трансформаторным маслом. Металлические реостаты являются ступенчатыми, а переключение с одной ступени на другую осуществляется либо вручную, с помощью рукоятки контроллера, существенным элементом которого является вал с укрепленными на нем контактами, либо же автоматически, с помощью контакторов или контроллера с электрическим приводом.

Жидкостный реостат представляет собой сосуд с электролитом (например, водным раствором соды или поваренной соли), в который опущены электроды.

Сопротивление реостата регулируется изменением глубины погружения электродов.

Рассмотрим пуск фазного двигателя с помощью ступенчатого металлического реостата (рис. 1.13), управляемого контакторами K .

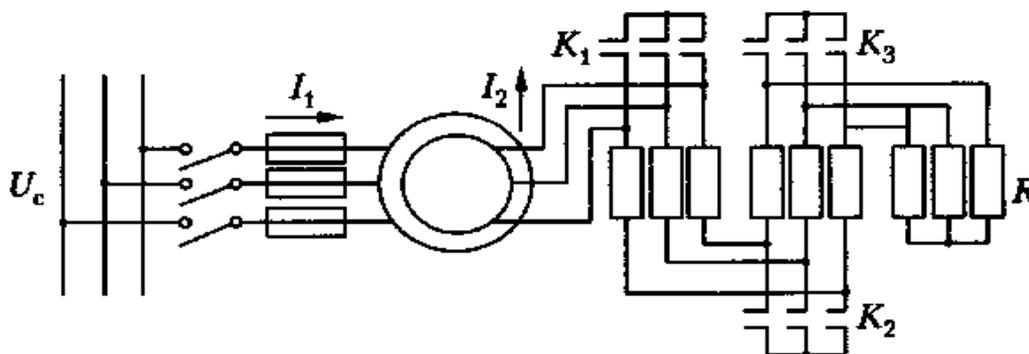


Рис. 1.13. Схема пуска асинхронного двигателя с помощью пускового реостата

Перед пуском щетки должны быть опущены на контактные кольца ротора, а все ступени реостата включены. Далее в процессе пуска поочередно включаются контакторы K_3 , K_2 , K_1 . Характеристики вращающего момента двигателя $M = f(s)$ и вторичного тока $I_2 = f(s)$ при работе на разных ступенях реостата изображены на рис. 1.14, *a* и *б* соответственно.

Предположим, что сопротивления ступеней пускового реостата и интервалы времени переключения ступеней подобраны так, что момент двигателя M при пуске меняется в пределах от некоторого M_{max} до некоторого M_{min} и при включении в сеть $M_n = M_{max} > M_{cm}$ (кривая 3 на рис. 1.14, *a*). В начале пуска двигатель работает по характеристике 3, ротор приходит во вращение, скольжение s начинает уменьшаться, и при $s = s_3$, когда $M = M_{min}$, производится переключение реостата на ступень 2. При этом двигатель будет работать по характеристике 2, и при дальнейшем разбеге двигателя скольжение уменьшится от $s = s_3$ до $s = s_2$, а момент – от значения $M = M_{max}$ до $M = M_{min}$. Затем производится переключение на ступень 1 и т.д. После выключения последней ступени реостата двигатель переходит на работу по естественной характеристике 0 и достигает установившейся частоты вращения.

При наличии у двигателя короткозамыкающего механизма после окончания пуска щетки с помощью этого механизма поднимаются с контактных колец, и кольца замыкаются накоротко, а реостат возвращается в пусковое положение. Тем самым пусковая аппаратура приводится в готовность к следующему пуску. Необходимо отметить, что дистанционное управление короткозамыкающим механизмом контактных колец сложно осуществить – это затрудняет автоматическое управление двигателем.

Пусковые характеристики асинхронного двигателя при реостатном пуске наиболее благоприятны, так как высокие значения моментов достигаются при невысоких значениях пусковых токов.

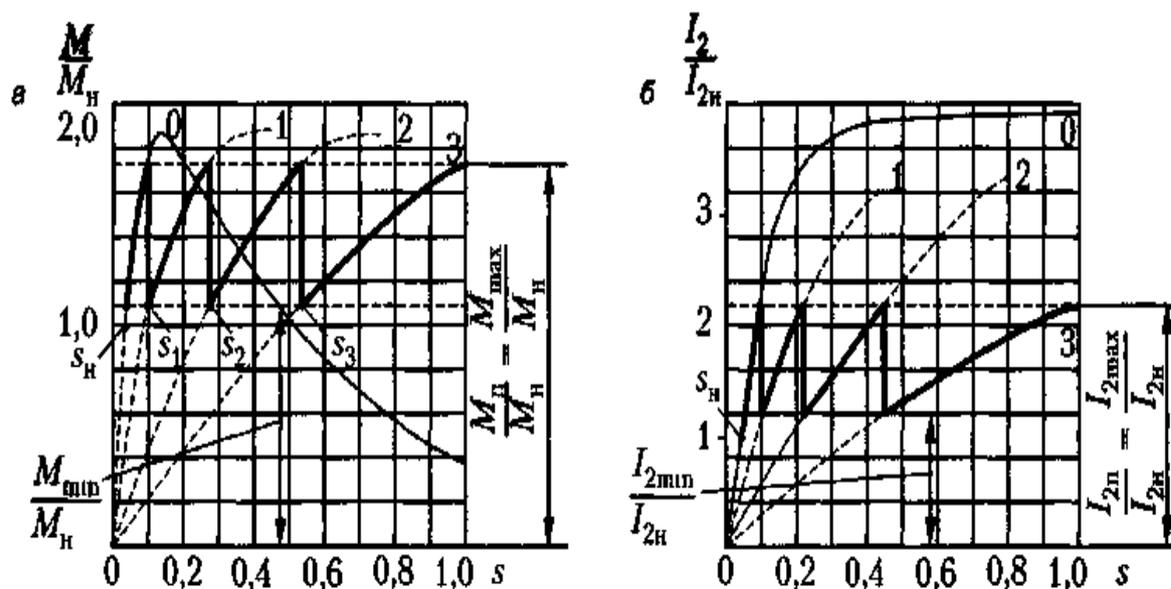


Рис. 1.14. Последовательные изменения при реостатном пуске асинхронного двигателя: а) вращающего момента; б) тока

1.10.6. Самозапуск асинхронных двигателей

В электрических сетях в результате коротких замыканий случаются кратковременные, длительностью до нескольких секунд, значительные понижения напряжения или перерывы питания.

Включенные в сеть асинхронные двигатели при этом начинают затормаживаться и чаще всего полностью останавливаются. При восстановлении напряжения начинается одновременный самозапуск не отключившихся от сети двигателей. Он способствует быстрейшему восстановлению нормальной работы производственных механизмов и поэтому целесообразен, а в ряде случаев даже чрезвычайно желателен.

Однако одновременный самозапуск большого количества асинхронных двигателей загружает сеть весьма большими токами, что вызывает в ней большие падения напряжения и задерживает процесс восстановления нормального напряжения. Время самозапуска двигателей при этом увеличивается, а в ряде случаев пусковой момент недостаточен для пуска двигателя. Кроме того, самозапуск отдельных двигателей в подобных условиях недопустим или невозможен (например, двигатели с фазным ротором с пуском с помощью реостата и асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором с пуском с помощью реакторов и автотрансформаторов, не снабженные специальной автоматической аппаратурой для автоматического самозапуска).

Поэтому целесообразно использовать возможность самозапуска только для двигателей наиболее ответственных производственных механизмов, а все остальные двигатели снабдить релейной защитой для их отключения от сети при глубоких падениях напряжения. Самозапуск широко применяется для асинхронных двигателей механизмов электрических станций.

1.11. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором

Частота вращения ротора асинхронного двигателя

$$n = n_1(1 - s). \quad (1.37)$$

Способы регулирования частоты вращения асинхронных двигателей, согласно выражению (1.37), можно подразделить на два класса:

1) регулирование частоты вращения первичного магнитного поля

$$n_1 = \frac{f_1}{p}, \quad (1.38)$$

что достигается либо регулированием первичной частоты f_1 либо изменением числа пар полюсов p двигателя;

2) регулирование скольжения двигателя s при $n_1 = \text{const}$.

В первом случае КПД двигателя остается высоким, а во втором случае КПД снижается тем больше, чем больше s , так как при этом мощность скольжения теряется во вторичной цепи двигателя.

$$P_s = s P_{\text{эм}}. \quad (1.39)$$

Рассмотрим основные способы регулирования частоты вращения.

1.11.1. Регулирование частоты вращения изменением первичной частоты

Частотное регулирование требует применения источников питания с регулируемой частотой (синхронные генераторы с переменной частотой вращения, ионные или полупроводниковые преобразователи частоты и др.). Поэтому этот способ регулирования используется главным образом в случаях, когда для целых групп двигателей необходимо повышать ($n > 3000$ об./мин.) частоты вращения (например, ручной металлообрабатывающий инструмент, некоторые механизмы деревообрабатывающей промышленности и др.). С развитием полупроводниковых преобразователей частоты все более перспективным становится индивидуальное частотное регулирование частоты вращения двигателей.

Если пренебречь относительно небольшим падением напряжения в первичной цепи асинхронного двигателя, то

$$U_1 = E_1 = 4,44 f_1 w_1 k_{\text{об1}} \Phi_{\delta}. \quad (1.40)$$

Существенное изменение потока Φ_{δ} при регулировании n нежелательно, так как Φ_{δ} , превышающий нормальный, вызывает увеличение насыщения магнитной цепи и сильное увеличение намагничивающего тока, а уменьшение Φ_{δ} вызывает недоиспользование машины, уменьшение перегрузочной способности и увеличение тока I_2 при неизменном значении M . Поэтому в большинстве случаев целесообразно поддерживать $\Phi_{\delta} = \text{const}$. При этом из соотношения (1.40) следует, что одновременно с регулированием частоты

необходимо пропорционально ей изменять напряжение, то есть поддерживать

$$\frac{U_1}{f_1} = const. \quad (1.41)$$

Отступление от этого правила целесообразно только в случаях, когда $M_{ст}$ быстро уменьшается с уменьшением n (например, в приводах вентиляторов, когда $M_{ст} \sim n^2$). В этом случае более быстрое уменьшение U_1 по сравнению с f_1 улучшает энергетические показатели двигателя ($\cos \varphi_1$ и КПД).

1.11.2. Регулирование частоты вращения изменением числа пар полюсов

Регулирование частоты вращения изменением числа пар полюсов p используется только для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, так как при этом требуется изменять p только для обмотки статора. Изменять p можно двумя способами:

- 1) применением на статоре нескольких обмоток, которые уложены в общих пазах и имеют разные числа пар полюсов p ;
- 2) применением обмотки специального типа, которая позволяет получить различные значения p изменением (переключением) схемы соединений обмотки.

Предложено значительное количество различных схем обмоток с переключением числа полюсов, однако широкое распространение получили только некоторые. Применение нескольких обмоток невыгодно, так как при этом из-за ограниченного места в пазах сечение проводников каждой из обмоток нужно уменьшить, что приводит к снижению мощности двигателя. Использование обмоток с переключением числа полюсов вызывает усложнение коммутационной аппаратуры, в особенности если с помощью одной обмотки желают получить более двух частот вращения или две частоты вращения, отношение которых не равно двум.

Двигатели с изменением числа пар полюсов называются *многоскоростными*. Они обычно выпускаются на 2, 3 или 4 частоты вращения, причем двухскоростные двигатели изготавливаются с одной обмоткой на статоре и с переключением числа пар полюсов в отношении $p_2 : p_1 = 2:1$, трехскоростные двигатели – с двумя обмотками на статоре, из которых одна выполняется с переключением $p_2 : p_1 = 2:1$, четырехскоростные двигатели – с двумя обмотками на статоре, каждая из которых выполняется с переключением числа полюсов в отношении 2:1.

Масса и стоимость многоскоростных двигателей несколько больше, чем те же характеристики нормальных асинхронных двигателей такой же мощности. Тем не менее, их использование – это лучший и наиболее широко применяемый способ регулирования частоты вращения асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.

1.11.3. Регулирование частоты вращения уменьшением напряжения

При уменьшении U_1 момент двигателя изменяется пропорционально U_1^2 и соответственно изменяются механические характеристики (рис. 1.15), в результате чего изменяются также значения рабочих скольжений $s_1, s_2, s_3 \dots$ при данном виде зависимости $M_{ст} = f(s)$. Очевидно, что регулирование s в этом случае возможно в пределах $0 < s < s_m$.

Для получения достаточно большого диапазона регулирования частоты вращения необходимо, чтобы активное сопротивление цепи ротора и, соответственно, s были довольно велики (рис. 1.15, б). Следует учитывать, что при повышенных скольжениях во вторичной цепи увеличиваются потери, равные мощности скольжения P_s и вызывающие повышенный нагрев ротора.

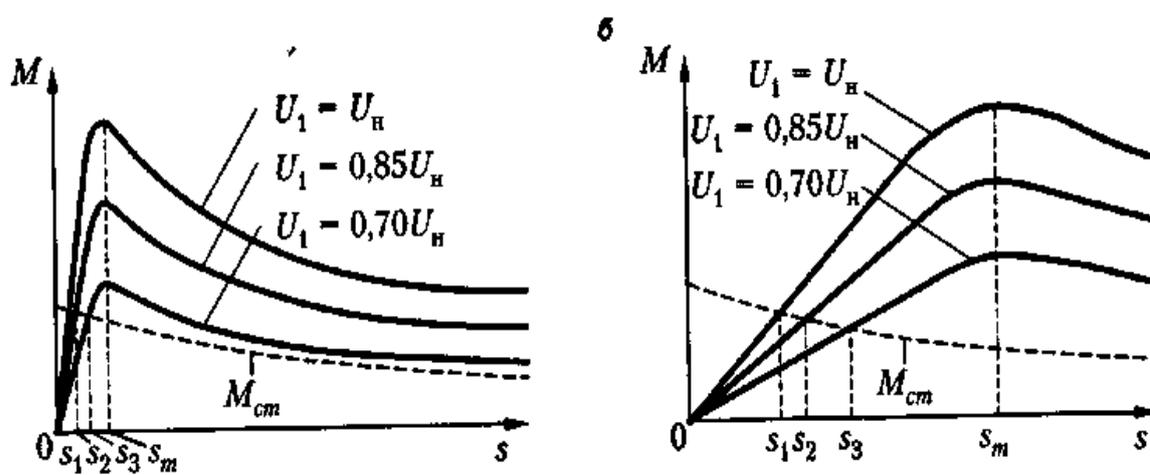


Рис. 1.15. Механические характеристики асинхронных двигателей при различных значениях первичного напряжения: а) при малых; б) при больших значениях активного сопротивления цепи ротора

Описываемый метод регулирования применяется также для двигателей с фазным ротором, причем в этом случае в цепь ротора включаются добавочные сопротивления.

В связи с пониженным КПД и трудностями регулирования напряжения рассматриваемый метод применяется только для двигателей малой мощности. При этом для регулирования U_1 можно использовать регулируемые автотрансформаторы или сопротивления, включенные последовательно в первичную цепь. В последние годы для этой цели все чаще применяют реакторы насыщения, регулируемые путем подмагничивания постоянным током (рис. 1.16).

При изменении величины постоянного тока подмагничивания индуктивное сопротивление реактора изменяется, что приводит к изменению напряжения на зажимах двигателя. Автоматическим регулированием тока подмагничивания можно расширить зону регулирования частоты вращения в область $s > s_m$ и получить при этом жесткие механические характеристики.

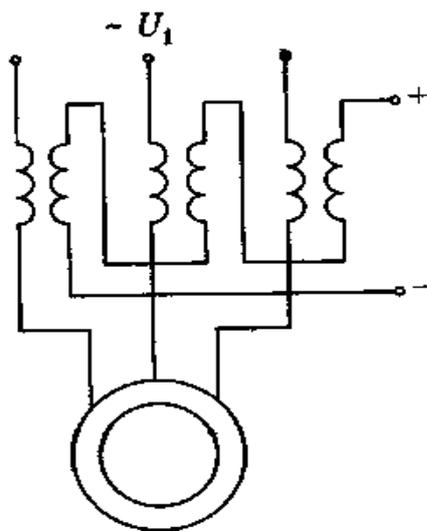


Рис. 1.16. Схема регулирования частоты вращения асинхронного двигателя с помощью реактора с подмагничиванием постоянным током

1.11.4. Импульсное регулирование частоты вращения

Импульсное регулирование частоты вращения (рис. 1.17) выполняется периодическим включением двигателя в сеть и отключением его от сети или периодическим шунтированием с помощью контактора K сопротивлений, включенных последовательно в цепь статора.

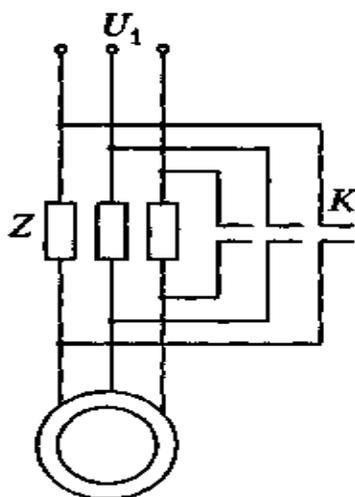


Рис. 1.17. Схема импульсного регулирования частоты вращения асинхронного двигателя

При этом двигатель постоянно находится в переходном режиме ускорения или замедления частоты вращения ротора и в зависимости от частоты и продолжительности импульсов работает с некоторой средней постоянной частотой вращения. Подобное регулирование частоты вращения сопряжено со значительным ухудшением энергетических показателей и применяется только для двигателей очень малой мощности ($P_n < 30...50$ Вт).

1.12. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей с фазным ротором

Для фазных двигателей можно, в принципе, использовать те же способы регулирования частоты вращения, что и для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Однако на практике применяется иногда только способ регулирования частоты вращения с помощью реакторов насыщения. Далее рассмотрим способы регулирования частоты вращения, которые специфичны для двигателей с фазным ротором и в которых используется возможность включения регулирующих устройств во вторичную цепь.

1.12.1. Регулирование частоты вращения с помощью реостата в цепи ротора

Регулирование частоты вращения с помощью реостата в цепи ротора производится по той же схеме, что и реостатный пуск фазного двигателя (рис. 1.13), но реостат при этом должен быть рассчитан на длительную работу. При увеличении активного сопротивления вторичной цепи вид механической характеристики двигателя изменяется (рис. 1.14, *a*): характеристика становится более мягкой и скольжение двигателя при том же моменте нагрузки $M_{ст}$ увеличивается.

При $M_{cm}=const$ рабочее скольжение s с большей точностью пропорционально s_m и, следовательно, активному сопротивлению цепи ротора. Поэтому скольжения s и s' , соответствующие случаям $r_d = 0$ и $r_d \neq 0$, находятся в соотношении

$$\frac{s'}{s} = \frac{r_d + r_2}{r_2}, \quad (1.42)$$

откуда значение r_d , необходимое для получения скольжения s' ,

$$r_d = \left(\frac{s'}{s} - 1 \right) r_2. \quad (1.43)$$

Рассматриваемый способ регулирования частоты вращения связан со значительными потерями энергии в сопротивлении r_d и поэтому малоэкономичен. Он применяется главным образом при кратковременной или повторно кратковременной работе (например, пусконаладочные режимы некоторых машин, крановые устройства и пр.), а также в приводах с вентиляторным моментом. В последнем случае мощность на валу с уменьшением частоты вращения быстро снижается, и поэтому мощность скольжения и потери в цепи ротора ограничены.

К недостаткам реостатного регулирования частоты вращения относятся также мягкость механических характеристик и зависимость диапазона регулирования от нагрузки. В частности, регулирование частоты вращения на холостом ходу практически невозможно.

1.12.2. Регулирование частоты вращения введением добавочной ЭДС во вторичную цепь двигателя

Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя путем увеличения его скольжения всегда связано с выделением во вторичной цепи двигателя значительной электрической мощности скольжения

$$P_s = s P_{эм}, \quad (1.44)$$

которая при реостатном регулировании почти целиком теряется в реостате. Естественно, что эту мощность лучше использовать полезно, повышая КПД установки. Полезно использовать мощность скольжения можно, если вместо реостата подключить к контактным кольцам фазного двигателя приемник электрической энергии в виде подходящей для этих целей вспомогательной электрической машины. Эта вспомогательная машина может быть и источником электрической энергии как возбудитель асинхронной машины со стороны ротора.

В связи с этим рассмотрим вопрос о влиянии на работу фазного асинхронного двигателя внешней добавочной ЭДС E_d , вводимой во вторичную цепь двигателя с помощью его контактных колец, при условии, что частота этой добавочной ЭДС всегда равна частоте вторичного тока и частоте ЭДС $f_2 = s f_1$ самого двигателя.

Предположим, что асинхронный двигатель с фазным ротором работает при условии, что U_1, f_1 и M_2 постоянны. Полагая в порядке допущения, что $\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1$, можно считать, что поток Φ_δ также постоянен, а комплекс Φ_δ отстает от \dot{U}_1 на $\pi/2$.

Тогда ток в цепи ротора I_2 будет равен

$$\dot{I}_2 = \frac{s \dot{E}_2}{r_2 + jsx_{\sigma 2}}, \quad \text{или} \quad I_2 = \frac{s E_2}{\sqrt{r_2^2 + (sx_{\sigma 2})^2}}. \quad (1.45)$$

Учтем, что в режимах работы с $s < s_m$ величина $r_2 \gg sx_{\sigma 2}$. В таких условиях комплексы sE_2 и \dot{I}_2 можно считать совпадающими. Векторную диаграмму для \dot{U}_1, \dot{I}_2 и $s\dot{E}_2$ можно представить так, как показано на рис. 1.18, а.

Введем в цепь ротора добавочную ЭДС E_d (частоты скольжения), направленную встречно ЭДС sE_2 . Поскольку в этом случае результирующая

$$I_2 = \frac{sE_2 - E_d}{r_2} -$$

ЭДС в цепи ротора уменьшится до величины $sE_2 - E_d$, то и ток

уменьшится в $\frac{sE_2 - E_d}{sE_2}$ раз. При этом электромагнитный момент $M_{эм} = c_m I_2 \Phi_\delta$ уменьшится в таком же отношении. В связи с этим нарушится баланс моментов $M_2 - M_{эм} > 0$ в пользу статического момента на валу ($M_2 = \text{const}$).

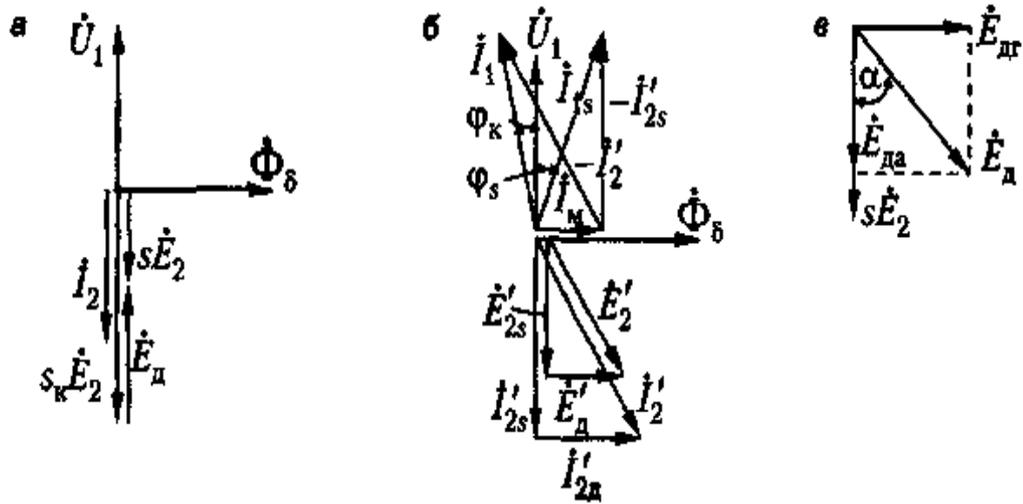


Рис. 1.18. Упрощенные векторные диаграммы асинхронного двигателя при введении в цепь ротора добавочной ЭДС E_d

В итоге частота вращения двигателя начнет уменьшаться до тех пор, пока ток ротора I_2 , а значит, и $M_{эм}$ не достигнут своих прежних значений. Установятся новые значения скольжения s_k и ЭДС ротора $s_k E_2$, соответствующие новому (после введения E_d) установившемуся режиму.

$$I_2 = \frac{sE_2}{r_2} \quad \text{и} \quad \text{новом} \quad I_2 = \frac{s_k E_2 - E_d}{r_2}$$

Из равенства токов ротора в исходном режиме найдем:

$$s_k = s + \frac{E_d}{E_2}. \quad (1.46)$$

Очевидно, что если ввести добавочную ЭДС E_d согласно с основной ЭДС sE_2 , то скорость увеличится, а скольжение уменьшится.

В общем случае можно считать, что

$$s_k = s \pm \frac{E_d}{E_2}, \quad (1.47)$$

где знак «+» соответствует встречному, а «-» – согласному включению добавочной ЭДС E_d .

Таким образом, введением добавочной ЭДС в цепь ротора асинхронного двигателя можно регулировать его частоту вращения как на понижение, так и на повышение.

Введением добавочной ЭДС в цепь ротора асинхронной машины можно также регулировать коэффициент мощности $\cos \varphi_1$. Физика такого регулирования иллюстрируется векторной диаграммой, приведенной на рис. 1.18, б. Диаграмма эта соответствует таким же условиям режима, как и на рис. 1.18, а.

Здесь рассмотрен случай, когда фазовый угол сдвига дополнительной ЭДС \dot{E}_d по отношению к основной ЭДС sE_2' составляет $\pi/2$ радиан. (Напомним, что поскольку на этой векторной диаграмме изображаются электромагнитные величины первичной и вторичной обмоток, то все величины, относящиеся к обмотке ротора, предварительно приводятся к обмотке статора.) Видно, что при таком введении ЭДС E_d в цепи ротора помимо тока \dot{I}_{2s} , обусловленного основной ЭДС sE_2 , возникает реактивная составляющая \dot{I}_{2d} , обусловленная вводимой ЭДС. В рассматриваемом случае эта составляющая будет емкостной. Поэтому в токе статора изменяется нагрузочный ток $-\dot{I}_2$ за счет ее реактивной, в данном случае емкостной составляющей. В результате изменяются величина тока I_1 и $\cos \varphi_1$. В рассматриваемом случае новое значение угла сдвига φ_k между \dot{U}_1 и \dot{I}_1 после введения добавочной ЭДС оказывается меньше нуля. Следовательно, двигатель уже не потребляет, а генерирует в сеть реактивную мощность. Намагничивание, то есть возбуждение, двигателя происходит со стороны ротора от источника дополнительной ЭДС \dot{E}_d . Очевидно также, что если дополнительную ЭДС \dot{E}_d вводить в цепь ротора под некоторым углом α к ЭДС $s\dot{E}_2'$ (рис. 1.18, в), то можно одновременно регулировать и частоту вращения двигателя через составляющую $s\dot{E}_{da}$, и коэффициент мощности $\cos \varphi_1$.

Рассмотренный способ регулирования частоты вращения асинхронного двигателя с фазным ротором весьма экономичен и обеспечивает широкий диапазон регулирования. Трудности, которые при этом возникают, обусловлены главным образом способом получения регулируемого добавочного напряжения частоты скольжения. Такое напряжение, в частности, можно получить на базе коллекторного преобразователя частоты, что и было реализовано в двигателе Шраге – Рихтера.

Глава 2. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

2.1. Конструкция синхронных машин

Синхронной называют машину переменного тока, в которой скорость вращения ротора равна скорости вращения магнитного поля в ее рабочем зазоре. Синхронная машина может быть использована в качестве генератора напряжения стабильной частоты (турбогенератор, гидрогенератор и дизель-генератор), первичным двигателем в которых используются паровая или газовая турбина, или дизель. Часто синхронную машину используют в качестве двигателя с неизменной скоростью вращения ротора, приводящего во вращение крупные вентиляторы, компрессоры, центробежные насосы и генераторы постоянного тока и т.д. Кроме того, синхронную машину используют как компенсатор для повышения коэффициента мощности питающей электрической сети, а также для регулирования ее реактивной составляющей мощности.

Конструкция статора синхронной машины, называемого также якорем, практически ничем не отличается от конструкции статора асинхронной машины. Основное отличие синхронной машины заключается в устройстве ротора (индуктора), который представляет собой по существу явнополюсный или неявнополюсный электромагнит (рис. 2.1, *а*, *б*), обмотка которого через контактные кольца и щетки питается от внешнего источника постоянного тока. В качестве индуктора в синхронной машине может использоваться постоянный магнит.

Явнополюсный ротор (рис. 2.1, *а*) обычно используется в машинах с четырьмя и большим числом пар полюсов. Обмотка возбуждения выполняется в этом случае в виде цилиндрических катушек прямоугольного сечения, которые размещаются на сердечниках полюсов и укрепляются при помощи полюсных наконечников. Ротор, сердечники полюсов и полюсные наконечники изготавливаются из листовой стали. Двухполюсные и четырехполюсные машины большой мощности, работающие при скорости вращения ротора 1500 и 3000 об/мин, изготавливаются, как правило, с неявнополюсным ротором (рис. 2.1, *б*). Применение в них явнополюсного ротора невозможно по условиям обеспечения необходимой механической прочности крепления полюсов и обмотки возбуждения. Обмотка возбуждения в такой машине размещается в пазах сердечника ротора, выполненного из массивной стальной поковки, и укрепляется в них немагнитными металлическими клиньями. В синхронных двигателях с явнополюсным ротором в полюсных наконечниках размещаются стержни беличьей клетки, выполненной из материала с повышенным удельным сопротивлением (латунь и др.). Эта клетка служит в качестве пусковой обмотки. Такая же беличья клетка, состоящая из медных стержней, применяется в некоторых синхронных генераторах, она называется успокоительной обмоткой, или демпферной, т.к. обеспечивает быстрое затухание колебаний ротора, возникающих при некоторых режимах работы синхронной машины. В последнее время синхронные двигатели часто

выполняются без пусковой обмотки, но с массивными полюсами. В этих полюсах при пуске возникают вихревые токи, которые, взаимодействуя с вращающимся магнитным полем, создают пусковой момент. Неявнополюсные машины также выполняются без успокоительной обмотки, роль которой выполняют вихревые токи, замыкающиеся в массивном роторе.

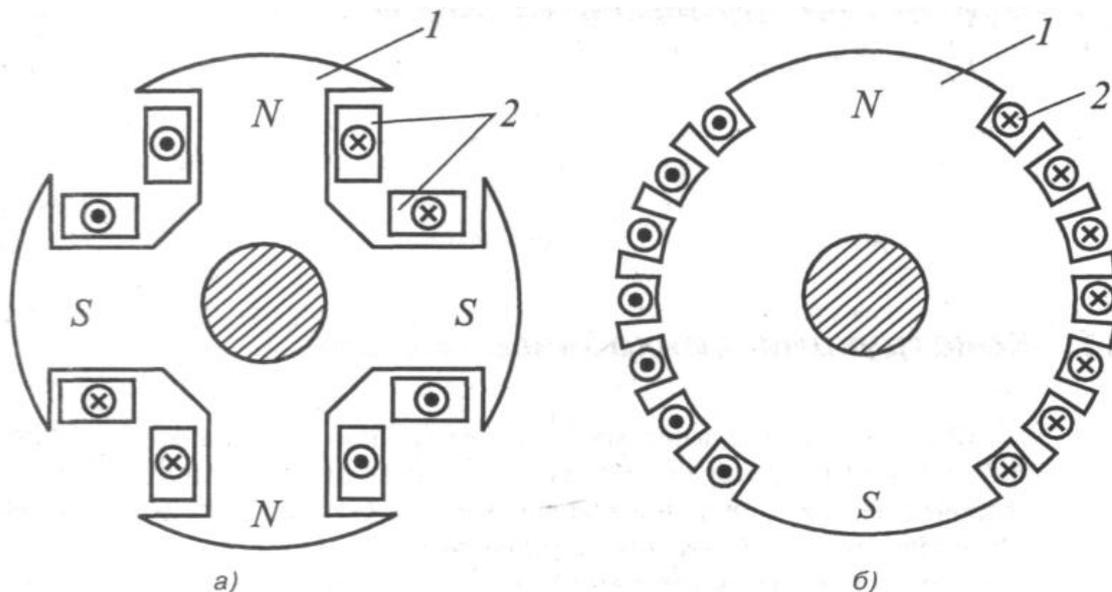


Рис. 2.1. Конструкция ротора (индуктора) явнополюсной (а) и неявнополюсной (б) синхронной машины

2.2. Работа синхронного генератора при холостом ходе

Как и все электрические машины, синхронная машина обратима, т.е. она может работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя. Рассмотрим случай, когда ротор синхронной машины приводится во вращение отдельным двигателем, а якорная (статорная) обмотка не нагружена. Так как линии магнитного поля статора являются продолжениями линий поля индуктора и они в этом случае не изгибаются в рабочем зазоре, то оси вращающихся полей статора и ротора совпадают, т.е. угол θ между ними равен нулю (рис. 2.2, а). В режимах нагрузки: в генераторном $\theta > 0$ (рис. 2.2, б), а в двигательном $\theta < 0$ (рис. 2.2, в).

При холостом ходе магнитный поток генератора создается только обмоткой возбуждения. Этот поток направлен по оси полюсов ротора и индуцирует в фазах обмотки якоря ЭДС, определяемую по той же формуле, что и для асинхронной машины:

$$E_0 = 4,44f_1\omega_1 k_{o6l} \Phi_0. \quad (2.1)$$

Характеристика холостого хода показана на рис. 2.3.

При небольших токах возбуждения магнитный поток мал и стальные участки магнитопровода машины не насыщены, вследствие чего их магнитное

сопротивление мало. При этом магнитный поток практически определяется только магнитным сопротивлением воздушного зазора между ротором и статором и характеристика холостого хода ($E_0 = f(I_B)$) или, в другом масштабе, $\Phi_0 = f(I_B)$ имеет вид прямой линии (рис. 2.3). По мере возрастания потока растет магнитное сопротивление стальных участков магнитопровода. При индукции в стали более 1,7-1,8 Тл магнитное сопротивление стали сильно возрастает и характеристика холостого хода становится нелинейной. Номинальный режим работы синхронных генераторов приблизительно соответствует «колену» кривой характеристики холостого хода, при этом коэффициент насыщения k_H , т.е. отношение отрезков av/ac , составляет 1,1-1,4.

При рассмотрении работы синхронной машины в ряде случаев для облегчения математического анализа не учитывают нелинейность кривой холостого хода, заменяя ее прямой линией. При этом отпадает необходимость делать различие между магнитными характеристиками при холостом ходе и при нагрузке. Спрямоленную характеристику проводят или как касательную к кривой холостого хода (прямая 1 на рис. 2.3), или через точку b , соответствующую рассматриваемому режиму работы, например, номинальному (прямая 2). Во втором случае спрямоленная характеристика учитывает некоторое среднее насыщенное состояние магнитной цепи машины.

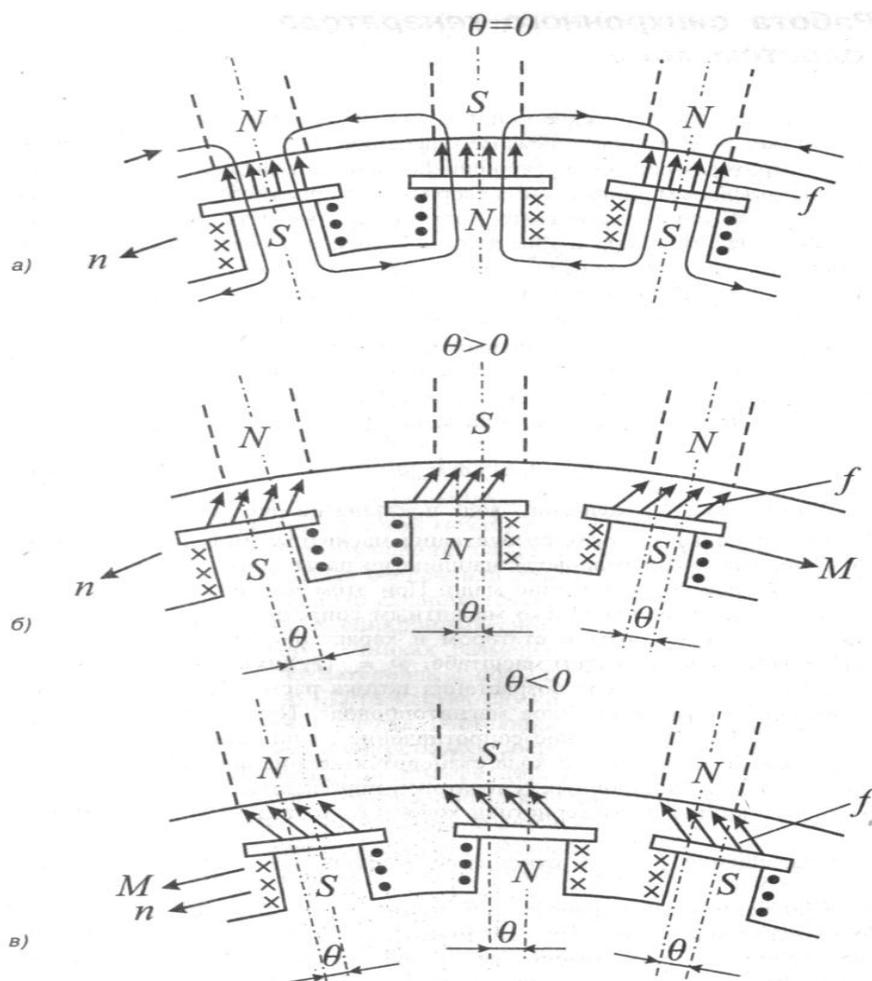


Рис. 2.2. Магнитное поле синхронной машины в режимах: холостого хода (а), генераторном (б) и двигательном (в)

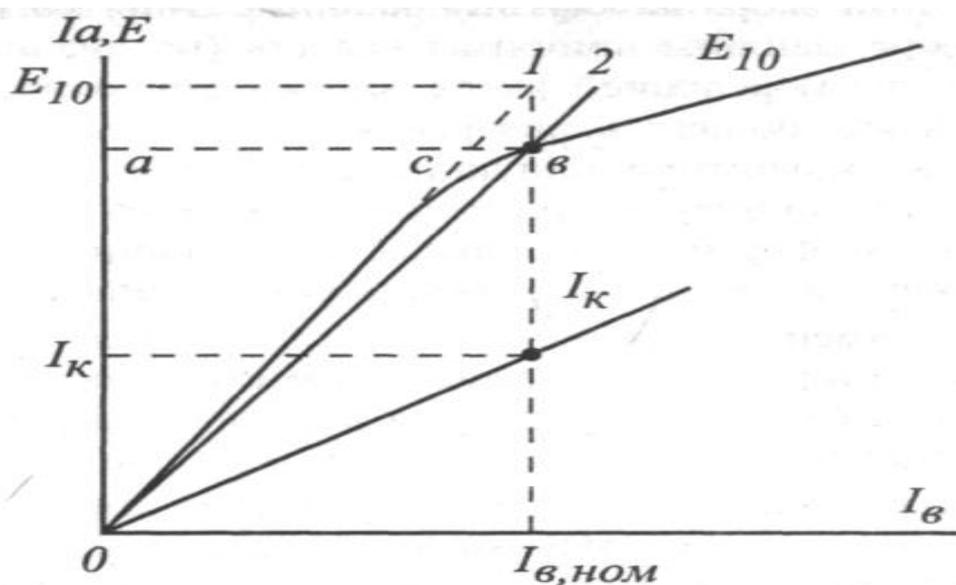


Рис. 2.3. Характеристика холостого хода

2.3. Реакция якоря в синхронной машине

Как было показано выше, в асинхронной машине изменение тока ротора автоматически приводит к изменению тока статора. В результате магнитный поток в рабочем зазоре остается практически не зависящим от режима работы машины. В синхронной машине такого автоматического слежения за током нагрузки нет.

В режиме холостого хода в синхронном генераторе существует только одна НС, а именно НС ротора, создающая основное магнитное поле в рабочем зазоре машины. При появлении тока в обмотках статора взаимодействие намагничивающих сил ротора и статора приводят к появлению результирующего магнитного поля генератора. Это поле как по величине магнитной индукции в рабочем зазоре машины, так и по характеру ее распределения в этом зазоре в значительной степени определяется величиной и направлением тока якоря.

Влияние тока якоря на картину распределения магнитного потока в рабочем зазоре машины принято называть (по аналогии с машинами постоянного тока) реакцией якоря. Форма кривой ЭДС синхронного генератора, работающего в режиме нагрузки, определяется картиной распределения магнитной индукции в рабочем зазоре машины. Для того, чтобы генерируемая синхронной машиной кривая ЭДС имела синусоидальную форму необходимо, чтобы форма кривой результирующей индукции в зазоре незначительно отличалась от синусоиды.

При рассмотрении реакции якоря в синхронном генераторе обычно считается, что он работает в режиме симметричной нагрузки. Различают три граничных режима действия реакции якоря при: а) чисто активной, б) индуктивной и в) емкостной нагрузках.

При активной нагрузке ток в фазе статора достигает максимума в тот момент, когда против этой фазы находится середина полюса. Поперечное поле реакции якоря в набегающем конце полюса ротора ослабляет магнитный поток, а в сбегающем конце – наоборот, усиливает (рис. 2.4, *а*). Следовательно, при активном характере нагрузки синхронного генератора реакция якоря вызывает смещение оси результирующего магнитного поля в сторону вращения ротора машины.

Следует заметить, что при насыщении ферромагнитного сердечника ослабление магнитного поля в набегающем конце полюса превышает его усиление в сбегающем конце. Поэтому, в том случае, когда помимо поперечной реакции якоря будет действовать и продольная, это приведет к уменьшению величины ЭДС синхронного генератора.

На рис. 2.4, *а* кривая 1 соответствует распределению вдоль рабочего зазора НС ротора, а кривая 2 – НС якоря. В синхронных машинах с неявнополюсным ротором кривая индукции от действия НС якоря будет совпадать с кривой 2. В явнополюсной машине асимметрия магнитной проводимости ротора приводит к появлению провалов, соответствующих промежуткам между полюсами, распределение магнитной индукции в этом случае соответствует кривой 3 рис. 2.4, *а*.

При индуктивной нагрузке максимальное значение тока в фазе будет в том случае, когда соответствующий полюс ротора переместится по направлению вращения на 90 градусов (рис. 2.4, *б*). Из рисунка видно, что поток якоря направлен против потока ротора. Следовательно, при чисто индуктивной нагрузке реакция якоря синхронного генератора имеет продольно – размагничивающий характер (кривая 1 соответствует распределению НС ротора, кривая 2 – НС якоря, а также индукции для случая его неявнополюсной конструкции, а кривая 3 – для распределения магнитной индукции в случае явнополюсного ротора).

Если нагрузка имеет идеальный емкостный характер, то ток в фазе якоря будет достигать максимума в момент времени, когда соответствующий полюс ротора еще не достигнет этой фазы и будет на расстоянии 90 градусов от ее середины (рис. 2.4, *в*). В этом случае реакция якоря синхронного генератора имеет продольно-намагничивающий характер (обозначения кривых 1, 2, 3 на (рис. 2.4, *в*) соответствуют обозначению при чисто индуктивном характере нагрузки синхронного генератора).

Для всех трех режимов работы синхронного генератора характерно изменение результирующего магнитного поля при действии реакции якоря и изменение его ЭДС.

Так как требования к величине и форме ЭДС довольно жесткие, необходимо свести к минимуму реакцию якоря, что обеспечивается увеличением магнитного сопротивления машины. Проще всего это осуществляется увеличением рабочего зазора. При этом для того, чтобы сохранить неизменной величину магнитной индукции в рабочем зазоре машины, увеличивают НС возбуждения за счет увеличения тока возбуждения.

Явление реакции якоря наблюдается не только в синхронном генераторе, но и в двигателе. Однако так как в двигателе форма кривой ЭДС не имеет существенного значения, то реакция якоря в нем имеет второстепенное значение.

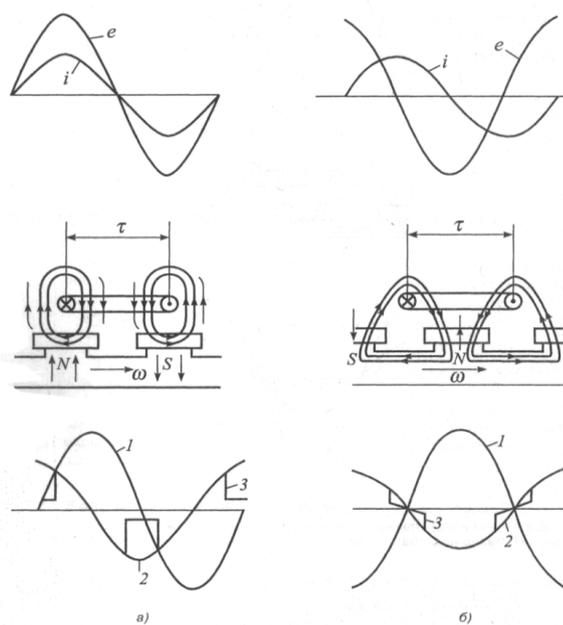


Рис. 2.4. Реакции якоря в синхронном генераторе: при активной нагрузке (а), при индуктивной нагрузке (б)

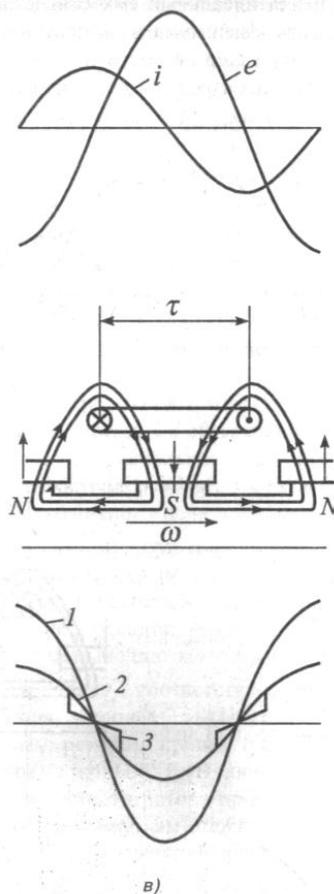


Рис. 2.4. (Окончание).
Реакции якоря в синхронном генераторе при емкостной нагрузке (в)

2.4. Принцип действия синхронных машин

Физические процессы, происходящие в синхронной машине, тесно связаны с условиями ее работы. Выделим три типичных условия работы синхронной машины:

- работа на пассивную, автономную нагрузку;
- работа на жесткую сеть (сеть бесконечной мощности);
- работа на мягкую сеть (сеть, мощность которой сравнима с мощностью синхронной машины).

Рассмотрим последовательно работу и свойства синхронной машины в первых двух отмеченных условиях работы. Свойства синхронной машины при работе на «мягкую» сеть являются промежуточными по отношению к рассматриваемым режимам.

2.4.1. Работа на пассивную, автономную нагрузку

В этом случае синхронная машина может работать только как генератор.

В генераторном режиме работы по обмотке статора (якоря) протекает ток нагрузки. Этот ток создает поток якоря, малая часть которого является потоком рассеяния Φ_{p1} , а основная часть, обозначенная через Φ_1 , замыкается через ротор. Этот поток также называют потоком реакции якоря. Для исследования поведения синхронного генератора, работающего на пассивную нагрузку, целесообразно рассмотреть его схему замещения и векторную диаграмму.

С учетом вышесказанного, схема замещения синхронного генератора может быть представлена на рис. 2.5, а. В этой схеме замещения приняты следующие обозначения: E_0 – ЭДС индуктированная магнитным потоком возбуждения в обмотке якоря; $x_1 = x_a + x_{p1}$ – синхронное реактивное сопротивление якоря, x_a – реактивное сопротивление якоря, учитывающее реакцию магнитного потока якоря Φ_1 ; x_{p1} – реактивное сопротивление рассеяния якоря, учитывающее реакцию магнитного потока рассеяния Φ_{p1} ; R_a – активное сопротивление обмотки якоря.

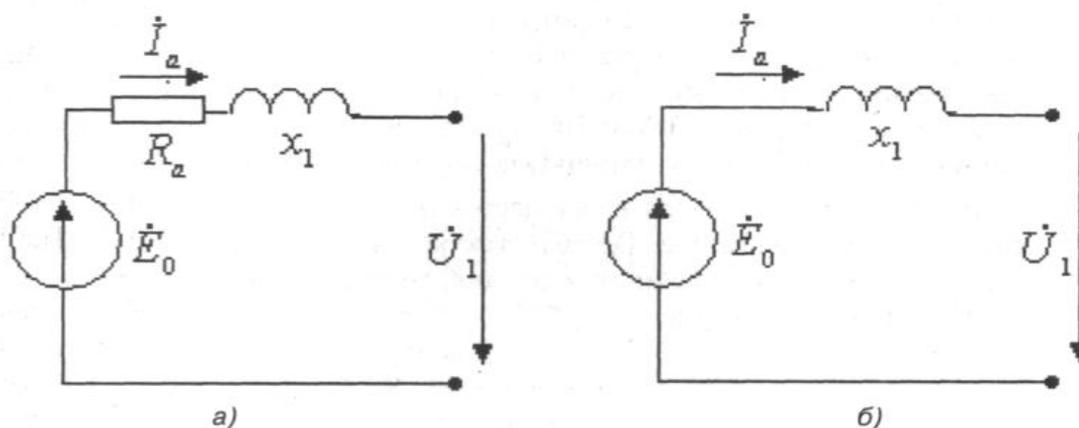


Рис. 2.5. Схема замещения синхронного генератора с учетом (а) и без учета (б) активного сопротивления обмотки якоря

В явнополусной машине ось, совпадающую с осью магнитной поля возбуждения (ротора), называют продольной и обозначают буквой d , а перпендикулярную ей ось называют поперечной и обозначают буквой q . Реактивные сопротивления якоря по продольной оси x_{ad} и по поперечной оси x_{aq} различны. При этом различаются и синхронные реактивные сопротивления по продольной и поперечной осям:

$$x_d = x_{ad} + x_{p1}, \quad x_q = x_{aq} + x_{p1}.$$

Активное сопротивление R_a мало по сравнению с синхронным сопротивлением, поэтому при качественном анализе его можно не учитывать. Упрощенная схема замещения синхронного генератора показана на рис. 2.5, б. Для этой схемы замещения на основании второго закона Кирхгофа можно записать:

$$\dot{E}_0 = \dot{U}_1 + j x_1 \dot{I}_a, \quad (2.2)$$

где \dot{U}_1 – напряжение на нагрузке

Для построения пространственной векторной диаграммы следует заметить, что ось d магнитного потока ротора (потока возбуждения) и перпендикулярная ей ось q вращаются вместе с ротором. Векторная диаграмма строится во вращающейся системе координат d - q (рис. 2.6).

На векторной диаграмме потокосцепление возбуждения Ψ_0 направлено по продольной оси, ЭДС E_0 отстает от потокосцепления на 90 градусов в соответствии с законом Фарадея. Направление тока якоря I_a выбрано произвольно, а векторов U_1 и $jx_1 I_a$ в соответствии с уравнением (2.2).

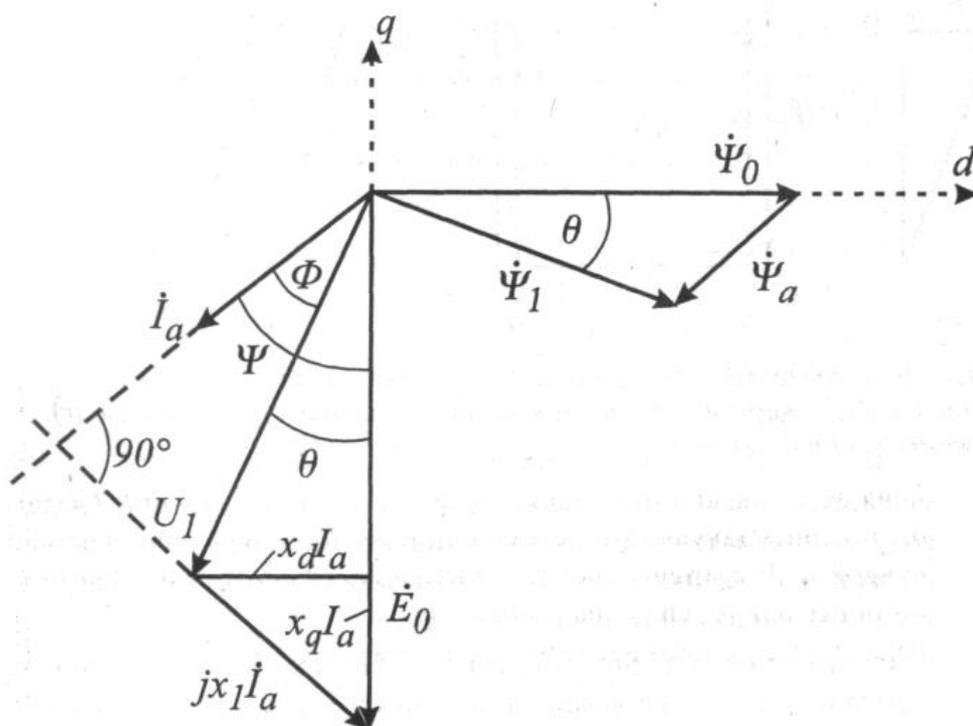


Рис. 2.6. Векторная диаграмма синхронного генератора

Потокосцепление Ψ_a имеет то же направление, что и ток I_a в соответствии с законом Ома для магнитной цепи. Потокосцепление воздушного зазора – есть сумма потокосцеплений Ψ_a и Ψ_0 . Угол θ , который называется углом момента, отсчитывается от потока воздушного зазора до продольной оси. В данном случае этот угол положительный. На точно такой же угол сдвинуты вектора U_1 , и E_0 . В генераторном режиме работы напряжение на пассивной нагрузке U_1 , зависит как от величины тока нагрузки, так и от сдвига по фазе φ между U_1 , и I_a . Угол может быть различным в зависимости от характера нагрузки. На рис. 2.7 без привязки к осям d и q представлены векторные диаграммы для пяти характерных случаев:

- для чисто активной нагрузки $\varphi = 0$ (рис. 2.7, а),
- для чисто индуктивной нагрузки $\varphi = 90^\circ$ (рис. 2.7, б),
- для чисто емкостной нагрузки $\varphi = -90^\circ$ (рис. 2.7, в),
- для активно-индуктивной нагрузки $0 < \varphi < 90^\circ$ (рис. 2.7, г),
- для активно-емкостной нагрузки $0 > \varphi > -90^\circ$ (рис. 2.7, д).

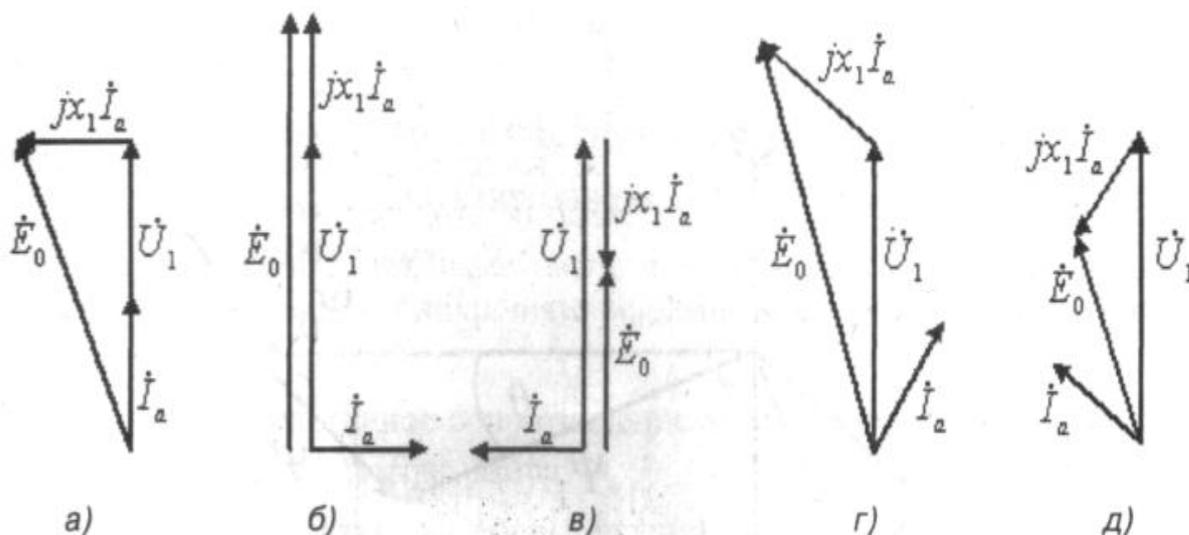


Рис. 2.7. Векторные диаграммы синхронного генератора для активной (а), индуктивной (б), емкостной (в), активно-индуктивной (г) и активно-емкостной (д) нагрузок

Рассматривая соотношение величин E_0 и U_1 , можно сделать вывод, что при активной и активно-индуктивной нагрузках величина напряжения U_1 меньше, чем E_0 , а при активно-емкостной нагрузке U_1 величина напряжения превышает E_0 .

Отмеченные особенности легко проследить на характеристиках генератора, которые называются внешними и представляют собой зависимость напряжения на нагрузке U_1 , от тока нагрузки I_a при различных коэффициентах мощности нагрузки. Эти характеристики показаны на рис. 2.8.

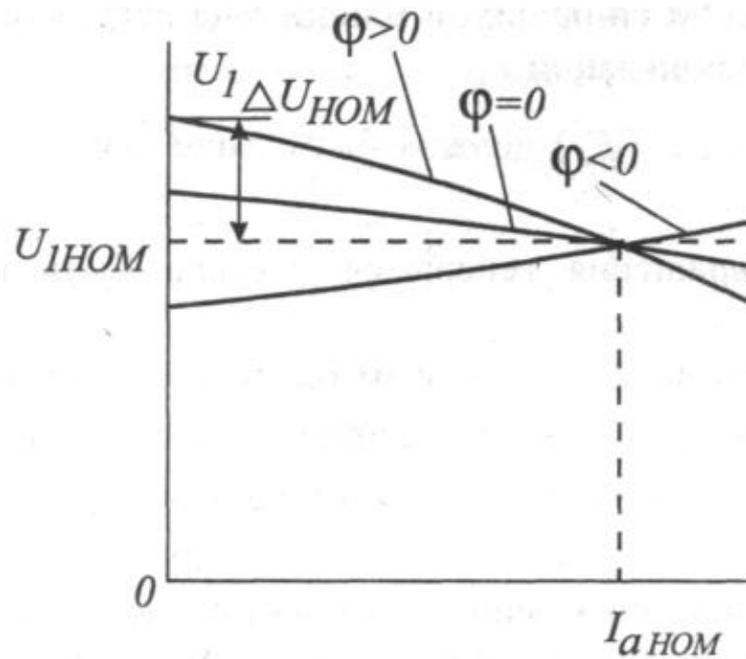


Рис. 2.8. Внешние характеристики генератора

Для поддержания стабильного выходного напряжения необходимо с ростом тока нагрузки изменять ЭДС E_0 , которая в свою очередь определяется током возбуждения. Зависимости тока возбуждения $I_{\text{в}}$ от тока нагрузки I_a при $U_1 = \text{const}$ и $\cos\varphi = \text{const}$ при различных видах нагрузки называются регулировочными характеристиками генератора, они представлены на рис. 2.9.

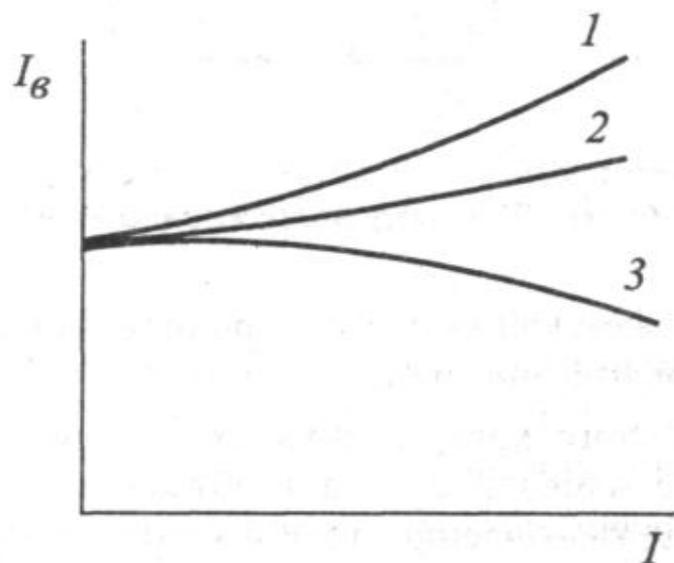


Рис. 2.9. Регулировочные характеристики генератора при активном (кривая 1), индуктивном (кривая 2) и емкостном (кривая 3) характерах нагрузки

2.4.2. Работа синхронной машины на жесткую сеть

Для подключения синхронной машины на сеть необходимо соблюсти условия синхронизации:

- величина ЭДС (E_0) должна быть равна напряжению U_1 сети;
- скорость вращения генератора должна быть равна $n = 60f_i/p$ с тем, чтобы частота ЭДС в точности совпала с частотой сети f_i ;
- напряжение сети и ЭДС генератора должны быть в фазе;
- очередность фаз генератора должна совпадать с очередностью фаз сети.

Параллельно с жесткой сетью синхронная машина может работать и как генератор, и как двигатель.

По реализации условий синхронизации синхронная машина может быть подключена своей якорной обмоткой к трехфазной сети. При этом машина будет находиться в режиме идеального холостого хода. Векторная диаграмма, соответствующая этому режиму, представлена на рис. 2.10, *а*.

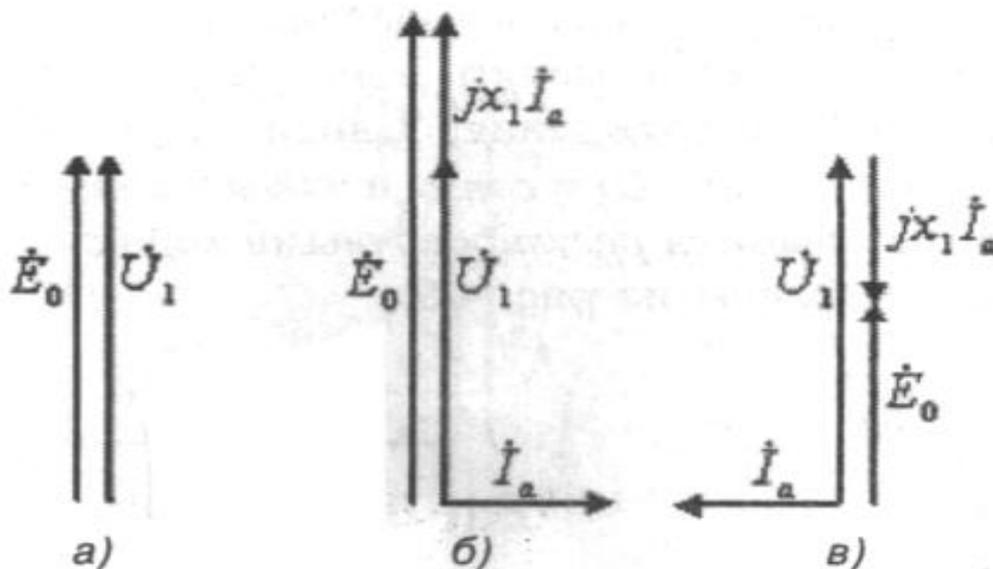


Рис. 2.10. Векторные характеристики генератора в режимах: идеального холостого хода (*а*), перевозбужденном (*б*) и недовозбужденном (*в*)

В режиме холостого хода машина не генерирует и не потребляет мощности. Любое изменение тока возбуждения и связанной с ним ЭДС E_0 , приводит к появлению тока в якоре генератора. Поскольку в жесткой сети напряжение U_1 постоянно, то увеличение E_0 по сравнению с U_1 приводит к появлению индуктивного тока в сети (рис. 2.10, *б*). Уменьшение E_0 по сравнению с U_1 приводит к появлению емкостного тока в цепи (рис. 2.10, *в*). Поскольку в обоих случаях угол θ между U_1 и E_0 равен 0, то машина не отдает и не потребляет активной мощности. Таким образом, изменяя ток возбуждения, можно изменять только реактивную мощность. Рассмотрим векторную диаграмму синхронной машины в общем случае, показанную на рис. 2.11.

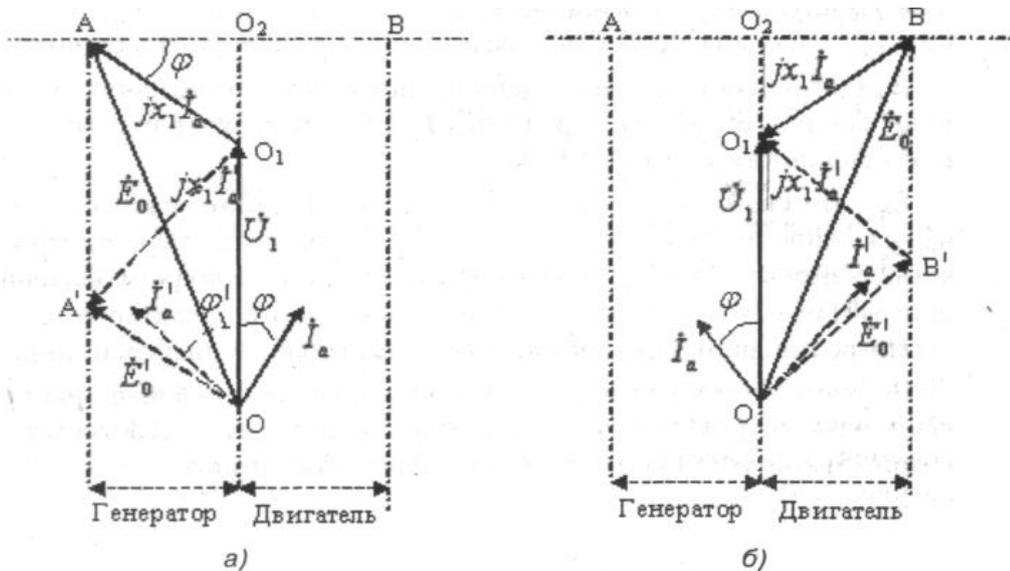


Рис. 2.11. Векторная диаграмма синхронной машины при работе на сеть в генераторном (а) и двигательном (б) режимах

Из векторной диаграммы следует

$$AO_2 = x_1 I_a \cos \varphi,$$

$$O_1O_2 = x_1 I_a \sin \varphi.$$

(2.3)

Активная и реактивная мощности, отдаваемые генератором в сеть, определяются уравнениями

$$P_1 = m_1 U_1 I_a \cos \varphi,$$

$$Q_1 = m_1 U_1 I_a \sin \varphi.$$

(2.4)

Сравнение уравнений (2.3) и (2.4) показывает, что при постоянном напряжении сети ($U_1 = \text{const}$) отрезок AO_2 в определенном масштабе – есть активная мощность, а отрезок O_1O_2 – реактивная мощность.

Поэтому для изменения активной мощности при ($Q_1 = \text{const}$) конец вектора должен скользить по горизонтальной прямой (АВ). Для изменения реактивной мощности при ($P_1 = \text{const}$) конец вектора (E_0) должен скользить по вертикальной прямой (АА'). Положение вектора (OO_2) соответствует холостому ходу. Если вектор (E_0) находится слева от прямой (OO_2), то машина работает в генераторном режиме (рис. 2.11, а). Если вектор (E_0) находится справа от прямой (рис. 2.11, б), то машина работает в двигательном режиме.

В генераторном режиме при скольжении вектора вниз по вертикали машина потребляет реактивную (индуктивную) мощность до тех пор, пока ($E_0 > U_1$). При ($E_0 \leq U_1$) машина потребляет реактивную (емкостную) мощность.

В двигательном режиме машина потребляет реактивную (емкостную) мощность до тех пор, пока ($E_0 > U_1$), и реактивную (индуктивную) мощность при ($E_0 \leq U_1$).

Все эти свойства синхронной машины при работе на жесткую сеть чрезвычайно полезны и часто используются (например, синхронные компенсаторы). Особенно важны эти свойства синхронной машины при работе на мягкую сеть. Именно такая работа характерна для синхронных генераторов, работающих параллельно в энергосистемах.

В этом случае рассмотренные свойства синхронной машины позволяют разделить активную и реактивную мощность в соответствии с номинальной установленной мощностью генераторов.

2.5. Энергетическая диаграмма и КПД синхронной машины

На рис. 2.12 изображена энергетическая диаграмма синхронной машины, работающей в генераторном режиме.

Мощность, передаваемая через вал ротора от внешнего двигателя, частично расходуется на покрытие механических потерь P_m (в подшипниках и на самовентиляцию), потерь в ферромагнитном сердечнике генератора на гистерезис и вихревые токи P_{mg} и электрических потерь в обмотках возбуждения $P_{воз}$ и якоря $P_{эл}$. Последние являются переменными потерями, их величина определяется нагрузкой генератора; остальные же потери при $\eta = \text{const}$, $U_e = \text{const}$ от изменения нагрузки не зависят.

Коэффициент полезного действия, как и в трансформаторах и в других типах машин, определяется из уравнения

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_m + P_{mg} + P_{воз} + P_{эл}}$$

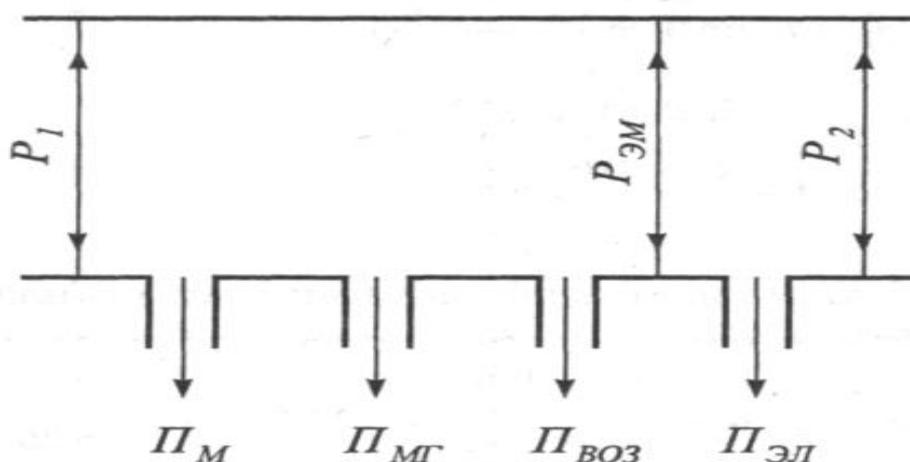


Рис. 2.12. Энергетическая диаграмма синхронной машины

Удельная мощность (величина мощности на единицу массы или объема) растет с увеличением мощности генератора. Поэтому для питания энергетических сетей используются генераторы со значительной удельной мощностью.

2.6. Электромагнитная мощность и момент синхронной машины

Как следует из энергетической диаграммы, выходная мощность синхронного генератора меньше электромагнитной на величину электрических потерь в обмотке статора. Однако электрические потери в обмотке статора уже для машин средней мощности меньше 1% номинальной мощности, то можно считать, что для m_1 – фазной машины

$$P_{эм} = m_1 U_1 I_a \cos \varphi. \quad (2.5)$$

Воспользовавшись векторной диаграммой (рис. 2.6), можно получить

$$P_{эм} = m_1 U_1 I_a \cos(\psi - \theta) = m_1 U_1 I_a (\cos \psi \cos \theta + \sin \psi \sin \theta). \quad (2.6)$$

Из векторной диаграммы и уравнений (2.5, 2.6) имеем

$$U_1 \cos \theta = E_0 - I_d x_d = E_0 - I_a \sin \psi x_d;$$

$$I_d x_d = I_a \sin \psi = \frac{E_0 - U_1 \cos \theta}{x_d};$$

$$I_q x_q = U_1 \cdot \sin \theta = I_a \cos \psi \cdot x_q; \quad (2.7)$$

$$I_a \cos \psi = \frac{U_1 \cdot \sin \theta}{x_q}.$$

Таким образом, выражение электромагнитной мощности можно представить в виде:

$$P_{эм} = m_1 \frac{E_0 U_1}{x_d} \sin \theta + m_1 \frac{U_1^2}{2} I_a \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta. \quad (2.8)$$

Электромагнитный момент, возникающий в результате взаимодействия тока статора с результирующим магнитным полем, определится выражением:

$$M = \frac{P_{эм}}{\omega} = \frac{m_1}{\omega_1} E_0 U_1 \frac{\sin \theta}{x_d} + \frac{m_1 U_1^2}{2 \omega_1} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta. \quad (2.9)$$

Первая составляющая полученной суммы является основным (электромагнитным) моментом, а вторая – реактивным моментом, возникающим вследствие неравенства продольной и поперечной составляющих синхронных индуктивных сопротивлений в явнополюсной синхронной машине.

Зависимость (2.9) называют угловой характеристикой синхронной машины, эта характеристика показана на рис. 2.13.

Если синхронная машина имеет неявнополюсную конструкцию, то второе слагаемое уравнения (2.9) равно нулю и угловая характеристика имеет форму кривой 1, в случае явнополюсной конструкции ротора – кривой 2 (кривая 3 соответствует реактивному моменту).

Если угол θ положителен, то положительный момент создает на валу ротора по отношению к первичному двигателю, вращающему ротор, тормозной момент; синхронная машина работает в режиме генератора и происходит

преобразование механической энергии первичного двигателя в электрическую энергию сети. В противном случае момент на валу ротора отрицателен и является вращающим; синхронная машина работает в режиме двигателя и происходит преобразование электрической энергии сети в механическую энергию на валу ротора.

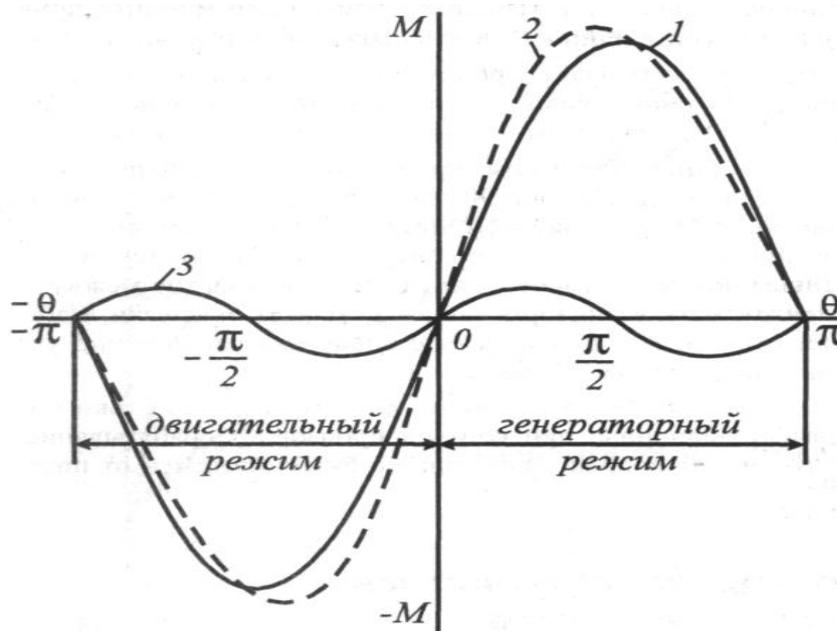


Рис. 2.13. Угловая характеристика синхронной машины

Работа синхронной машины в диапазоне изменения угла θ от -90° до $+90^\circ$ устойчива, т.к. при любом увеличении или уменьшении нагрузки соответственно увеличивается или уменьшается момент на валу машины и устанавливается равновесие между моментом, развиваемым первичным двигателем, и генератором (или между механическим тормозящим моментом нагрузки на валу ротора и вращающим моментом синхронного двигателя). Значению $\theta = 90^\circ$ соответствует максимальное значение развиваемой мощности и момента на валу синхронной машины. При $\theta > 90^\circ$ — работа синхронной машины неустойчива. В этом случае, при работе машины в режиме генератора, вращающий момент, развиваемый первичным двигателем, превышает максимальный тормозящий момент генератора, т.к. увеличение угла θ свыше 90° электрических градусов приведет не к увеличению момента, а к его уменьшению. В результате нарушается равновесие между моментами: тормозящим генератора и вращающим первичного двигателя. Избыток вращающего момента приведет к еще большему увеличению θ и уменьшению тормозящего момента. Этот процесс будет происходить до момента, пока генератор не выпадет из синхронизма и система автоматики не отключит его от нагрузки, т.к. при этом наступает аварийный режим.

Аналогичные процессы происходят и у синхронного двигателя, когда угол θ превышает 90° электрических градусов. В этом случае, аналогично, увеличение момента нагрузки на валу ротора приводит не к увеличению

развиваемого синхронным двигателем момента, а к его уменьшению. В результате нарушается равновесие между вращающим моментом машины и тормозящим моментом нагрузки. Избыток тормозящего момента приводит к еще большему увеличению угла и уменьшению вращающего момента. Этот процесс будет протекать до момента, когда токи в обмотках не превысят величины, при которой произойдет срабатывание аварийной защиты и синхронный двигатель не будет отключен от питающей сети.

2.7. Рабочие характеристики синхронного двигателя

Рабочие характеристики (рис. 2.14) представляют собой зависимости тока I_a , электрической мощности P_1 , поступающей в обмотку якоря, КПД η , и $\cos \varphi$ от отдаваемой механической мощности P_2 при $U_1 = \text{const}$, $f_1 = \text{const}$ и неизменном токе возбуждения.

Поскольку скорость вращения двигателя постоянна, зависимость $n = f(P_2)$ обычно не приводится; не приводится также и зависимость $M = f(P_2)$, так как вращающий момент M пропорционален P_2 . Зависимости $I_a = f(P_2)$ и $P_1 = f(P_2)$ имеют характер, близкий к линейному. Ток холостого хода I_{a0} определяется реактивной составляющей и активным током, компенсирующим потери в стали и механические потери. Мощность холостого хода P_0 равна сумме возникающих при этом режиме потерь. Кривая $\eta = f(P_2)$ имеет характер, общий для всех электрических машин. Синхронные двигатели могут работать с $\cos \varphi = 1$, но обычно они рассчитываются на работу при номинальной нагрузке с опережающим током, при этом $\cos \varphi = 0,9-0,8$. В этом случае улучшается суммарный $\cos \varphi$ сети, от которой питаются синхронные двигатели, т.к. создаваемая ими опережающая реактивная составляющая тока компенсирует отстающую реактивную составляющую тока, которая обычно имеет место.

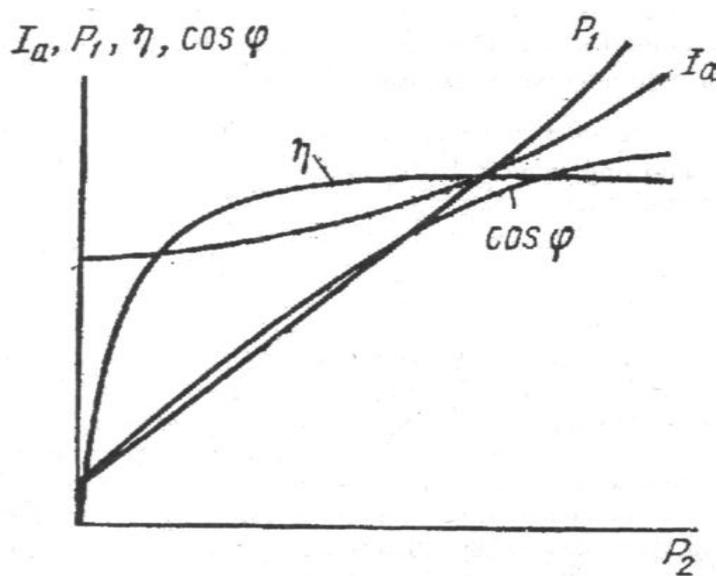


Рис. 2.14. Рабочие характеристики синхронного двигателя

2.8. Определение индуктивных сопротивлений синхронной машины

Индуктивное сопротивление синхронной машины может быть найдено по результатам опытов холостого хода и короткого замыкания. При опыте холостого хода определяют характеристику холостого хода $E_{10} = f(I_B)$ (рис. 2.3) при номинальной скорости вращения машины, изменяя ток возбуждения I_B .

При опыте короткого замыкания обмотки якоря замыкают накоротко через амперметры, после этого ротор приводят во вращение с номинальной скоростью и снимают зависимость тока якоря от тока возбуждения $I_a = f(I_e)$, которая имеет прямолинейный характер. Это объясняется тем, что при условии $r_a \approx 0$ сопротивление цепи якоря при коротком замыкании является чисто индуктивным, вследствие чего ток короткого замыкания I_k отстает по фазе на 90 градусов от вектора ЭДС (рис. 2.7, б) и поток реакции якоря размагничивает машину. При работе машины в рассматриваемом режиме напряжение $U_l = 0$, поэтому уравнение (2.2) принимает вид:

$$\text{для явнополюсной машины } \dot{E}_0 = j\dot{I}_a x_{ad} + j\dot{I}_a x_{p1} = j\dot{I}_a x_d, \quad (2.10)$$

$$\text{для неявнополюсной машины } \dot{E}_0 = j\dot{I}_a x_a + j\dot{I}_k x_{p1} = j\dot{I}_k x_1. \quad (2.11)$$

Определение индуктивных сопротивлений x_d и x_q . Из формулы (2.10) можно определить синхронное индуктивное сопротивление машины по продольной оси

$$x_d = \frac{E_{10}}{I_a}, \quad (2.12)$$

где ЭДС E_{10} и ток I_a должны быть взяты при одном и том же значении тока возбуждения. Для прямолинейного участка характеристики холостого хода безразлично, при каком токе возбуждения определяется x_d , т.к. во всех случаях $x_d = \text{const}$. Чтобы определить сопротивление при любом значении тока возбуждения, величину E_{10} находят по спрямленной ненасыщенной характеристике холостого хода (рис. 2.3). Однако полученное таким путем x_d будет несколько большим, чем при учете насыщения машины. По полученному значению x_d можно определить синхронное индуктивное сопротивление по поперечной оси:

$$x_q = (0,6 - 0,8) x_d. \quad (2.13)$$

В неявнополюсных машинах

$$x_d = x_q = x_l; x_1 = \frac{E_{10}}{I_a}. \quad (2.14)$$

2.9. Способы пуска синхронных двигателей

Синхронные двигатели имеют по сравнению с асинхронными большое преимущество, заключающееся в том, что благодаря возбуждению постоянным током они могут работать с $\cos \varphi = 1$ и не потребляют при этом реактивной мощности из сети, а при работе с перевозбуждением даже отдают реактивную мощность в сеть. В результате улучшается коэффициент мощности сети и уменьшаются падение напряжения и потери в ней, а также повышается коэффициент мощности генераторов, работающих на электростанциях. При понижении напряжения синхронный двигатель сохраняет большую нагрузочную способность. Кроме того, использование возможности увеличения тока возбуждения синхронных двигателей позволяет увеличивать надежность их работы при аварийных понижениях напряжения в сети и тем самым улучшать условия работы энергосистемы в целом. Вследствие большего размера воздушного зазора добавочные потери в стали и клетке ротора синхронных двигателей меньше, чем у асинхронных, благодаря чему КПД синхронных двигателей обычно выше.

В то же время конструкция синхронных двигателей сложнее, чем устройство короткозамкнутых асинхронных двигателей. Кроме того, синхронные двигатели должны иметь возбудитель или иное устройство для питания обмотки возбуждения постоянным током. Вследствие этого синхронные двигатели в большинстве случаев дороже асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.

Пуск синхронных двигателей также сложнее, и регулировать частоту их вращения можно только регулированием частоты напряжения. Тем не менее, применение синхронных двигателей постоянно расширяется, и они строятся на мощности до $P_n = 60$ МВт.

Для синхронных двигателей могут применяться все способы включения в сеть, рассмотренные ранее для генераторов. Однако потребность во вспомогательном двигателе, который смог бы разогнать синхронный двигатель до синхронной или близкой к ней скорости, является существенным недостатком этих способов. Поэтому пуск с помощью вспомогательного двигателя применяется обычно для синхронных двигателей большой мощности или при включении в маломощную сеть.

В подавляющем большинстве случаев применяется асинхронный пуск синхронных двигателей. Для того чтобы асинхронный пуск синхронных двигателей был успешным, они снабжаются мощной демпферной обмоткой, способной выдерживать значительные токи. В силу этих целевых особенностей демпферная обмотка синхронных двигателей называется пусковой.

Обычно синхронные двигатели имеют на своем валу возбудитель в виде генератора постоянного тока параллельного возбуждения (рис. 2.15). При пуске по схеме рис. 2.15, а контакты 7 разомкнуты, а контакт 8 замкнут. При этом обмотка возбуждения двигателя 2 замкнута через сопротивление 6 и асинхронный пуск происходит в наиболее благоприятных условиях. В конце асинхронного пуска, при $s = 0,05$, срабатывает частотное реле, обмотка

которого (на рисунке не показана) подключена к сопротивлению 6, и включает контактор цепи возбуждения. Контакты 7 контактора при этом замыкаются, а контакт 8 размыкается. В результате в обмотку 2 подается ток возбуждения, и двигатель втягивается в синхронизм.

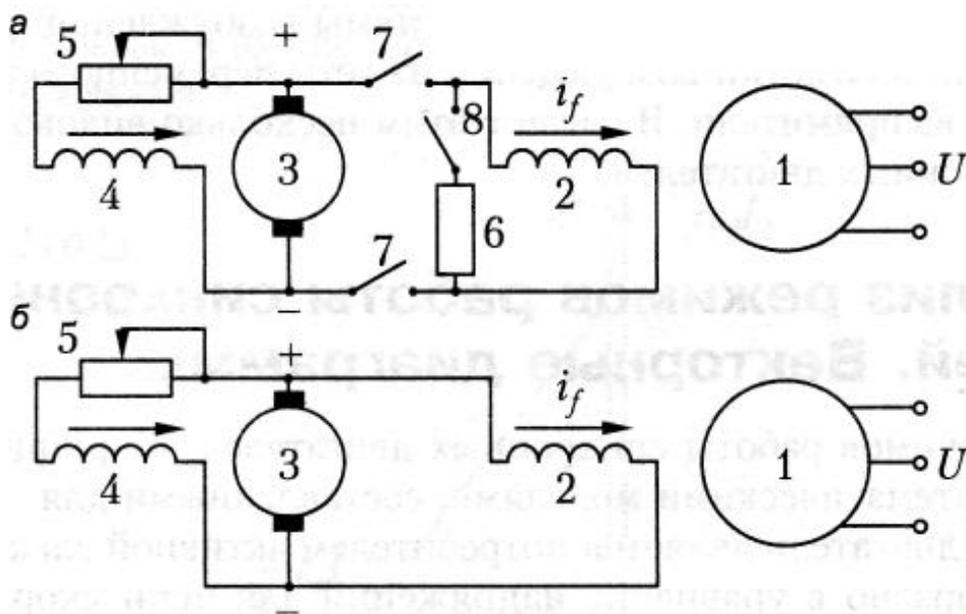


Рис. 2.15. Схемы цепи возбуждения синхронного двигателя с машинными возбудителями при пуске: а) с разрядным сопротивлением; б) с наглухо включенным возбудителем;

1 – якорь двигателя; 2 – обмотка возбуждения двигателя; 3 – якорь возбудителя; 4 – обмотка возбуждения возбудителя; 5 – реостат возбуждения возбудителя; 6 – разрядное сопротивление; 7 и 8 – контакты контактора или автомата гашения поля

В последнее время все чаще применяется схема с наглухо присоединенным возбудителем (рис. 2.15, б). В этом случае при пуске по цепи якоря 3 протекает переменный ток, который, однако, не причиняет вреда. При $n = (0,6...0,7)n_n$ возбудитель возбуждается и возбуждает синхронный двигатель, благодаря чему при приближении к синхронной частоте вращения двигатель втягивается в синхронизм.

Пуск по схеме, изображенной на рис. 1.11, б, происходит в менее благоприятных условиях, но обеспечивает надежное втягивание двигателя в синхронизм, если момент нагрузки на валу $M_{ст}$ при $n = n_n$ не превышает $(0,4...0,5)M_H$.

Зачастую производится прямой асинхронный пуск синхронных двигателей путем включения на полное напряжение сети. При тяжелых условиях пуска производится реакторный или автотрансформаторный пуск при пониженном напряжении, как у асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.

Возможны и другие способы пуска, например, частотный пуск, при котором двигатель питается от отдельного регулируемого источника тока,

частота которого плавно поднимается от нуля до номинальной. В этом случае двигатель входит в синхронизм уже при весьма малой частоте вращения. Необходимость в регулируемом источнике питания ограничивает области применения этого способа пуска.

В последние годы успешно внедряются системы возбуждения синхронных двигателей с питанием обмотки возбуждения от сети переменного тока через полупроводниковые выпрямители. В связи с этим несколько видоизменяются и схемы пуска синхронных двигателей.

2.10. Включение синхронных генераторов на параллельную работу

Современные мощные синхронные генераторы работают, как правило, в составе энергосистемы, на общую сеть. Благодаря этому достигаются повышенная надежность энергоснабжения потребителей и возможность маневрирования сезонными энергоресурсами. Все параллельно работающие генераторы должны выдавать в сеть ток одинаковой частоты. Поэтому они должны вращаться синхронно, и их частоты вращения должны быть обратно пропорциональны числам их пар полюсов.

2.10.1. Условия синхронизации генераторов

Совместной параллельной работе генераторов должна предшествовать специальная процедура включения, называемая синхронизацией, в процессе которой на холостом ходу генератора проверяются и выполняются следующие обязательные условия включения:

- напряжение включаемого генератора U_g должно быть равно напряжению сети U_c или уже работающего генератора;
- частота генератора f_g должна равняться частоте сети f_c ;
- чередование фаз генератора и сети должно быть одинаковым;
- напряжения U_g и U_c должны быть в фазе.

При указанных условиях векторы напряжений генератора и сети совпадают и вращаются с одинаковой частотой (рис. 2.16), разности напряжений между контактами выключателя при включении генератора (рис. 2.17) равны и поэтому при включении не возникает никакого толчка тока.

$$U_{gA} - U_{cA} = U_{gB} - U_{cB} = U_{gC} - U_{cC} = 0. \quad (2.15)$$

Равенство напряжений достигается регулированием тока возбуждения генератора и контролируется с помощью вольтметра. Изменение частоты и фазы напряжения генератора достигается изменением частоты вращения генератора. Правильность чередования фаз необходимо проверять только при первом включении генератора после монтажа или сборки схемы. Совпадение напряжений по фазе контролируется с помощью ламп, нулевых вольтметров или специальных синхроскопов, а в автоматических синхронизаторах – с помощью специальных измерительных элементов.

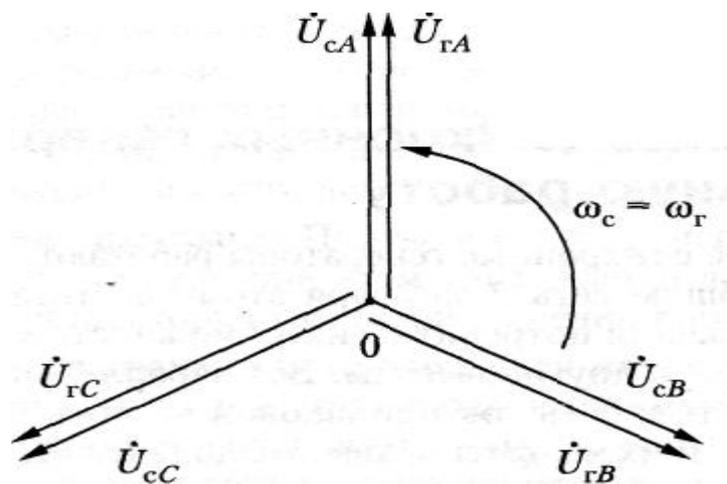


Рис. 2.16. Векторные диаграммы напряжений сети (U_c) и генератора (U_g) при идеальных условиях включения на параллельную работу

2.10.2. Синхронизация с помощью лампового синхроскопа

Синхронизация с помощью лампового синхроскопа может осуществляться по схеме на погасание или на вращение света. Схема синхронизации на погасание света представлена на рис. 2.17, а, где слева изображен генератор Γ_1 , уже работающий на шины станции и сеть, а справа – включаемый на параллельную работу генератор Γ_2 , с вольтметром V , переключателем Π и с ламповым синхроскопом C , каждая из ламп 1, 2, 3 которого включена между контактами одной и той же фазы или полюса выключателя B_2 . При соблюдении условий синхронизации напряжения на всех лампах одновременно равны нулю и лампы не светятся, что указывает на возможность включения генератора Γ_2 с помощью выключателя B_2 на параллельную работу.

Достичь точного равенства частот $f_g = f_c$ в течение даже небольшого промежутка времени практически невозможно, и поэтому напряжения $U_g - U_c$ на лампах 1, 2, 3 (рис. 2.17, а) пульсируют с частотой $f_g = f_c$ (рис. 2.18), и если эта частота мала, то лампы загораются и погасают с такой же частотой.

Частота $f_g = f_c$ соответствует частоте пульсаций напряжения (пунктирные кривые на рис. 2.18, б). Регулированием частоты генератора необходимо добиться того, чтобы частота загорания и погасания ламп была минимальна (период 3-5 с), и произвести затем включение выключателя B_2 в тот момент времени, когда лампы не горят.

При малой частоте погасания лампы гаснут раньше, чем напряжение достигнет нуля, и загораются также при $U > 0$. Поэтому, если реализуется схема, изображенная на рис. 2.17, а, трудно выбрать правильный момент включения. В этом отношении предпочтительной является схема на рис. 2.17, б, в которой лампа 1 включена так же, как на схеме, приведенной на рис. 2.17, а, а лампы 2 и 3 – между различными фазами генератора и сети. Поэтому при соблюдении условий синхронизации и равенства (2.15) лампа 1 не светится, а лампы 2 и 3 светятся с одинаковой яркостью.

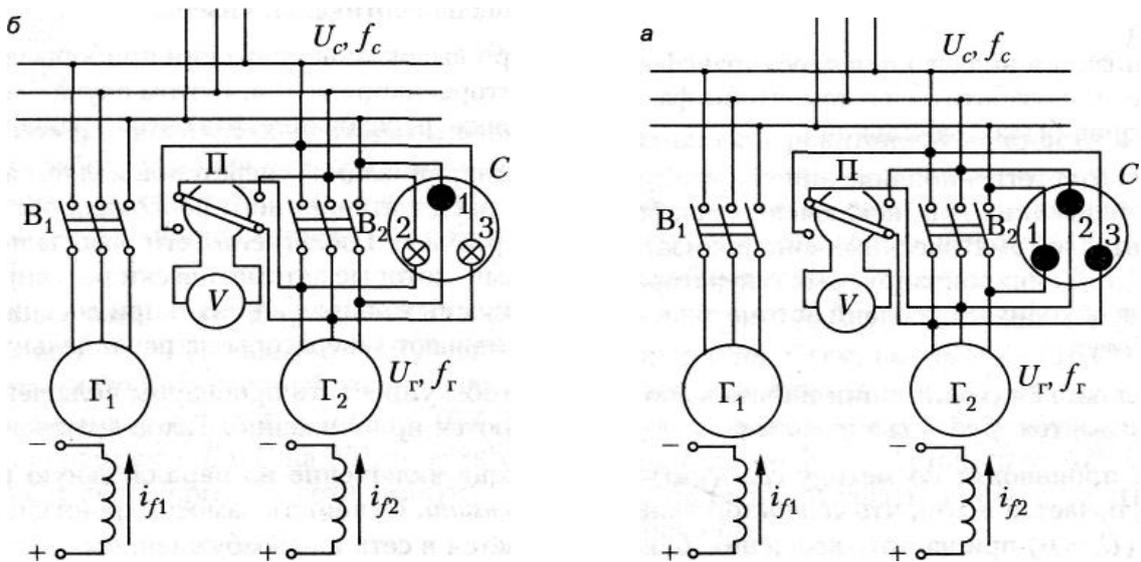


Рис. 2.17. Схемы синхронизации генератора с помощью ламповых синхроскопов с включением: *а*) на погасание и *б*) на вращение света

При $f_2 - f_c \neq 0$ лампы 1,2,3 (рис. 2.17, *б*) загораются и погасают поочередно, и создается впечатление вращающегося света, причем при $f_2 > f_c$ вращение происходит в одну сторону, а при $f_2 < f_c$ – в другую.

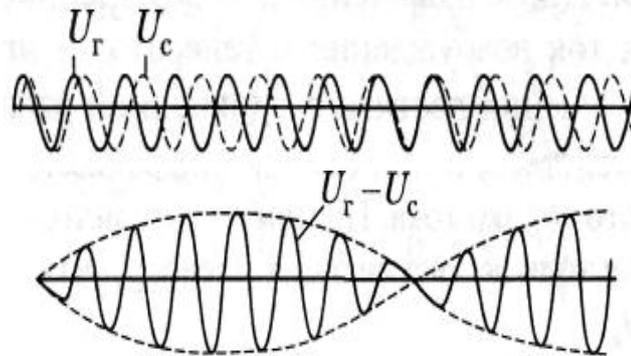


Рис. 2.18. Кривые изменения во времени напряжений генератора U_r , сети U_c и ламп ($U_r - U_c$) при неравенстве частот сети и генератора

Отметим, что если при реализации схемы, приведенной на рис. 2.17, *а*, вместо одновременного погасания и загорания всех трех ламп получится вращение света, а при реализации схемы, изображенной на рис. 2.17, *б*, – одновременное погасание и загорание ламп, это будет указывать на неправильность чередования фаз генератора и сети. При этом необходимо поменять местами начала двух фаз обмотки статора генератора.

Для более точного выбора момента включения параллельно одной из ламп (рис. 2.17, *а*) включают вольтметр, имеющий растянутую шкалу в области нуля (нулевой вольтметр).

2.10.3. Другие методы синхронизации

Синхронизация с помощью ламп и нулевого вольтметра применяется только для генераторов малой мощности. Для мощных генераторов пользуются электромагнитным синхроскопом, который работает на принципе вращающегося магнитного поля, и при $f_2 \neq f_c$ его стрелка вращается с частотой $f_2 - f_c$ в ту или иную сторону в зависимости от того, какая частота больше. При правильном включении стрелка синхроскопа обращена вертикально вверх.

Автоматические синхронизаторы осуществляют автоматическое регулирование U_2 и f_2 синхронизируемых генераторов в нужных направлениях и при достижении необходимых условий автоматически включают генераторы на параллельную работу. Недостатки: сложность, длительность входа в синхронизацию, необходимость непрерывного и квалифицированного обслуживания.

Чаще включение на параллельную работу производят по методу самосинхронизации (грубой синхронизации). Сущность самосинхронизации заключается в том, что генератор включается в сеть в невозбужденном состоянии ($U_2 = 0$) при частоте вращения, близкой к синхронной (допускается отклонение до 2%). При этом отпадает необходимость в точном выравнивании частот, величины и фазы напряжений, благодаря чему процесс синхронизации предельно упрощается и возможность ошибочных действий исключается. После включения невозбужденного генератора в сеть немедленно включается ток возбуждения и генератор втягивается в синхронизм, то есть скорость его вращения достигает синхронной.

При самосинхронизации неизбежно возникновение значительного толчка тока. Поэтому такие методы включения применяют при толчке тока, не превышающем $3,5 I_n$.

2.11. Синхронные режимы параллельной работы синхронных машин

Режим работы синхронной машины в составе энергосистемы при синхронной частоте вращения называется синхронным. Рассмотрим особенности этого режима, считая в целях упрощения анализа, что энергосистема, к которой подключена рассматриваемая машина, является бесконечно мощной, то есть в ней U и f постоянны. Такую энергосистему в дальнейшем иногда будем представлять в виде бесконечно мощного генератора, у которого внутренние сопротивления обмотки якоря равны нулю и, следовательно, $E_s = U$, а инерционная постоянная бесконечно велика, так что его частота вращения всегда постоянна.

Рассмотрим особенности синхронного режима параллельной работы, полагая в целях упрощения, что генератор неявнополюсный и сопротивление обмотки якоря $r_a = 0$. В этом случае ток якоря определяется простой зависимостью

$$i = \frac{\dot{E} - \dot{U}}{j x_d} = \frac{\Delta \dot{U}}{j x_d}. \quad (2.16)$$

2.11.1 Изменение реактивной мощности. Режим синхронного компенсатора

Предположим, что при включении на параллельную работу условия синхронизации возбужденного генератора были соблюдены в точности, то есть $U_c = U_c$ или $E = U_c = U$. Тогда, согласно равенству (2.16), $I = 0$, то есть машина не примет на себя никакой нагрузки.

При увеличении тока возбуждения увеличится E (рис. 2.19, а) и возникнет ток I (см. выражение (2.16), отстающий от ΔU , а также от E и U на 90° , поэтому машина будет отдавать в сеть чисто индуктивный ток и реактивную мощность. Если ток возбуждения уменьшить, так что $E < U$ (рис. 2.19, б), ток I также будет отставать от ΔU на 90° , но опережать E и U на 90° , то есть машина будет отдавать в сеть емкостной ток и потреблять из сети реактивную мощность.

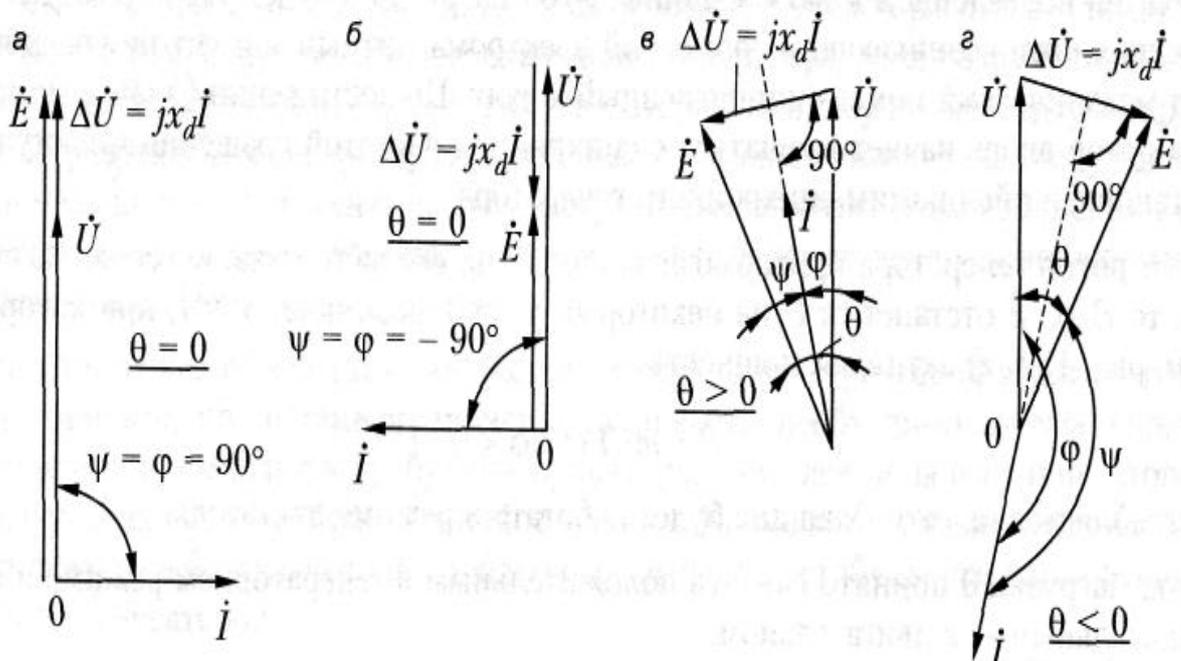


Рис. 2.19. Векторные диаграммы неявнополюсной синхронной машины при работе в режиме: а), б) компенсатора; в) генератора; г) двигателя

Таким образом, изменение тока возбуждения синхронной машины вызовет в ней только реактивные токи или изменение реактивного тока и реактивной мощности. При $E > U$ синхронная машина считается перевозбужденной, а при $E < U$ – недовозбужденной. При равенстве активной мощности нулю перевозбужденная синхронная машина по отношению к сети эквивалентна емкости, а недовозбужденная – индуктивности.

Синхронная машина, не несущая активной нагрузки и загруженная реактивным током, называется синхронным компенсатором. Такие компенсаторы применяются для повышения коэффициента мощности и поддержания нормального уровня напряжения в сети.

Компенсаторы выпускаются мощностью от 10 до 160 МВ*А обычно в горизонтальном исполнении, их номинальные напряжения составляют 6,6 – 15,75 кВ. Проведенные исследования и опыт эксплуатации показывают, что для крупных синхронных компенсаторов оптимальными скоростями вращения (при $f = 50$ Гц) являются 750 – 1000 об/мин.

2.11.2. Изменение активной мощности. Режимы генератора и двигателя

Изменение активной мощности синхронной машины возможно только при изменении механической мощности на ее валу. Увеличим, например, движущий механический момент на ее валу. Тогда равенство моментов на валу нарушится, ротор генератора ускорится, а вектор E начнет опережать вектор U (рис. 2.19, в), между ними возникнет некоторый угол θ , называемый углом нагрузки. При этом возникнет ток I , отстающий от $\Delta U = E - U$ на 90° , но имеющий активную и реактивную составляющие по отношению к напряжению U . В результате в сеть будет отдаваться активная мощность $P = mUI \cos \varphi > 0$, получаемая в процессе электромеханического преобразования механической энергии, подведенной к валу машины. Угол нагрузки θ будет увеличиваться до тех пор, пока возникающий тормозной электромагнитный момент не уравновесит механический момент, приложенный к валу. По достижении баланса моментов ротор вновь начнет вращаться с синхронной частотой вращения и наступит установившийся режим синхронного генератора.

Если ротор генератора притормозить, создав на его валу механическую нагрузку, то ЭДС E отстанет от U на некоторый угол θ , возникнет ток I , при котором (рис. 2.19, г) активная мощность $P = mUI \cos \varphi$ потребляется из сети. Машина будет работать в режиме двигателя.

Угол нагрузки θ принято считать положительным в генераторном режиме и отрицательным – в двигательном.

Все изложенное ранее верно и для явнополюсной машины, с той лишь разницей, что векторные диаграммы будут несколько сложнее.

Отметим некоторые особенности параллельной работы синхронных генераторов на сеть ограниченной мощности. Главная особенность такой работы заключается в том, что изменение режима работы одного генератора может оказывать заметное влияние на режим работы других генераторов. Поэтому все процедуры управления работающим генератором, связанные с изменением его тока возбуждения или механического момента на валу, могут привести к заметным изменениям величины напряжения и частоты в сети. Для того чтобы обеспечить надлежащее качество электрической энергии, генерируемой в энергосистеме ограниченной мощности, необходимо одновременно и согласованно выполнять требуемые процедуры управления на всех генераторах, образующих систему ограниченной мощности. Кроме того, в таких системах может оказаться более сложной проблема обеспечения устойчивости параллельной работы генераторов.

2.12. Несимметричные режимы работы синхронных генераторов

2.12.1. Физические особенности несимметричных режимов

В практике эксплуатации синхронных генераторов иногда наблюдаются такие режимы, когда мощные однофазные потребители нарушают их симметричную нагрузку. Возможны и аварийные ситуации, обусловленные, например, несимметричными короткими замыканиями, которые могут стать длительными. Очевидно, что физические процессы электромеханического преобразования энергии в этих режимах будут отличаться от таковых при симметричной нагрузке.

Рассмотрим некоторые физические особенности несимметричных режимов на примере короткого замыкания. Для определенности будем полагать, что на роторе имеется только одна обмотка возбуждения, а на статоре – только одна короткозамкнутая фазная обмотка. Оценим частотный спектр токов, индуцированных в этом режиме в обмотках статора и ротора, и обусловленные этими токами структурные изменения магнитного поля в воздушном зазоре генератора.

Переменный ток основной частоты f_1 , индуцированный в короткозамкнутой обмотке статора магнитным потоком возбуждения Φ , будет создавать пульсирующее магнитное поле якоря. Представим его двумя полями – прямым и обратным, вращающимися с одинаковой частотой $n = \frac{f}{p}$, но в разные стороны.

Прямо вращающееся магнитное поле якоря неподвижно по отношению к ротору и образует с потоком возбуждения единое магнитное поле, необходимое для электромеханического преобразования энергии. Обратное поле будет вращаться с частотой $2n_1$ по отношению к ротору, индуцируя в его обмотке возбуждения переменный ток удвоенной частоты $2f_1$. Этот ток, в свою очередь, возбудит пульсирующее магнитное поле ротора, которое также представим двумя полями – прямо и обратно вращающимися с частотой $2n_1$ по отношению к ротору.

Очевидно, что прямое поле ротора будет вращаться с частотой $3n_1$ по отношению к статору, а обратное – с частотой n_1 . Следовательно, прямое поле будет индуцировать в короткозамкнутой обмотке якоря ток утроенной частоты $3f_1$, а обратное поле ротора образует единое магнитное поле с обратным полем якоря, вращающимся с частотой n_1 . Из сказанного становится очевидной физика дальнейшего развития электромагнитных процессов, возникающих в обмотках статора и ротора.

Логическая схема этих процессов представлена на рис. 2.20, где указаны частоты индуцированных токов, а стрелками показаны обусловившие их электромагнитные связи.

Видно, что в рассматриваемом несимметричном режиме в обмотке статора индуцируется спектр токов нечетных гармоник, а в обмотке ротора – спектр токов четных гармоник.

Наличие такого количества гармоник тока и магнитного поля в зазоре создает дополнительные воздействия на конструктивные элементы синхронного генератора, что необходимо учитывать при проектировании генератора.

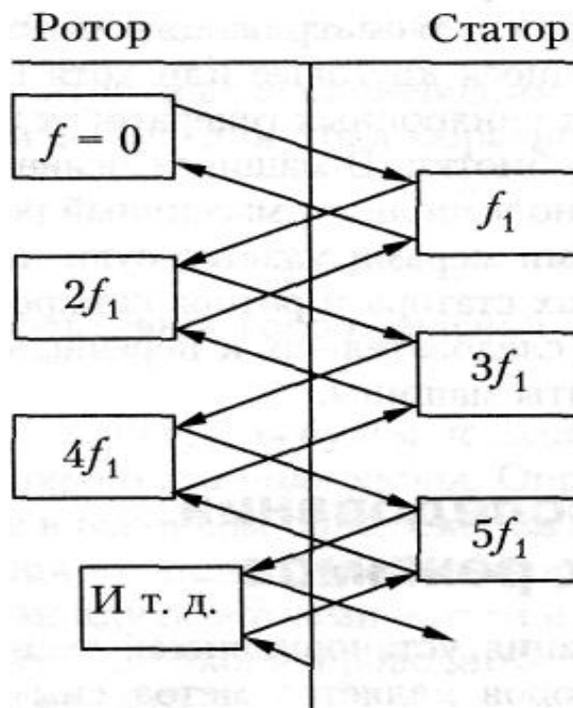


Рис. 2.20. Логическая схема формирования частотного спектра токов ротора и статора

Рассмотрим некоторые из этих дополнительных воздействий.

1. Потери энергии и нагрев ротора. Токи повышенных частот, индуцируемые в обмотках и массивных конструкциях ротора, вызывают в них дополнительные потери и нагрев. Особенно опасны такие токи для массивных роторов турбогенераторов. По глубине ротора эти токи распределяются в условиях резкого поверхностного эффекта, то есть в относительно тонком слое (толщиной несколько миллиметров), и поэтому характеризуются большой плотностью на поверхности ротора.

2. Вибрации. Взаимодействие вращающихся с разной частотой вращения и в разные стороны магнитных потоков в воздушном зазоре приводит к возникновению пульсирующих тангенциальных электромагнитных сил и пульсирующих электромагнитных моментов. Кроме того, в результате взаимодействия этих же магнитных полей возникают переменные радиальные электромагнитные силы. Все эти силы вызывают дополнительную вибрацию частей машины, шум и ослабление запрессовки сердечника статора. Особенно опасны пульсирующие силы для сварных соединений.

3. Искажение симметрии напряжений. Перенапряжения. Сложная структура прямо – и обратновращающихся магнитных полей в воздушном зазоре обуславливает сложный гармонический спектр ЭДС, индуцируемых в

обмотках статора. Большой спектр гармоник тока при несимметричных режимах возникает, как видно из рассмотренного примера, лишь потому, что одноосная обмотка возбуждения и неполнофазная обмотка статора не способны создать вращающееся магнитное поле. Поэтому для ограничения электромагнитного процесса возникновения высших гармоник тока в обмотках машины на роторе предусматривают конструктивные структуры, способные создавать вращающиеся круговые или хотя бы эллиптические магнитные поля. В явнополюсных синхронных генераторах эту роль выполняют демпферные (успокоительные) обмотки. В машинах неявнополюсных (типа турбогенераторов) эту роль успешно выполняет массивный ротор с электропроводными пазовыми клиньями. Такими мерами удастся существенно ограничить высшие гармоники токов в обмотках статора и ротора синхронных генераторов при несимметричных режимах, а следовательно, и перечисленные ранее дополнительные воздействия на элементы машины.

Общим методом исследования установившихся несимметричных режимов работы синхронных генераторов является метод симметричных составляющих, согласно которому несимметричная система токов якоря (равно как ЭДС и напряжений) представляется тремя симметричными системами – прямой (I_1), обратной (I_2) и нулевой (I_0) последовательностями. Действие каждой из них рассматривается отдельно.

2.12.2. Токи и сопротивления прямой последовательности

При симметричной нагрузке синхронного генератора существуют только токи прямой последовательности. Введенные там синхронные сопротивления x_d и x_q являются индуктивными сопротивлениями фазных обмоток якоря синхронной машины для составляющих тока прямой последовательности I_d и I_q .

Принципиальной особенностью нормального режима работы синхронной машины с токами прямой последовательности является то, что ротор машины вращается синхронно с полем токов прямой последовательности или полем реакции якоря, и поэтому это поле не индуцирует в цепях индуктора никаких токов. По этой причине сопротивления x_d и x_q определяются как статические, то есть при отсутствии трансформаторных связей магнитного поля якоря с обмотками ротора. В силу этого значения этих сопротивлений, аналогичных сопротивлению трансформатора при холостом ходе, довольно велики.

2.12.3. Токи и сопротивления обратной последовательности

Токи обратной последовательности создают в воздушном зазоре магнитное поле реакции якоря обратной последовательности, которое вращается по отношению к статору с синхронной частотой вращения в обратном направлении, а по отношению к ротору – с удвоенной синхронной частотой вращения.

Обратносинхронное поле якоря в силу отмеченных ранее физических особенностей возбуждает такой электромагнитный процесс, при котором в обмотках статора и ротора индуцируются высшие гармоники тока, которые не

могут в явном виде учитываться при использовании метода симметричных составляющих. Отмеченная особенность электромагнитных процессов учитывается при определении сопротивлений для токов обратной последовательности.

Следуя теории метода симметричных составляющих, представим полное сопротивление фазной обмотки якоря для тока обратной последовательности I_2 в виде

$$Z_2 = r_2 + jx_2, \quad (2.17)$$

где r_2 и x_2 – активное и индуктивное сопротивления обратной последовательности соответственно.

При определении сопротивлений r_2 и x_2 будем исходить из физической картины вращающегося обратносинхронного поля якоря. Определим сначала x_2 , учитывая, что это сопротивление в основном определяется магнитной проводимостью путей для обратносинхронного поля реакции якоря. Вследствие появления трансформаторных связей между обмотками ротора и статора, возникающих при обратносинхронном поле реакции якоря, проводимость эта должна определяться как динамическая.

При этом следует иметь в виду, что магнитная проводимость путей для обратносинхронного поля реакции якоря, возникающая в результате его вращения по отношению к несимметричному ротору, будет периодически меняться. Следовательно, будет периодически изменяться и x_2 . В машине с демпферными обмотками будет наблюдаться изменение в пределах от x_d'' (когда обратносинхронное поле реакции якоря ориентировано в направлении продольной оси ротора) до x_q'' (когда оно ориентировано по поперечной оси ротора). В машине без демпферных обмоток диапазон изменения x_2 будет от x_d' до x_q .

В расчетах по методу симметричных составляющих во внимание принимается лишь постоянная составляющая x_2 , определяемая либо по среднему значению магнитной проводимости путей для обратносинхронного поля реакции якоря, либо по среднему значению магнитного сопротивления тех же путей.

При усреднении магнитной проводимости получим:

$$x_2 = \frac{x_d'' + x_q''}{2} \quad (2.18)$$

для машин с демпферными обмотками и

$$x_2 = \frac{x_d' + x_q}{2} \quad (2.19)$$

для машин без демпферных обмоток.

2.12.4. Токи и сопротивления нулевой последовательности

Токи нулевой последовательности обмотки статора I_0 создают в воздушном зазоре только пульсирующие поля гармоник 3, 9, 15... , а основная гармоника поля будет отсутствовать. Эти гармоники индуцируют в обмотках возбуждения и успокоительной токи, значение которых невелико.

Сопротивление нулевой последовательности

$$Z_0 = r_0 + jx_0. \quad (2.20)$$

Индуктивное сопротивление нулевой последовательности x_0 по причине отсутствия поля основной гармоники довольно невелико и определяется полями пазового и лобового рассеяния обмотки статора и указанными гармониками поля в зазоре. Можно считать, что $x_{\sigma a} = x_0$, если обмотка якоря выполнена с диаметральной шагом, и $x_{\sigma a} > x_0$, если шаг укороченный. Это происходит потому, что при укороченном шаге встречаются пазы, в которых полный ток нулевой последовательности оказывается равным нулю. Соответственно, в них будут отсутствовать потоки пазового рассеяния. Активное сопротивление нулевой последовательности $r_0 = r_a$. Сопротивления z_0 , x_0 и r_0 можно определить опытным путем, если при вращении машины с синхронной частотой питать последовательно включенные фазы обмотки статора током I_0 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копылов И.П. Электрические машины: Учебник для бакалавров / под ред. И.П. Копылова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2012. – 675 с.
2. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: Учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2007. – 320 с.
3. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока: Учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2010. – 350 с.
4. Копылов И.П. Электрические машины: Учебник для вузов / И.П. Копылов. – 3-е изд., испр. – М.: Высш. шк., 2002. – 607 с.
5. Попов В.В. Введение в электромеханику: Учебное пособие. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000. – 260 с.
6. Гольдберг О.Д., Макаров Л.В., Хелемская С.П. Проектирование электрических машин: Учебник для вузов. – М.: ИД «Бастет», 2014. – 560 с.
7. Проектирование электрических машин: Учебник для вузов / И.П. Копылов, К.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев; под ред. И.П. Копылова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2005. – 430 с.
8. Арсеньев Г.Н. Электропреобразовательные устройства РЭС: Учебник. – М.: ИД «ФОРУМ»: ИНФРА – М., 2014. – 544 с.
9. Александров Г.Н. Режимы работы трансформаторов: РАО «ЕЭС России». Центр подготовки кадров (СЗФ АО «ГВЦ Энергетики». – СПб., 2003. – 180 с.
10. Арсеньев Г.Н., Деркач В.В. Автоматические устройства радиоэлектронных систем: Учебное пособие для вузов. М.: Радиотехника, 2006. – 408 с.
11. Задоя Н.И. Основы электрических машин (Машины переменного тока): Методическое пособие и контрольные задания / Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2014. – 46 с.

Задоя Николай Иванович

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Часть 2. Асинхронные машины переменного тока.
Синхронные машины переменного тока

Учебное пособие для бакалавров направления
«Электроэнергетика и электротехника»

Редактор Е.Ф. Изотова

Подписано в печать 02.09.14. Формат 60x84 /16.
Усл. печ. л. 4,19. Тираж 125 экз. Заказ 14 1291. Рег. №145.

Отпечатано в РИО Рубцовского индустриального института
658207, Рубцовск, ул. Тракторная, 2/6.