

Понятие о синхронных машинах

Вопросы темы.

1. Однофазный асинхронный двигатель.
2. Устройство и принцип действия синхронного генератора
3. Реакция якоря
4. Характеристики синхронного генератора
5. Работа синхронной машины в режиме двигателя
6. Пуск и остановка синхронного двигателя
7. Рабочие характеристики синхронного двигателя

9. Синхронные машины. Устройство и принцип действия синхронного генератора

Синхронными называются электрические машины, частота вращения которых связана постоянным соотношением с частотой сети переменного тока, в которую эта машина включена. Синхронные машины служат генераторами переменного тока на электрических станциях, а двигатели применяются в тех случаях, когда нужен двигатель, работающий с постоянной частотой вращения. Синхронные машины обратимы, т. е. они могут работать и как генераторы, и как двигатели, хотя в конструкциях современных синхронных генераторов и двигателей имеются небольшие, но весьма существенные отличия. Синхронная машина переходит от режима генератора к режиму двигателя в зависимости от того, действует ли на ее вал вращающая или тормозящая механическая сила. В первом случае она получает на валу механическую, а отдает в сеть электрическую энергию, а во втором — она потребляет из сети электрическую энергию, а отдает на валу механическую.

Синхронная машина (рис. 17) имеет две основные части — статор 1 и ротор 2, причем **статор** (рис. 18) *не отличается от статора асинхронной машины*. В пазы статора укладывают трехфазную обмотку, концы которой выводят на клеммовую панель.

Ротор синхронных машин вращается синхронно с вращающимся магнитным полем (отсюда их название). Поскольку частоты вращения ротора и магнитного поля одинаковы, в обмотке ротора не индуцируются токи. Поэтому обмотка ротора получает питание от источника постоянного тока. Ротор синхронной машины представляет собой систему вращающихся электромагнитов, которые питаются постоянным током, поступающим в ротор через контактные кольца и щетки от внешнего источника. Ротор в некоторых случаях изготавливают в виде постоянного магнита.

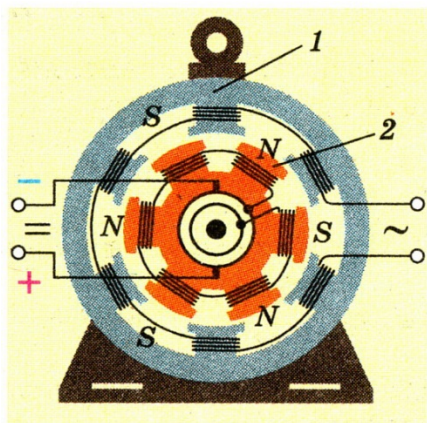


Рис. 17. Синхронная машина

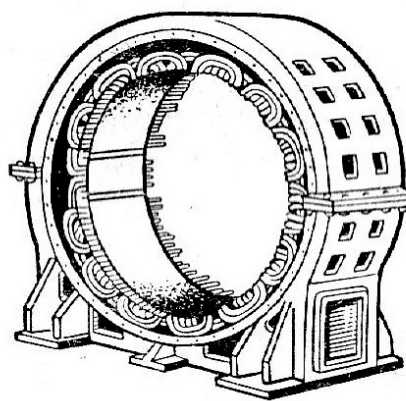


Рис. 18. Статор синхронной машины

В обмотках статора под действием вращающегося магнитного поля ротора наводится ЭДС, которая подается на внешнюю цепь генератора. Такая конструкция генератора позволяет устранить скользящие контакты в цепи нагрузки генератора (обмотки статора непосредственно соединяются с нагрузкой) и надежно изолировать обмотки статора от корпуса машины, что существенно для мощных генераторов, работающих при высоких напряжениях.

Основной магнитный поток синхронного генератора, создаваемый вращающимся ротором, возбуждается посторонним источником-возбудителем, которым обычно является генератор постоянного тока небольшой мощности, установленный на общем валу с синхронным генератором. Постоянный ток от возбудителя подается на ротор через щетки и контактные кольца, установленные на валу ротора.

По своей конструкции роторы бывают явнополюсными (рис. 19) и неявнополюсными (рис. 20). Число пар полюсов ротора обусловлено скоростью его вращения. В первом случае синхронные генераторы приводятся в действие тихоходными турбинами гидроэлектростанций, во втором — паровыми или газовыми турбинами тепловых электростанций.

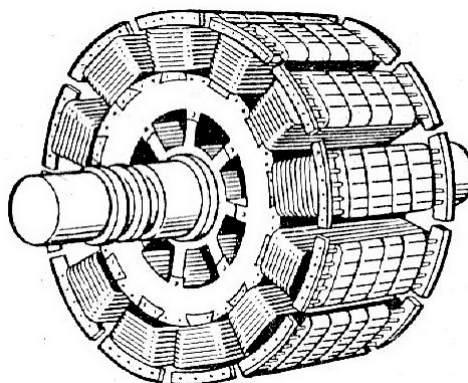
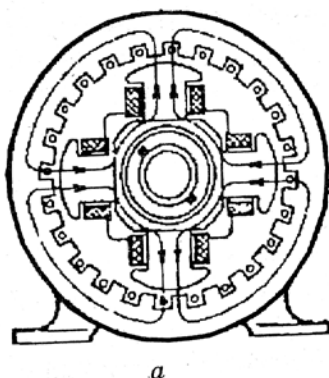


Рис. 19. Явнополюсный ротор синхронной машины

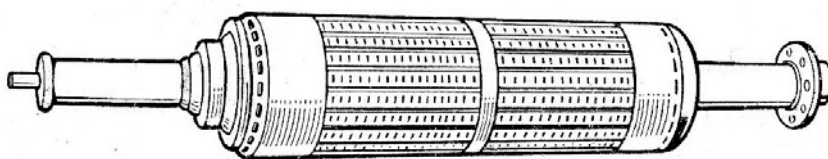
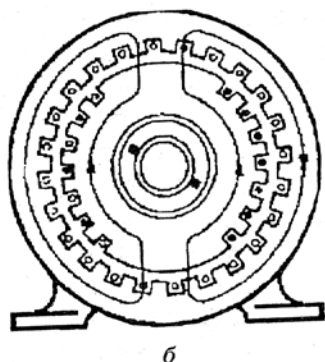


Рис. 20. Неявнополюсный ротор синхронной машины

Питание к обмотке ротора подводится через скользящие контакты, состоящие из медных колец и графитовых щеток. При вращении ротора его магнитное поле пересекает витки обмотки статора, индуцируя в них ЭДС. Чтобы получить синусоидальную форму ЭДС, зазор между поверхностью ротора и статором увеличивают от середины полюсного наконечника к его краям (рис. 21).

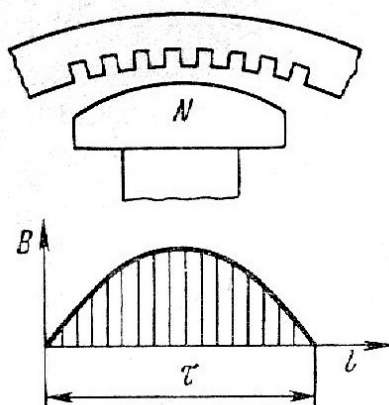


Рис. 21. Форма воздушного зазора и распределение магнитной индукции по поверхности ротора в синхронном генераторе

Частота индуцированной ЭДС (напряжения, тока) синхронного генератора

$$f = \frac{pn}{60},$$

где p - число пар полюсов ротора генератора.

Отношение $\frac{n}{60}$ выражает число оборотов ротора в секунду; при $p = 1$ каждый оборот ротора соответствует полному циклу изменений индуцированного переменного тока (одному периоду); при увеличении p соответственно увеличивается и число периодов тока, индуцируемого за один оборот ротора.

При стандартной частоте переменного тока 50 Гц частота вращения двухполюсной машины ($p = 1$) 3000 об/мин. С такой частотой вращаются современные турбогенераторы, состоящие из паровой турбины и синхронного генератора большой мощности с неявнополюсным ротором, который имеет одну пару полюсов.

У гидрогенераторов первичным двигателем служит гидравлическая турбина, скорость вращения которой невелика (от 50 до 750 об/мин) и определяется высотой напора воды. В этом случае используются синхронные генераторы с явнополюсным ротором, имеющим от 4 до 60 пар полюсов.

Частота вращения дизель-генераторов, соединенных с первичным двигателем — дизелем, находится в пределах от 500 до 1500 об/мин. Обычно это явнополюсные машины небольшой мощности.

Как и у любого генератора, работающего по закону электромагнитной индукции, индуцированная ЭДС пропорциональна магнитному потоку машины и частоте вращения ротора. Среднее значение ЭДС, наводимое в каждой фазе обмотки статора,

$$E_{cp} = c n \Phi ,$$

где n — скорость вращения ротора;

Φ — максимальный магнитный поток, возбуждаемый в синхронной машине;

c — постоянный коэффициент, учитывающий конструктивные особенности данной машины.

Используют различные способы возбуждения синхронных генераторов. Широкое распространение получил синхронный генератор с машинным возбудителем, представляющим собой генератор постоянного тока, расположенный на одном валу с синхронным генератором. Машинный возбудитель приводится в действие от того же первичного двигателя, что и синхронный генератор. Выходные зажимы возбудителя через щетки и кольца подсоединены к обмотке ротора синхронного генератора. Напряжение синхронного генератора можно регулировать реостатом в цепи обмотки возбуждения возбудителя, что удобно и энергетически выгодно, так как в этой обмотке протекают сравнительно небольшие токи.

Находят также применение генераторы с самовозбуждением через полупроводниковые или механические выпрямители.

Самовозбуждение генератора происходит следующим образом. В момент пуска генератора благодаря остаточной индукции в магнитной системе появляются слабые ЭДС и токи в рабочей обмотке генератора. Это приводит к появлению ЭДС на выходе и небольшого тока в цепи возбуждения, усиливающего индукцию магнитного поля машины. ЭДС генератора возрастает до тех пор, пока магнитная система машины полностью не возбудится.

На рис. 22 приведен внешний вид автомобильного трёхфазного синхронного генератора, а на рис. 23 — схема его включения. Здесь 1, 2, 3 — обмотки статора; 4 — выпрямитель переменного тока в постоянный, используемый для подзарядки аккумуляторной батареи 5 и питания электрооборудования 6; 7 — полупроводниковый выпрямитель, питающий обмотку возбуждения ротора 8 через регулировочный реостат 9.

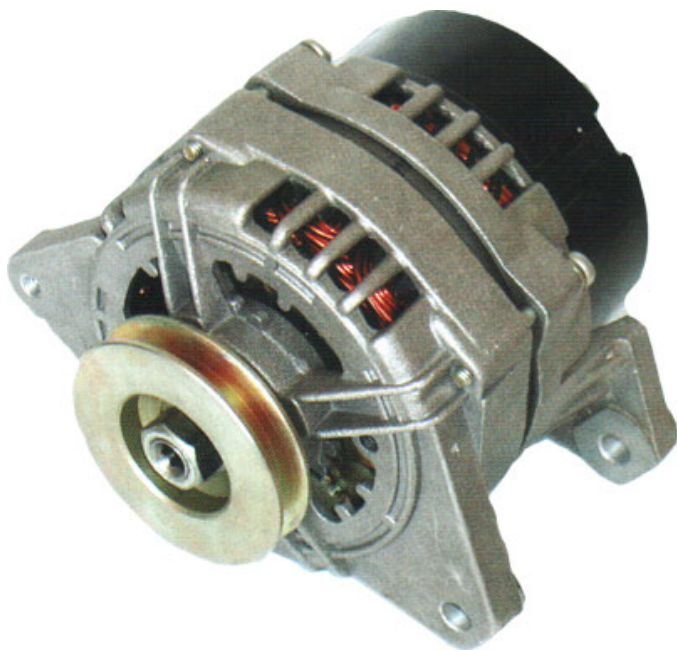


Рис. 22. Автомобильный генератор

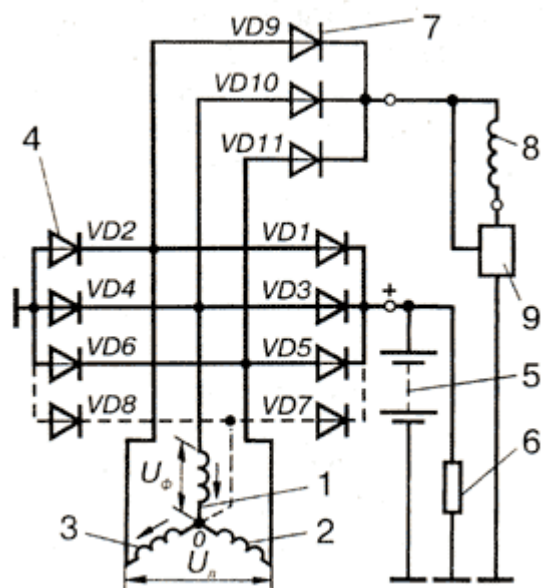


Рис. 23. Схема включения генератора

10. Реакция якоря

Магнитная система синхронного генератора в режиме холостого хода (без нагрузки) состоит из магнитного потока полюсов, который индуцирует ЭДС в обмотке статора. После включения нагрузки в трехфазной обмотке статора возникает ток, который, как известно, создает свое вращающееся магнитное поле. Скорость вращения этого поля равна скорости вращения магнитного поля полюсов. Следовательно, полный магнитный поток синхронной машины при нагрузке складывается из магнитных потоков ротора и статора. Магнитное поле статора, накладываясь на магнитное поле ротора, может либо ослаблять, либо усиливать его. Результат взаимодействия этих полей определяется величиной и характером нагрузки. Влияние магнитного поля статора на магнитное поле, создаваемое вращающимися полюсами ротора, называется *реакцией якоря*.

Явление реакции якоря относится и к синхронным двигателям, но поскольку в этих двигателях форма кривой ЭДС малосущественна, то реакция якоря в них имеет второстепенное значение.

11. Характеристики синхронного генератора

Основными характеристиками синхронного генератора являются *характеристики холостого хода*, а также *внешняя* и *регулировочная*.

Характеристика холостого хода $E_0(I_0)$ представляет с собой зависимость ЭДС генератора E_0 на холостом ходу (т. е. без нагрузки) от тока возбуждения I_0 . Она связана с кривой намагничивания стали и напоминает ее по форме (рис. 24).

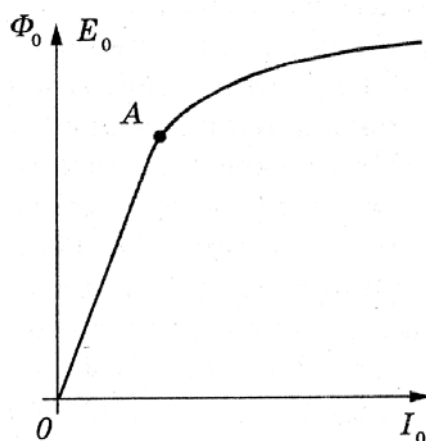


Рис. 24. Характеристика холостого хода синхронного генератора

На холостом ходу синхронного генератора его ЭДС создается только главным магнитным потоком, поэтому ЭДС E_0 пропорциональна главному магнитному потоку Φ_0 , который, в свою очередь, пропорционален магнитной индукции B_0 в статоре. Поэтому зависимость $E_0 = f(I_B)$ подобна зависимости $B_0 = f(I_B)$, т. е. первоначальной кривой намагничивания стали. При достижении области магнитного насыщения магнитной системы генератора скорость роста ЭДС уменьшается.

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

Внешняя характеристика синхронного генератора $U(I)$ характеризует его электрические свойства и представляет собой зависимость напряжения на зажимах генератора U от его тока нагрузки I при постоянных значениях коэффициента мощности $\cos \varphi$, скорости вращения ротора n и тока возбуждения I_0 (рис. 25)

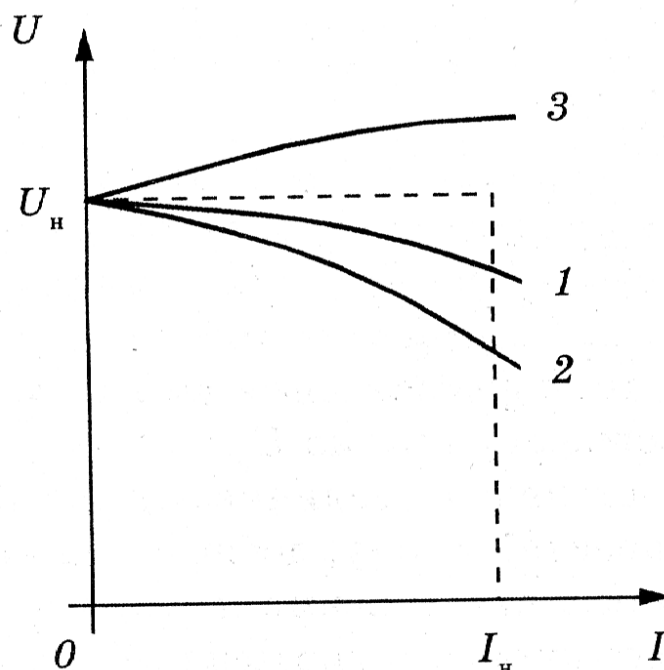


Рис. 25. Внешняя характеристика синхронного генератора

Чтобы экспериментально получить внешнюю характеристику, нужно сначала нагрузить генератор до номинального тока I_H при номинальном напряжении U_H на зажимах генератора, которое устанавливается путем регулировки тока возбуждения. Затем, поддерживая ток возбуждения и частоту вращения постоянными, постепенно уменьшают ток нагрузки до нуля. Внешние характеристики могут иметь спад (кривая 2) или подъем (кривая 3) в зависимости от характера нагрузки и действия реакции якоря. Номинальный режим нагрузки выбирают таким, чтобы при $\cos \varphi = 0,8$ изменения напряжения ΔU не превышали 35-45 % от номинального (кривая 1).

Регулировочная характеристика синхронного генератора представляет собой зависимость тока возбуждения генератора I_B от тока нагрузки I ($I_B = f(I_H)$) при $U = U_H = \text{const}$, $n = n_H = \text{const}$ и $\cos \varphi = \text{const}$.

Эта характеристика показывает, как выбрать ток возбуждения, при котором напряжение на зажимах генератора оставалось бы постоянным при изменениях нагрузки.

Чтобы экспериментально получить регулировочную характеристику, нужно сначала включить генератор и сообщить его ротору номинальную скорость вращения n_H при холостом ходе, а затем путем изменения тока возбуждения добиться получения номинального напряжения U_H .

Далее постепенно увеличивают ток нагрузки и снимают характеристику, добиваясь в каждой точке постоянства напряжения на зажимах машины ($U = U_H = \text{const}$) путем регулирования тока возбуждения.

На рис. 26 изображены регулировочные характеристики для различных значений $\cos \varphi$. Мы видим, что при активно-индуктивной нагрузке, когда $\varphi \geq 0$ (кривая 2), ток возбуждения необходимо увеличивать, а при активно-емкостной нагрузке, когда $\varphi \leq 0$ (кривая 3) — уменьшать. Кривая 1 соответствует оптимальному режиму. Все эти явления обусловлены реакцией якоря.

Регулировочные характеристики имеют важное практическое значение, так как они определяют пределы изменения тока возбуждения для поддержания номинального напряжения при изменении нагрузки.

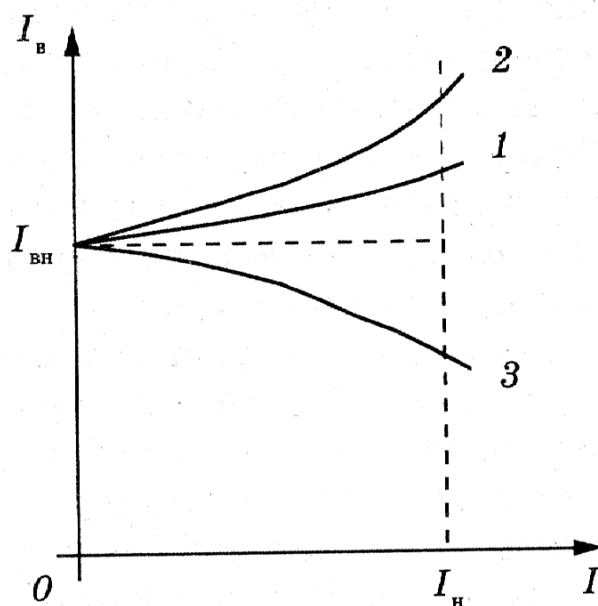


Рис. 26. Регулировочная характеристика синхронного генератора

12. Работа синхронной машины в режиме двигателя

Устройство статора синхронного двигателя аналогично устройству статора асинхронного двигателя. Ротор синхронного двигателя представляет собой электромагнит или постоянный магнит (рис. 27).

Принцип работы синхронного двигателя поясняется рис. 28. Внутри магнита N_1S_1 помещен магнит NS . Если магнит N_1S_1 вращать, то он потянет за собой магнит NS . В стационарном режиме частоты вращения обоих магнитов одинаковы.

К валу магнита NS можно приложить механическую нагрузку. Чем больше эта нагрузка, тем больше угол отставания оси магнита NS от оси магнита N_1S_1 . При некоторой нагрузке силы притяжения между магнитами будут преодолены и ротор остановится.

В реальном двигателе поле магнита N_1S_1 заменено вращающимся магнитным полем статора; при этом ротор либо вращается синхронно с магнитным полем статора, отставая на угол α , либо останавливается (выпадает из синхронизма) при перегрузке. Таким образом, независимо от нагрузки ротор всегда вращается с постоянной частотой, равной частоте вращения магнитного поля статора:

$$n_2 = n_1 = \frac{60f}{p}.$$

Увеличение нагрузки приводит к увеличению тока в цепи двигателя и, следовательно, к увеличению потребляемой из сети электрической мощности. В отличие от асинхронного двигателя, в котором увеличение нагрузки на валу приводит к уменьшению скорости вращения ротора, в синхронном двигателе увеличение механической нагрузки приводит к увеличению угла α между полюсами вращающихся полей статора и ротора при сохранении скорости вращения ротора.

Ротор синхронного двигателя будет продолжать синхронное вращение до тех пор, пока он будет за полпериода переменного тока успевать поворачиваться своими полюсами к следующим проводникам обмотки статора с таким же направлением тока, как и в тех проводниках, против которых он находится в данный момент. Другими словами, ротор двигателя должен вращаться с такой же скоростью, что и поле статора, проходя полюс за полпериода переменного тока (разность скоростей поля и ротора может составлять не более 2-5 %), при этом на него будет действовать вращающий момент одного и того же направления. При слишком большой механической нагрузке ротор двигателя выпадает из синхронизма и двигатель останавливается.

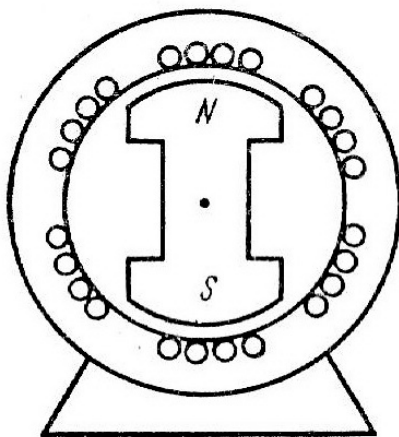


Рис. 27. Схематическое изображение синхронного двигателя

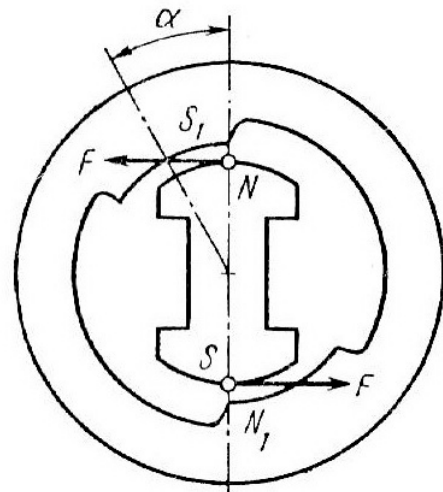


Рис. 28. К пояснению принципа работы синхронного двигателя

Постоянство частоты вращения — важное достоинство синхронного двигателя. Строгое постоянство частоты вращения требуется во многих областях техники, например при записи и воспроизведении звука.

13. Пуск и остановка синхронного двигателя

Недостаток синхронного двигателя - трудность пуска: для пуска нужно раскрутить ротор в сторону вращения поля статора.

В прошлом для раскручивания ненагруженного синхронного двигателя применялся специальный разгонный асинхронный двигатель небольшой мощности. Сначала ротор разгонялся до скорости, близкой к синхронной, потом включалась обмотка возбуждения, а затем обмотки статора включались в сеть.

В настоящее время синхронные двигатели запускают с помощью асинхронного пуска. Для этого применяют специальную короткозамкнутую обмотку, вделанную в ротор. В момент пуска двигатель работает как асинхронный. Когда частота вращения ротора приближается к частоте вращения поля статора, ротор входит в синхронизм и двигатель работает как синхронный. Короткозамкнутая обмотка при этом оказывается обесточенной, так как частота вращения ротора равна частоте вращения поля статора и стержни обмотки ротора не пересекаются магнитными силовыми линиями.

Для остановки синхронного двигателя сначала уменьшают ток возбуждения до значения, соответствующего минимальному току обмоток статора, затем отключают статор и лишь после этого размыкают цепь возбуждения. Несоблюдение такого порядка (например, отключение обмотки возбуждения раньше отключения обмоток статора) приведет к чрезмерному увеличению тока в обмотке статора и опасным для целостности изоляции перенапряжениям в разомкнутой обмотке возбуждения.

14. Рабочие характеристики синхронного двигателя

Рабочими характеристиками синхронного двигателя являются зависимости потребляемой мощности P_1 , потребляемого тока I_1 , вращающего момента M , $\cos \varphi$ и КПД η от полезной мощности нагрузки P_2 . Они изображены на рис. 29 и соответствуют случаю, когда на холостом ходу $\cos \varphi = 1$.

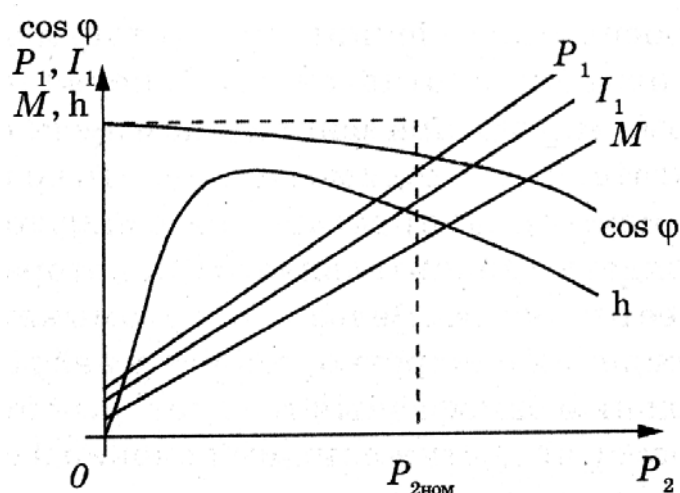


Рис. 29. Характеристики синхронного двигателя

При постоянном токе возбуждения увеличение нагрузки на валу двигателя вызывает уменьшение $\cos \varphi$, что объясняется увеличением реактивного падения напряжения при возрастании потребляемого от сети тока I_1 . Коэффициент полезного действия η с увеличением нагрузки быстро увеличивается и достигает максимума, когда не зависящие от нагрузки механические потери и потери в стали становятся равными зависящим от нагрузки потерям в меди обмоток. Дальнейшее увеличение нагрузки снижает КПД. Потребляемый статором ток I_1 на холостом ходу мал, при увеличении нагрузки ток I_1 возрастает практически пропорционально нагрузке. Вращающий момент M , развиваемый двигателем, на холостом ходу мал, поскольку механические потери невелики. При увеличении нагрузки, благодаря постоянству скорости вращения синхронного двигателя, вращающий момент возрастает почти линейно. Потребляемая двигателем мощность растет быстрее, чем полезная P_2 , так как при увеличении нагрузки сказывается увеличение электрических потерь в двигателе, которые пропорциональны квадрату тока.

Контрольные вопросы

- 1 . Как устроен трехфазный синхронный генератор?
- 2 . Каков принцип работы трехфазного синхронного генератора?
- 3 . Какие конструкции роторов используются в трехфазных синхронных генераторах?
- 4 . Как осуществляется самовозбуждение трехфазного синхронного генератора?
5. Какое явление называют реакцией якоря?
6. Что такое характеристика холостого хода синхронного генератора, её вид.
7. Что такое внешняя характеристика синхронного генератора, её вид.
8. Что такое регулировочная характеристика синхронного генератора, её вид.
- 9 . Опишите работу синхронной машины в режиме двигателя.
10. Как осуществляются асинхронный пуск и остановка синхронного двигателя?
11. Изобразите рабочие характеристики синхронного двигателя.