

## Принцип действия и конструкция синхронных генераторов.

### Основные понятия.

*Синхронной* называется бесколлекторная машина переменного тока, в которой скорость вращения ротора  $n_1$  сети переменного тока,

$$n = \frac{f_1 60}{p} \quad (1.1).$$

где  $p$ -число пар полюсов машины.

Применение синхронных машин весьма широко и многообразно. Синхронная машина обратима и может работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя.

Синхронный генератор является основным типом генератора переменного тока, применяемым в процессе производства электроэнергии.

Синхронные двигатели в отличие от двигателей других типов имеют строго постоянную скорость вращения при данной частоте (1.1), не зависящую от нагрузки.

Другой отличительной особенностью синхронных двигателей является возможность регулировки их коэффициента мощности. Последнее свойство наиболее важно в электроприводе большой мощности, так как дает возможность повысить коэффициент полезного действия. Синхронные двигатели малой мощности применяются в системах автоматики, где используется главным образом их свойство постоянной скорости вращения.

Синхронные машины имеют еще одно весьма важное применение- в качестве синхронного компенсатора, дающего возможность улучшать коэффициент мощности в электрической системе.

Синхронные машины изготавливаются различной мощности от долей ватта (двигатели автоматических систем) до сотен мегаватт (турбо и гидрогенераторы, синхронные компенсаторы).

### Принцип действия синхронного генератора.

Работа синхронного генератора основано на явлении электромагнитной индукции и заключается в преобразовании механической энергии в электрическую энергию переменного тока.

При изучении принципа действия генераторов постоянного тока отмечалось, что в обмотке якоря этого генератора индуктируются переменная Э.Д.С. Следовательно, если генератор постоянного тока лишить коллектора, то он превратится в генератор переменного тока. Вращающаяся часть генератора *называется ротором*, неподвижная *статором*. Щетки А и В наложены на контактные кольца, соединенные с концами обмотки.

Если предположить, что магнитная индукция  $B$  распределяется в воздушном зазоре синусоидально ( $B=B_m \sin a$ ), то Э.Д.С., индуктируемая в якорной обмотке генератора, так же является синусоидальной.

$$e = Blv = B_{\max} l v \sin a. \quad (1.2).$$

Отсутствие коллектора упрощает конструкцию машины и дает возможность обмотку, в которой индуктируются Э.Д.С., расположить на неподвижной части генератора - на статоре.

При этом обмотку возбуждения располагают на роторе. Такая конструктивная схема наиболее рациональна в синхронных машинах большой мощности, так как при

расположении рабочей обмотки на роторе пришлось бы передавать в рабочую обмотку через контактные кольца значительные мощности при напряжении до 20 кв. В этих условиях работа контактных колец и щеток стала бы весьма ненадежной, а потери энергии в щеточном контакте - значительны.

При расположении рабочей обмотки на статоре выводы этой обмотки присоединяют непосредственно к электрической сети. Конечно, и в этом случае машина не избавляется от контактных колец и щеток, необходимых для соединения обмотки возбуждения с возбудителем. Но так как величина тока возбуждения в десятки раз меньше рабочего (переменного) тока, а напряжение не превышает 450 в, то щеточный контакт работает более надежно, а потери энергии в нем невелики.

Исходя из перечисленных соображений синхронные машины, как правило, выполняют с рабочей обмоткой, располагаемой на статоре.

Обмотка статора трехфазного генератора состоит из трех однофазных обмоток, смещенных в пространстве под углом 120 эл. градусов относительно друг друга и соединенных звездой или треугольником. На роторе расположены обмотка возбуждения, при подключении которой к источнику постоянного тока (возбудителя) возникает магнитное поле возбуждения.

### Возбуждение синхронных машин.

В синхронных машинах применяются два способа возбуждения электромагнитное и возбуждение постоянными магнитами.

При *электромагнитном возбуждении* основной магнитный поток создается посредством обмотки возбуждения.

В зависимости от способа питания обмотки возбуждения постоянным током синхронные машины разделяются на машины *независимого возбуждения* и машины *самовозбуждением*.

При независимом возбуждении для питания обмотки возбуждения используются генератор постоянного тока, называемый возбудителем.

Реостаты  $r_1$  и  $r_2$  предназначены для регулирования величины тока возбуждения синхронной машины. Мощность возбудителя составляет от 2 до 5% мощности синхронной машины при напряжении до 450 в. Возбудитель обычно монтируют совместно с синхронной машиной и он является его неотъемлемой частью. При этом возбудитель располагают либо по оси машины, тогда якорь возбудителя закрепляют на выступающем конце вала.

При самовозбуждении питание обмотки возбуждения осуществляется от синхронного генератора с применением выпрямителя. Самовозбуждение применяется в синхронных машинах малой и средней мощности.

При возбуждении синхронных машин *постоянными магнитами*, последние обычно располагаются на роторе. Этот способ возбуждения дает возможность получить машину без контактных колец. Отсутствие в такой машине обмотки возбуждения уменьшает электрические потери, а следовательно, повышает к.п.д. Но вместе с тем возбуждение от постоянных магнитов усложняет регулировку параметров машины, например регулировку Э.Д.С. генератора.

Синхронные машины с постоянными магнитами обычно выполняются на малые мощности.

### *Типы синхронных машин и их конструкция.*

В силовых установках переменного тока в качестве первичных двигателей синхронных генераторов применяют паровые или гидравлические турбины и двигатели внутреннего сгорания (дизели). В первом случае синхронные генераторы называют гидрогенераторами, а во втором случае - дизель генераторами. Все эти типы синхронных генераторов конструктивно отличаются друг от друга.

Так как гидравлическая турбина работает при сравнительно небольшой скорости вращения (60-500 об/мин), то для получения переменного тока промышленной частоты в гидрогенераторе применяют ротор с большим числом полюсов. Поэтому роторы гидрогенераторов имеют конструкцию с *явно выраженными полюсами* (явно полюсную), при которой каждый полюс выполняется в виде отдельного узла, состоящего из сердечника и полюсной катушки. Все полюса закрепляются на обode.

Гидрогенераторы, как правило, выполняются с вертикальным расположением вала.

Паровая турбина работает при большой скорости вращения, поэтому турбогенераторы являются быстроходными синхронными машинами и их роторы, как правило, выполняются двухполюсными ( $n_1 = 3000 \text{ об/мин}$ )  $n$

В процессе работы машины на ротор действуют центробежные силы, величина которых пропорциональна квадрату окружной скорости. Поэтому при таких больших скоростях вращения, какие имеют место в турбогенераторах, явно полюсная конструкция ротора непригодна по условиям механической прочности. В этом случае применяют неявнополюсный ротор, имеющий вид удлиненного стального цилиндра с профрезерованными на поверхности продольными пазами для обмотки возбуждения.

Турбогенераторы и дизель генераторы выполняются с горизонтальным расположением вала. Дизель генераторы рассчитываются на скорость вращения 600-1500 об/мин и выполняются ротором.

Ниже является неподвижной частью синхронной машины и состоит из корпуса и сердечника, в пазах которого располагается обмотка.

Статор является неподвижной частью синхронной машины и состоит из корпуса и сердечника, в пазах которого располагается обмотки.

Для машин малой мощности корпуса отливают из чугуна или стали, а для машин средней и большой мощности - выполняют сварными. Корпуса машин большой мощности для удобства сборки и транспортировки делают разъемными.

Сердечник статора изготавливают из листовой электротехнической стали толщиной 0.5 или 0.35 мм. Листы штампуют в виде колец и изолируют с двух сторон лаком. В крупных машинах сердечник разделяют в осевом направлении на ряд пакетов толщиной до 6см, между которыми оставляют воздушный зазор (вентиляционный канал) шириной до 1см.

В листах сердечника делают пазы для кладки проводов обмотки статора. Чаще всего пазы выполняют прямоугольными, открытыми или полузакрытыми.

Обмотку статора выполняют из секций, изготовленных обычно из медных проводов круглого или прямоугольного сечения.

Выводы обмотки статора обозначают буквой  $C$  с цифрой, в соответствии с номером фазы.

Ротор неявнополюсных синхронных машин выполняют из цельной поковки или сборным.

Для размещения обмотки возбуждения на наружной поверхности ротора выфрезеровывают пазы прямоугольной формы, которые занимают только две трети окружности, образуя центральные зубцы.

Обмотку ротора неявнополюсных машин выполняют из медного провода прямоугольного сечения. Обмотка крепится при помощи закладываемых в пазы металлических клиньев. Изоляция обмотки ротора осуществляется так же, как обмотки статора.

Концы обмотки выводятся на контактные кольца. Ротор с явно выраженными полюсами состоит из обода, на котором закреплены сердечники полюсов с катушками. Сердечник полюса имеет с одной стороны полюсный наконечник, а с другой – хвост, при помощи которого он крепятся на ободу.

### *Обмотки статоров машин переменного тока и Э.Д.С. синхронного генератора.*

Обмотка статора машины переменного тока представляет собой систему проводов, определенным образом уложенных в пазах сердечника статора. Обмотки статора машин переменного тока имеют много общего с обмотками якоря машин постоянного тока. Но между ними есть и существенная разница - обмотки переменного тока являются незамкнутыми.

Элементом обмотки статора является *секция*, которая может быть одно – или многовитковой. Секция состоит из активных сторон и лобовых частей. Расстояние между активными сторонами секции называется шагом обмотки  $y$ .

Шаг называется *диаметральным* или *полным*, если он равен полюсному делению ( $y = \tau = \frac{z}{2p} = \tau$ ), укороченным, если он меньше полюсного деления ( $y < \tau$ ).

Применяемые в настоящее время *обмотки статора классифицируются* следующим образом:

по числу фаз – однофазные и многофазные (главным образом трехфазные)

по способу укладки секций в пазы – однослойные, когда сторона секции занимает весь паз, и двухслойные, когда в одном пазу лежат две стороны различных секций (по аналогии с обмоткой якоря машины постоянного тока)

в зависимости от размеров секций – обмотки с полным и обмотки с укороченным шагом.

### *Трехфазная двухслойная обмотка.*

Простейшая трехфазная обмотка может быть выполнена тремя секциями, оси которых сдвинуты по окружности статора на  $1/3$  двойного деления  $\frac{2\tau}{3}$ . Каждая секция в этом случае представляет собой фазную обмотку.

Обычно фазная обмотка состоит не из одной, а из нескольких секций, занимающих  $q$  пазов в пределах каждого полюсного деления. Таким образом, для образования трехфазной обмотки зубцовый слой сердечника статора в пределах каждого деления необходимо разделить на три зоны по  $q$  пазов в каждой. Порядок

чередования таких зон под каждым полюсом должен быть одинаковым. Секции, уложенные в пазы одинаковых зон, образуют фазные обмотки.

Для определения величины  $q$  представляющей собой число пазов приходящихся на полюс и фазу, следует пользоваться формулой

$$q = \frac{z}{2pt} \quad (1.3).$$

где  $m$  - число фаз, для фазной обмотки  $m = 3$ .

Угол сдвига между осями фазных обмоток в трехфазной обмотке составляет 120 эл. градусов. Однако для построения схемы обмотки удобнее этот сдвиг выразить в пазах. Все окружность статора составляет 360 рэл. градусов, поэтому угол между соседними пазами

$$a = \frac{360p}{Z} \quad (1.4).$$

Тогда сдвиг между фазными обмотками, выраженный в пазах, равен

$$\lambda = \frac{120}{a} \quad (1.5).$$

### *Трехфазные однослойные обмотки статоров.*

В однослойных обмотках каждая сторона секции полностью заполняет паз сердечника статора.

Однослойные обмотки статоров разделяются на концентрические и шаблонные.

В концентрической обмотке секции каждой секционной группы имеют разную ширину и располагают концентрически. Шаги обмотки  $y$  секций, входящих в секционную группу, неодинаковы, но их среднее значение определяется выражением

$$y_{cp} = \frac{Z}{2p} \quad (1.6).$$

Так, например, для трехфазной однослойной концентрической обмотки с  $Z=24$ ;  $2p=4$

$$Y_{cp} = \frac{24}{4} = 6 \text{пазов}, \quad (1.7).$$

$$Q = \frac{Z}{2pt} = \frac{24}{4 \cdot 3} = 2. \quad (1.8).$$

Следовательно, секционная группа каждой фазной обмотки состоит из двух секций.

Шаги этих секций, расположенных концентрически, равны

$$y_1=7 \text{ и } y_2=5.$$

Правильность принятых шагов этих секций проверяется по формуле

$$\frac{\sum_1^q y}{q} = y_{cp}, \quad (1.9).$$

где  $\sum_1^q y$  - сумма шагов всех концентрически расположенных секций,

$$\sum_1^q y = y_1 + y_2 + \dots + y_q.$$

В нашем примере  $\frac{7+5}{2} = 6$ , т.е. шаги  $y_1$  и  $y_2$  выбраны правильно.

Однослойная обмотка называется двухплоскостной, так как лобовые части секций этой обмотки имеют разный вылет и располагаются в двух плоскостях.

Такая конструкция обмотки позволяет избежать пересечения лобовых частей секции, принадлежащих разным фазам. При нечетном числе пар полюсов число групп лобовых частей будет так же нечетным. В этом случае одну секционную группу приходится делать переходного размера с двойко изогнутой лобовой частью.

На рис.1 показана схема однослойной трехфазной обмотки для машины с разъемным статором. Такая конструкция обмотки позволяет разобрать статор на две части (по линии разреза), не повредив ни одну из секций. Лобовые части секций в этой обмотке расположены в трех плоскостях.

Применение различных по размеру секций, образующих секционные группы, ведет к тому, что секционные группы концентрических обмоток обладают разными сопротивлениями. Это следует учитывать при определении размеров секций секционных групп, образующих фазную обмотку. Необходимо чтобы все фазные обмотки имели одинаковое сопротивление, а поэтому все фазные обмотки должны содержать одинаковое число различных по размерам секционных групп.

Существенным недостатком концентрических обмоток является наличие в них секций различных размеров, что усложняет изготовление обмотки. От этого недостатка избавлены *шаблонные* однослойные обмотки. Все секции этих обмоток имеют одинаковые размеры и могут изготавливаться на общем шаблоне.

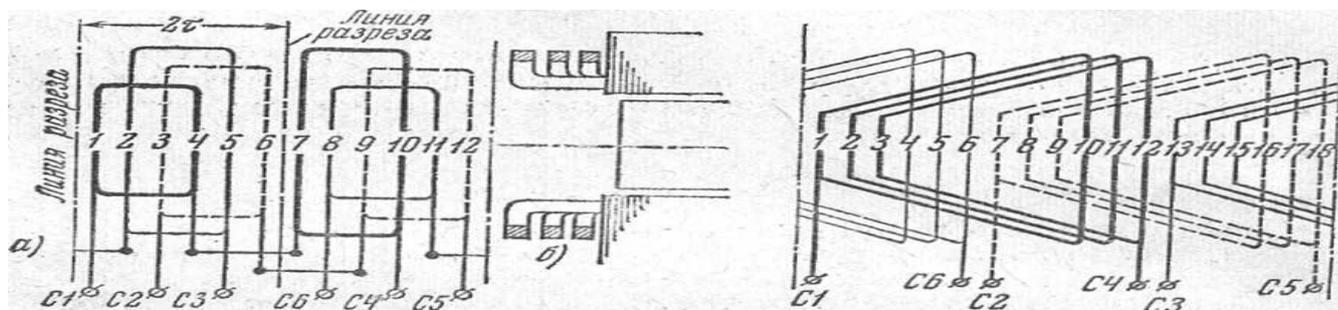


Рис.1. Трехфазная однослойная обмотка машины с разъемным статором: а — схема обмотки ( $2p = 4$ ;  $Z = 12$ ;  $\langle \tau = 1 \rangle$ ) б — расположение лобовых частей

Рис.2. Трехфазная однослой-

Кроме того, все секции таких обмоток имеют одинаковые сопротивления, а лобовые части получаются короче, чем в концентрических обмотках, что уменьшает расход меди.

В качестве примера рассмотрим простую шаблонную обмотку двухполюсной машины с тремя секциями в секционной группе. Развернутая схема этой обмотки представлена на рис.2. Трапецеидальная форма секций несколько облегчает расположение лобовых частей обмотки.

Общим недостатком всех типов однослойных обмоток является затрудненное размещение лобовых частей, которые приходится размещать в двух и более плоскостях.

### Однофазные обмотки.

Однофазная обмотка выполняется аналогично одной фазе трехфазной обмотки с той разницей, что секций этой обмотки занимают лишь  $2/3$  пазов сердечника статора. Такая конструкция обмотки делает ее наиболее экономичной. Дело в том, что



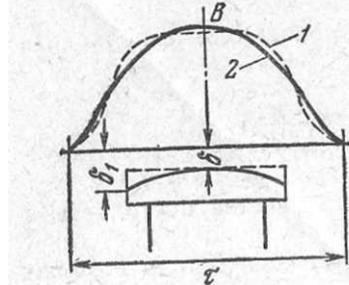
Как следует из закона электромагнитной индукции, мгновенное значение Э.Д.С. одного статорной обмотки определяется выражением

$$e_{пр} = B l v$$

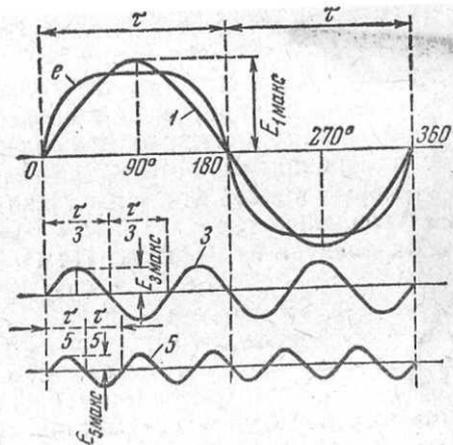
Если принять длину проводника  $l$  и скорость движения поля ротора  $v$  величинами

распределения магнитной индукции  $B$  в зазоре по окружности статора

$$e_{пр} = B \cdot \text{const.}$$



нескошенном (кривая 1) и скошенном (кривая 2) полюсных наконечниках.



постоянными, что имеет место в синхронной машине, то характер изменения Э.Д.С.  $e_{пр}$  будет зависеть исключительно от кривой распределения магнитной индукции  $B$  в зазоре по окружности статора.

Из этого следует что для получения кривой Э.Д.С. близкой к синусоиде, прежде всего необходимо, чтобы распределение магнитной индукции  $B$  в зазоре было достигается увеличением зазора под краями полюсных наконечников. Хорошие результаты дает полюсный наконечник с отношением  $\frac{\delta_1}{\delta} = 1.5 - 2$ .

В неявнополусных машинах синусоидальный характер распределения магнитной индукции создается подбором соответствующего отношения между частью окружности ротора без пазов и частью его окружности с пазами, в которых укладывается распределенная обмотка возбуждения. Обычно это отношение равно  $2/3$ .

Однако даже в этом случае кривая распределения магнитной индукции в зазоре лишь приближается к синусоиде. Поэтому э. д. с. обмотки статора остается несинусоидальной и содержит высшие гармоники. Так как кривая э. д. с. обмотки статора симметрична относительно оси абсцисс, то в составе этой э. д. с. содержатся наряду с первой (основной) гармоникой высшие гармоники только нечетного порядка: 3, 5, 7 и т. д.

Э. д. с. первой гармоники трехфазной обмотки сдвинуты по фазе относительно друг друга на угол  $120^\circ$

$$e_{1A} = E_{1\text{макс}} \sin \omega t;$$

$$e_{1B} = E_{1\text{макс}} \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$e_{1C} = E_{1\text{макс}} \sin(\omega t + 120^\circ)$$

Сделав аналогичную запись для э. д. с. третьей гармоники получим.

$$e_{3A} = E_{3\text{макс}} \sin 3 \omega t$$

$$e_{3B} = E_{3\text{макс}} \sin 3(\omega t - 120^\circ) = E_{3\text{макс}} \sin 3 \omega t ;$$

$$e_{3C} = E_{3\text{макс}} \sin 3(\omega t + 120^\circ) = E_{3\text{макс}} \sin 3 \omega t$$

Отсюда следует, что э. д. с. третьей гармоники во всех трех фазах обмотки статора в любой момент времени совпадают по направлению. Это приводит к отсутствию э. д. с. третьей гармоники в линейной э. д. с. (напряжении) при схемах соединения трехфазной

обмотки как звездой, так и треугольником. Все сказанное о третьей гармонике распространяется на гармоники, номера которых кратны трем: 9, 15 и т.д. Амплитуда высших гармоник уменьшается с увеличением номера гармоники. Поэтому из оставшихся гармоник практическое значение имеют лишь пятая и седьмая. Действие этих гармоник можно в значительной степени ослабить укорочением шага обмотки. Предположим, что кривая распределения магнитной индукции  $B$  в воздушном зазоре не синусоидальна и наряду с первой гармоникой  $B_1$  содержит пятую гармонику  $B_5$  (рис.14, а). Если при этом обмотка выполнена с диаметральным шагом ( $y = \tau$ ), то э. д. с. первой и пятой гармоник ( $e_x$  и  $e_b$ ) в обеих сторонах секции (рис.14, б) складываются. В этом случае э. д. с. секции  $e_{cd}$ , а следовательно, и э. д. с. всей обмотки содержит наряду с первой также и пятую гармонику. Если же шаг секции укоротить на  $1/5 \tau (y = \frac{4}{5} \tau)$ , то э. д. с. пятой гармоники  $e_5$  в активных сторонах секции будут действовать встречно и взаимно уничтожаться (рис. 14, в), тогда в секции останется только э. д. с. первой гармоники и э. д. с. секции  $e_c$ , станет практически синусоидальной. Аналогично при укорочении шага на  $1/7 \tau (y = \frac{6}{7} \tau)$  уничтожается э. д.с. седьмой гармоники

Обычно шаг секции принимают равным  $0,8 - 0,86\tau$ . Этим достигается

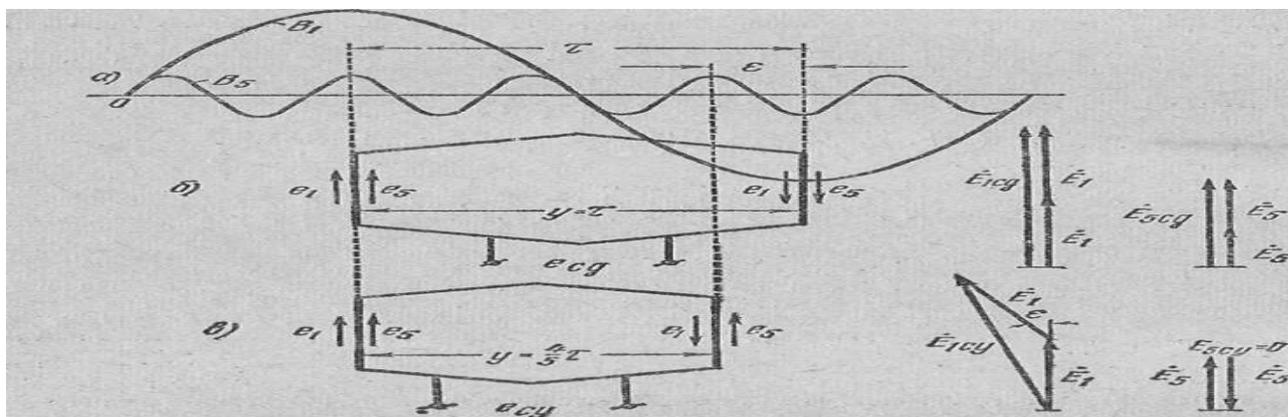


Рис. 5. Устранение э.д. с. пятой гармоники укорочением шага обмотки на  $1/5\tau$

ослабление э. д. с. как пятой, так и седьмой гармоник. Из построений, проведенных на рис.5, видно, что укорочение шага секции на  $\varepsilon$  связано с ослаблением не только высших гармоник, но и основной гармоники. Так, при  $y = \tau$ . Э. д. с. первой гармоники равна арифметической сумме э. д. с.  $e_1$ , наводимых в обеих сторонах секции (рис.5,б). Однако при укорочении шага э. д. с.  $E_r$  в сторонах секции перестают совпадать по фазе и арифметическая сумма этих э. д. с. заменяется геометрической суммой (рис.5,в). Таким образом, при равных условиях э. д. с. секции с диаметральным, шагом  $E_{cd}$  больше э. д. с. секции с укороченным шагом  $E_{cy}$ .

Отношение  $\frac{E_{cy}}{E_{cd}}$  представляет собой *КОЭФФИЦИЕНТ УКОРОЧЕНИЯ ШАГА ОБМОТКИ*  $K_y$

$$K_y = \frac{E_{cy}}{E_{cd}} \quad (1.10)$$

Для первой гармоники

$$K_{y1} = \sin \frac{y}{\tau} 90 \quad (1.11).$$

В общем случае для Э.Д.С. любой гармоники коэффициент укорочения равен

$$K_{yV} = \sin v \frac{y}{\tau} 90^\circ \quad (1.12).$$

где  $V$  — номер гармоники.

Пример. Определить коэффициенты укорочения шага обмотки для э. д. с. первой, пятой и седьмой гармоник, если шаг обмотки  $y = \frac{4}{5} \tau$ . **Решение.** По формуле имеем

$$K_{y1} = \sin \frac{4}{5} 90^\circ = 0,951;$$

$$K_{y5} = \sin 5 \frac{4}{5} 90^\circ = 0;$$

$$K_{y7} = \sin 7 \frac{4}{5} 90^\circ = 0,573.$$

Следовательно, э. д. с.  $E_x$  обмотки с укороченным шагом составляет 95% от э. д. с, которая имела бы место в обмотке с диаметральным шагом. Но, применив укорочение шага обмотки, мы полностью избавились от э. д. с. пятой гармоники и почти наполовину уменьшили э.д. с. седьмой гармоники.

#### *Реакция якоря и характеристики синхронного генератора.*

В процессе работы нагруженного синхронного генератора в нем действуют две намагничивающие силы:

а) н. с. обмотки возбуждения

$$F_0 = i_B \frac{\omega_B}{p},$$

где  $\frac{\omega_B}{p}$  — число витков обмотки возбуждения на пару полюсов;  $i_B$  — ток в

обмотке возбуждения; б) н. с. обмотки статора (якоря)

$$F_a = 0.45 m_1 \frac{I_1 \omega_1}{p} K_1 \quad (1.13)$$

где  $m_1$  — число фаз обмотки;

$K_1$  — обмоточный коэффициент. Намагничивающая сила обмотки возбуждения  $F_0$  создает магнитное поле возбуждения. Но при подключении нагрузки намагничивающие силы  $F_0$  и  $F_a$  взаимодействуют и создают результирующее магнитное поле, отличающееся от поля обмотки возбуждения. Этот процесс воздействия н. с. обмотки статора  $F_a$  на н. с. обмотки возбуждения  $F_0$  называется *реакцией якоря*.

Реакция якоря оказывает влияние на рабочие свойства синхронной машины, так как изменение магнитного поля в машине сопровождается изменением э. д. с, наведенной в обмотке статора, а следовательно, изменением и ряда других величин, связанных с этой э. д. с. В принципе реакция якоря синхронных машин аналогична реакции якоря в машинах постоянного тока.

Однако, если в машинах постоянного тока влияние реакции якоря на рабочие свойства машины зависит исключительно от величины нагрузки, то в

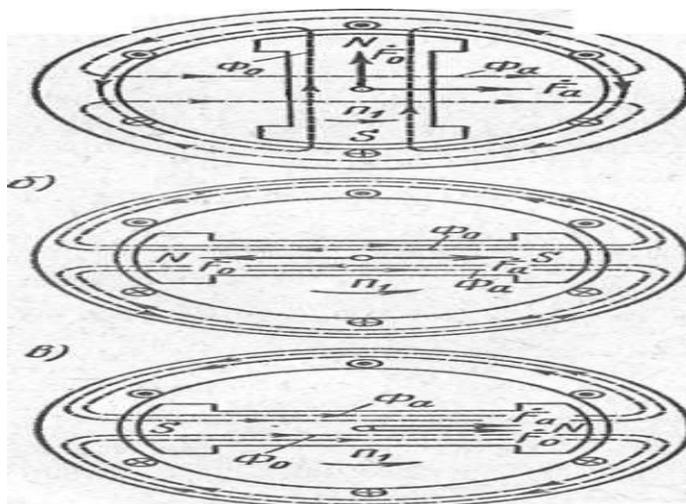
синхронных машинах это влияние определяется еще и характером нагрузки. Синхронные генераторы, как правило, работают на смешанную нагрузку (активно-индуктивную или активно-емкостную). Но для выяснения вопроса о влиянии реакции якоря на работу синхронной машины целесообразно рассмотреть случаи работы генератора при нагрузках предельного характера, а именно: активной, индуктивной и емкостной. Воспользуемся для этого векторными диаграммами намагничивающих сил. При построении этих диаграмм следует иметь в виду, что вектор э. д. с.  $\vec{E}_0$ , индуцируемой магнитным потоком обмотки возбуждения в обмотке статора, отстает по фазе от вектора этого потока (а следовательно, и вектора н. с.  $F_0$ ) на  $90^\circ$ . ■

Что же касается вектора тока в обмотке статора  $I_x$ , то он может занимать по отношению к вектору  $\vec{E}_0$  различные положения, определяемые углом  $\gamma/\delta$ , в зависимости от вида нагрузки.

**Активная нагрузка ( $p = 0$ ).** На рис.6а представлены статор и ротор двухполюсного генератора. На статоре показана часть фазной обмотки. Ротор явно полюсный, вращается против движения часовой стрелки. В рассматриваемый момент времени ротор занимает вертикальное положение, что соответствует максимуму э. д. с.  $E_0$  в фазной обмотке. Так как ток при активной нагрузке совпадает по фазе с э. д. с., то указанное положение ротора соответствует также и максимуму тока. Построив линии магнитной индукции поля возбуждения (ротора) и линии магнитной индукции поля обмотки статора, видим, что н. с. обмотки статора  $F_a$  направлена перпендикулярно н. с. возбуждения  $F_0$ . Этот вывод также подтверждается векторной диаграммой, построенной для этого же случая. Порядок построения этой диаграммы следующий: в соответствии с положением ротора генератора проводим вектор н. с. возбуждения  $F_0$ ; под углом  $90^\circ$  к этому вектору в сторону отставания проводим вектор э. д. с.  $\vec{E}_0$ , наведенной магнитным полем возбуждения в обмотке статора; при подключении, чисто активной нагрузки ток в обмотке статора  $I_1$  совпадает по фазе с э. д. с.  $\vec{E}_0$ , а поэтому вектор и. с.  $F_a$ , создаваемой этим током, сдвинут в пространстве относительно вектора  $F_0$  на  $90^\circ$ .

Такое взаимодействие н. с.  $F_a$  и  $F_0$  аналогично реакции якоря в генераторе постоянного тока при расположении щеток на

Рис.7. а.



геометрической нейтрали: магнитное поле машины ослабляется под набегающим краем полюса и усиливается под сбегающим краем полюса.

Вследствие насыщения магнитно Д цепи результирующее магнитное поле машины несколько ослабляется.

Индуктивная нагрузка  $\varphi = 90^\circ$  Поэтому он достигает максимального значения лишь после поворота ротора вперед на  $90^\circ$  относительно его положения, соответствующего максимуму э. д. с.  $E_0$  (рис.6,б). При этом и. с. якоря  $F_a$  действует по оси полюсов ротора встречно н. с. возбуждения  $F_0$ . В этом мы также убеждаемся, построив векторную диаграмму. Такое действие н. с. якоря  $F_a$  ослабляет поле машины. Следовательно, реакция якоря в синхронном генераторе при чисто индуктивной нагрузке оказывает продольно-размагничивающее действие.

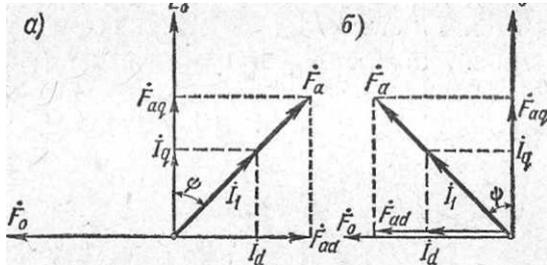


Рис8. Реакция якоря при смешанной нагрузке:

а — активно-индуктивная нагрузка; б — активно-емкостная нагрузка

Емкостная нагрузка ( $\psi = -90^\circ$ ). Так как ток  $I_1$  при емкостной нагрузке опережает по фазе э. д. с.  $\dot{E}_0$  на  $90^\circ$ , то своего наибольшего значения он достигает раньше, чем э. д. с, т. е. когда ротор займет положение, показанное на рис.6, в. Намагничивающая сила якоря  $F_a$ , так же как и в предыдущем случае, действует по оси полюсов, но теперь уже согласно с н. с. возбуждения  $F_0$ . При этом происходит усиление магнитного поля возбуждения. Таким образом, при чисто емкостной нагрузке синхронного генератора реакция якоря оказывает продольно-намагничивающее действие.

Смешанная нагрузка. При смешанной нагрузке синхронного генератора ток  $I_1$  статора сдвинут по фазе относительно э. д. с.  $\dot{E}_0$  на угол  $\psi$ , значения которого находятся в пределах  $0 < \psi < \pm 90^\circ$ . Для выяснения вопроса о влиянии реакции якоря при смешанной нагрузке воспользуемся диаграммами н. с, представленными на рис.7.

При активно-индуктивной нагрузке (рис.7,а) вектор  $F_a$  отстает от вектора  $\dot{E}_0$  на угол  $0 < \psi < 90^\circ$ . Разложим вектор  $F_a$  на две составляющие: продольную составляющую н. с. якоря  $F_{ad} = F_a \sin \psi$  поперечную составляющую н.с. якоря  $F_{aq} = F_a \cos \psi$ . Такое же разложение н. с. якоря  $F_a$  на составляющие можно сделать в случае активно-емкостной нагрузки (рис.7,б). Поперечная составляющая н. с. якоря  $F_{aq}$  пропорциональна активной составляющей тока нагрузки

$$I_q = I_1 \cos \psi \quad (1.14)$$

а продольная составляющая н. с. якоря  $F_{ad}$  пропорциональна реактивной составляющей тока нагрузки

$$I_d = I_1 \sin \psi \quad (1.15)$$

При этом, если реактивная составляющая тока нагрузки  $I_d$  отстает по фазе от э. д. с.  $\dot{E}_0$  (нагрузка активно-индуктивная), то н. с.  $F_{ad}$  размагничивает генератор, если же реактивная составляющая  $I_d$  опережает по фазе э. д. с.  $\dot{E}_0$  (нагрузка активно-емкостная), то н. с.  $F_{ad}$  подмагничивает генератор.

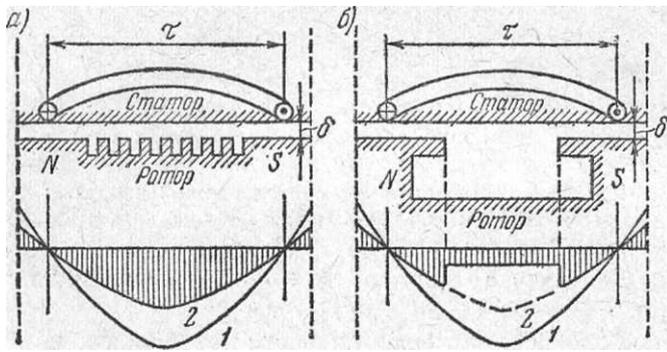


Рис.9. Распределение магнитного потока якоря по поперечной оси синхронной машины:

а — в неявнополусной машине; б — в явно полюсной машине: 1-график  $n$ . с; 2 — график магнитного потока

Направление вектора  $F_{ad}$  относительно вектора  $F_0$  определяет характер реакции якоря, который при токе нагрузки  $I_1$ , отстающем по фазе от э. д. с.  $E_0$ , является размагничивающим, а при токе  $I_1$  опережающим по фазе э. д. с.  $E_0$ , является подмагничивающим.

В явно полюсной машине магнитное сопротивление в меж полюсном пространстве больше магнитного сопротивления под полюсами. Объясняется это значительным воздушным зазором меж полюсного пространства. Поэтому составляющая магнитного потока якоря по поперечной оси в явно полюсной машине намного меньше, чем в неявнополусной (рис.б). При определении поперечной составляющей н. с. якоря для явно полюсной машины это уменьшение потока учитывается коэффициентом  $K_q$   
 $F_{aq} = K_q F_a \cos \psi$

Здесь  $K_q$  — коэффициент поперечной реакции якоря, представляющий собой отношение магнитного потока якоря по поперечной оси в явно полюсной машине к составляющей потока якоря по этой же оси в неявнополусной машине. Обычно  $K_q = 0,4 - 0,5$ .

Продольная составляющая н. с. якоря в явно полюсной машине

$$F_{ad} = K_d F_a \sin \psi$$

где  $K_d$  — коэффициент продольной реакции якоря, учитывающий некоторое ослабление составляющей магнитного потока якоря по продольной оси в явнополусной машине вследствие неравномерности воздушного зазора. Обычно  $K_d = 0,85$ .

### Уравнение э. д. с. синхронного генератора.

Напряжение на выводах генератора, работающего с нагрузкой, отличается от напряжения этого генератора в режиме холостого хода. Это объясняется влиянием ряда причин: реакции якоря, магнитного потока рассеяния, падением напряжения в активном сопротивлении обмотки статора.

Как было установлено, при работе нагруженной синхронной машины в ней действует несколько намагничивающих сил, которые, взаимодействуя, создают результирующий магнитный поток. Однако при учете факторов, влияющих на напряжение синхронного генератора, условно исходят из предположения *независимого действия* всех намагничивающих сил генератора, т. е. предполагается, что каждая из намагничивающих сил создает собственный магнитный поток.

Но следует отметить, что такое представление не соответствует физической сущности явлений, так как в одной магнитной системе возникает лишь один магнитный

поток - результирующий. Но в данном случае предположение независимости магнитных потоков дает возможность понять влияние всех факторов на работу.

Итак, выясним каковы же влияния намагничивающих сил, действующих в явнополносном синхронном генераторе, на работу последнего.

1. Намагничивающая сила обмотки возбуждения  $F_0$  создает магнитный поток возбуждения  $\Phi_0$ , который индуцирует в обмотке статора основную э. д. с. генератора  $E_0$ .

2. Составляющая намагничивающей силы обмотки якоря по продольной оси  $F_{ad}$  создает составляющую магнитного потока реакции якоря по продольной оси  $\Phi_{ad}$ . Этот магнитный поток индуцирует в обмотке статора э. д. с.  $E_{ad}$ , называемую э. д. с. *реакции якоря по продольной оси*,

$$E_{ad} = -j I_d X_{ad}$$

представляющий собой отношение магнитного потока якоря по поперечной оси в

где  $X_{ad}$  — индуктивное сопротивление обмотки статора, эквивалентное реакции якоря по продольной оси.

Величина  $X_{ad}$  показывает, какова степень влияния реакции якоря по продольной оси на работу генератора.

Так, в синхронных машинах при насыщенной магнитной системе магнитный поток реакции якоря по продольной оси  $\Phi_{ad}$  меньше, чем при ненасыщенной. Объясняется это тем, что поток  $\Phi_{ad}$  почти полностью проходит через сталь, магнитное сопротивление которой возрастет при магнитном насыщении. Из этого следует, что величина  $X_{ad}$  зависит от степени магнитного насыщения машины: с увеличением степени магнитного насыщения,  $X_{ad}$  уменьшается.

3. Составляющая намагничивающей силы обмотки якоря по поперечной оси  $F$  создает составляющую магнитного потока реакции якоря по поперечной оси  $\Phi_{aq}$ , который индуцирует в обмотке статора э. д. с. реакции якоря по поперечной оси,

$$E_{aq} = -j I_q X_{aq}$$

Где  $X_{aq}$  — индуктивное сопротивление обмотки статора, эквивалентное реакции якоря по поперечной оси. Величина  $X_{aq}$  не зависит от степени магнитного насыщения машины, так как при явно полюсном роторе магнитный поток  $\Phi_{aq}$  проходит через значительный воздушный зазор меж полюсного пространства.

4. Магнитный поток рассеяния обмотки статора индуцирует в обмотке статора э. д. с. рассеяния  $E_{p1}$

$$E_{p1} = -j I_1 X_{p1}$$

где  $X_{p1}$  — индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора.

5. Ток в фазной обмотке статора  $I$  создает активное падение напряжения

$$U_{r1} = I_1 r_1$$

где  $r_1$  — активное сопротивление фазной обмотки статора.

Ввиду малой величины активного сопротивления  $r_1$  активное падение напряжения невелико и даже при номинальном токе статора обычно меньше 1% от номинального напряжения на выводах генератора  $U_{1н}$

Геометрическая сумма всех перечисленных выше величин дает значение напряжения на выводах синхронного генератора  $U_x$

$$U_1 = E_0 + E_{ad} + E_{aq} + E_{p1} - U_{r1}$$

Полученное выражение представляет собой уравнение э. д. с. явно полюсного синхронного генератора,

В неявнополюсных машинах индуктивные сопротивления  $X_{ad}$  и  $X_{aq}$  приблизительно равны, так как воздушный зазор в этих машинах по окружности статора одинаков. Это дает возможность при построении векторных диаграмм для неявнополюсного генератора реакцию якоря рассматривать не отдельно по продольной и поперечной составляющим, а

учитывать ее по полной намагничивающей силе  $F_a$  и соответствующей э. д. с.

$$E_a = -jI_1 X_a$$

Здесь  $X_a$  — индуктивное сопротивление обмотки статора, обусловленное реакцией якоря.

Кроме того, поскольку поток якоря  $\Phi_a$  и поток рассеяния  $\Phi_{p1}$  создаются одним током, то индуктивное сопротивление реакции якоря  $X_a$  и индуктивное сопротивление рассеяния  $X_{p1}$  целесообразно рассматривать как сумму

$$X/X_c = X_a + X_{p1},$$

где  $X_c$  — синхронное сопротивление неявнополюсной машины.

В этом случае э. д. с. реакции якоря и э. д. с. рассеяния учитываются совместно

$$-jI_1 X_a + (-jI_1 X_{p1}) = -jI_1 X_c = E_c$$

тогда уравнение э. д. с. для неявнополюсного синхронного генератора принимает вид

$$U_1 = E_0 + E_c - U_{r1}$$

### Векторные диаграммы синхронного генератора.

Воспользовавшись уравнением э. д. с. построим векторную диаграмму явно полюсного синхронного генератора, работающего на активно-индуктивную нагрузку (ток  $I_1$  отстает по фазе от э. д. с.  $\dot{E}_0$ ). Векторная диаграмма строится на основании следующих данных:

- 1) э. д. с. генератора в режиме холостого хода  $\dot{E}_0$ ;
- 2) величины тока нагрузки  $I_1$  и его угла сдвига  $\psi_x$  относительно э. д. с.  $\dot{E}_0$ ;
- 3) активного сопротивления фазной обмотки статора  $r_1$ .

При симметричной нагрузке генератора диаграмма строится лишь для одной фазы.

Рассмотрим, порядок построения векторной диаграммы. произвольном направлении откладываем активную вектор Э.Д.С. и под углом  $\psi$  к нему вектор тока  $I_1$ . Последний разложим на составляющие реактивную  $I_d = I_1 \sin \psi_1$  и активную  $I_q = I_1 \cos \psi_1$ . Далее, из конца вектора  $E_a$  откладываем векторы э. д. с.

$$E_{ad} = -jI_d X_{ad}$$

$$E_{aq} = -jI_q X_{aq}$$

$$E_{p1} = -jI_1 X_{p1}$$

$$U_{r1} = I_1 r_1$$

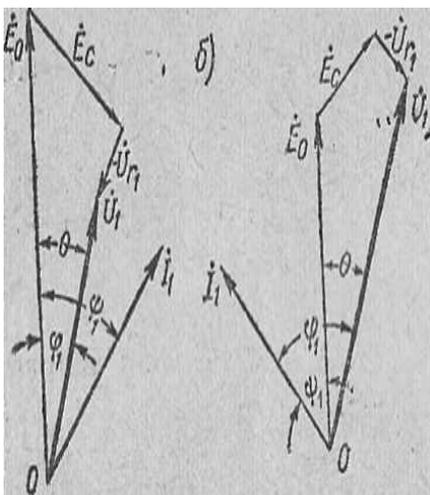


Рис. 10. Векторные диаграммы неявнополюсного генератора:

а - при активно-индуктивной нагрузке; б - при активно-емкостной нагрузке

Соединив конец вектора  $U_{r1}$  с точкой  $O$ , получим напряжение  $U_1$  величина которого равна геометрической сумме векторов э. д. с.

При построении векторной диаграммы генератора, работающего на активно-емкостную нагрузку' (ток  $I_1$  опережает по фазе э. д. с.  $E_0$ )■, вектор тока  $I_1$  откладывают влево от вектора э. д. с. , а направление вектора  $E_{ad}$  устанавливают согласно с направлением вектора э. д. с.  $E_0$ , так как при емкостном характере нагрузки реакция якоря имеет подмагничивающий характер. В остальном порядок построения диаграммы остается прежним.

Векторную диаграмму синхронного неявнополюсного генератора строят на основании уравнения, и этот вектор  $E_0$  откладывают под углом  $\psi_1$  к вектору тока  $I_1$  (рис.9). Следует отметить, что построенные векторные диаграммы не учитывают насыщения магнитной цепи машины, а поэтому они отражают лишь качественную сторону явлений. Но тем не менее эти диаграммы дают возможность сделать следующие выводы:

а) основным фактором, влияющим на изменение напряжения нагруженного генератора, является , продольная составляющая, магнитного потока якоря, создающая э. д. с.  $E_{ad}$ ;

б) при работе генератора на активно-индуктивную нагрузку, т. е. с током  $I_1$ , отстающим по фазе от э. д. с.  $E_0$ , напряжение на выводах обмотки статора  $U_x$  с увеличением нагрузки уменьшается, что объясняется размагничивающим влиянием реакции якоря. При работе генератора на активно-емкостную нагрузку (с током  $I_1$  опережающим по фазе э. д. с.  $E_0$ ), напряжение  $U_1$  с увеличением нагрузки повышается, что объясняется подмагничивающим влиянием реакции якоря.

### *Потери и коэффициент полезного действия синхронных машин.*

Преобразование энергии в синхронной машине связано с потерями энергии, которые классифицируются следующим образом.

Механические потери  $P_{мех}$ —потери на трение в подшипниках; трение о воздух или другой газ, охлаждающий машину, например водород; трение щеток о контактные кольца.

Магнитные потери в сердечнике статора  $P_c$  слагаются из потерь гистерезиса и вихревых токов.

Электрические потери, обусловленные нагревом статорной обмотки

$$P_3 = m_1 I_1^2 r$$

где  $r_{75}$  — активное сопротивление фазы статорной обмотки при рабочей температуре  $75^\circ C$ ;  $m_1$ —число фаз;  $I_1$ —фазный ток статора.

Потери на возбуждение  $P_B$  к которым, помимо потерь в обмотке возбуждения  $i_B U_B$ , относятся потери в самом возбуждателе, если он работает от общего с синхронной машиной первичного двигателя.

Добавочные потери  $P_d$ , которые слагаются из потерь в поверхностном слое ротора, вызванных пульсациями поля вследствие зубчатости внутренней поверхности статора, а также из потерь, вызванных полями рассеяния статора.

Механические потери, магнитные потери в стали статора и потери на возбуждение составляют потери холостого хода

$$P_0 = P_{мех} + P_c + P_B$$

Величина этих потерь не зависит от нагрузки машины. Сумма всех потерь

$$\Sigma P = P_{мех} + P_c + P_3 + P_B + P_d.$$

Коэффициент полезного действия синхронной машины

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \sum P}{P_1}.$$

Данная формула может быть преобразована в вид, удобный для подсчета к.п.д. синхронного генератора,

$$\eta_r = 1 - \frac{\sum p}{P_r + \sum p}$$

где  $P_r$  - полезная мощность генератора, Вт;

$$P_r = m_1 I_1 U_1 \cos \psi_1.$$

К.п.д. синхронного двигателя удобно подсчитать по формуле

$$\eta_d = 1 - \frac{\sum p}{P_1}$$

где  $P_1$  — мощность на входе двигателя, Вт;

$$P_1 = m_1 I_1 U_1 \cos \psi_1 \quad (1.16).$$

Приведенные формулы к.п.д. синхронной машины

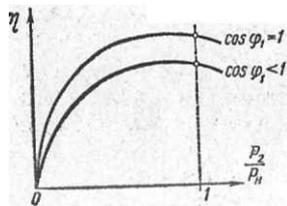


Рис 11. Зависимость  $\eta$  от  $\cos \varphi_1$  синхронной машины

показывают, что величина к.п.д. зависит не только от величины нагрузки машины, но и от значения коэффициента

мощности.

В синхронных машинах небольшой и средней мощности (до 100 кВа) к.п.д. обычно равен 85—90%; у мощных синхронных машин к.п.д. достигает 96—99%.

### ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ.

Включить генератор в сеть с параллельно работающими генераторами можно или способом точной синхронизации, или способом самосинхронизации.

*Способ точной синхронизации.* Сущность этого способа состоит в том, что, прежде чем включить генератор в сеть, его приводят в состояние, удовлетворяющее всем перечисленным условиям. Момент соблюдения этих условий, т. е. момент синхронизации, определяется прибором, называемым синхроскопом. По своей конструкции синхроскопы разделяются на стрелочные и ламповые. Рассмотрим процесс синхронизации генератора с применением лампового синхроскопа.

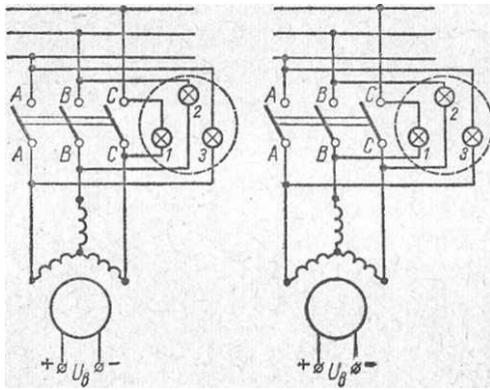
Ламповый синхроскоп состоит из трех ламп, расположенных в вершинах равностороннего треугольника. Лампы могут включаться либо по схеме «на погасание» (рис.11, а), либо по схеме «на вращение света» (рис. 11, б).

а)

б)

Рис.. Включение ламп синхроскопа:

а - по схеме «на погасание»; б — по схеме «на вращение света»



Изменяя скорость вращения первичного двигателя, добиваются равенства  $\omega_r = \omega_c$ , о чем будет свидетельствовать погасание ламп на длительное время. В этот момент и следует

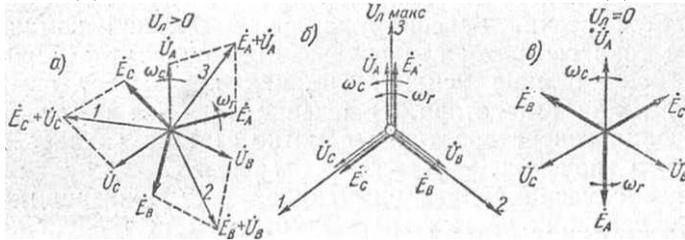


Рис. Векторные диаграммы напряжений и э. д. в. с. при включении ламп синхроскопа «на погасание»

замкнуть рубильник, после чего генератор окажется подключенным к сети.

При включении ламп синхроскопа по схеме «на вращение света» при расхождении частот  $\omega_r \neq \omega_c$  лампы загораются попеременно, по кругу, создавая эффект «вращения света». Причем, если  $\omega_r > \omega_c$ , то «вращение света» происходит в одну сторону, а если  $\omega_r < \omega_c$  — в другую.

Моменту синхронизации соответствует горение двух ламп с одинаковой яркостью и погасание лампы 3 (рис.12), включенной в разрыв фазы А. Следует отметить, что если порядок следования фаз генератора отличается от порядка следования фаз сети (например, в сети А—В—С, а у генератора С—А—В), то лампы синхроскопа, включенные по схеме «на погасание», ведут себя, как при включении «на вращение света». Для создания требуемого порядка следования фаз

необходимо поменять местами любые две фазы на выводах генератора. Процесс точной синхронизации на электростанциях обычно автоматизируют.

Способ самосинхронизации.

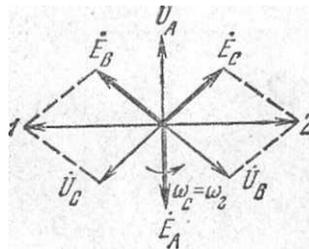


Рис.14. Векторная диаграмма при включении ламп синхроскопа по схеме «на вращение света» в генератора

Ротор невозбужденного генератора приводится во вращение первичным двигателем до скорости, отличающейся от синхронной не более чем на 2—5%, после чего генератор подключается к сети. Для того что избежать перенапряжений в обмотке ротора в момент подключения генератора к сети, ее замыкают на некоторые сопротивления. Сразу же после подключения генератора к сети обмотку возбуждения подключают на клеммы возбуждителя, и генератор начинает

работать синхронно. Так как в момент подключения генератора к сети его Э.Д.С. равна нулю, то под действием напряжения сети в обмотке статора наблюдается резкий бросок тока, превышающий номинальные значения тока генератора. Одновременно на валу ротора появляются механические усилия. Но, как показывает опыт, они не опасны для генератора. В течение 1-7 сек после момента подключения генератора ток в обмотке статора спадает до номинального значения.

Способ самосинхронизации очень удобен в условиях частых включений, так как требует немного времени и легко автоматизируется.

### Синхронизирующая способность синхронных машин

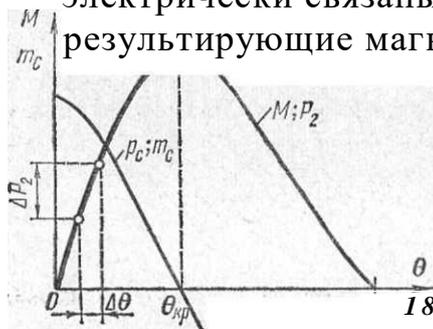
Из рассмотренного в предыдущих параграфах следует, что при параллельной работе нескольких синхронных генераторов в каждом из них возникает некоторая сила, удерживающая генератор в состоянии устойчивой работы, т. е. предотвращающая выход этого генератора из синхронизма. Другими словами, синхронный генератор, включенный на параллельную работу, обладает *СИНХРОНИЗИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ*.

Физический смысл синхронизирующей способности синхронных генераторов состоит в следующем.

В процессе работы синхронного генератора внедействуют два вращающихся магнитных поля: поле статора и поле ротора.

Оба поля вращаются синхронной скоростью и создают в машине результирующее вращающееся магнитное поле. Так как обмотки статоров всех генераторов, включенных на параллельную работу,

электрически связаны между собой, то также связанными оказываются и результирующие магнитные поля всех генераторов, которые вращаются с синхронной скоростью



$$n_1 = \frac{f_1 60}{p}$$

Результирующее магнитное поле машины замыкается через сердечник ротора. Поэтому электрическая связь между обмотками статоров параллельно работающих машин в конечном итоге переходит в магнитную связь роторов этих машин. Магнитная связь роторов

аналогична эластичной механической связи, которая позволяет роторам смещаться относительно друг друга в пределах угла  $\delta$

$$0 < \delta < 90 \text{ эл. градусов,}$$

продолжая вращаться с синхронной скоростью. Лишь при смещении ротора какой-либо из параллельно работающих машин на угол  $\delta$ , выходящий за указанные пределы, связь ротора этой машины с роторами других машин нарушается и машина выходит из синхронизма.

Для количественной оценки синхронизирующей способности синхронной машины вводят понятия *УДЕЛЬНОЙ СИНХРОНИЗИРУЮЩЕЙ МОЩНОСТИ  $P_c$*  и *УДЕЛЬНОГО СИНХРОНИЗИРУЮЩЕГО МОМЕНТА  $T$* . Удельная синхронизирующая мощность определяется отношением приращения мощности  $\Delta P_r$  к соответствующему приращению угла  $\Delta \theta$

$$P_c = \frac{\Delta P_r}{\Delta \theta} \quad \text{или} \quad P_c = \frac{dP_r}{d\theta}$$

Удельный синхронизирующий момент

$$M_c = \frac{dM}{d\theta} .$$

Величины  $P_c$  и  $m_c$  тем больше, чем круче подъем угловой характеристики на участке, соответствующем изменению угла  $\Delta\theta$ . В неустойчивой области угловой характеристики величины  $p_c$  и  $M_c$  отрицательны.

Поэтому условие устойчивой работы синхронной машины можно выразить

$$P_c > 0 \text{ или } M_c > 0 . ,$$

При изменениях нагрузки синхронного генератора нарушается равенство между мощностью первичного двигателя и мощностью генератора. Возникающий при этом небаланс мощностей  $\Delta P$  представляет собой *СИНХРОНИЗИРУЮЩУЮ МОЩНОСТЬ*

$$\Delta P = p_c \Delta\theta$$

Синхронизирующей мощности соответствует *СИНХРОНИЗИРУЮЩИЙ МОМЕНТ*  $\Delta M$

$$\Delta M = \frac{\Delta P}{\omega_1} = m_c \Delta\theta$$

Этот момент обусловлен разностью электромагнитного момента генератора и вращающего момента первичного двигателя и оказывает на ротор генератора действие, предотвращающее выход машины из синхронизма.

Из этого графика (рис.14) видно, что наибольшей синхронизирующей способностью синхронная машина обладает при  $\theta = 0$ . С ростом  $\theta$  синхронизирующая способность машины снижается и при  $\theta = \theta_{кр}$  она совершенно исчезает ( $p_c = 0$ ;  $m_c = 0$ ).

Синхронизирующей способностью обладают не только синхронные генераторы, но и синхронные двигатели

#### *Принцип действия синхронного двигателя.*

В соответствии с принципом обратимости синхронная машина может работать не только в режиме генератора, но и в режиме двигателя.

Если вал синхронного генератора, работающего параллельно с сетью, отсоединить от первичного двигателя, не отключая цепей статора и ротора, то синхронная машина будет работать в режиме двигателя. В этом случае трехфазный ток в обмотке статора синхронной машины создает вращающееся магнитное

поле, которое, взаимодействуя с магнитным полем ротора, заставляет вращаться ротор с синхронной скоростью.

Для уяснения принципа работы синхронного двигателя обратимся к его модели (рис.15), состоящей из внешней и внутренней магнитных систем с явно выраженными полюсами, разделенных зазором. Обе системы могут

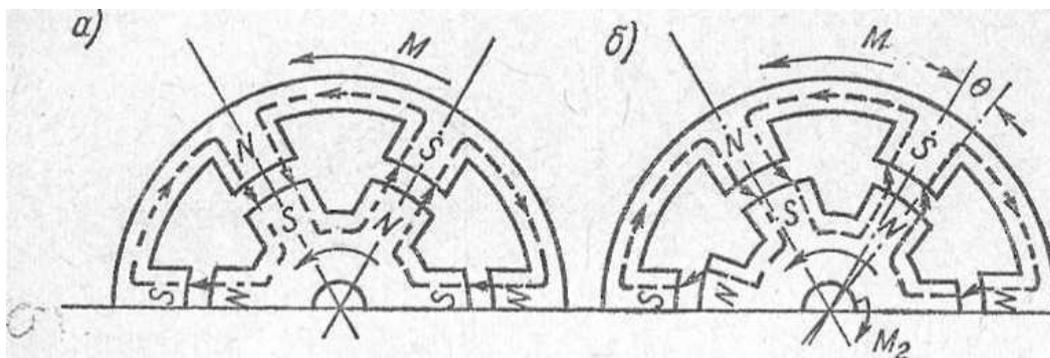


Рис. 15

вращаться относительно общей оси, при этом внутренняя система (ротор) расположена на валу.

Если к внешней магнитной системе приложить вращающий момент  $M$ , то она начнет вращаться и создаст вращающееся поле, аналогичное вращающемуся магнитному полю обмотки статора при подключении ее к сети трехфазного тока. Благодаря магнитной связи между разноименными полюсами магнитных систем вращение внешней системы полюсов передается внутренней системе. В результате ротор начинает вращаться в ту же сторону, что и поле внешней системы. Если пренебречь трением, то можно считать, что в режиме холостого хода момент, противодействующий вращению, равен нулю. Тогда полюсы магнитных систем, вращаясь в одну сторону с одинаковой скоростью, располагаются соосно друг относительно друга (рис. 15, а). Если же к валу приложить тормозящее усилие в виде противодействующего момента  $M_2$ , то внутренняя система полюсов сместится относительно внешней системы на угол  $\theta$  (рис. 15, б), значение которого определяется величиной противодействующего момента.

В синхронном двигателе, в отличие от рассматриваемой модели, вращающееся поле создается не вращением магнитной системы, а трехфазным током в обмотке статора. При этом мощность, развиваемая на валу двигателя, компенсируется мощностью, поступающей из сети.

Таким образом, в синхронном двигателе (так же, как и в генераторе) взаимодействием тока статора с магнитным полем ротора создается электромагнитный момент (см. рис. 17.3), но в отличие от генератора этот момент в двигателе является вращающим.

При изменениях нагрузки на валу синхронного двигателя происходят изменения угла  $\theta$  между вектором н. с. ротора и вектором н. с. обмотки статора, что сопровождается соответствующим изменением электромагнитного вращающего момента.

Но если в синхронном генераторе увеличение нагрузки сопровождается увеличением угла  $\theta$  в направлении вращения ротора, т. е. вектор н. с. ротора (ось полюсов ротора) генератора опережает вектор н. с. статора, то в двигателе увеличение нагрузки на вал сопровождается увеличением угла  $\theta$  в направлении, противоположном вращению ротора.

Зависимость электромагнитного момента синхронного двигателя  $M$  от угла  $\theta$  (угловая характеристика) аналогична угловой характеристике синхронного генератора, включенного на параллельную работу, но располагается в третьем квадранте системы координат (рис. 18.2, кривая 3), т. е. эта зависимость выражается отрицательными значениями момента  $M$  и угла  $\theta$ . Таким образом, угловая характеристика синхронной машины представляет собой две полуволны: положительную, соответствующую генераторному режиму работы (см. рис. 17.7), и отрицательную, соответствующую двигательному режиму (рис. 18.2). Область устойчивой работы синхронного двигателя ограничивается значениями угла  $\theta$ , величина которого должна быть меньше критического  $\theta_{кр}$ .

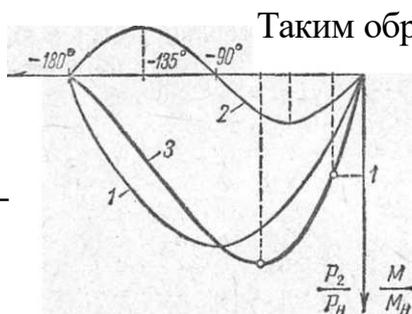


Рис.17. Угловая характеристика электромагнитного момента

Понятия о перегрузочной способности, удельной синхронизирующей мощности и удельном синхронизирующем моменте, выведенные для генераторного режима, применимы и для двигательного режима синхронной машины.

Следует отметить, что ротор синхронного двигателя может вращаться только со скоростью, равной скорости вращения поля статора, т. е. с синхронной скоростью  $n_1 = \frac{f_1 \cdot 60}{p}$ . Чтобы убедиться в этом, обратимся опять к модели синхронного двигателя.

Предположим, что ротор двигателя при вращении отстает от внешней системы полюсов. Тогда в какой-то момент времени полюса ротора расположатся против одноименных полюсов внешней системы. В этом случае нарушится магнитная связь между магнитными системами, так как их полюса будут взаимно отталкиваться; ротор перестанет испытывать действие электромагнитного момента и остановится. Вращение ротора только с синхронной скоростью составляет характерную особенность синхронных двигателей

При изменениях нагрузки синхронного двигателя меняется угол  $\theta$ . При этом ротор вследствие инерции вращающихся масс агрегата не сразу занимает положение, соответствующее новой нагрузке, а некоторое время совершает колебательные движения. Таким образом, в синхронном двигателе, также как и в генераторе, имеют место колебания; физическая сущность этого явления изложена.

#### Рабочие характеристики синхронного двигателя.

Рабочие характеристики синхронного двигателя представляют собой зависимость скорости вращения ротора  $n_2$ , тока в обмотке статора  $I_1$  мощности на входе двигателя  $P_1$  полезного момента  $M_2$  и коэффициента мощности  $\cos \varphi_1$  от полезной мощности двигателя  $P_2$  (рис. 18.4).

Скорость вращения ротора  $n_2$  всегда равна синхронной, скорости  $n_1 = \frac{f_1 60}{p}$ , поэтому график  $n_2 = f(P_2)$  имеет вид прямой, | параллельной оси абсцисс

Полезный момент на валу синхронного двигателя находится в следующей зависимости от мощности  $P_2$

$$M_2 = \frac{P_2}{\omega_1}$$

И так как рабочие характеристики снимаются при условии  $\omega_1 = \text{const}$ , то график  $M_2 = f(P_2)$  имеет вид прямой, выходящей из начала координат.'

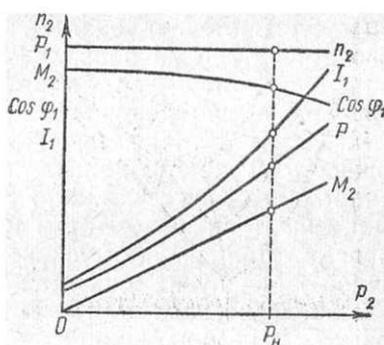


Рис. 18. Рабочие характеристики синхронного двигателя

Мощность на входе  $P_1 = P_2 + \Sigma p$

С увеличением нагрузки  $P_2$  увеличиваются также и потери  $\Sigma p$  поэтому мощность  $P_1$  растет несколько быстрее мощности  $P_2$  и график  $P_1 = f(P_2)$  имеет несколько криволинейный вид. Кривая  $\cos \varphi_1 = f(P_2)$  зависит от характера возбуждения двигателя в режиме холостого хода.) Если при холостом ходе  $\cos \varphi_1 = 1$ , то при увеличении нагрузки он уменьшается (см. рис. 18.3).

Величина тока в обмотке статора двигателя равна

$$I_1 = \frac{P_1}{m_1 U_1 \cos \varphi_1}$$

(Из этого выражения видно, что ток  $I_1$  с увеличением нагрузки  $P_2$  растет быстрее, чем мощность  $P_1$  вследствие уменьшения  $\cos \varphi_1$ .)

Так как ротор синхронного двигателя вращается в ту же сторону, что и поле статора, то направление вращения ротора определяется порядком следования фаз в обмотке статора и порядком расположения/фазных обмоток статора. Для изменения направления вращения трехфазного синхронного двигателя необходимо переключить два линейных провода, подведенных из сети, к обмоткам статора.

### *Пуск в ход синхронных двигателей.*

Пуск в ход синхронного двигателя непосредственным включением в сеть невозможен, так как ротор из-за своей значительной инерции не может быть сразу увлечен вращающимся полем статора, скорость которого устанавливается мгновенно. В результате магнитная связь между статором и ротором не возникает. Для пуска синхронного двигателя приходится применять специальные способы, сущность которых состоит в предварительном приведении ротора во вращение до синхронной или близкой к ней скорости, при которой между статором и ротором устанавливается магнитная связь.)

Практическое применение имеют два способа пуска в ход синхронных двигателей: пуск посредством вспомогательного двигателя и асинхронный пуск.

Пуск в ход синхронного двигателя посредством вспомогательного двигателя. Процесс пуска при этом протекает аналогично процессу включения синхронного генератора на параллельную работу. Ротор возбужденного двигателя приводится во вращение до синхронной скорости и с помощью синхронизирующего устройства подключается к сети. Затем вспомогательный двигатель отключают. Обычно мощность пускового двигателя составляет 5—15% от мощности синхронного двигателя. Это позволяет пускать в ход синхронный двигатель только без нагрузки или при малой нагрузке на валу. Применение пускового двигателя мощностью, достаточной для пуска синхронного двигателя под нагрузкой, нецелесообразно, так как при этом установка получается громоздкой и неэкономичной.

В качестве пускового (вспомогательного) двигателя обычно применяют асинхронный двигатель с фазным ротором с числом полюсов на два меньше, чем число полюсов синхронного двигателя. Это делается для того, чтобы можно было ротор синхронного двигателя привести во вращение со скоростью, близкой к синхронной. Для регулировки скорости вращения в цепь ротора асинхронного двигателя включают регулировочный реостат. В настоящее время описанный способ пуска применяется лишь для мощных синхронных компенсаторов.

Асинхронный пуск синхронных двигателей. Этот способ возможен при наличии в полюсных наконечниках ротора пусковой обмотки, аналогичной успокоительной обмотке синхронного генератора. Схема включения двигателя при этом способе пуска приведена на рис. 18.5. Не возбужденный синхронный двигатель подключается к сети трехфазного тока. Вращающееся магнитное поле статора при этом индуцирует в пусковой обмотке ротора Э.Д.С., которая создает в замкнутых стержнях обмотки токи. Взаимодействием этих токов с полем статора создается момент, приводящий ротор двигателя во вращение. При достижении скорости вращения ротора, составляющей примерно 95% синхронной скорости, подается питание в обмотку возбуждения, и двигатель начинает работать синхронно. В этом случае пусковая обмотка не влияет на работу двигателя, так как в ее стержнях э. д. с. не наводятся.

В процессе асинхронного пуска обмотку возбуждения оставлять разомкнутой нельзя, так как магнитный поток статора, пересекающий ее в начальный период пуска с синхронной скоростью, индуцирует в ней э. д. с. Вследствие большого числа витков обмотки возбуждения эта э. д. с. достигает 3000—4000 в и более, что представляет опасность как для целостности самой обмотки, так и для обслуживающего персонала. Для предотвращения этого обмотку возбуждения на период разгона ротора замыкают на активное сопротивление  $r_x$ , примерно в десять раз большее сопротивления обмотки возбуждения. Переключение зажимов И1 и И2 обмотки возбуждения с сопротивления  $r_x$  на клеммы возбуждителя осуществляется посредством переключателя П.

Непосредственное подключение синхронных двигателей к сети переменного тока применяется только при достаточной мощности сети, способной выдерживать большие пусковые токи, достигающие пяти-, семикратного значения по сравнению с номинальным значением тока двигателя. При недостаточной мощности сети для ограничения пусковых токов применяют пуск двигателя при пониженном напряжении: автотрансформаторный или реакторный пуск.

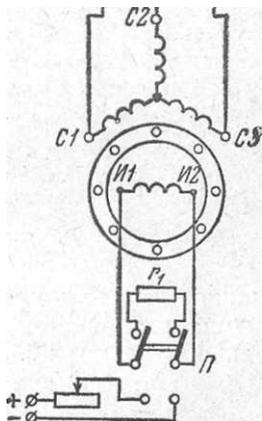


Рис. 19 Схема асинхронного пуска синхронного

### Реактивный синхронный двигатель

Ротор реактивного двигателя в отличие от обычных синхронных двигателей с явно полюсным ротором не имеет обмотки возбуждения.

Для выяснения принципа действия реактивного двигателя обратимся к выражению электромагнитного момента явно полюсной машины.

$$M = \frac{m_1 U_1 E_0}{\omega_1 x_d} \sin \theta + \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_1} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta = M_{осн} + M_p$$

из которого следует, что если машину лишить возбуждения ( $E_0 = 0$ ), то первое слагаемое, представляющее основную составляющую электромагнитного момента, становится равным нулю. Тогда на ротор такого невозбужденного двигателя будет действовать лишь реактивная составляющая электромагнитного момента.

$$M_p = \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_1} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta$$

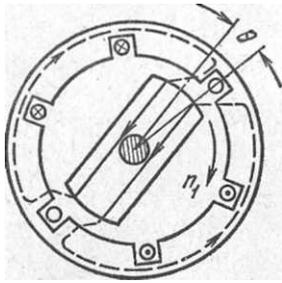


рис. 21.

Следовательно, возможно осуществить синхронный двигатель без обмотки возбуждения при условии, что  $x_q < x_d$ , т. е. если ротор имеет явно выраженные полюса. Таким двигателем является реактивный синхронный двигатель. Вращение ротора реактивного двигателя можно объяснить физически: при включении обмотки статора в сеть создается вращающееся магнитное поле, которое намагничивает ротор. При этом ротор стремится занять положение в поле статора, соответствующее минимальному магнитному сопротивлению. А так как поле статора вращается, то с такой же скоростью начинает вращаться и ротор двигателя.

Из выражения реактивного момента видно, что величина вращающего момента реактивного двигателя пропорциональна квадрату напряжения, подведенного к двигателю, т. е.  $M_p = U_1^2$  что имеет большое значение при колебаниях напряжения в сети.

Мощность реактивного синхронного двигателя определяется выражением

$$P_2 = \frac{m_1 U_1}{2} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta$$

которое получается из выражения мощности синхронной явно-полюсной машины, если в ней принять  $E_0 = 0$ .

Из этого следует, что мощность реактивного двигателя меньше мощности синхронного двигателя таких же габаритов, но с обмоткой возбуждения.

Электромагнитный момент реактивного двигателя пропорционален синусу двойного угла  $\theta$ . Угловая характеристика этого двигателя представлена кривой 2 на рис. 18.2.

Максимальное значение момента реактивного двигателя соответствует углу  $\theta_{кр} = 45^\circ$ , а по своей величине оно в несколько раз меньше максимального момента двигателя обмоткой возбуждения

К недостаткам реактивных двигателей следует также отнести низкий коэффициент мощности, величина которого зависит от конструкции ротора, т. е. от величины отношения  $x_d/x_q$ .

Так, например, при  $x_d/x_q = 4$  наибольшее значение коэффициента мощности  $\cos \varphi_1$  составляет 0,6, а при  $x_d/x_g = 5$   $\cos \varphi_1 = 0,67$ . Учитывая все особенности реактивных синхронных двигателей, применять их в приводах средней, а тем более большой мощности экономически нецелесообразно. Обычно эти двигатели изготавливаются на небольшие мощности (десятки ватт) и применяются в автоматике.

Для возможности самостоятельного пуска в ход реактивные двигатели снабжаются пусковой клеткой на роторе, позволяющей осуществлять асинхронный пуск.

Наряду с трехфазными применяются однофазные реактивные двигатели. Обмотка статора такого двигателя делается однофазной и включается в однофазную сеть переменного тока по таким же схемам, что и однофазные асинхронные двигатели.

Достоинство реактивных синхронных двигателей состоит в том, что они просты по конструкции, надежны в работе (отсутствие скользящих контактов) и удобны в эксплуатации, так как для их включения не требуется постоянного напряжения. В то же время реактивные синхронные двигатели обладают важным свойством синхронных машин-их ротор вращается с постоянной скоростью, независимо от нагрузки на валу.