

Лекция 16. Синхронные машины

Используются в качестве *генераторов, двигателей и синхронных компенсаторов*. Генераторы – привод от *паровых турбин* (турбогенераторы). Генераторы гидроэлектростанций с приводом от *гидротурбин* (гидрогенераторы). Автомобильные электрические краны (синхронные генераторы приводятся от двигателей внутреннего сгорания).

Синхронный компенсатор – машина для повышения коэффициента мощности ($\cos\varphi$) электротехнических установок.

Трехфазные синхронные генераторы, двигатели и синхронные компенсаторы имеют одинаковое устройство.

Соотношения для трехфазного генератора (см. лекцию №7).

Устройство трехфазной синхронной машины

Синхронная машина состоит из неподвижного статора (якоря) 1 и подвижного ротора (индуктора) 3 (рис. 2.33).

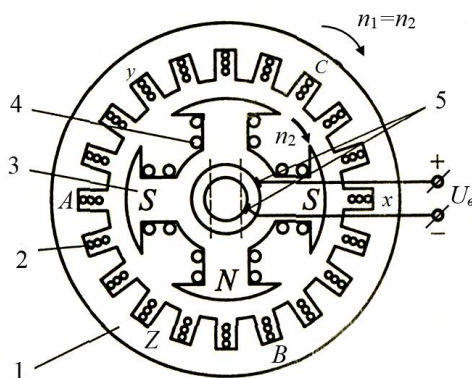


Рис. 2.33. Конструктивная схема синхронной машины: 1 – якорь; 2 – обмотка якоря; 3 – индуктор; 4 – обмотка возбуждения; 5 – контактные кольца со щетками

Статор устроен так же, как у асинхронной машины. В пазы уложены катушки трехфазной обмотки статора 2, сдвинутые в пространстве на 120° .

Ротор (рис. 2.34) представляет собой электромагнит (сердечник 1 и обмотку возбуждения 2). Роторы выполняются явнополюсными (рис. 2.34, а) или неявнополюсными (рис. 2.34, б). **Явнополюсный ротор** – выступающие полюсы с обмоткой возбуждения 2. **Неявнополюсный ротор** – распределенная обмотка возбуждения в пазах цилиндра ротора. При подаче напряжения U_B в обмотке возбуждения протекает ток, создающий МДС и магнитный поток. Магнитное поле *неявнополюсного ротора* имеет *два магнитных полюса N – S*, число пар полюсов $p=1$. Магнитное поле *явнополюсного ротора* имеет *четыре полюса*, а число пар полюсов $p=2$ (рис. 2.34).

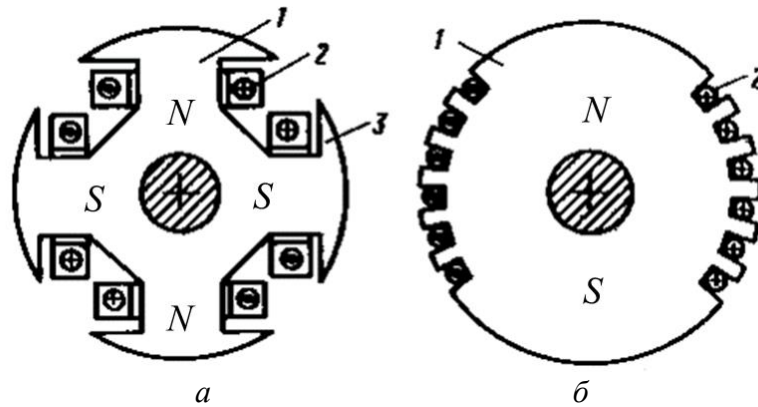


Рис. 2.34. Поперечные разрезы роторов явнополюсной (а) и неявнополюсной (б) машин: 1 – сердечник; 2 – обмотка возбуждения

На рис. 2.35,а показана электрическая схема статора и ротора. Обмотка ротора 2 (обмотка возбуждения), подключается через контактные кольца 3 и щетки 4 к источнику постоянного напряжения U_B .

Количество полюсов на статоре и роторе должно быть одинаково. От количества полюсов зависит синхронная скорость вращения ротора (n_2):

$$n_2 = 60 \frac{f_1}{p}, \quad (2.12)$$

где f_1 – частота токов статора; p – число пар полюсов.

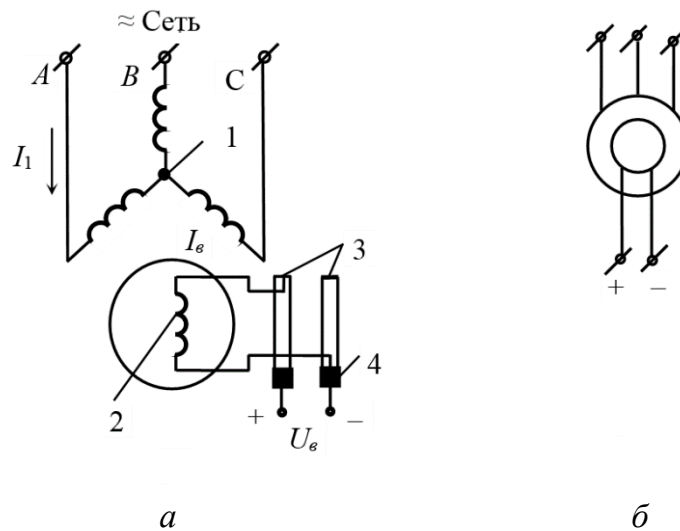


Рис. 2.35. Электрическая схема синхронной машины (а) и ее условное обозначение (б): 1 – обмотка статора; 2 – обмотка ротора; 3 – контактные кольца; 4 – щетки

Неявнополюсные роторы – в синхронных машинах большой мощности, при одной или двух парах полюсов и скорости вращения $n_2 = 3000$ или 1500 об/мин, *явнополюсные* – в машинах большой мощности с частотой $750, 500$ об/мин.

Для обмоток возбуждения источниками являются устройства, называемые *возбудителями*. Простейший возбудитель – самовозбуждающий генератор

постоянного тока, установленные на валу синхронного двигателя. Его мощность не более 3 % от мощности синхронного двигателя. В процессе эксплуатации генератор недостаточно надежен. В последнее время применяются диодные и тиристорные выпрямители, питающиеся от сети переменного тока.

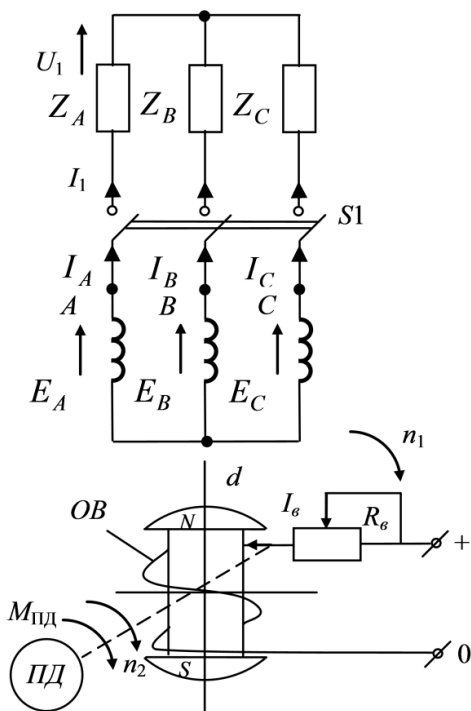
Принцип действия трехфазного синхронного генератора

Обмотки статора генератора *соединены звездой* рис. 2.37. Ротор генератора приводится во вращение от приводного двигателя (ПД) с частотой n_2 .

Ротор – двухполюсный магнит (неявнополюсный или явнополюсный). При вращении ротора его магнитное поле будет индуцировать в 3-х фазной обмотке статора переменные ЭДС, действующие значения которых равны между собой ($E_A = E_B = E_C = E_1$).

Частота ЭДС в обмотках статора (якоря):

$$f_1 = pn_1/60 \quad (2.13)$$



При замыкании трехфазной обмотки статора с помощью автомата S1 по фазам (Z_A, Z_B, Z_C) будут протекать токи I_A, I_B, I_C , которые создадут **вращающееся магнитное поле статора Φ_a** (см. лекцию 14).

Частоты вращения магнитного поля статора и ротора равны (выразим f_1 из (2.12) и приравняем ее с (2.13)): $n_1 = n_2$.

Отсюда *следует*:

Магнитные поля обмотки возбуждения ротора и статора неподвижны относительно друг друга и образуют результирующее поле машины.

Рис. 2.36. Схема трехфазного синхронного генератора, ПД – приводной двигатель

Скольжение синхронной машины в установившемся режиме ($S = 0$), и **токи в роторе не наводятся**.

Синхронная машина называется *синхронной*, так как ее **результирующее магнитное поле и ротор вращаются синхронно** с одной скоростью.

Работа трехфазного синхронного генератора на автономную нагрузку

Объекты с *автономным электроснабжением* приемников: строительные площадки, удаленные от промышленных районов; лесозаготовительные пункты; морские и речные суда, летательные аппараты.

При постоянной скорости вращения ротора и токе $I_B = I_{BH}$, в обмотках статора наводится симметричная трехфазная ЭДС, в результате в обмотках статора протекает ток, создающий вращающееся магнитное поле. Будем считать, что действующие значения фазных токов равны ($I_A = I_B = I_C = I_1$). Магнитные поля статора и возбуждения перемещаются в пространстве с одинаковой скоростью и в одну сторону.

Воздействие МДС статора на поле возбуждения машины называется **реакцией якоря**. Магнитное поле возбуждения всегда направлено по оси полюсов (продольной оси d) (рис. 2.37) и наводит (по поперечной оси q) в обмотке статора ЭДС холостого хода E_{10} . ЭДС отстает от магнитного поля на 90° . **Ориентация магнитного поля статора** по отношению к осям симметрии ротора, **зависит от характера нагрузки Z_H и угла сдвига ψ** (между ЭДС E_{10} и током I_1). Если пренебречь малым активным сопротивлением обмотки якоря R_1 по сравнению с ее индуктивным сопротивлением $X_{об}$, то угол ψ от характера нагрузки Z_H может изменяться от $+\pi/2$ до $-\pi/2$.

Рассмотрим реакцию якоря в трех предельных случаях. Магнитная система машины не насыщена и магнитное поле от обмотки возбуждения имеет синусоидальный характер распределения, число пар полюсов обмоток статора и ротора $p=1$.

1. Ток якоря I_1 отстает от E_{10} ($\psi = 90^\circ$) при индуктивной ($Z_H = +jx_L$) нагрузке. На векторной диаграмме (рис. 2.37, а) показана реакция якоря. На диаграмме изображены вектора магнитного потока возбуждения Φ_B и тока возбуждения I_B (вдоль продольной оси d машины).

При вращении ротора в каждой фазе обмотки якоря (статора) от потока Φ_B наводится ЭДС холостого хода E_{10} , отстающая от магнитного потока на 90° . Под действием E_{10} в нагрузке проходит ток I_1 , отстающий от E_{10} на угол $\psi = 90^\circ$.

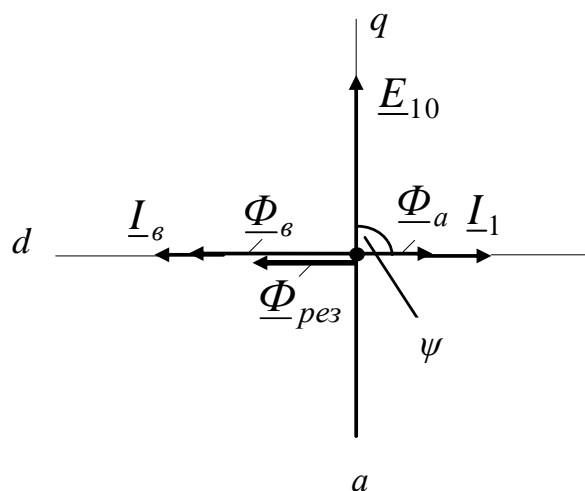
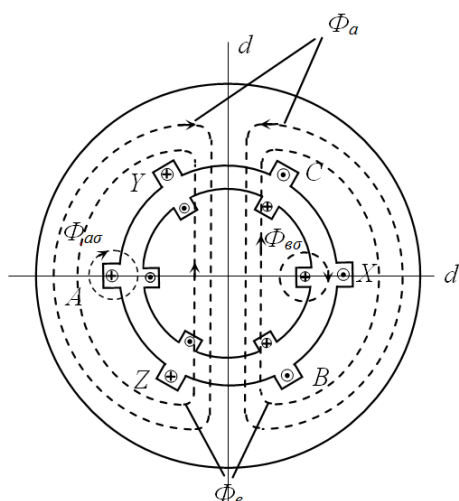


Рис. 2.37. Получение результирующего вектора магнитного поля машины при индуктивной нагрузке, $\psi = 90^\circ$



МДС обмотки статора, определяемая током I_1 , создает магнитное поле статора $\underline{\Phi}_a$, совпадающее с направлением тока I_1 навстречу полю возбуждения $\underline{\Phi}_в$ (рис. 2.37, а). На рис. 2.38 показано встречное направление магнитных потоков возбуждения $\underline{\Phi}_в$ и статора $\underline{\Phi}_a$.

Результирующий магнитный поток машины ($\underline{\Phi}_{рез} = \underline{\Phi}_в + \underline{\Phi}_a$) уменьшается по сравнению с потоком холостого хода $\underline{\Phi}_0$.

Рис. 2.38. Распределение магнитных потоков $\underline{\Phi}_в$, $\underline{\Phi}_a$, рассеяния $\underline{\Phi}_{ас}$ и $\underline{\Phi}_{вс}$ в синхронном генераторе

Вывод: **реакция якоря при индуктивной нагрузке в генераторе продольная (по оси d) и размагничивающая.** Результирующий магнитный поток $\underline{\Phi}_{рез}$ и ЭДС E_1 , индуцированная в обмотке якоря, будут меньше чем при холостом ходе. Можно показать, что при индуктивной нагрузке (продольная реакция якоря) электромагнитный момент синхронного генератора равен нулю.

2. Ток якоря I_1 опережает E_{10} ($\psi = -90^\circ$) – при емкостной нагрузке ($Z_H = -jX_C$).

На векторной диаграмме (рис. 2.37, б) показана реакция якоря синхронного генератора. На ней ток I_1 опережает ЭДС холостого хода E_{10} на 90° , а магнитный поток статора $\underline{\Phi}_a$ совпадает с потоком возбуждения $\underline{\Phi}_в$ и действует вдоль продольной оси d . Результирующий магнитный поток генератора $\underline{\Phi}_{рез} = \underline{\Phi}_в + \underline{\Phi}_a$ увеличивается по сравнению с потоком холостого хода $\underline{\Phi}_{рез.0}$.

В этом случае $\underline{\Phi}_{рез}$ и ЭДС, индуцированная в обмотке якоря E_1 будут больше, чем при холостом ходе.

Вывод: при емкостной нагрузке реакция якоря в синхронном генераторе продольная и намагничивающая. Можно показать, что при емкостной нагрузке (продольная реакция якоря) электромагнитный момент генератора также равен нулю.

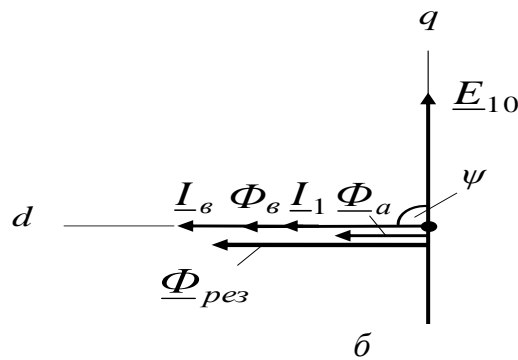
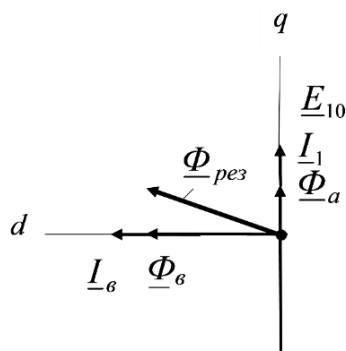


Рис. 2.37. Получение результирующего вектора магнитного поля машины при емкостной нагрузке, $\psi = -90^\circ$

3. Ток якоря I_1 совпадает по фазе с E_{10} ($\psi = 0$). Такому режиму соответствует *активно-емкостный характер нагрузки* ($Z_H = R_H - jX_C$), при этом емкостное сопротивление нагрузки X_C должно быть равно индуктивному X_L сопротивлению обмотки якоря $X_{об}$.



Ток нагрузки I_1 (рис. 2.37, в) совпадает с ЭДС холостого хода E_{10} и поэтому магнитный поток Φ_a направлен поперек по отношению к оси полюсов ротора. Поле Φ_a ослабляет поле возбуждения Φ_B на *набегающей* половине полюса ротора и усиливает на *сбегающей* половине. $\Phi_{рез} = \Phi_B + \Phi_a$ *немного увеличивается* по сравнению с $\Phi_{рез.0}$. В этом случае **реакция якоря поперечная.**

Рис. 2.37. Получение результирующего вектора магнитного поля машины при активной нагрузке, $\psi = 0$

На *ротор действует тормозной электромагнитный момент*, для компенсации его *приводной двигатель* генератора должен развивать на валу *равный ему механический момент.*

При *смешанном характере нагрузки* (активно-индуктивный, активно-емкостной) реакция якоря имеет две составляющие – продольную (размагничивающую или намагничивающую) и поперечную.

Мощность и электромагнитный момент синхронного генератора

Установим зависимость для *невянополюсного генератора* между активной мощностью P и параметрами машины θ , X_C , пренебрегая сопротивлением обмотки якоря ($R_1 = 0$). На рис. 2.39- упрощенная векторная диаграмма.

При ее построении считаем, что в машине существуют два независимых магнитных потока: *полный поток возбуждения Φ_2* и *полный поток якоря (статора) Φ_1* . Полный поток якоря (статора) равен сумме основного потока Φ_a и потока

рассеяния $\Phi_{a\sigma}$ (рис. 2.39). Поток $\Phi_b, \Phi_a, \Phi_{a\sigma}$ наводит в одной обмотке якоря ЭДС соответственно E_{10}, E_a и $E_{a\sigma}$. По второму закону Кирхгофа:

$$\underline{E}_{10} + \underline{E}_a + \underline{E}_{a\sigma} = \underline{I}_1 \underline{Z}_H + \underline{I}_1 R_1 = \underline{U}_1 + \underline{I}_1 R_1, \quad (2.14)$$

где \underline{Z}_H – комплексное сопротивление нагрузки; R_1 – активное сопротивление фазы обмотки якоря (статора).

ЭДС \underline{E}_a и $\underline{E}_{a\sigma}$:

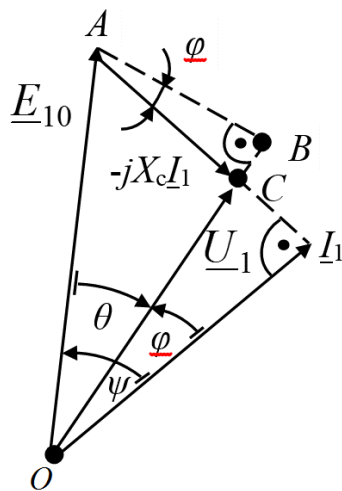
$$\underline{E}_a = -jI_1 X_a; \underline{E}_{a\sigma} = -jI_1 X_{a\sigma}. \quad (2.15)$$

Подставив значения ЭДС и U_1 получим:

$$\underline{U}_1 = \underline{E}_{10} - jI_1(X_a + X_{a\sigma}) + \underline{I}_1 R_1 = \underline{E}_{10} - jI_1 X_c + \underline{I}_1 R_1, \quad (2.16)$$

где $X_c = X_{a\sigma} + X_a$ – синхронное индуктивное сопротивление обмотки якоря, X_a – индуктивное сопротивление реакции якоря; $X_{a\sigma}$ – индуктивное сопротивление рассеяния одной обмотки якоря.

Проведем дополнительные построения (рис. 2.39) – продолжим вектор \underline{U}_1 и опустим из \underline{E}_{10} (точка А) перпендикуляр на вектор \underline{U}_1 . Из прямоугольных треугольников ОАВ и АСВ найдем общую сторону АВ



$$AB = OA \sin \theta = AC \cos \varphi,$$

так как $OA = E_{10}, AC = I_1 X_c$, то получим:

$$E_{10} \sin \theta = I_1 X_c \cos \varphi.$$

Отсюда:

$$I_1 \cos \varphi = \frac{E_{10} \sin \theta}{X_c}.$$

Рис. 2.39. Упрощенная векторная диаграмма синхронного генератора: ψ – угол между векторами \underline{E}_{10} и током генератора \underline{I}_1 ; θ – угол между векторами \underline{E}_{10} и напряжением на зажимах генератора \underline{U}_1 .

Умножим обе части этого уравнения на mU_1 , получим активную мощность (электрическая мощность генератора):

$$P = mU_1 I_1 \cos \varphi = \frac{mU_1 E_{10}}{X_c} \sin \theta = P_{max} \sin \theta, \quad (2.17)$$

где m – число фаз машины (для трехфазной $m = 3$); $P_{max} = mU_1 E_{10} / X_c$ – максимальная мощность.

Угол нагрузки θ – угол между магнитной осью вращающегося поля машины и осью полюсов (магнитного поля) ротора (индуктора). Положительный угол нагрузки ($\theta > 0$) означает, что при вращении ротора и магнитного поля генератора с одной скоростью ось полюсов ротора смещена в сторону вращения (*опережения*) относительно магнитной оси поля якоря.

Из уравнения (2.17) следует, что активная мощность генератора зависит от угла нагрузки θ , т.е. для изменения мощности необходимо изменять угол θ с помощью приводного двигателя. Кроме того мощность пропорциональна напряжению U_1 и ЭДС E_{10} . Если принять потери мощности якоря и механические потери равными нулю, то активная мощность отдаваемая в сеть равна электромагнитной $P = P_{эм}$.

Электромагнитный момент синхронной машины:

$$M_{эм} = \frac{P_{эм}}{\omega_1} = \frac{P}{\omega_1} = \frac{mU_1E_{10}}{X_c\omega_1} \sin \theta = M_{max} \sin \theta, \quad (2.18)$$

где ω_1 – угловая синхронная частота вращения, ($\omega_1 = 2\pi n_1/60$); M_{max} – максимальное значение момента.

В генераторном режиме синхронной машины ($\theta > 0$) момент двигателя является тормозным. Максимальный момент M_{max} определяет перегрузочную способность синхронной машины.

При увеличении момента сопротивления больше M_{max} синхронная машина **выпадает из синхронизма**. Номинальный режим машины определяется моментом M_H и углом $\theta = 20 - 30^\circ$. Рабочий диапазон изменения угла θ составляет $0 \dots 30^\circ$. Превышение нагрузки сверх номинальной может происходить только кратковременно.

Внешняя и регулировочная характеристики синхронного генератора

Внешние характеристики – зависимости напряжения генератора от тока якоря $U_1 = f(I_1)$ при $I_B = const$, $n_2 = n_1 = const$ и $\cos \varphi = const$ (рис. 2.40).

1. При индуктивной нагрузке ($\varphi = 90^\circ, \cos \varphi = 0$) – реакция якоря продольная размагничивающая, и с ростом тока якоря I_1 напряжение генератора U_1 уменьшается.

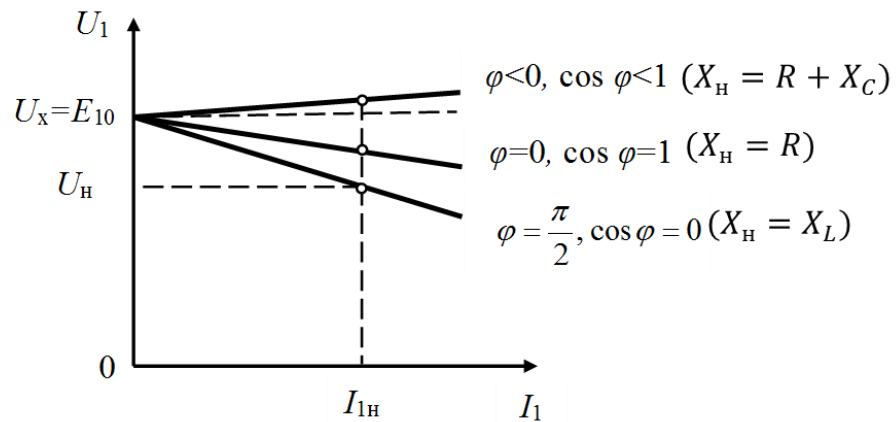


Рис. 2.40. Внешние характеристики синхронного генератора

2. При активной нагрузке ($\varphi = 0, \cos \varphi = 1$) – реакция якоря продольно-поперечная размагничивающая. С ростом тока I_1 напряжение генератора U_1 уменьшается. Продольная составляющая тока якоря в этом случае меньше чем в п. 1, а размагничивание и уменьшение напряжения генератора меньше.

3. При активно-емкостной нагрузке ($\varphi < 0$) – реакция якоря продольно-поперечная намагничивающая. С ростом тока I_1 напряжение U_1 увеличивается.

Если нагрузка смешанная (активно-индуктивная $\varphi < 0$), то внешние характеристики проходят между линиями $\varphi = 0$ и $\varphi = 90^\circ$.

Для генератора стабильность напряжения с изменением тока нагрузки определяют падением напряжения:

$$\Delta U = \frac{U_x - U_n}{U_x} 100 = \frac{E_{10} - U_n}{E_{10}} 100\%.$$

При активно-индуктивной нагрузке $\Delta U = 15 - 25\%$ (рис. 2.41).

Регулировочные характеристики – зависимости $I_b = f(I_1)$, при $U_1 = \text{const}$, $n_2 = n_1 = \text{const}$ и $\cos \varphi = \text{const}$ (рис. 2.41). Определяют закон изменения тока возбуждения при неизменном напряжении на выходе машины и изменяющемся токе нагрузки и ее характере ($\cos \varphi = \text{const}$).

На рис. 2.41 показаны **регулировочные характеристики** для трех значений $\cos \varphi$.

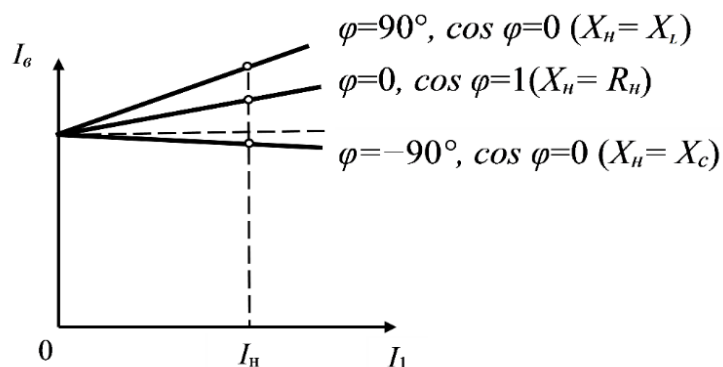


Рис. 2.41. Регулировочные характеристики синхронного генератора

При *индуктивном* ($\varphi = 90^\circ$) и *активном* ($\varphi = 0$) характере нагрузки реакция якоря *продольная размагничивающая*. Чтобы сохранить напряжение U_1 постоянным с ростом нагрузки (тока якоря I_1), необходимо компенсировать это размагничивающее действие увеличением тока возбуждения. Зависимости $I_B = f(I_1)$ при $\cos \varphi = 0$ ($\varphi = 90^\circ$) и $\cos \varphi = 1$ ($\varphi = 0$) *возрастающие*. При *емкостной нагрузке* $\cos \varphi = 0$ ($\varphi = -90^\circ$) реакция якоря *продольная намагничивающая* и для сохранения неизменным напряжения U_1 ток возбуждения необходимо *уменьшать*. **Регулировочная характеристика имеет падающий характер.**

Принцип действия трехфазного синхронного электродвигателя

Подключим трёхфазную синхронную обмотку якоря (статора) синхронного двигателя к трёхфазной сети (рис. 2.42) замыкая автомат S1. Токи обмотки *статора* создадут вращающееся *магнитное поле* с частотой вращения n_1 .

Предположим, что ротор (за счет внешнего приводного двигателя) разогнан до скорости $n_2 \cong 0,95n_1$ и внешний двигатель был отключен. В обмотку ротора подан ток возбуждения, создающий неподвижное, относительно ротора, магнитное поле. Вращающееся магнитное поле статора «захватывает» *магнитное поле ротора* и ускоряясь, *начинает вращаться со скоростью* вращения магнитного поля статора ($n_2 = n_1$). *Синхронная машина работает в режиме двигателя.*

При идеальном *холостом ходе* (момент нагрузки $M_C = 0$), ось результирующего магнитного поля совпадает с магнитной осью ротора ($\theta = 0$).

Если к валу двигателя приложить момент сопротивления ($M_C > 0$) то ось магнитного поля ротора сместится на угол θ по отношению к результирующему полю в сторону отставания. Создается электромагнитный момент двигателя, увеличивающийся с ростом угла θ , уравновешивающий момент сопротивления: $M_{эм} = M_C$.

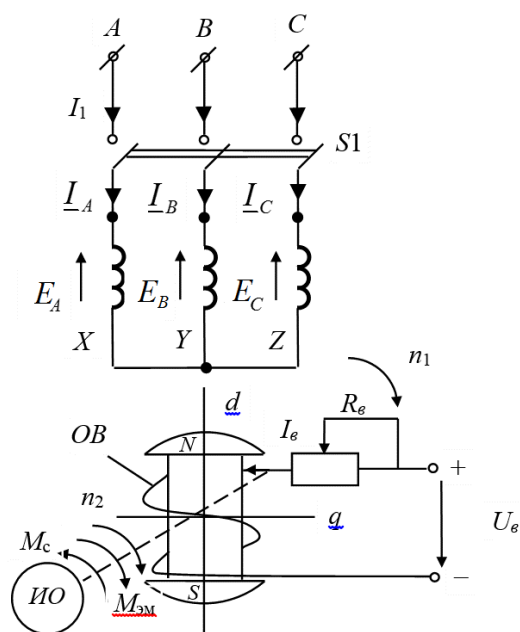


Рис. 2.42. Схема включения синхронного двигателя

Если момент сопротивления M_c на исполнительном органе ИО превысит M_{\max} , то двигатель «выходит из синхронизма» – скорость ротора станет равной нулю, он остановится. Номинальному моменту ($-M_n$) соответствует угол нагрузки $\theta = -(20^\circ - 30^\circ)$. Перегрузочная способность двигателя по моменту (M_{\max}/M_n) составляет 2,0...2,8. Если **увеличивать токи возбуждения I_B** , то **максимальный момент двигателя M_{\max} будет увеличиваться, так как возрастает E_{10}** .

Синхронный двигатель обладает свойством саморегулирования при изменении нагрузки на валу – автоматически изменяет электромагнитный момент $M_{эм}$. При уменьшении нагрузки уменьшается угол θ , электромагнитный момент $M_{эм}$ и мощность $P_{эм}$ двигателя. При увеличении нагрузки на валу двигателя угол θ , электромагнитный момент и мощность двигателя увеличиваются.

Пуск электродвигателя. Механическая характеристика

Механическая характеристика синхронного электродвигателя $n_2 = f(M)$, прямая I, (рис. 2.43). Точка 1 – номинальный режим, точка 2 – максимальный момент M_{\max} .

Особенности механической характеристики. Независимость скорости вращения ротора от M_c вплоть до M_{\max} . Скорость вращения ротора n_2 и магнитного поля машины равны ($n_1 = n_2$).

Применяются *асинхронный пуск* синхронного двигателя и *пуск с помощью дополнительного электрического двигателя*.

Вывод: с увеличением механического момента сопротивления возрастает угол θ , увеличивается механическая мощность на валу двигателя и электроэнергия, потребляемая им из сети. При этом скорость вращения ротора n_2 будет оставаться постоянной и равной скорости вращения магнитного поля якоря n_1 . **Максимальный момент (мощность) развивается при $\theta = -90^\circ$.**

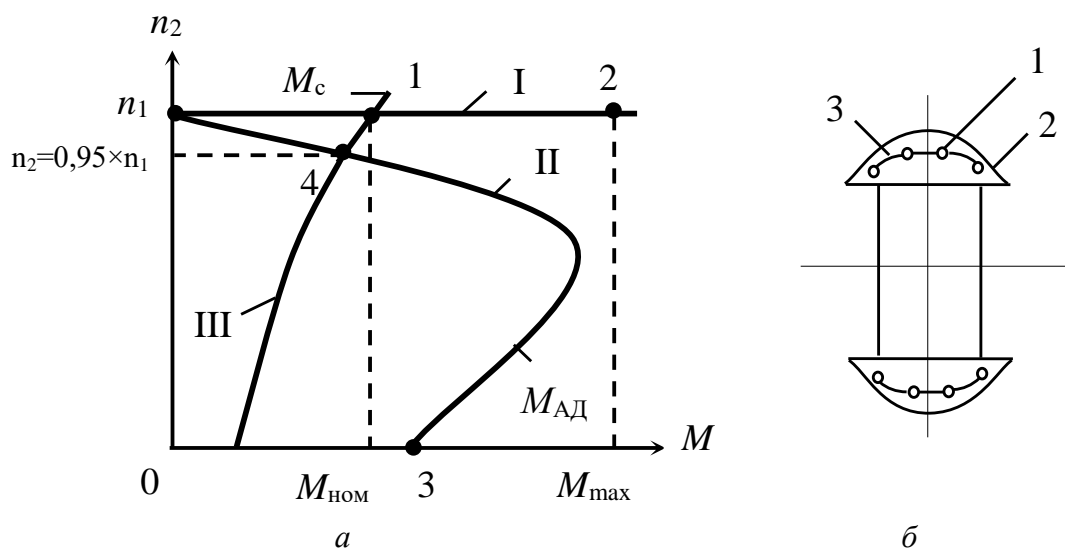
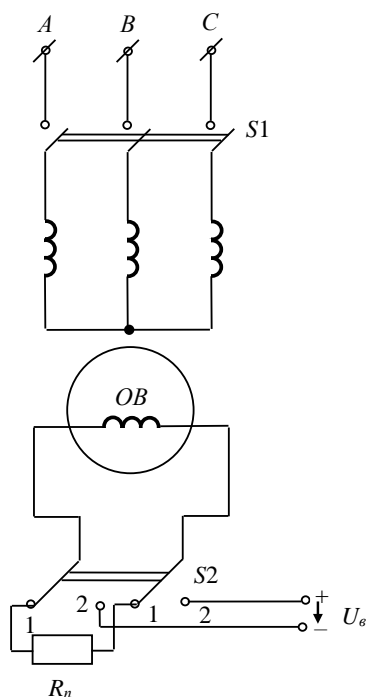


Рис. 2.43. Механические характеристики синхронного двигателя (а); размещение короткозамкнутой обмотки в полюсах ротора (б)

Наиболее часто встречается асинхронный пуск. Для *асинхронного* пуска синхронного двигателя их роторы, кроме основной обмотки возбуждения, имеют специальную **пусковую короткозамкнутую обмотку**, подобную «беличьему колесу» асинхронных двигателей.

Стержни 1 этой обмотки (рис.2.43, б) укладывают в специальные пазы полюсов 2 и соединяют по торцам ротора проводником 3.



При пуске двигателя (рис. 2.44) обмотку статора подключают к трехфазной сети переключателем S_1 а обмотку возбуждения OB отключают от источника питания U_B переключателем S_2 (из положения 2 в положение 1) на резистор R_n , сопротивление которого в 10...15 раз превышает сопротивление обмотки.

Рис. 2.44. Схема асинхронного пуска синхронного двигателя

Если обмотку возбуждения оставить разомкнутой, то в начале пуска в ней будет индуцироваться большая ЭДС вращающимся магнитным полем, опасная для изоляции. Под действием *асинхронного момента* (M_{Ad}), от взаимодействия токов в стержнях обмотки ротора и вращающегося магнитного поля машины, ротор разгоняется по механической характеристике (кривая II), соответствующей асинхронному двигателю, до скорости ($n_2 = 0,95n_1$) близкой к синхронной. Разгон идет от точки 3 до точки 4 (рис. 2.43), затем переключателем S_2 обмотку возбуждения подключают к источнику постоянного напряжения (положение 2).

Ток возбуждения создает магнитный поток ротора, возникает синхронный электромагнитный момент $M_{эм}$ и двигатель втягивается в синхронизм. Переход двигателя (в процессе пуска) с асинхронной на синхронную механическую характеристику (см. рис. 2.43, т. 3-4-1).

Характеристика момента сопротивления M_c (кривая III). После пуска двигатель будет работать в номинальном установившемся режиме (точка 1 – пересечение механической характеристики двигателя (прямая I) и момента сопротивления M_c – кривая III).

Регулирование коэффициента мощности трехфазного синхронного двигателя

Рассмотрим влияние тока возбуждения ротора, на работу синхронного двигателя, включенного в промышленную трехфазную сеть.

Результирующее магнитное поле синхронного двигателя индуцирует ЭДС в трех обмотках статора. Изменяющийся магнитный поток этого поля, пересекаясь с фазой обмотки статора, индуцирует в ней ЭДС, определяемые по формуле (2.15).

Для одной обмотки фазы статора двигателя, согласно второму закону Кирхгофа:

$$\underline{U}_1 = \underline{E}_{10} + jX_c I_1 + R_1 I_1, \quad (2.19)$$

где U_1 – напряжение сети; R_1 – активное сопротивление фазы обмотки статора; I_1 – ток в фазе обмотки статора.

В синхронных машинах $R_1 \ll X_c$, тогда членом $R_1 I_1$ пренебрегаем:

$$\underline{U}_1 = \underline{E}_{10} + jX_c I_1. \quad (2.20)$$

Построим по уравнению (2.20) три векторные диаграммы двигателя для различных токов возбуждения (рис. 2.45), при условии постоянства напряжения сети $U_1 = const$ и момента $M = const$ ($n = const$). Этим условиям из формулы (2.17) следует, что при регулировании тока возбуждения:

$$E_{10} \sin \theta = const; I_1 \cos \varphi = I_{1a} = const,$$

где I_{1a} – активная составляющая тока якоря (статора).

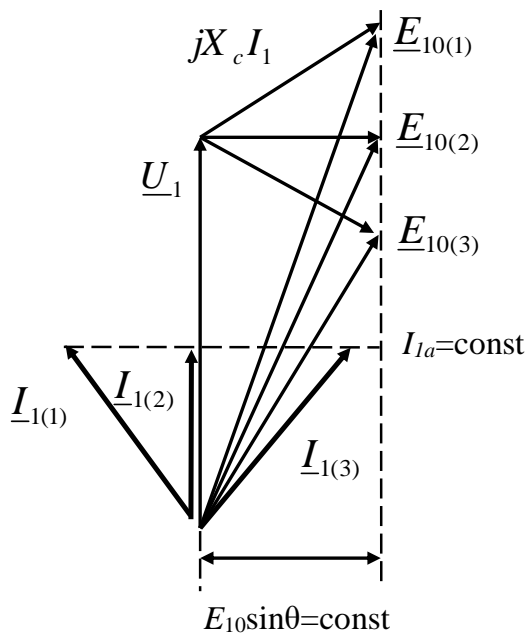


Рис. 2.45. Векторные диаграммы синхронного двигателя при регулировании с помощью тока возбуждения

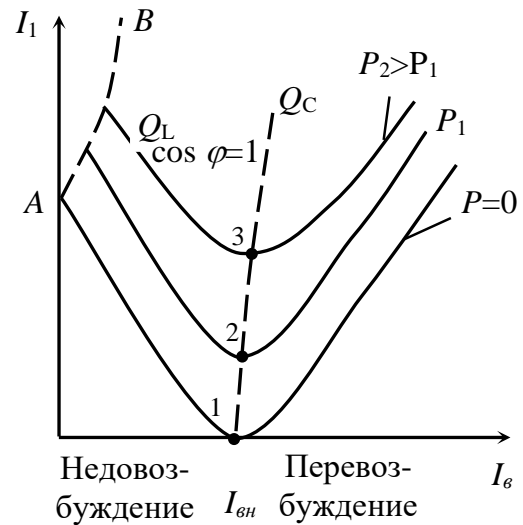


Рис. 2.46. U-образные характеристики синхронного двигателя. АВ– граница устойчивости

Первая векторная диаграмма – при токе $I_{1(1)}$ опережающем напряжение сети \underline{U}_1 (двигатель генерирует в сеть реактивную и потребляет активную мощность). Ток возбуждения $I_{в1}$ большой, так как ЭДС холостого хода $E_{10(1)}$ максимальна.

Вторая диаграмма – при минимальном токе $I_{1(2)} = I_{1a}$, совпадающем по фазе с \underline{U}_1 (двигатель потребляет из сети активную мощность и не потребляет реактивной мощности). Ток возбуждения $I_{в2}$ меньше тока $I_{в(1)}$, так как $E_{10(2)} < E_{10(1)}$.

Третья диаграмма – при токе $I_{1(3)}$ отстающем от \underline{U}_1 (двигатель потребляет реактивную и активную мощность). Ток возбуждения $I_{в3}$ меньше, чем в предыдущих двух случаях, так как $(E_{10(3)} < E_{10(2)} < E_{10(1)})$.

На основе этого анализа на рис. 2.46 построены U-образные характеристики – зависимости тока статора от тока возбуждения обмотки ротора $I_1 = f(I_e)$. При условии $U_1 = const, M_c = const (P = const)$.

Из анализа этих характеристик следуют три энергетических режима работы синхронного двигателя в зависимости от тока возбуждения I_e .

1. При номинальном токе возбуждения $I_{вн}$ ток статора двигателя совпадает по фазе с напряжением сети и двигатель работает как активный элемент,

потребляя из сети только **активную** электрическую мощность, при $\cos \varphi = 1$. Этому режиму соответствуют точки 1, 2, 3 (при разных нагрузках на валу 0, P_1 , P_2) и пунктирная линия $\cos \varphi = 1$.

2. При **токе возбуждения меньшем номинального** ($I_B < I_{BH}$) *недовозбуждение* двигателя, ток статора отстает от напряжения сети (активно-индуктивная нагрузка) и электродвигатель **потребляет из сети реактивную мощность** $Q_L > 0$ (область Q_L).

3. При **токе возбуждения большем номинального** ($I_B > I_{BH}$) *перевозбуждение* двигателя, ток статора опережает напряжение сети (**активно-емкостная нагрузка**) и электродвигатель **отдает в сеть емкостную реактивную мощность** $Q_C < 0$ (область Q_C).

Обычно синхронные двигатели мощностью 0,5...50 МВт работают с перевозбуждением ($I_B > I_{BH}$) при $\cos \varphi = -(0,7 \dots 0,9)$.

При этом *емкостные составляющие* токов статора компенсируют *индуктивные составляющие токов* асинхронных двигателей, трансформаторов и других приемников, уменьшая токи и потери энергии в линиях.

Перевозбужденный синхронный двигатель без нагрузки на валу ($P = 0$) называется синхронным компенсатором– потребителем ёмкостного тока.

Синхронные компенсаторы **используют для повышения коэффициента мощности ($\cos \varphi$)** и стабилизации напряжения промышленных сетей. Мощности синхронных компенсаторов достигают 100...160 Мвар.