

2. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

2.1. Принцип действия и устройство синхронных машин

Трехфазная синхронная машина, электромагнитная схема которой показана на рис. 2.1, содержит неподвижный статор и вращающийся ротор. На статоре 1 расположена трехфазная обмотка, аналогичная по конструкции обмотке асинхронных машин. На роторе расположен электромагнит 2, состоящий из сердечника и обмотки возбуждения 4, которая получает питание от источника постоянного тока посредством контактных колец и щеток. Ротор синхронной машины является индуктором, а статор – якорем.

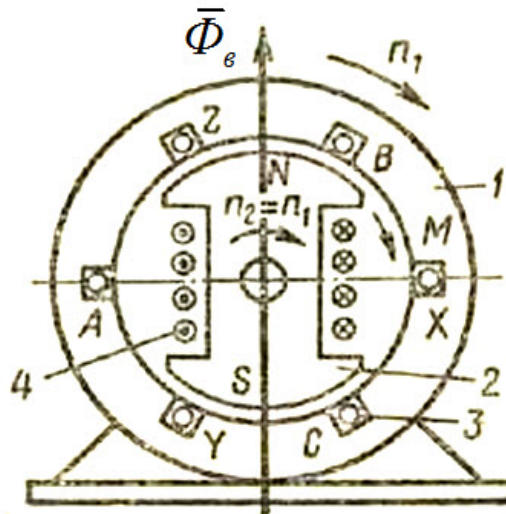


Рис. 2.1. Электромагнитная схема синхронной машины

В генераторном режиме индуктор вращается со скоростью n_2 , вместе с ним вращается магнитный поток машины $\bar{\Phi}_v$, который пересекает проводники обмотки якоря и индуцирует в них трехфазную эдс \bar{E}_a . Эдс якоря \bar{E}_a меняется с частотой f_1 , определяемой по формуле [1]:

$$f_1 = \frac{pn_2}{60}. \quad (1.1)$$

При подключении обмотки якоря к какой-либо нагрузке в ней под действием эдс \bar{E}_a возникает ток \bar{I}_a , который создает вращающееся магнитное поле, характеризующееся потоком $\bar{\Phi}_a$, частота вращения которого равна

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}. \quad (2.2)$$

Частоты вращения ротора синхронной машины n_2 и поля статора n_1 равны. Результирующий магнитный поток $\bar{\Phi}$ создается потоками $\bar{\Phi}_\epsilon$ и $\bar{\Phi}_a$. Магнитное поле потока $\bar{\Phi}$ вращается в зазоре машины с той же частотой, что и ротор. В двигательном режиме с включением обмотки якоря в трехфазную сеть возникающий в ней ток \bar{I}_a создает круговое поле. Оно вращается с частотой n_1 при частоте тока f_1 . Обмотка возбуждения в свою очередь создает поле полюсов, которое вращается синхронно с ротором и является неподвижным относительно поля статора. Частота вращения ротора находится в строгой зависимости от частоты тока сети. Она равна частоте вращения магнитного поля статора. Взаимодействие потока $\bar{\Phi}$ с током \bar{I}_ϵ в обмотке возбуждения приводит к образованию электромагнитных сил и момента M , который является тормозным в генераторном режиме и движущим в режиме двигателя [16].

Статор синхронной машины по конструкции принципиально не отличается от статора асинхронной машины. Конструкция ротора определяется областью применения машины и способом ее возбуждения. В машинах малой мощности используют постоянные магниты, а в машинах большой мощности возбуждение осуществляется постоянным током.

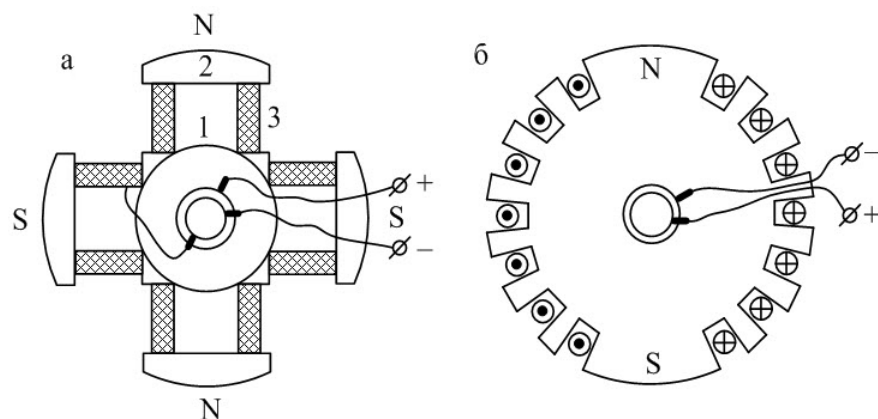


Рис. 2.2. Конструкции роторов синхронных машин: а – явнополюсная;
б – неявнополюсная

Существуют явнополюсное и неявнополюсное исполнения ротора синхронных машин (рис. 1.2). Явнополюсные роторы выполняются в машинах с числом полюсов четыре и более. Северные и южные полюсы чередуются. На сердечниках полюсов 1 размещают обмотку возбуждения в виде цилиндрических катушек 3. Они укрепляют с помощью полюсных наконечников 2. Полюсные наконечники имеют такой профиль, при котором воздушный зазор между наконечником и статором получается минимальным под серединой полюса и максимальным у его краев. Благодаря такому исполнению полюсного наконечника индукция магнитного поля в зазоре меняется практически по синусоидальному закону. Ротор, сердечники полюсов и полюсные наконечники изготавливают из листовой стали [16].

Синхронные машины с явнополюсными роторами конструируют тихоходными по условиям обеспечения необходимой механической прочности крепления полюсов и обмотки возбуждения. На полюсных наконечниках синхронных двигателей размещают обмотку типа «беличья клетка» (рис. 2.3), которая называется пусковой и изготавливается из латуни для повышения сопротивления. В синхронных генераторах аналогичная обмотка изготавливается из меди. Она называется успокоительной или демпферной. Такая обмотка обеспечивает затухание колебаний ротора, которые возникают в переходных режимах работы машины [2].

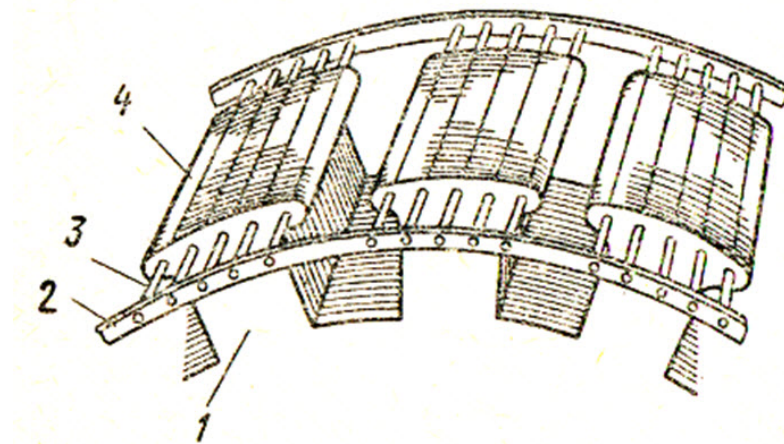


Рис. 2.3. Устройство пусковой (демпферной) обмотки синхронной машины: 1 – полюсы ротора; 2 – короткозамкнутые кольца; 3 – стержни «беличьей клетки»; 4 – полюсные наконечники

Неявнополюсные роторы выполняются в машинах с двумя или четырьмя полюсами. Обмотка возбуждения размещается в пазах сердечника ротора и закрепляется немагнитными клиньями. При пуске и в переходных режимах в массивных полюсах возникают вихревые токи, действие которых эквивалентно действию тока в короткозамкнутой обмотке.

Питание обмотки возбуждения синхронных машин проводится от независимого источника или посредством самовозбуждения. При независимом возбуждении обмотка ротора получает питание от генератора постоянного тока (возбудителя), находящегося на одном валу с генератором, или от управляемого вентильного преобразователя, который запитан от отдельной сети. Самовозбуждение происходит за счет остаточного потока в магнитной системе машины и питания обмотки ротора от обмотки якоря через управляемый преобразователь. Мощность, затрачиваемая на возбуждение, составляет 0,3-3% от мощности синхронной машины. Причем, чем машина мощнее, тем эта доля меньше. Системы возбуждения автоматизированы, к ним предъявляются повышенные требования в отношении надежности функционирования. В современных синхронных гене-

раторах применяется бесконтактная система возбуждения, при которой отсутствуют контактные кольца на роторе [16].

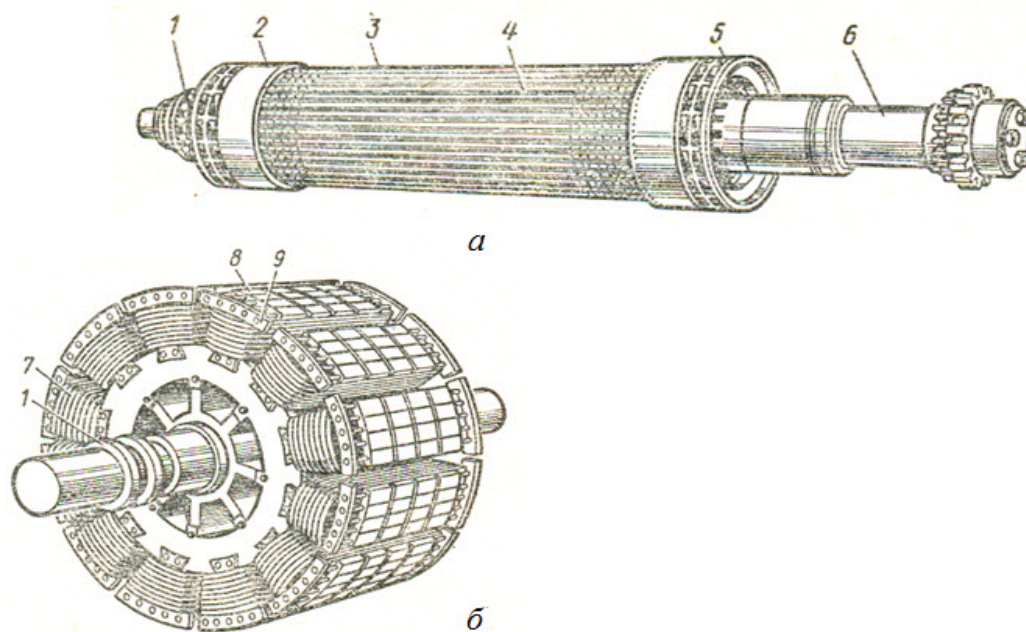


Рис. 2.4. Общий вид роторов турбогенераторов: 1 – контактные кольца; 2 – кольцевые бандажы; 3 – ротор; 4 – металлические клинья; 5 – вентилятор; 6 – вал; 7 – обмотка возбуждения; 8 – полюсы; 9 – пусковая обмотка

Явнополюсные турбогенераторы приводятся во вращение быстроходными паровыми или газовыми турбинами. Роторы турбогенераторов преимущественно двухполюсные (рис. 2.4, а). Их максимальная частота вращения 3000 об/мин. Это позволяет уменьшить габариты и массу машины, а также используемой паровой турбины. Увеличение количества полюсов на роторе приводит к увеличению его диаметра (рис. 2.4, б), примерно в $\sqrt{2}$ раз в четырехполюсной машине, а также к снижению частоты вращения при одинаковой мощности. Турбогенераторы выполнены с горизонтальным расположением ротора. При мощности до 30 МВт они имеют поверхностное или косвенное (обдув) воздушное охлаждение, а в случае больших мощностей – косвенное водородное.

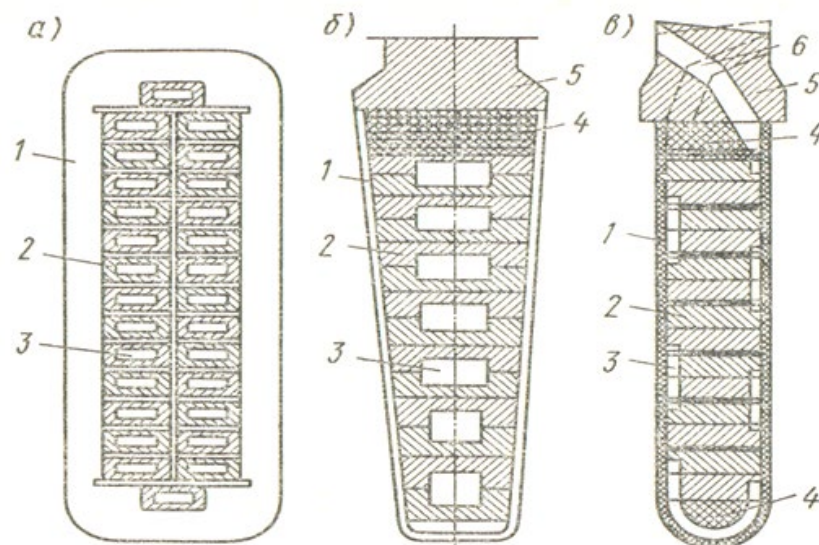


Рис. 2.5. Выполнение внутренних каналов в обмотках статора (а) и ротора (б, в) в турбогенераторах с непосредственным охлаждением: 1 – пазовая изоляция; 2 – полые проводники; 3 – каналы для прохода охлаждающего вещества; 4 – изоляционные прокладки; 5 – клин; 6 – канал для забора и выброса охлаждающего газа из зазора между ротором и статором

Гидрогенераторы приводятся во вращение сравнительно тихоходными гидравлическими турбинами, имеют явнополусные роторы большого диаметра преимущественно вертикального исполнения [2].

2.2. Реакция якоря синхронных машин

В режиме холостого хода в синхронном генераторе имеет место только магнитный поток индуктора $\bar{\Phi}_g$, создаваемый магнитодвижущей силой обмотки возбуждения \bar{F}_g . При подключении нагрузки протекающий по обмотке якоря ток \bar{I}_a образует магнитодвижущую силу \bar{F}_a . Она создает магнитный поток якоря $\bar{\Phi}_a$. Поток $\bar{\Phi}_a$ совместно с потоком $\bar{\Phi}_g$ образуют результирующий поток генератора $\bar{\Phi}$. Воздействие магнитодвижущей силы якоря на магнитное поле синхронной машины называется реакцией якоря. Изменение результирующего потока в ма-

шине, а также конструктивные особенности приводят к изменению напряжения на ее зажимах при работе на автономную нагрузку. Действие реакции якоря существенно зависит от характера нагрузки. Оно может искажать, ослаблять и усиливать поле машины.

Рассмотрим влияние реакции якоря на рабочие свойства синхронной машины для различных углов сдвига фаз ψ между эдс \bar{E}_0 на холостом ходу и током \bar{I}_a в обмотке якоря. Угол ψ определяется характером нагрузки. На рис. 2.6 обмотка каждой фазы представлена в виде одного витка. В случае активной нагрузки ($\psi = 0$) ток \bar{I}_a совпадает по фазе с эдс \bar{E}_0 . При заданной полярности и заданном направлении вращения индуктора амплитудное значение эдс имеет место в фазе A при положении индуктора, показанном на рис. 2.6, а. Магнитодвижущая сила индуктора \bar{F}_ϵ направлена по оси полюсов, а магнитодвижущая сила \bar{F}_a является поперечной и искажает магнитное поле синхронной машины. Индуктивной нагрузка вызывает отставание тока \bar{I}_a по фазе от эдс \bar{E}_0 на угол $\psi = \pi/2$. Эдс в фазе A имеет максимальное значение при положении индуктора, показанном на рис. 1.6, а.

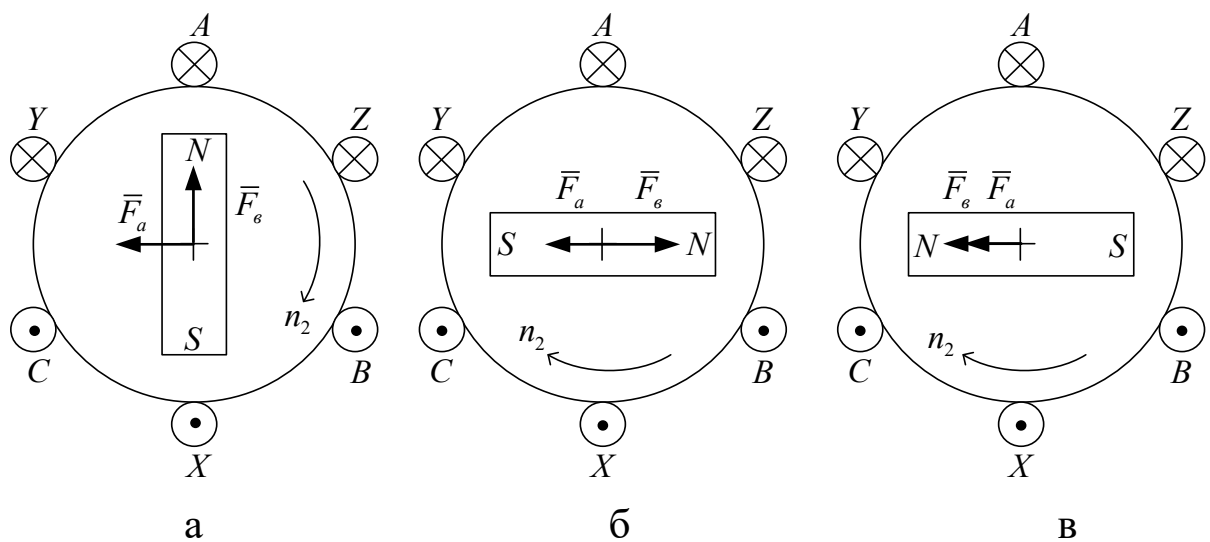


Рис. 2.6. Действие магнитодвижущей силы реакции якоря \bar{F}_a на магнитное поле машины при: а – активной; б – индуктивной; в – емкостной нагрузках

К тому времени, когда ток в фазе A достигает амплитудного значения, индуктор успевает повернуться на 90^0 эл и занять положение на рис. 2.6, б. Магнитодвижущие силы индуктора \bar{F}_e и якоря \bar{F}_a направлены встречно, сила \bar{F}_a является в данном случае продольно размагничивающей.

При емкостной нагрузке ток \bar{I}_a опережает по фазе на угол $\psi = \pi / 2$.

Максимальное значение эдс в фазе A определяется положением индуктора рис. 1.6, а. Ток в фазе A достигает амплитудного значения, когда положение индуктора соответствует рис. 2.6, в. Магнитодвижущие силы индуктора \bar{F}_e и якоря \bar{F}_a направлены согласно, а сила \bar{F}_a является в данном случае продольно намагничивающей.

Нагрузка синхронных генераторов в большинстве случаев носит активно-индуктивный характер ($0 < \psi < \frac{\pi}{2}$). В момент времени t_m ток в фазе A достигает амплитудного значения, а индуктор относительно положения рис. 1.6, а успевает повернуться на угол ψ .

Для анализа работы синхронных машин с явнополюсным ротором в различных режимах вводят продольную d и поперечную q оси и используют так называемый метод двух реакций. Этот метод предложен А. Блонделем. Магнитодвижущая сила якоря \bar{F}_a представляется в виде двух составляющих.

Они действуют по осям d и q (рис. 2.7).

$$\bar{F}_a = \bar{F}_{ad} + \bar{F}_{aq}, \quad (2.3)$$

где $\bar{F}_{ad} = \bar{F}_a \sin \psi$, $\bar{F}_{aq} = \bar{F}_a \cos \psi$.

Магнитодвижущие силы \bar{F}_{ad} и \bar{F}_{aq} создаются составляющими тока якоря \bar{I}_{ad} и \bar{I}_{aq} . Они образуют потоки $\bar{\Phi}_{ad}$ и $\bar{\Phi}_{aq}$. Эти потоки наводят эдс

\bar{E}_{ad} и \bar{E}_{aq} . Векторная диаграмма потоков и эдс машины представлена на рис.

2.8. Эдс явнополюсного синхронного генератора, работающего под нагрузкой

$$\bar{E}_{\delta} = \bar{E}_0 + \bar{E}_{ad} + \bar{E}_{aq}. \quad (2.4)$$

Эдс \bar{E}_{δ} неявнополюсного синхронного генератора, работающего под нагрузкой, в котором разложение величин по осям d и q не проводится из-за одинакового зазора между статором и ротором, определяется выражением

$$\bar{E}_{\delta} = \bar{E}_0 + \bar{E}_a, \quad (2.5)$$

где \bar{E}_a – эдс, наводимая магнитодвижущей силой \bar{F}_a .

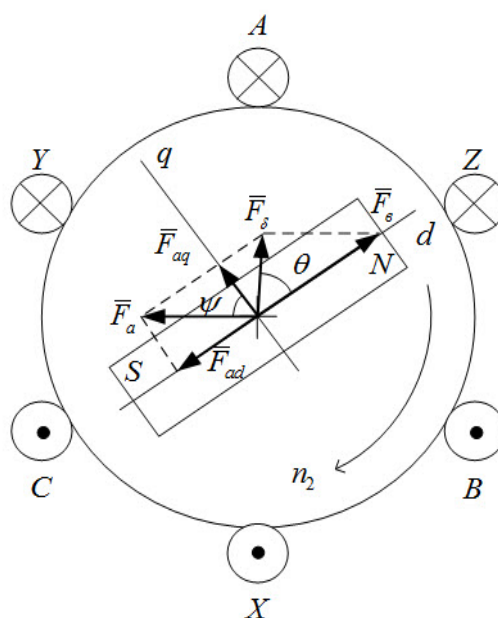


Рис. 2.7. Действие магнитодвижущей силы реакции якоря \bar{F}_a на магнитное поле машины при активно-индуктивной нагрузке

Вектор \bar{F}_δ представляет результирующую магнитодвижущую силу, наводящую эдс \bar{E}_δ при работе синхронной машины под нагрузкой. Вектор \bar{F}_δ для явнополюсных и неявнополюсных машин определяется выражениями

$$\bar{F}_\delta = \bar{F}_0 + \bar{F}_{ad} + \bar{F}_{aq}; \quad (2.6)$$

$$\bar{F}_\delta = \bar{F}_0 + \bar{F}_a. \quad (2.7)$$

Угол θ между продольной осью d и вектором результирующей намагничивающей силы \bar{F}_δ называется углом нагрузки. От величины угла θ зависят электромагнитный момент M и активная мощность P синхронной машины.

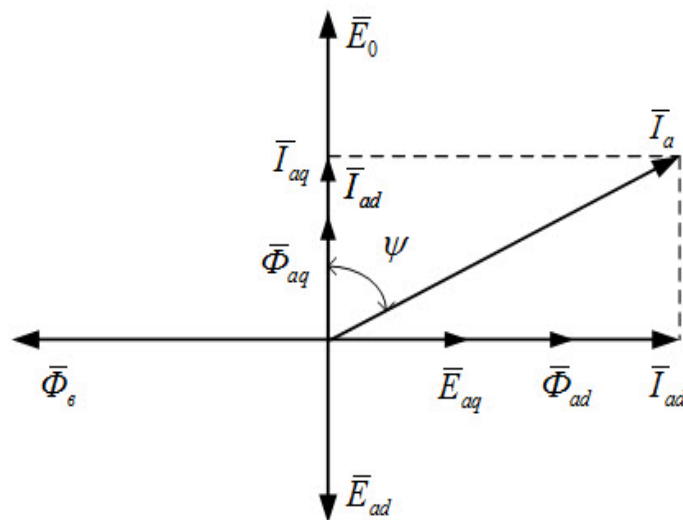


Рис. 2.8. Векторная диаграмма потоков и эдс явнополюсного синхронного генератора

Индуктор (ротор) явнополюсной машины имеет магнитную несимметрию, поскольку сопротивление магнитному потоку по осям d и q неодинаково. Сопротивление магнитному потоку по оси q значительно больше магнитного сопротивления потоку по оси d . Поэтому вводятся понятия индуктивных сопротивлений продольной x_{ad} и поперечной x_{aq} реакции якоря. Магнитная цепь по оси q ненасыщенна. В данном случае считается, что со-

противление x_{aq} является постоянным. Величина x_{ad} не является постоянной вследствие малого воздушного зазора, поскольку зависит от насыщения магнитной цепи. Индуктивные сопротивления по осям d и q , соответственно, с учетом индуктивного сопротивления рассеивания обмотки статора x_σ будут равны

$$x_d = x_{ad} + x_\sigma; \quad x_q = x_{aq} + x_\sigma. \quad (2.8)$$

В неявнополусной машине воздушный зазор равномерный, поэтому можно полагать, что $x_{ad} = x_{aq}$ и $x_d = x_q$.

2.3. Синхронные генераторы. Векторные диаграммы синхронного генератора

Анализ работы синхронных генераторов подразделяется на качественный и количественный. В обоих случаях часто используют векторные диаграммы А. Блонделя. При качественном анализе работы применяются упрощенные диаграммы. Они строятся для ненасыщенных машин. Количественный анализ требует уточненных диаграмм [1, 16]. Для цепи якоря неявнополусного синхронного генератора имеет место уравнение:

$$\bar{U}_a = \bar{E}_\delta + \bar{E}_\sigma - \bar{I}_a r_a = \bar{E}_\delta - j\bar{I}_a x_\sigma - \bar{I}_a r_a, \quad (2.9)$$

где \bar{E}_σ – эдс, наводимая в обмотке якоря потоком рассеяния; x_σ – индуктивное сопротивление, обусловленное этим потоком.

Выражение (2.9) с учетом (2.5) примет вид:

$$\bar{U}_a = \bar{E}_0 + \bar{E}_a - j\bar{I}_a x_\sigma - \bar{I}_a r_a = \bar{E}_0 - j\bar{I}_a x_a - j\bar{I}_a x_\sigma - \bar{I}_a r_a. \quad (2.10)$$

В выражении (2.10) \bar{E}_a представляет эдс самоиндукции, индуцируемая в обмотке якоря. Она проявляется при отсутствии насыщения магнитопровода и пропорциональна току \bar{I}_a . Анализ работы ненасыщенной синхронной машины допускается проводить с помощью упрощенной векторной диаграммы (рис. 2.9), которая строится исходя из (2.2). Величина $x_c = x_a + x_\sigma$ называется полным или синхронным индуктивным сопротивлением машины. Величина эдс \bar{E}_0 получается несколько завышенной без учета насыщения. Точная векторная диаграмма синхронного неявнополюсного генератора, называемая диаграммой Потье, строится с учетом насыщения магнитной цепи машины при ее испытаниях.

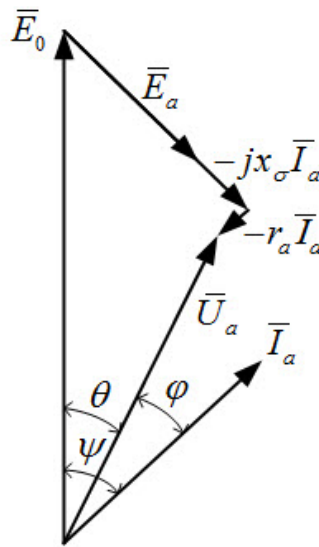


Рис. 2.9. Упрощенная векторная диаграмма синхронного неявнополюсного генератора

При работе машины в генераторном режиме напряжение \bar{U}_a всегда отстает от эдс \bar{E}_0 . В этом случае угол θ считается положительным. Чем больше нагрузка генератора, т.е. отдаваемая им мощность, тем больше угол θ .

Уравнение (2.9) с учетом (2.4) принимает вид:

$$\bar{U}_a = \bar{E}_\delta + \bar{E}_\sigma - \bar{I}_a r_a = \bar{E}_0 + \bar{E}_{ad} + \bar{E}_{aq} - j\bar{I}_a x_\sigma - \bar{I}_a r_a, \quad (2.11)$$

где $\bar{E}_{ad} = -j\bar{I}_{ad}x_{ad}$; $\bar{E}_{aq} = -j\bar{I}_{aq}x_{aq}$.

Упрощенная векторная диаграмма (рис. 2.10,а) явнополюсного синхронного генератора строится исходя из (2.11) [2]. Сопротивления x_d и x_q , определяемые из (2.8), называются синхронными (полными) индуктивными сопротивлениями обмотки якоря по продольной d и поперечной q осям. ЭДС \bar{E}_σ , индуцируемую в обмотке якоря потоком рассеяния, можно представить в виде суммы двух составляющих, ориентированных по осям d и q :

$$\bar{E}_\sigma = \bar{E}_{\sigma d} + \bar{E}_{\sigma q} = -j\bar{I}_{ad}x_\sigma - j\bar{I}_{aq}x_\sigma. \quad (2.12)$$

Выражение (2.3) с учетом (1.8) и (2.4) примет вид:

$$\bar{U}_a = \bar{E}_0 - j\bar{I}_{ad}x_d - j\bar{I}_{aq}x_q - \bar{I}_a r_a = \bar{E}_0 + \bar{E}_d + \bar{E}_q - \bar{I}_a r_a. \quad (2.13)$$

Упрощенная векторная диаграмма (рис. 2.10, б) явнополюсного синхронного генератора может быть построена на основании (2.13). В условиях эксплуатации известны следующие паспортные данные синхронного генера-

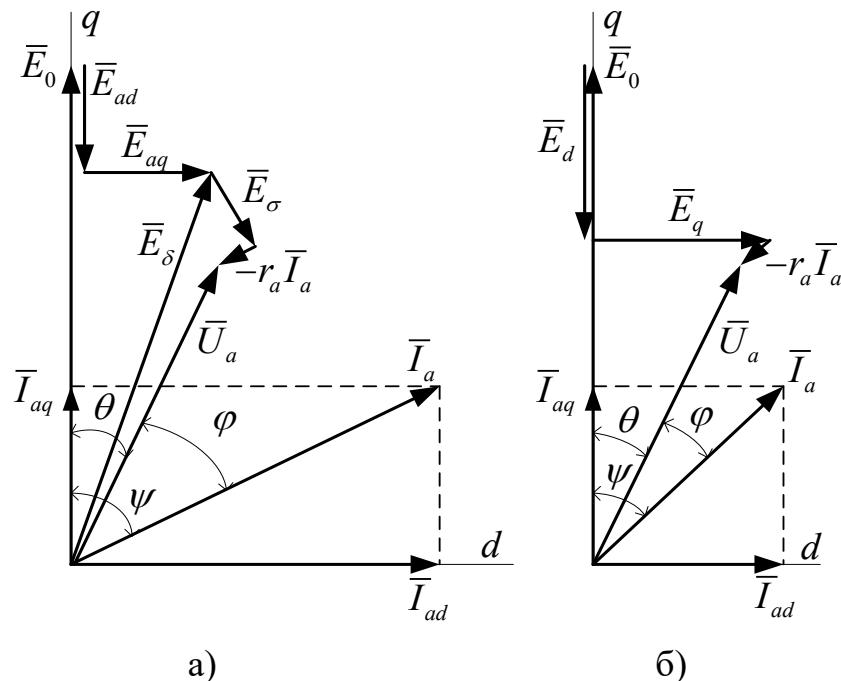


Рис. 2.10. Упрощенные векторные диаграммы синхронного явнополюсного генератора

тора: U_a , I_a , $\cos\varphi$, r_a , x_d и x_q .

На (рис. 2.11, а) показана диаграмма, выполненная по (2.5) с дополнительными построениями. В треугольнике abc отрезок bc представлен в масштабе напряжения. Он равен $-j\bar{I}_{ad}x_q$. Гипотенуза ca определяется как:

$$-j\bar{I}_{ad}x_q - j\bar{I}_{aq}x_q = -jx_q(\bar{I}_{ad} + \bar{I}_{aq}) = -jx_q\bar{I}_a. \quad (2.14)$$

Из (2.14) вытекает практический способ построения упрощенной векторной диаграммы (рис. 2.11, б) синхронного явнополюсного генератора. Последовательность действий пронумерована. На плоскости произвольно откладывают вектор U_a . Под углом φ строят вектор тока нагрузки \bar{I}_a . Откладывают вектора падения напряжения на активном сопротивлении статора $-r_a\bar{I}_a$ и строят $-jx_q\bar{I}_a$. Таким способом устанавливается точка c , затем проводится прямая через точки 0 и c , которая является осью q . Перпендикулярно q проводится ось d . Диаграмма достраивается согласно (2.14) [1].

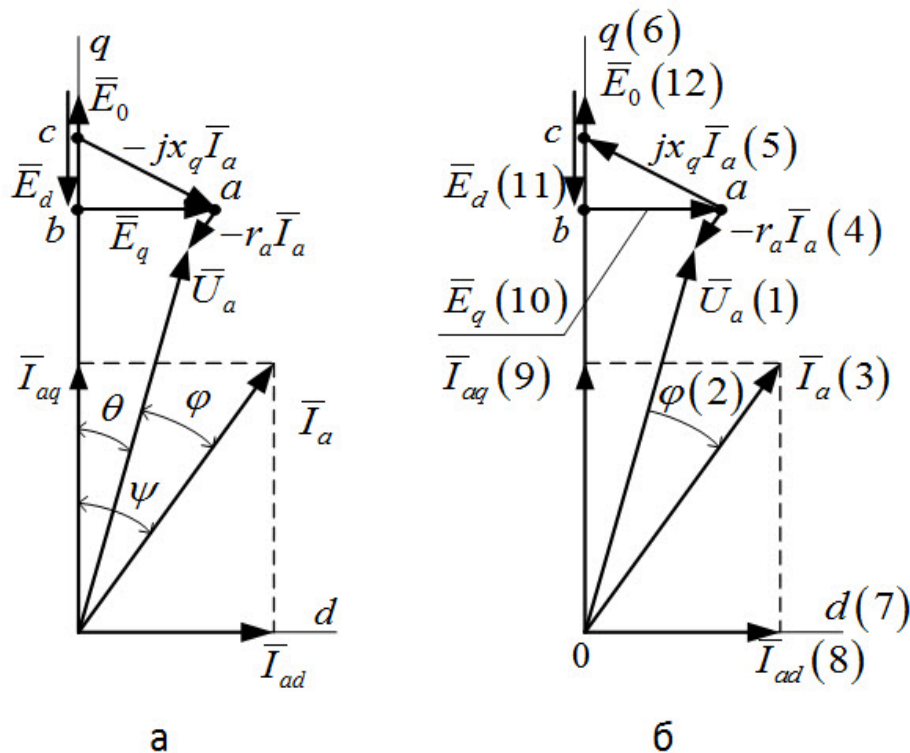


Рис. 2.11. Практический метод построения упрощенной векторной диаграммы синхронного явнополюсного генератора

2.4. Характеристики синхронного генератора. Определение индуктивных сопротивлений синхронной машины

Работа синхронных машин оценивается по различным характеристикам, которые служат для определения параметров, необходимых для эксплуатации и при испытаниях. Характеристики получают экспериментальным или расчетным путем. Затем сравниваются с характеристиками заводов-изготовителей, результатами предыдущих испытаний, результатами испытаний машин той же серии [11].

Программа приемо-сдаточных испытаний синхронных машин предусматривает построение следующих характеристик [6].

2.4.1. Характеристика холостого хода представляет кривую намагничивания, являющуюся частью петли гистерезиса (рис. 2.12) и выражающую зависимость эдс E_0 от тока возбуждения I_B .

Характеристику $E_0 = f(I_B)$ получают при условиях $n_2 = \text{const} = n_H$ и $I_a = 0$. При проведении испытаний машин обычно снимают нисходящую ветвь петли гистерезиса. Для этого вращающийся генератор возбуждают, доводя эдс холостого хода до значения $E_0 = 1,2 - 1,3 U_{aH}$, а затем снижают ток возбуждения I_B до нуля. Явление гистерезиса приводит к тому, что характеристика обычно не проходит через начало координат, при условии $I_B = 0$. Чтобы полученную характеристику совместить с началом координат необходимо сместить ее по оси I_B [24]. Характеристику холостого хода принято строить в относительных величинах эдс E_O^* и тока возбуждения I_B^* .

В результате получается зависимость $E_0^* = f(I_0^*)$. Здесь $E_0^* = \frac{E_0}{U_{aH}}$, а

$I_B^* = \frac{I_B}{I_{B0H}}$. В качестве базовых величин при определении значений E_0^* и I_B^*

принимают номинальное значение напряжения на выходе генератора U_{aH} и ток возбуждения I_{B0H} , который соответствует эдс холостого хода E_0 , равной номинальному напряжению генератора U_{aH} . Экспериментальная характеристика сравнивается с нормальной характеристикой холостого хода, которая получена в результате статистических исследований различных серий синхронных машин средней и большой мощности [2]. Характеристика холостого хода используется для выявления дефектов в обмотках и магнитной системы синхронной машины, определения степени ее насыщения, эксплуатационных параметров.

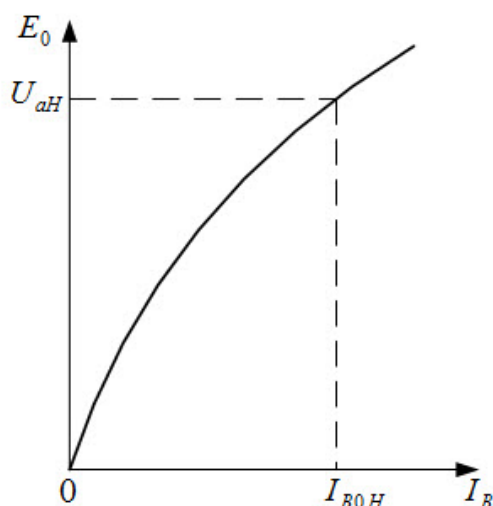


Рис. 2.12. Характеристика холостого хода синхронного генератора

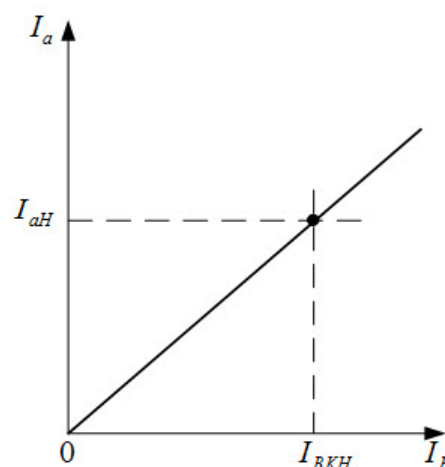


Рис. 2.13. Характеристика короткого замыкания синхронного генератора

2.4.2. Характеристика короткого замыкания $I_a = f(I_B)$ строится при условиях $n_2 = const = n_H$ и $U_a = 0$. Программой испытания синхронных машин предусматривается испытательное симметричное короткое замыкание выводов обмотки якоря. Для получения характеристики вращающуюся машину возбуждают, доводя ток в короткозамкнутой обмотке статора до значения $1,2I_{aH}$, а затем снижают ток возбуждения I_B до нуля. Магнитная цепь ненасыщенна, характеристика получается практически линейной (рис. 2.13). Характеристика короткого замыкания не проходит через начало координат вследствие

остаточного намагничивания стали магнитопровода машины при $I_B = 0$. Чтобы полученную характеристику совместить с началом координат, необходимо сместить ее по оси I_B [24].

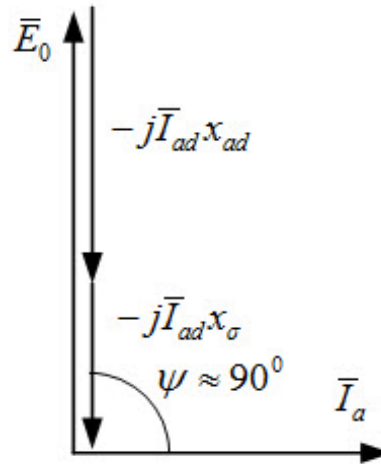


Рис. 2.14. Векторная диаграмма явнополюсного синхронного генератора при коротком замыкании

В синхронных машинах большой мощности можно пренебречь активным сопротивлением обмотки якоря и считать полное сопротивление обмотки чисто индуктивным, реакцию якоря – продольно размагничивающей. При условиях $r_a \approx 0$ и $U_a = 0$ уравнения для неявнополюсного и явнополюсного генераторов, соответственно (2.10) и (2.11), примут вид:

$$\bar{E}_0 = j\bar{I}_a x_a + j\bar{I}_a x_\sigma = j\bar{I}_a x_c; \quad (2.15)$$

$$\bar{E}_0 = j\bar{I}_{ad} x_{ad} + j\bar{I}_{ad} x_\sigma = j\bar{I}_{ad} x_d = j\bar{I}_a x_d. \quad (2.16)$$

Векторная диаграмма явнополюсного синхронного генератора в режиме короткого замыкания представлена на рис. 2.14. Характеристика короткого замыкания вместе с характеристикой холостого хода используется для определения параметров синхронной машины, необходимых для эксплуатации [1].

2.4.3. Внешняя характеристика $U_a = f(I_a)$ снимается при условиях $n_2 = const = n_H$, $I_B = const$ и $\cos\varphi = const$ (характер нагрузки постоянный). Вид характеристик, представленных на рис. 2.7, определяется нагрузкой и действием реакции якоря. Изображенные характеристики получены при нагружении синхронного генератора номинальным током I_{aH} при напряжении U_{aH} и его последующей постепенной разгрузке до работы вхолостую. В случае активной и индуктивной нагрузке реакция якоря размагничивает синхронную машину с ростом тока I_a . Когда нагрузка емкостная, происходит насыщение магнитной цепи. Переход от режима холостого хода к режиму номинальной нагрузки и наоборот определяется изменением напряжения ΔU или $\Delta u_{\%}$. На рис. 2.15 для активной нагрузки величина $\Delta u_{\%}$ рассчитывается из выражения:

$$\Delta u_{\%} = \frac{E_0 - U_{aH}}{U_{aH}} \cdot 100\%. \quad (2.17)$$

Обычно $\Delta u_{\%} = 25 - 35\%$. Чтобы подключенные к генератору потребители работали при напряжении близком к номинальному, применяются специальные устройства по его стабилизации. Желательно, чтобы генераторы обладали небольшой величиной $\Delta u_{\%}$. Однако для этого надо иметь пониженное синхронное индуктивное сопротивление x_c в неявнополюсных машинах или, соответственно, x_d и x_q в явнополюсных машинах. Для этого требуется увеличивать воздушный зазор между ротором и статором, что приводит к увеличению магнитодвижущей силы обмотки возбуждения, однако при этом возрастают её габаритные размеры. При этом машина становится более дорогой. В крупных турбогенераторах мощность ограничивается размерами ротора, на котором размещена обмотка возбуждения. Повышение мощности ведет к увеличению $\Delta u_{\%}$. В гидро-

генераторах из-за повышенного размера воздушного зазора значение $\Delta u_{\%}$ меньше [2].

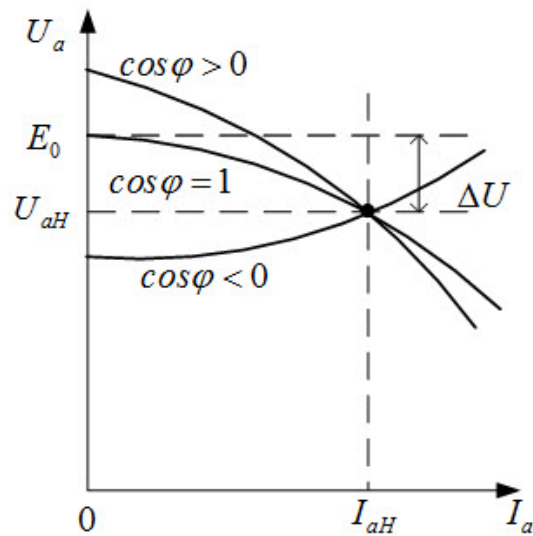


Рис. 2.15. Внешняя характеристика синхронного генератора при различных видах нагрузки

2.4.4. Регулировочная характеристика $I_B = f(I_a)$ показывает, как надо менять ток возбуждения генератора I_B , чтобы при изменении тока нагрузки I_a поддерживать его напряжение U_a на неизменном уровне.

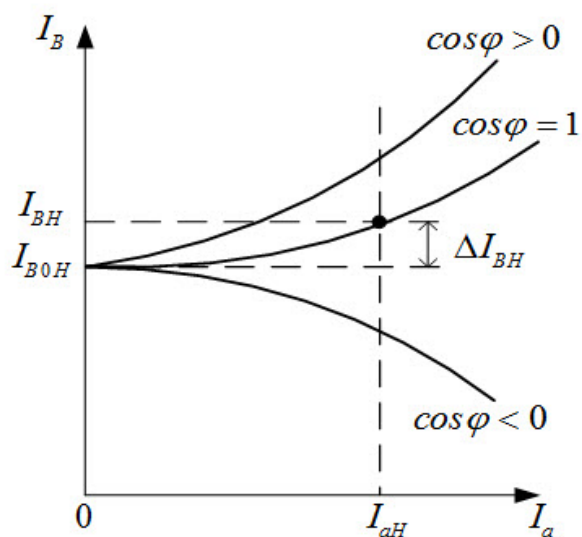


Рис. 2.16. Регулировочная характеристика синхронного генератора при различных видах нагрузки

Строится характеристика при условиях $n_2 = const = n_H$, $U_a = const = U_{aH}$, $\cos\varphi = const$. Их вид (рис. 2.16) определяется характером нагрузки и действием реакции якоря. При активной и индуктивной нагрузке для компенсации размагничивающего действия реакции якоря требуется увеличивать ток возбуждения. Емкостная нагрузка, наоборот, требует снижения тока возбуждения для предотвращения насыщения магнитной цепи машины. В результате ухудшаются условия регулирования и возрастают потери. Характеристики рис. 2.16 получены путем постепенного увеличения тока нагрузки I_a генератора до значения $1,2I_{aH}$ и при регулировании тока возбуждения I_B при неизменном напряжении на выходе. Переход от режима холостого хода к режиму номинальной нагрузки характеризуется изменением тока возбуждения:

$$\Delta i_{B\%} = \frac{I_{BH} - I_{B0H}}{I_{B0H}} \cdot 100\%, \quad (2.18)$$

где I_{BH} и I_{B0H} , – соответственно, токи возбуждения генератора в режиме его номинальной нагрузки и в режиме холостого хода при U_{aH} .

Построение регулировочной характеристики входит в программу испытаний синхронных машин. Это связано с определением диапазона регулирования тока возбуждения при заданном характере изменения нагрузки и с учетом нелинейности параметров машины [1].

2.4.5. Определение индуктивных сопротивлений синхронной машины

2.4.5.1. Определение индуктивных сопротивлений x_d и x_q . Опытные характеристики (рис. 2.17, а) холостого хода 1 и короткого замыкания 2 позволяют определить значения синхронных индуктивных сопротивлений обмотки якоря по

осям d и q . Обычно находят ненасыщенное значение $x_{d\infty}$, которое является определенным для каждой машины в отличие от насыщенного значения сопротивления x_d . Величина $x_{d\infty} = const$ на линейном участке характеристики холостого хода, а также на спрямленной характеристике холостого хода 3, соответствующей ненасыщенной машине. Учет насыщения при необходимости производится путем непосредственного определения эдс по характеристике холостого хода. Для тока возбуждения, соответствующего отрезку $0A$ на характеристике 1, находится $E_\infty = AA''$, а по характеристике 2 – ток I . Значение $x_{d\infty}$, в соответствии с (2.8), равно

$$x_{d\infty} = \frac{E_\infty}{I}. \quad (2.19)$$

В случае подстановки в (2.19) значения $E = AA'$ для той же величины тока возбуждения I_B определяется

$$x_d = \frac{E}{I} = \frac{E_\infty}{k_\mu I} = \frac{x_{d\infty}}{k_\mu}, \quad (2.20)$$

где k_μ – коэффициент насыщения.

Кривая 4 отображает зависимость x_d от насыщения магнитной цепи. Коэффициент насыщения составляет для турбогенераторов $k_\mu=1,2$, а для гидрогенераторов $k_\mu=1,06$. Величина индуктивного сопротивления x_q определяется с помощью коэффициентов приведения магнитной цепи или экспериментально при двигательном режиме синхронной машины. Для неявнополюсных генераторов можно воспользоваться (2.7) в определении индуктивного сопротивления, поскольку $x_d = x_q = x_c$. Данный способ наиболее часто применим в случае этого типа синхронных машин [1].

В практических расчетах используются относительные значения сопротивлений x_d^* и x_q^* . За базовую величину принимается U_{aH} / I_{aH} . Когда используются синхронные явнополюсные машины средней и большой мощности, $x_d^* = 0,6 - 1,6$, а $x_q^* = 0,4 - 1,0$. Для неявнополюсных машин $x_c^* = 0,9 - 2,4$. Указанные параметры показывают относительную величину падения напряжения при номинальном токе и позволяют сравнивать свойства генераторов различной мощности [2].

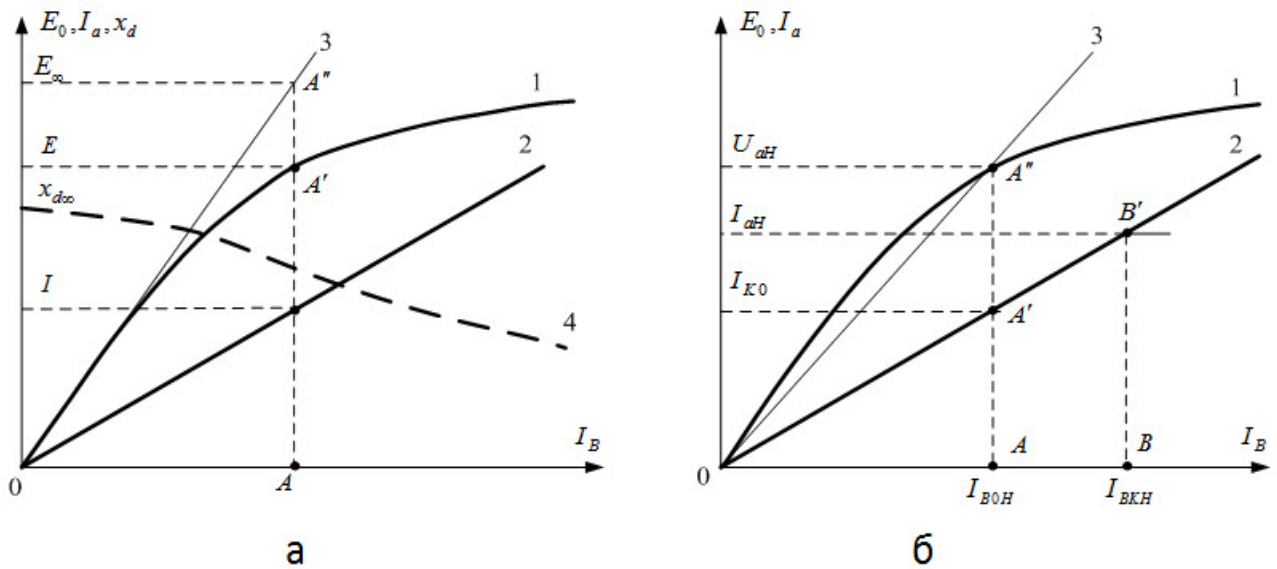


Рис. 2.17. Характеристики холостого хода и короткого замыкания: а - определение индуктивного сопротивления $x_{d\infty}$; б - определение отношения короткого замыкания

2.4.5.2. Определение отношения короткого замыкания. Данная величина является важной характеристикой эксплуатации синхронных генераторов (рис. 2.17, б). Она приводится в их паспортных данных. Отношение короткого замыкания представляет отношение установившегося тока короткого замыкания I_{K0} к номинальному току I_{aH} :

$$k_{OK3} = \frac{I_{K0}}{I_{aH}} = \frac{U_{aH}}{x_d} \cdot \frac{1}{I_{aH}} = \frac{1}{x_d^*}. \quad (2.21)$$

Для большинства синхронных машин характерно $x_d^* > 1$. При этом $k_{OKЗ} < 1$, т.е. ток короткого замыкания меньше номинального значения, что можно объяснить размагничивающим действием реакции якоря. В результате выражение (2.21) можно представить в виде:

$$k_{OKЗ} = \frac{I_{B0H}}{I_{BKH}}. \quad (2.22)$$

Величина $k_{OKЗ}$ определяет предельное значение нагрузки, которую способен нести генератор в установившемся режиме работы. Чем больше $k_{OKЗ}$, тем больше предельная нагрузка. Сопротивление x_d обратно пропорционально величине воздушного зазора δ между статором и ротором ($x_d = 1/\delta$). Таким образом, отношение короткого замыкания тем больше, чем больше зазор δ . Синхронные явнополюсные машины имеют сравнительно небольшое падение напряжения на внутреннем сопротивлении и меньшее изменение напряжения при колебаниях нагрузки. Это способствует более устойчивой их работе параллельно с сетью. Однако такие машины имеют значительные габариты и стоимость. Величина $k_{OKЗ}$ у явнополюсных машин составляет 0,8-1,8. Для синхронных неявнополюсных машин $k_{OKЗ} = 0,4-1,0$. Их габариты и стоимость несколько меньше [1].

2.4.5.3. Определение расчетного индуктивного сопротивления рассеяния обмотки якоря x_p . Для установления x_p сначала находят индуктивное сопротивление x_σ , обусловленное потоком рассеивания. Снимают индукционную нагрузочную характеристику синхронного генератора $U_a = f(I_B)$ при условиях $n_2 = const = n_H$, $I_a = const$, $\cos\varphi = const$. Частным случаем нагрузочной характеристики, имеющей вспомогательный характер, является характеристика холостого хода. Обе характеристики выполняются в одной системе координат. Индукционная нагрузочная характеристика снимается при большем токе возбужде-

ния, часть которого идет на компенсацию размагничивающего действия реакции якоря.

Индуктивное сопротивление x_σ , обусловленное потоком рассеивания, определяется путем графических построений [2]. На нагрузочной характеристике произвольно выбирают точку c_1 и отмечают криволинейный угол $a_1b_1c_1$ со стороны b_1c_1 , параллельной оси абсцисс (рис. 2.18). Затем этот угол переносят параллельно самому себе так, чтобы точка c_1 , совпала с точкой c , соответствующей номинальному напряжению U_{aH} . В результате получен треугольник abc , у которого сторона bc равна отрезку b_1c_1 . Опустив из точки a перпендикуляр на линию bc , получают отрезок ad , представляющий в масштабе напряжения m_U величину $I_a x_\sigma$. Значение x_σ рассчитывается из выражения:

$$x_\sigma = \frac{ad \cdot m_U}{I_a}, \quad (2.23)$$

где I_a — ток нагрузки генератора, заданный предварительно.

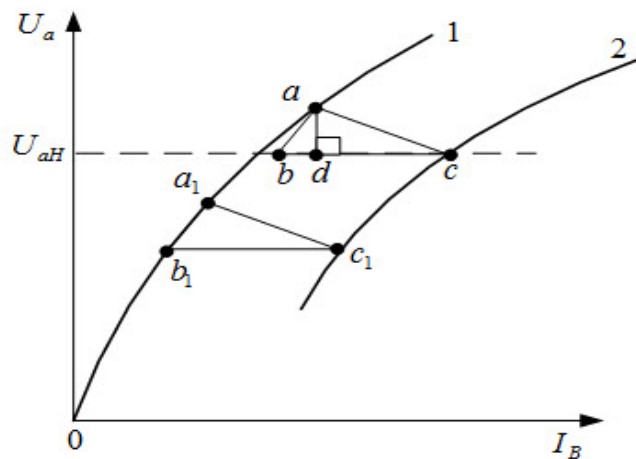


Рис. 2.18. Определение сопротивления x_σ : 1 — характеристика холостого хода; 2 — индукционная нагрузочная характеристика

Сопротивление x_p превышает сопротивление x_σ . Оно называется также индуктивным сопротивлением Потье. Неявнополюсные машины имеют $x_p \approx (1,05 - 1,10)x_\sigma$, у явнополюсных машин $x_p \approx (1,1 - 1,3)x_\sigma$. Сопротивление x_p используется при построении диаграммы Потье [1].

2.5. Построение диаграммы Потье

При эксплуатации синхронных генераторов требуется определить ток возбуждения, который необходим для обеспечения заданного режима работы с учетом насыщения магнитной цепи, а также изменение напряжение на выводах генератора при различных нагрузках. Диаграмма Потье строится преимущественно для неявнополюсных синхронных генераторов с использованием характеристик холостого хода и короткого замыкания (рис. 2.19). Сочетание этих характеристик позволяет определить размагничивающее действие реакции якоря (рис. 2.11, а).

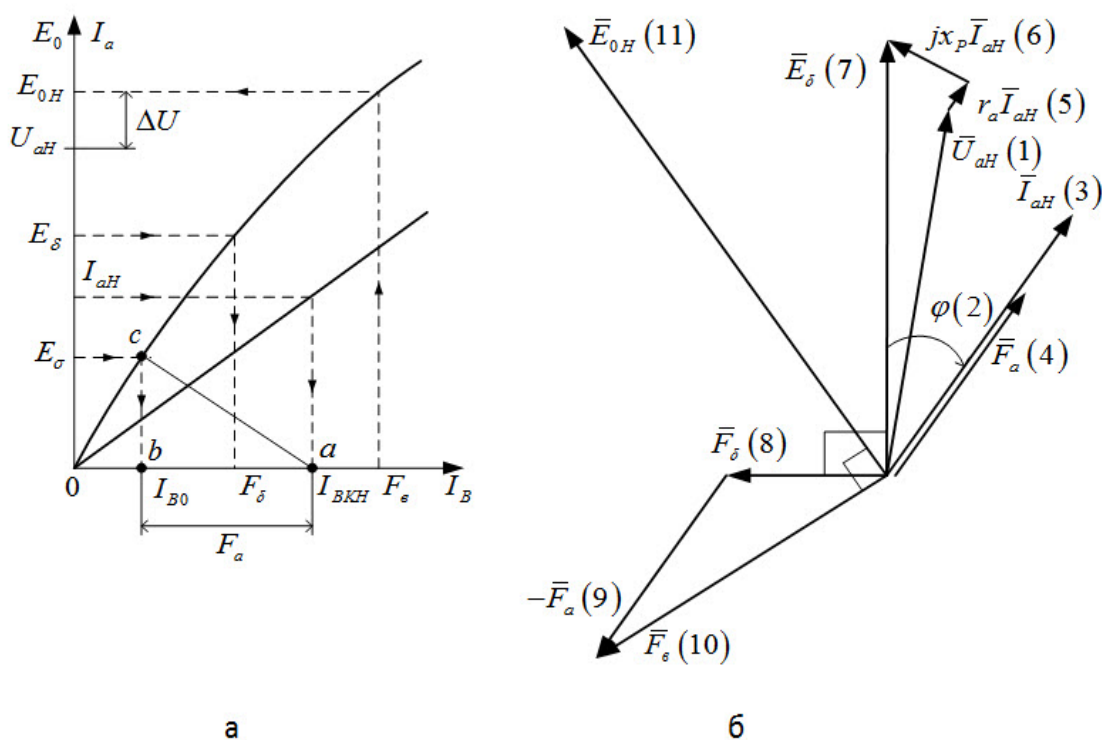


Рис. 2.19. Построение диаграммы Потье

В режиме короткого замыкания для создания номинального тока в обмотке якоря I_{aH} требуется ток возбуждения I_{BKH} (отрезок $0a$). Ток I_{BKH} соответствует эдс в режиме короткого замыкания $E_\sigma = x_\sigma I_{aH}$ (отрезок bc). Для создания такой же эдс на холостом ходу требуется ток возбуждения I_{B0} (отрезок $0b$). Отрезок ab в масштабе тока возбуждения характеризует размагничивающее действие продольной реакции якоря при условии $r_a \approx 0$. Треугольник abc называется треугольником Потье, а также реактивным или характеристическим треугольником [1].

Определение номинальных тока возбуждения и изменения напряжения входит в программу испытаний синхронной машины. Построение диаграммы Потье при работе генератора на активно-индуктивную нагрузку проводится при известных значениях U_{aH} , I_{aH} и $\cos\varphi$. Последовательность выполнения показана на рис. 2.19, б. Вектор \bar{U}_{aH} откладывается на плоскости произвольно, а вектор \bar{I}_{aH} – под углом φ . Затем к вектору \bar{U}_{aH} достраиваются падения напряжения $r_a \bar{I}_{aH}$, $jx_p \bar{I}_{aH}$ и устанавливают значение эдс \bar{E}_δ , соответствующая магнитодвижущей силе \bar{F}_δ в масштабе тока возбуждения (рис. 2.19, а). Вектор \bar{F}_δ опережает по фазе \bar{E}_δ на $\frac{\pi}{2}$. Для получения магнитодвижущей силы \bar{F}_e к вектору \bar{F}_δ следует достроить вектор $-\bar{F}_a$, находящийся в противофазе с вектором \bar{I}_{aH} . Он определяется из треугольника Потье.

$$\bar{F}_e = \bar{F}_\delta - \bar{F}_a. \quad (2.24)$$

Магнитодвижущей силе \bar{F}_e соответствует эдс холостого хода \bar{E}_{0H} (рис. 2.19, а), вектор которой отстает на диаграмме на угол $\pi/2$ от вектора \bar{F}_e . Величина \bar{F}_e характеризует ток возбуждения синхронного генератора, необходимый для обеспечения данного режима его нагрузки. Номинальное

изменение напряжения ΔU часто определяется в процентном отношении при известных значениях U_{aH} и E_{0H} по (2.9), где $E_0 = E_{0H}$ [1].

2.6. Мощность и электромагнитный момент синхронной машины

Выражения для мощности P и электромагнитного момента M синхронной машины, работающей параллельно с сетью бесконечной мощности, могут быть получены с помощью упрощенной векторной диаграммы явнополюсного генератора (рис. 2.20) при допущении $r_a \approx 0$.

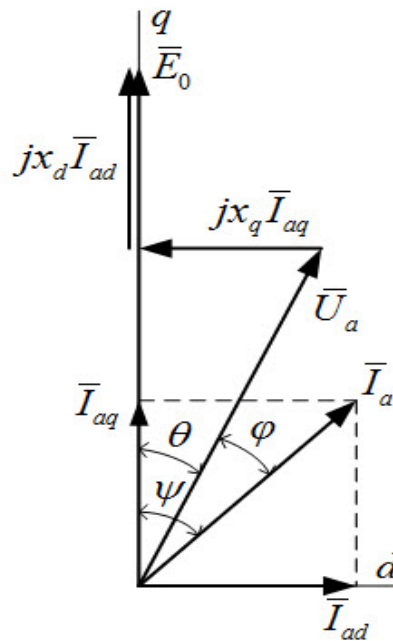


Рис. 2.20. Упрощенная векторная диаграмма явнополюсного синхронного генератора

Активная мощность, вырабатываемая генератором [8]

$$P = m U_a I_a \cos \varphi = m U_a I_a \cos (\psi - \theta). \quad (2.25)$$

Преобразовав тригонометрическое выражение

$$\cos (\psi - \theta) = \sin \psi \sin \theta + \cos \psi \cos \theta, \quad (2.26)$$

получим

$$\begin{aligned}
P &= mU_a I_a (\sin\psi \sin\theta + \cos\psi \cos\theta) = \\
&= mU_a I_{ad} \sin\theta + mU_a I_{aq} \cos\theta.
\end{aligned} \tag{2.27}$$

Из векторной диаграммы рис. 2.20 следует:

$$I_{ad} = \frac{E_0 - U_a \cos\theta}{x_d}; \quad I_{aq} = \frac{U_a \sin\theta}{x_q}. \tag{2.28}$$

Выражение (2.19) с учетом (2.20) запишется в виде:

$$P = \frac{mU_a E_0}{x_d} \sin\theta - \frac{mU_a^2}{x_d} \sin\theta \cos\theta + \frac{mU_a^2}{x_q} \sin\theta \cos\theta, \tag{2.29}$$

где $\sin\theta \cos\theta = \frac{1}{2} \sin 2\theta$.

Окончательно получим

$$P = \frac{mU_a E_0}{x_d} \sin\theta - \frac{mU_a^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta. \tag{2.30}$$

Выражение (2.30) показывает зависимость активной мощности P синхронной машины при параллельной работе с сетью бесконечной мощности и неизменном токе возбуждения ($E_0 = \text{const}$) от угла нагрузки θ в явнополюсной синхронной машине. Для машин с неявнополюсным ротором $x_d = x_q = x_c$, поэтому (2.30) принимает вид:

$$P = \frac{mU_a E_0}{x_c} \sin\theta. \tag{2.31}$$

Машины средней и большой мощности характеризуются малыми потерями мощности по сравнению с мощностью P , отдаваемой в сеть при генераторном режиме и потребляемой из сети в двигательном режиме. Пренебрегая потерями можно считать, что электромагнитная мощность машины $P_{\text{ЭМ}}$

и мощность P равны. Электромагнитный момент M пропорционален мощности $P_{\text{эм}} = P$, поэтому для неявнополюсной и явнополюсной синхронных машин, соответственно, имеют место выражения:

$$M = \frac{P}{\omega_1} = \frac{mU_a E_0}{x_c \omega_1} \sin \theta; \quad (2.32)$$

$$M = \frac{P}{\omega_1} = \frac{mU_a E_0}{x_d \omega_1} \sin \theta - \frac{mU_a^2}{2\omega_1} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta = M_{\text{осн}} + M_p, \quad (2.33)$$

где $M_{\text{осн}}$ – основная составляющая момента, зависящая от напряжения сети и возбуждения синхронной машины; M_p – реактивная составляющая момента, которая присутствует даже в невозбужденной машине ($E_0 = 0$) [16].

Зависимости $P = f(\theta)$ и $M = f(\theta)$, полученные при условиях $U_a = \text{const}$ и $E_0 = \text{const}$, называются угловыми характеристиками синхронной машины. На рис. 2.21 представлены графики зависимостей электромагнитного момента и его составляющих от нагрузки: 1 – график основной составляющей $M_{\text{осн}} = f(\theta)$, который является также графиком момента неявнополюсной машины; 2 – график реактивной составляющей $M_p = f(\theta)$; 3 – график результирующего момента явнополюсной машины.

Зависимости мощности машины от нагрузки в другом масштабе имеют аналогичный вид. Физически полученная форма кривой $M = f(\theta)$ обусловлена тем, что потоки $\bar{\Phi}_\epsilon$ и $\bar{\Phi}_\Sigma$ сдвинуты между собой на угол θ . При холостом ходе $\theta = 0$, между ротором и статором существуют только силы притяжения, действующие радиально (рис. 2.22, а), и момент машины равен нулю. В генераторном режиме (рис. 2.22, б) ток в проводниках обмотки статора взаимодействует с магнитным потоком ротора, в результате чего на каждый проводник обмотки статора и полюса ротора действуют электромагнитные

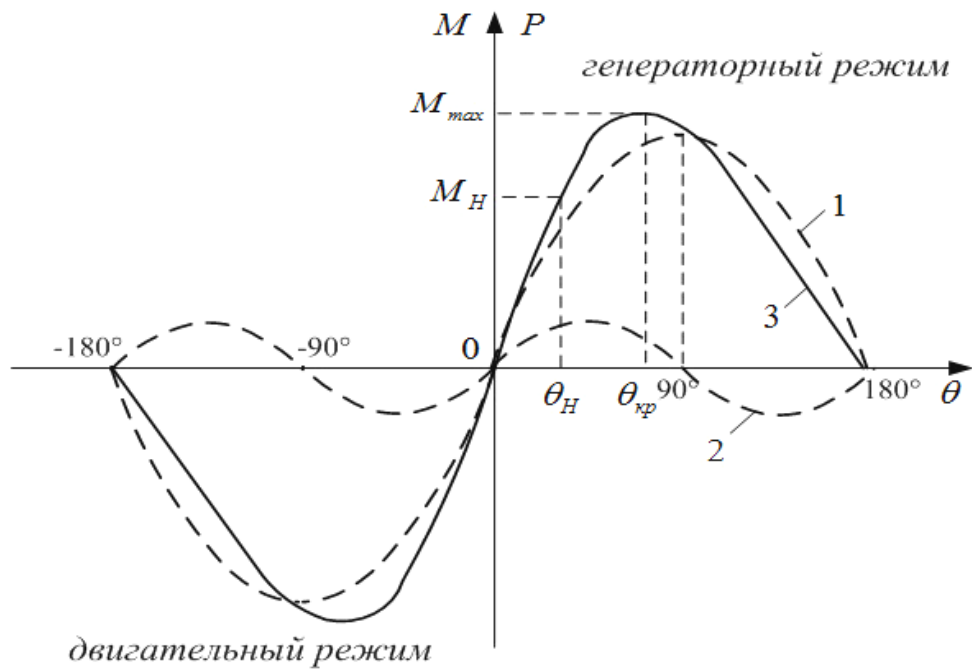


Рис. 2.21. Угловые характеристики синхронной машины

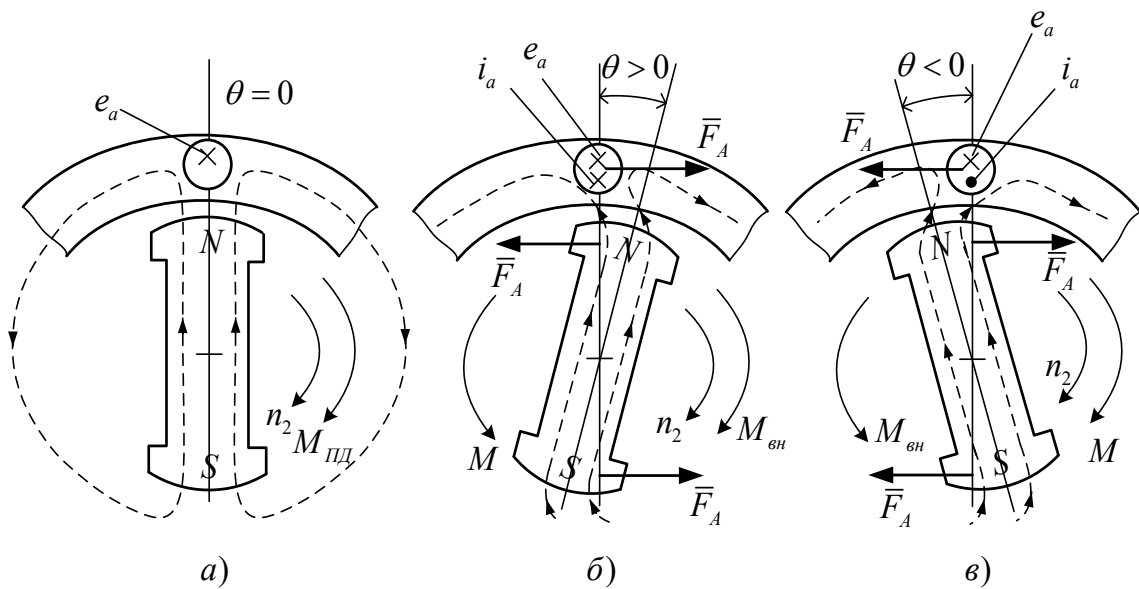


Рис. 2.22. Действие магнитного поля в синхронной машине

силы (силы Ампера) \bar{F}_A , одинаковые по величине и противоположные по направлению. Электромагнитные силы между статором и ротором образуют тангенциальные составляющие, создающие электромагнитный момент M ,

направленный против приложенного извне момента $M_{вн}$, приводящего ротор во вращение. Генератор с возникновением под действием эдс e_a тока в якоре i_a получает электрическую нагрузку, а приводной агрегат – механическую. Ось потока возбуждения $\bar{\Phi}_\epsilon$ под действием вращающего момента $M_{вн}$ опережает ось суммарного потока $\bar{\Phi}_\Sigma$ на угол θ ($\theta > 0$). В двигательном режиме $\theta < 0$, ось потока возбуждения $\bar{\Phi}_\epsilon$ под действием тормозного момента нагрузки $M_{вн}$ отстает от оси суммарного потока $\bar{\Phi}_\Sigma$ (рис. 2.14, в), вследствие чего тангенциальные составляющие электромагнитных сил, возникающих между ротором и статором, создают электромагнитный вращающий момент M [34].

2.7. Статическая устойчивость и перегрузочная способность синхронной машины

Угловая характеристика синхронной машины необходима для оценки статической устойчивости и перегрузочной способности. Под статической устойчивостью синхронной машины, работающей параллельно с сетью, понимают ее способность восстанавливать прежний режим работы ($n_2 = n_1$) после окончания действия внешних возмущений (изменения напряжения сети, мощности приводного двигателя, тока возбуждения и т.д.). Статическая устойчивость обеспечивается только при углах θ , соответствующих $M < M_{max}$ [16].

На рис. 2.23 приведены угловые характеристики неявнополусной машины в режиме генератора. Мощность $P_{пд}$ и момент $M_{пд}$ приводного двигателя от угла нагрузки θ не зависят (рис. 2.23, а). Вращающий момент приводного двигателя $M_{пд}$ и тормозной момент генератора M уравновешены в точках 1 и 2, однако работа агрегатов в этих точках неодинакова. В результате случайного приращения угла нагрузки $\Delta\theta$ в точке 1 электрическая мощ-

ность генератора P превысит мощность приводного двигателя $P_{\text{пд}}$ на величину ΔP . На валу генератора будет действовать тормозной момент $\Delta M = \Delta P / \omega_1$, замедляющий вращение ротора генератора.

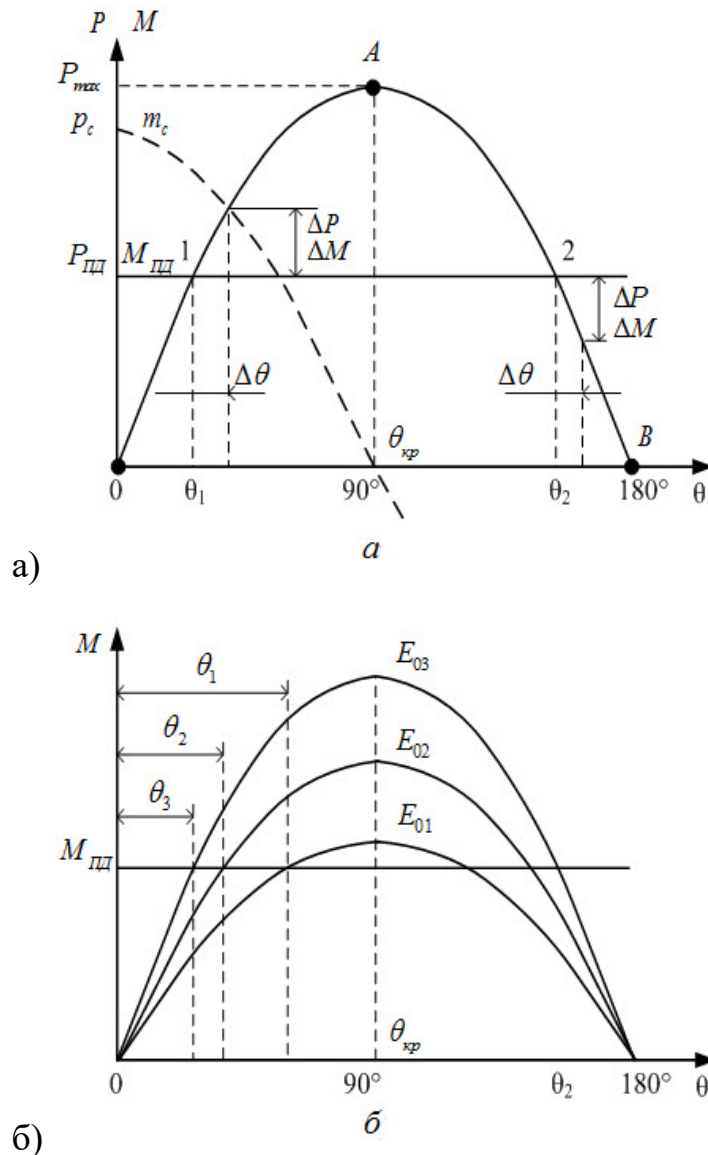


Рис. 2.23. К понятию статической устойчивости и перегрузочной способности синхронной машины

В результате случайного приращения угла нагрузки $\Delta\theta$ в точке 2 электрическая мощность генератора P будет меньше мощности приводного двигателя $P_{\text{пд}}$ на величину ΔP , в результате чего ротор получит ускорение, а угол θ возрастет еще больше, в результате чего происходит выпадение ге-

нератора из синхронизма с сетью. Выпадение из синхронизма является аварийным режимом, поскольку сопровождается прохождением по обмотке якоря больших токов. Это объясняется тем, что эдс генератора и напряжение сети при указанном режиме могут складываться по контуру «генератор – сеть», а не вычитаться, как при нормальной работе.

Величины ΔP и ΔM , возникающие при внешних возмущениях в области устойчивой работы машины, называются, соответственно, синхронизирующей мощностью и синхронизирующим моментом [2].

При снижении внешнего момента по какой-либо причине, то при работе машины в точке 2 угол θ уменьшается, электромагнитный момент возрастает, что приводит к дальнейшему уменьшению угла θ и переходу к работе в точке 1. Участок угловой характеристики OA определяет устойчивую область работы синхронного генератора ($0 < \theta < 90_{эл}^0$), а участок AB – неустойчивую область. Неявнополюсная машина имеет $\theta_{кр} = 90_{эл}^0$, у явнополюсной машины устойчивая область работы меньше, поскольку $\theta_{кр} = 60 - 80_{эл}^0$ в зависимости от отношения моментов $M_{осн}$ и M_p . Для расчета критического угла нагрузки явнополюсных синхронных машин используют выражения [16]:

$$\theta_{кр} = \arccos\left(\sqrt{\beta^2 + 0,5} - \beta\right); \quad \beta = \frac{E_0}{4U_a \left(\frac{x_d}{x_q} - 1\right)}. \quad (2.34)$$

Синхронная машина развивает максимальный момент M_{max} и максимальную мощность P_{max} при угле $\theta = \theta_{кр}$. Величина, выражающая запас по моменту (мощности) называется перегрузочной способностью синхронной машины и выражается коэффициентом:

$$k_m = \frac{M_{max}}{M_H} = \frac{P_{max}}{P_H}. \quad (2.35)$$

Для неявнополюсной машины

$$k_m = \frac{mU_a E_0}{x_c} \cdot \frac{x_c}{mU_a E_0 \sin \theta_H} = \frac{1}{\sin \theta_H} \approx 2, \quad (2.36)$$

где $\theta_H = 20 - 35^\circ_{эл}$ соответствует номинальному моменту M_H .

Явнополюсные синхронные машины обладают несколько большим значением коэффициента k_m по сравнению с (2.36). Повышения перегрузочной способности синхронной машины можно достичь снижением величин x_d или x_c , увеличивая воздушный зазор δ . Синхронные машины с большим значением k_{OK3} имеют завышенные габариты и массу, однако более устойчивы при параллельной работе с сетью [1].

Устойчивость синхронного генератора при заданном значении отдаваемой в сеть активной мощности P зависит от тока возбуждения. При увеличении тока возбуждения возрастает эдс E_0 , момент M_{max} , увеличивается устойчивость машины. На рис. 2.15, б показано, что при различных возмущениях перевозбужденная синхронная машина ($E_0 > U_a$) в большей степени способна сохранять устойчивый режим работы, чем недовозбужденная ($E_0 < U_a$) за счет увеличения перегрузочной способности. Электрическая сеть, на которую работают синхронные генераторы, является для них преимущественно активно-индуктивной нагрузкой. Синхронные генераторы должны работать с некоторым перевозбуждением, обеспечивающим повышение перегрузочной способности. При наличии в сети большого числа статических или вращающихся компенсаторов реактивной мощности генератор для поддержания стабильного напряжения в сети должен работать с недовозбуждением. Такой режим неблагоприятен для генератора, так как с уменьшением тока возбуждения при заданной активной мощности P возрастает угол θ и снижается перегрузочная способность, определяющая устойчивость машины [34].

Динамической устойчивостью синхронной машины называется ее способность сохранять синхронный режим работы с сетью при больших возмущениях, например, при коротких замыканиях. Динамическая устойчивость зависит от величины, длительности возмущения, параметров машины и т.д. Современные синхронные генераторы снабжены различными устройствами, обеспечивающими автоматическое регулирование тока возбуждения. Автоматические регулятор возбуждения реагируют не только на отклонение напряжения генератора по величине, но и на производную по времени dU_a / dt , а также на величину dI_a / dt , определяемую изменениями угла нагрузки $d\theta / dt$ (компаудированные системы возбуждения) [16]. Для удержания синхронной машины в синхронизме при снижении напряжения в сети, применяют автоматическую форсировку тока возбуждения, осуществляемую релейной защитой [12].

2.8. Синхронные двигатели. Векторные диаграммы синхронного двигателя

Синхронная машина, работающая параллельно с сетью, автоматически переходит в двигательный режим, если к валу ротора приложен тормозной момент. При этом машина начинает потреблять из сети активную мощность, приводящую к созданию электромагнитного вращающего момента. Частота вращения ротора n_2 остается неизменной и связана с частотой сети, т.е. синхронные двигатели в пределах допустимого значения нагрузочного момента на валу имеют абсолютно жесткую механическую характеристику. Это является важным эксплуатационным свойством синхронных двигателей. Синхронные двигатели по конструкции принципиально не отличаются от синхронных генераторов [2]. Выражения (2.9) - (2.14) позволяют построить векторные диаграммы синхронного двигателя. Вместо напряжения машины \bar{U}_a используется напряжение сети $-\bar{U}_c$. Пренебрежем активным сопротивлени-

ем обмотки якоря. Для неявнополюсной и явнополюсной машин в двигательном режиме:

$$-\bar{U}_c = \bar{E}_0 - j\bar{I}_a x_c; \quad (2.37)$$

$$-\bar{U}_c = \bar{E}_0 - j\bar{I}_{ad} x_d - j\bar{I}_{aq} x_q. \quad (2.38)$$

Упрощенные векторные диаграммы, построенные по (2.37) и (2.38), представлены на рис. 2.24. Для выяснения свойств синхронного двигателя следует рассмотреть его работу при изменении нагрузочного момента на валу M_c , а также при изменении его тока возбуждения.

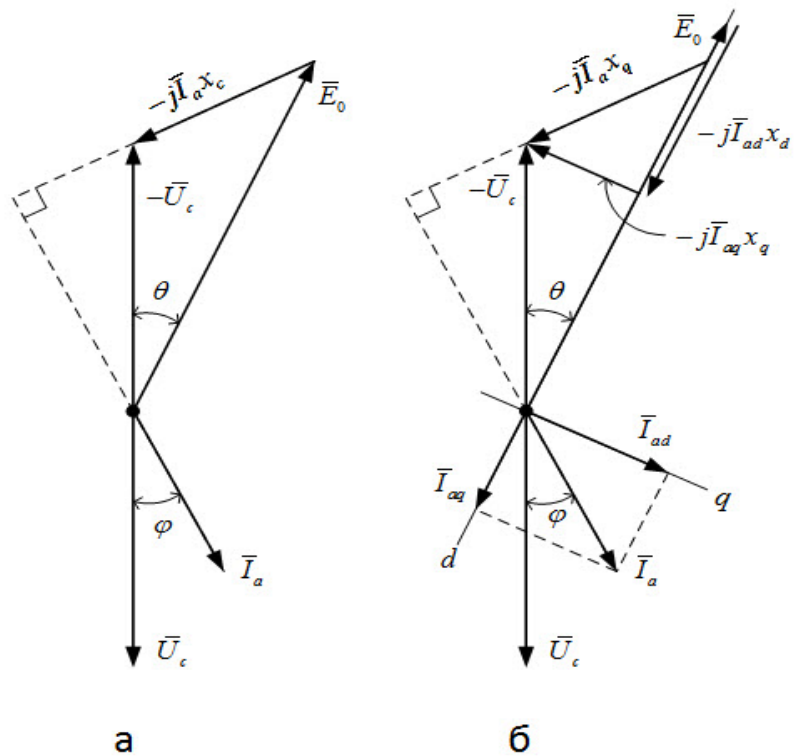


Рис. 2.24. Упрощенные векторные диаграммы синхронного двигателя:
а – построена по выражению (3.1); б – построена по выражению (3.2)

Рассмотрим работу синхронного двигателя при изменении нагрузочного момента M_c и постоянном токе возбуждения. Используем упрощенную векторную диаграмму неявнополюсной машины. Двигатель работает при $\cos\varphi = 1$. На

векторной диаграмме рис. 2.24,а данному режиму соответствует ток \bar{I}_{a1} и угол θ_1 . Повышение нагрузки приводит к росту угла между векторами \bar{E}_0 и $-\bar{U}_c$ до значения θ_2 . В установившемся режиме вращающий момент двигателя равен нагрузочному моменту $M = M_c$. Конец вектора \bar{E}_0 перемещается по окружности с радиусом, равным \bar{E}_0 . При условиях $I_g = const$, $E_0 = const$, $U_c = const$ вектор тока \bar{I}_{a2} также поворачивается вокруг точки O . При этом ток двигателя \bar{I}_{a2} имеет отстающую составляющую. Если нагрузка двигателя уменьшается по сравнению с исходной, то угол θ уменьшается до значения θ_3 . Ток двигателя \bar{I}_{a3} имеет опережающую реактивную составляющую [16].

Изменение активной мощности синхронного двигателя приводит к изменению его $\cos\varphi$. При уменьшении нагрузки вектор тока поворачивается в сторону опережения и двигатель может работать с $\cos\varphi = 1$ или с опережающим током. Увеличение нагрузки приводит к повороту вектора тока в сторону отставания.

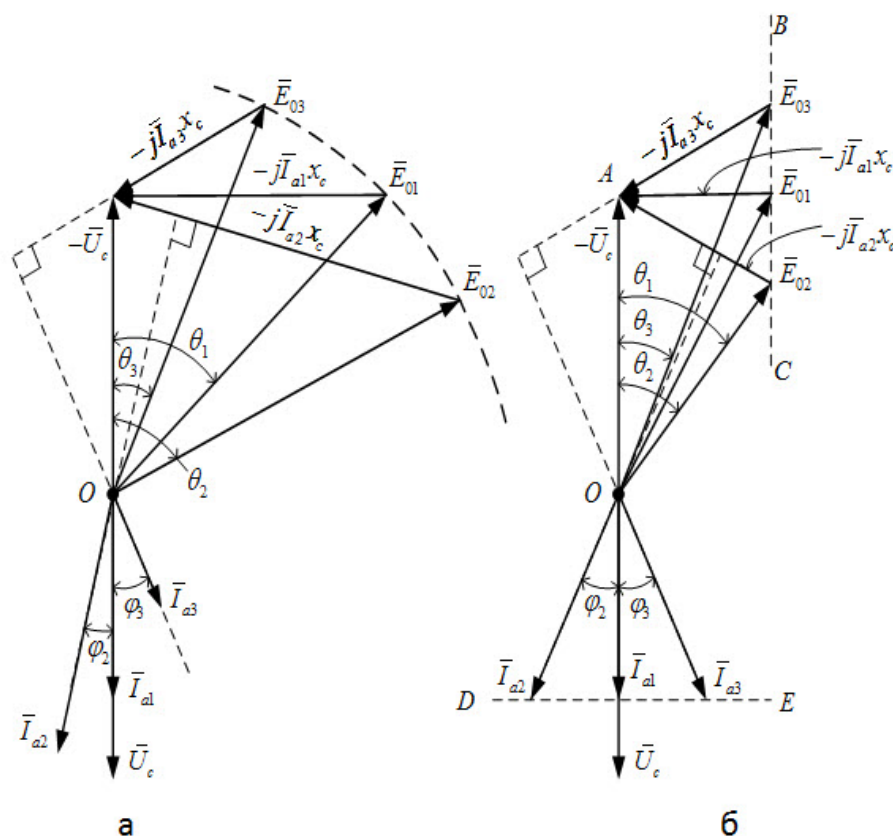


Рис. 2.52. Упрощенные векторные диаграммы синхронного неявнополусного двигателя при изменении: а - M_c ; б - тока возбуждения

Рассмотрим работу синхронного двигателя при изменении тока возбуждения и постоянном нагрузочном моменте M_c . Двигатель работает при $\cos\varphi = 1$. На векторной диаграмме рис. 2.25, б данному режиму соответствует ток \bar{E}_{01} и угол θ_1 . При уменьшении тока возбуждения эдс \bar{E}_0 снижается до \bar{E}_{02} , угол θ_2 возрастает. При постоянной активной мощности имеет место равенство $\bar{E}_{01}\sin\theta_1 = \bar{E}_{02}\sin\theta_2$. В результате конец вектора \bar{E}_0 при изменении тока возбуждения перемещается по прямой BC , которая параллельна \bar{U}_c и проходит через конец вектора \bar{E}_0 . При увеличении тока возбуждения эдс \bar{E}_0 возрастает до величины \bar{E}_{03} , угол $\theta_3 < \theta_1$. Вектор $-j\bar{I}_{a3}x_c$ поворачивается вокруг точки A . Изменяет направление вектор тока \bar{I}_{a3} . При постоянной активной мощности имеет место равенство $I_{a1}\cos\varphi_1 = I_{a2}\cos\varphi_2 = I_{a3}\cos\varphi_3$. В результате конец

вектора тока \bar{I}_a перемещается по прямой DE , которая перпендикулярна вектору \bar{U}_c [16].

Если при неизменной активной мощности изменять ток возбуждения, то будет изменяться только $\cos\varphi$, т.е. реактивная мощность.

Синхронный двигатель является генератором реактивного тока: в режиме недовозбуждения – индуктивного (ток \bar{I}_a отстает от напряжения сети \bar{U}_c , происходит потребление реактивной мощности из сети), в режиме перевозбуждения – емкостного (ток \bar{I}_a опережает напряжение сети \bar{U}_c , происходит отдача реактивной мощности в сеть).

Асинхронные двигатели являются основными электроприемниками. Они работают при $\cos\varphi < 1$ и создают в сетях наряду с трансформаторами значительные индуктивные токи. Если параллельно группе асинхронных двигателей подключить несколько перевозбужденных синхронных двигателей, то в сети возникает емкостная составляющая тока. Она частично или полностью компенсирует индуктивную составляющую тока. Электрическая система при этом разгружается от реактивных токов, величина тока в линии снижается, уменьшаются потери. Однако синхронный двигатель в режиме перевозбуждения потребляет значительный ток статора. В связи с этим двигатели, предназначенные для работы с перевозбуждением имеют завышенные габариты и меньший КПД, чем у двигателей, предназначенных для работы с $\cos\varphi = 1$ [16].

По своей конструкции синхронные двигатели практически не отличаются от синхронных генераторов. Они преимущественно выполняются явнополюсными и имеют меньший воздушный зазор, что способствует снижению пускового тока. Синхронные двигатели по сравнению с асинхронными имеют следующие преимущества:

- возможность работы с $\cos\varphi = 1$, в режиме потребления и отдачи реактивной мощности в сеть;

- меньшая чувствительность к изменениям напряжения в сети и лучшее сохранение перегрузочной способности (максимальный момент синхронного двигателя пропорционален напряжению в первой степени, а у асинхронного двигателя – квадрату напряжения);

- абсолютно жесткая механическая характеристика.

Недостатками синхронных двигателей являются:

- сложность конструкции;

- сравнительная сложность запуска;

- регулирование частоты вращения возможно только путем изменения частоты питающего напряжения.

Указанные недостатки синхронных двигателей делают их менее выгодными по сравнению с асинхронными двигателями при мощностях до 100 – 200 кВт. Однако при более высоких мощностях в некоторых электроприводах синхронные двигатели превосходят асинхронные двигатели по экономическим показателям [16].

2.9. Пуск синхронных двигателей. Рабочие характеристики

Пуск синхронного двигателя путем непосредственного включения в сеть невозможен. При подключении статора двигателя к цепи переменного тока, когда ротор неподвижен, а по обмотке возбуждения протекает постоянный ток, электромагнитный момент будет дважды изменять свое направление. Средний момент за период равняется нулю. Ротор, обладая значительной инерцией, не может разогнаться до синхронной частоты вращения в течение одного полупериода. Для пуска синхронного двигателя необходимо предварительно привести ротор во вращение с частотой, близкой к частоте вращения поля статора. В этих условиях поле статора медленно перемещается относительно полюсов вращающегося ротора, и при подключении обмотки возбуждения к источнику питания между магнитными системами ро-

тора и статора устанавливается магнитная связь. Она обеспечивает возникновение синхронного электромагнитного момента, под действием которого ротор начинает вращаться с синхронной частотой, т.е. втягивается в синхронизм [2].

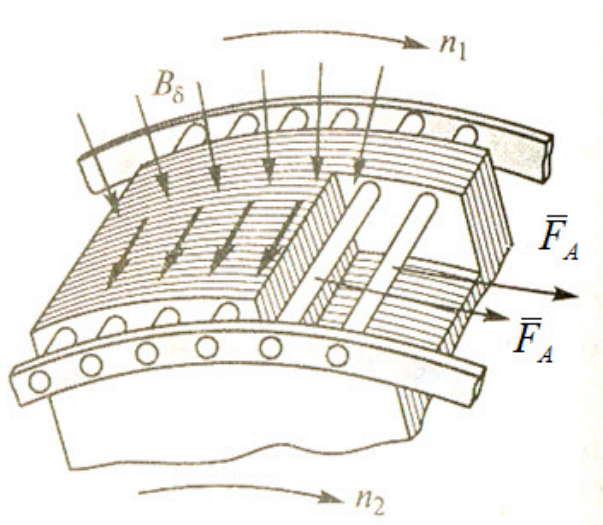


Рис. 2.26. Устройство пусковой обмотки синхронного двигателя

Пуск синхронных двигателей проводится преимущественно асинхронным способом. Для реализации данного способа в пазах полюсных наконечников ротора размещают короткозамкнутую пусковую обмотку, которая выполняется по типу «беличья клетка». Чтобы увеличить сопротивление стержней пусковая обмотка изготавливается из латуни или меди и замыкается с двух сторон медными кольцами (рис. 2.26). Обмотка возбуждения во избежание пробоя изоляции замыкается на время пуска на гасящий резистор, сопротивление которого превышает активное сопротивление обмотки возбуждения в 8–12 раз. Обмотка статора включается в трехфазную сеть. Вращающееся магнитное поле наводит в пусковой обмотке эдс. По стержням обмотки протекают токи. В результате взаимодействия этих токов с вращающимся магнитным полем статора на каждый стержень ротора действует электромагнитная сила \bar{F}_A . Совокупность таких сил создает на роторе асинхронный электромагнитный момент M_a . Под действием M_a ротор начинает вращаться в ту же сторону, что и поле статора. После разгона ротора до подсинхронной частоты вращения ($n_2 \approx 0,95n_1$) об-

мотку возбуждения подключают к источнику питания. При этом образуется синхронный момент и двигатель втягивается в синхронизм с сетью. В пусковой обмотке ротора больше не наводится эдс, асинхронный момент $M_a = 0$. Пусковая обмотка при синхронном вращении ротора выполняет роль демпферной (успокоительной) обмотки, ограничивая возможные колебания (качания) ротора. Колебания ротора вызваны изменением нагрузки на валу двигателя. Стержни демпферной обмотки синхронных двигателей выполняются большего сечения, чем у генераторов, поскольку при пуске она является пусковой обмоткой. На неявнополюсном роторе короткозамкнутая пусковая обмотка не может быть размещена. Ее роль играет обмотка возбуждения, замкнутая на гасящий резистор [16].

Величина сопротивления пусковой обмотки должна способствовать формированию требуемой пусковой характеристики синхронного двигателя с учетом нагрузки на его валу. Влияние на характеристику пускового момента тока, индуцируемого в обмотке возбуждения при пуске, называется одноосным эффектом.

Пусть пусковая обмотка отсутствует и обмотка возбуждения замкнута накоротко. При асинхронном пуске двигателя в обмотке возбуждения наводится эдс с частотой $f_2 = f_1 s$. По обмотке проходит переменный ток, создающий пульсирующее магнитное поле. Оно является суммой двух вращающихся в разные стороны полей ротора, прямого и обратного. Частота вращения каждого из этих полей относительно ротора равна

$$n_p = \pm \frac{60 f_2}{p} = \pm \frac{60 f_1 s}{p} = \pm n_1 s. \quad (2.39)$$

Относительно статора прямое поле вращается с частотой

$$n_{p,np} = n_2 + n_p = n_1 (1 - s) + n_1 s = n_1, \quad (2.40)$$

где n_2 – частота вращения ротора.

Относительно прямого поля синхронный двигатель ведет себя как обычный трехфазный асинхронный двигатель. Это поле и ток статора образуют основной асинхронный момент M'_a (рис. 2.27).

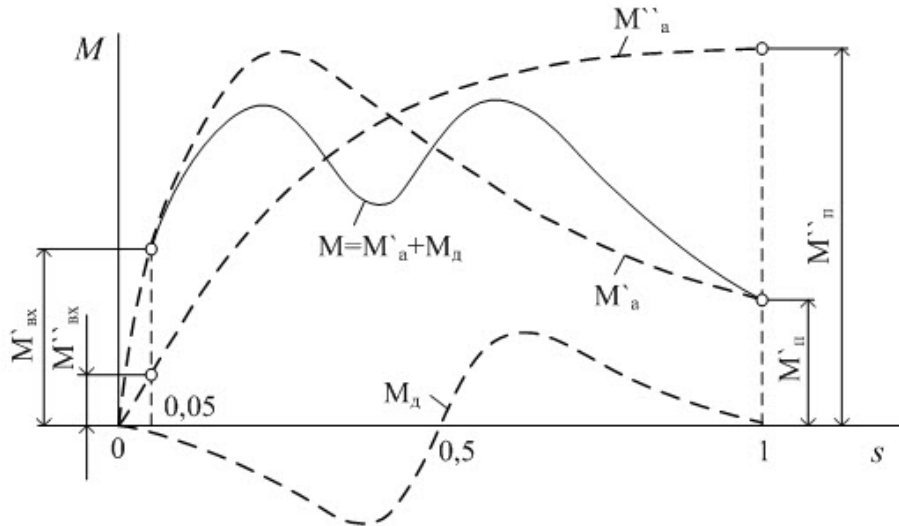


Рис. 2.27. Зависимость электромагнитного момента от скольжения при асинхронном пуске СД

Частота вращения обратного поля ротора относительно статора

$$n_{p.обр} = n_2 - n_p = n_1(1 - s) - n_1s = n_1(1 - 2s). \quad (2.41)$$

Относительно обратного поля синхронный двигатель ведет себя как обращенный асинхронный двигатель. В обмотке статора обратным полем индуцируется эдс с частотой $f_1(1 - 2s)$. Обмотка статора для этой эдс является короткозамкнутой. Возникающий в обмотке ток взаимодействует с обратным полем ротора и создает дополнительный асинхронный момент M_d (рис. 3.4). Наличие пусковой обмотки на роторе значительно уменьшает обратное магнитное поле и создаваемый им момент. Однако при $n_2 \approx 0,5n_1$ возникает характерный «провал» в кривой результирующего электромагнитного момента $M = M'_a + M_d$.

Этот «провал» тем больше, чем больше ток в обмотке возбуждения. Поэтому включение гасящего сопротивления в цепь обмотки возбуждения на период пуска уменьшает ток в этой обмотке и улучшает форму кривой пускового момента.

При запуске двигателя под нагрузкой может быть затруднено его вхождение в синхронизм или вхождение в синхронизм не происходит. Наибольший нагрузочный момент при котором ротор синхронного двигателя еще втягивается в синхронизм называется моментом входа двигателя в синхронизм M_{ex} . Величина асинхронного момента M_a при частоте вращения $n_2 \approx 0,95n_1$ зависит от активного сопротивления пусковой обмотки, т.е. от сечения стержней и удельного электрического сопротивления металла, из которого они изготовлены. Повышенное сопротивление пусковой обмотки приводит к образованию значительного пускового момента $M''_{\text{п}}$. Это приводит к уменьшению момента входа в синхронизм M''_{ex} . При сопротивлении пусковой обмотки, которое соответствует небольшому пусковому моменту $M'_{\text{п}}$, момент входа двигателя в синхронизм увеличивается M'_{ex} (рис. 3.4) [2].

При асинхронном пуске синхронного двигателя возникает большой пусковой ток. Прямой пуск применяется в мощных сетях, если это не вызовет значительных просадок напряжения. Если сеть не достаточно мощная, то применяются реакторный, трансформаторный (автотрансформаторный) способы пуска. В настоящее время применяется на производстве частотный пуск синхронных двигателей. Использование полупроводниковых преобразователей частоты позволяет регулировать частоту вращения ротора n_2 [2].

Рабочие характеристики синхронного двигателя показаны на рис. 2.28. Они являются зависимостями частоты вращения ротора n_2 , потребляемой мощности P_1 , полезного момента M , коэффициента мощности $\cos\varphi_1$ и тока в обмотке статора I_a от полезной мощности P_2 .

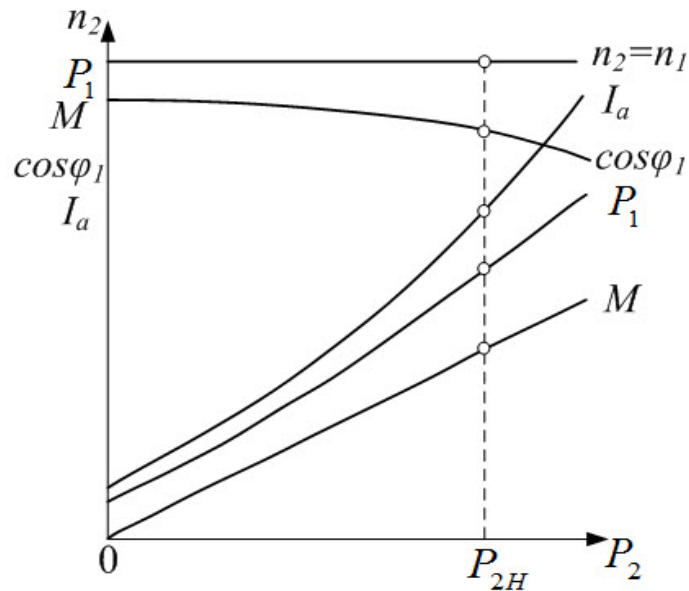


Рис. 2.28. Рабочие характеристики синхронного двигателя

Рабочие характеристики получаются при условиях $U_a = \text{const} = U_{aH}$, $f_1 = \text{const} = f_{1H}$ и $I_B = \text{const}$. Полезный момент на валу $M = \frac{P_2}{\omega_1}$ имеет линейную зависимость от мощности P_2 , так как $n_2 = n_1$. Потребляемая двигателем мощность P_1 с ростом мощности на валу P_2 также увеличивается, однако при этом из-за роста потерь P_1 растет быстрее P_2 . В результате зависимость $P_1 = f(P_2)$ нелинейная. Ток двигателя I_a при холостом ходе практически реактивный. По мере роста нагрузки возрастает активная составляющая тока I_a и его зависимость от мощности P_2 является нелинейной. Синхронные двигатели могут работать с $\cos\varphi_1 = 1$. Однако их рассчитывают на работу с опережающим током и $\cos\varphi_{1H} = 0,8 - 0,9$. При этом улучшается суммарный коэффициент мощности сети, поскольку компенсируется отстающая реактивная составляющая тока работающих в сети асинхронных двигателей, трансформаторов и др. [2].

2.10. Регулирование частоты вращения синхронных двигателей

Частота вращения синхронного двигателя n_2 равна частоте вращающегося магнитного поля $n_1 = 60 \cdot f_1 / p$. Регулирование величины n_2 путем изменения числа пар полюсов p нецелесообразно из-за усложнения схемы. Регулирование частоты питающего напряжения f_1 проводится по аналогии с регулированием частоты вращения ротора асинхронных двигателей. В синхронных электроприводах с большими моментами инерции применяется метод частотного регулирования с самосинхронизацией. При этом изменение величины f_1 происходит плавно и двигатель не выпадает из синхронизма.

Электромагнитный момент синхронного двигателя M прямо пропорционален току в статоре I_a и потоку возбуждения Φ_δ . При частотном регулировании обычно стремятся получить режим работы двигателя при $\cos\varphi_1 = 1$. В статорной обмотке ток поддерживается постоянным и минимальным

$$I_{a \min} = \frac{M}{\Phi_\delta}. \quad (2.42)$$

При изменении частоты f_1 изменяются эдс E_0 , угловая скорость ротора ω_1 и индуктивное сопротивление x_c (x_d и x_q при явнополюсном роторе). Можно считать, что

$$\frac{E_0}{E_{0H}} = \frac{x_c}{x_{cH}} = \frac{\omega_1}{\omega_{1H}} = \frac{f_1}{f_{1H}}. \quad (2.43)$$

При частотах питающего напряжения f_1 , отличных от номинальной f_{1H} , выражение (2.43) принимает вид

$$M = \frac{mU_1E_0}{x_{cH}\omega_1} \sin\theta = \frac{mU_1E_{0H}}{x_{cH}\omega_{1H}} \cdot \frac{f_{1H}}{f_1} \sin\theta = C \frac{U_1}{f_1} \sin\theta = \text{const}. \quad (2.44)$$

При неизменных значениях нагрузочного момента $M_H = M$ и $I_a = I_{a\min}$ должно выполняться условие $U_1 / f_1 = \text{const}$. На графиках рис. 2.29,а показано, что стороны треугольника OAB изменяются пропорционально частоте, а угол θ все остается неизменным. При изменениях нагрузки необходимо изменять ток возбуждения I_B .

Механические характеристики синхронного двигателя при частотном управлении показаны на рис. 2.30.

При частотном регулировании с самосинхронизацией управление преобразователем частоты осуществляется от системы датчиков положения ротора. Напряжение подается на каждую фазу двигателя при углах нагрузки $\theta < 90^\circ$. Такой способ регулирования автоматически обеспечивает условия устойчивой работы двигателя и его перегрузочную способность.

Синхронные двигатели, имеющие на валу датчик положения ротора, регулируемые путем изменения частоты с самосинхронизацией, называются вентильными двигателями. Режим работы вентильного двигателя зависит от силы тока возбуждения, соотношения U_1 / f_1 , моментов подачи напряжения на фазы двигателя и параметров преобразователя частоты.

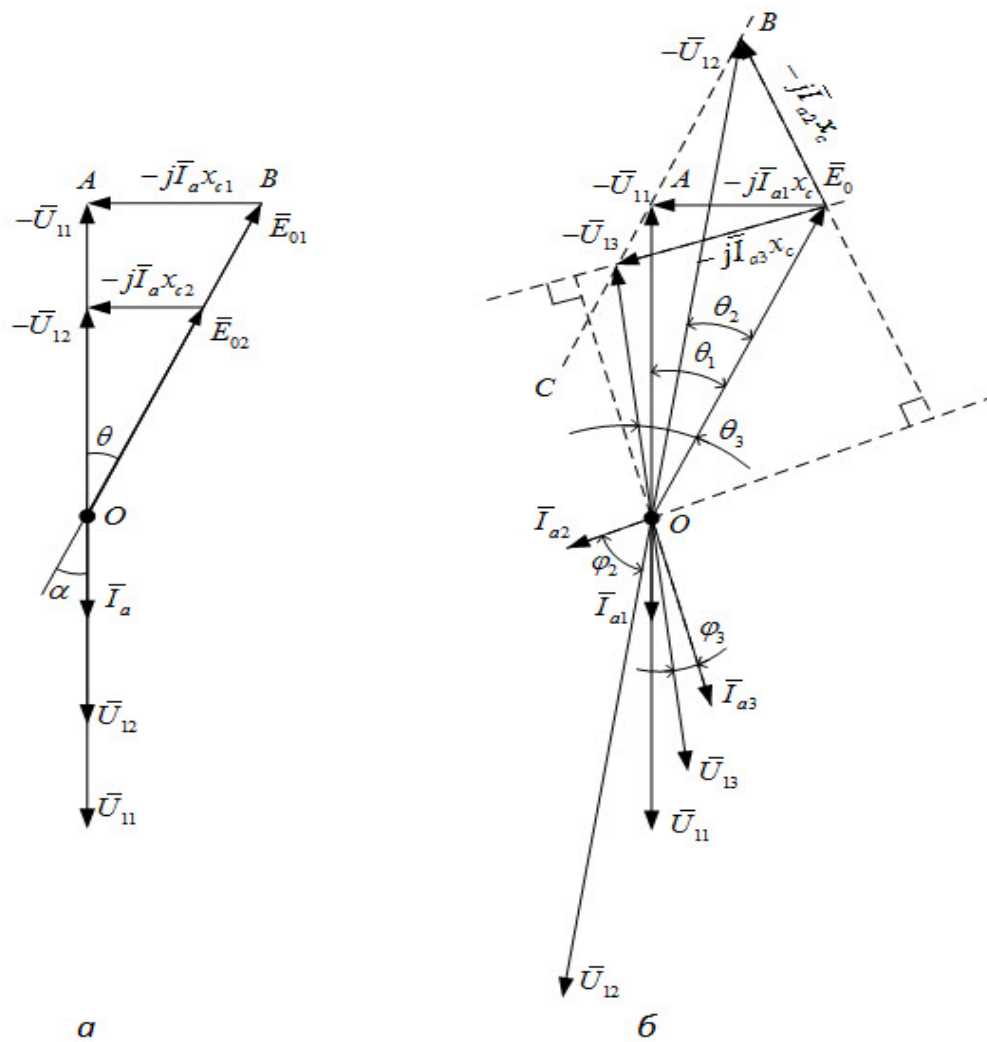


Рис. 2.29. Векторные диаграммы синхронного двигателя, питаемого от преобразователя частоты, при постоянном моменте: *a* – при постоянном угле θ и $\cos\varphi_1 = 1$; *б* – при изменении угла θ

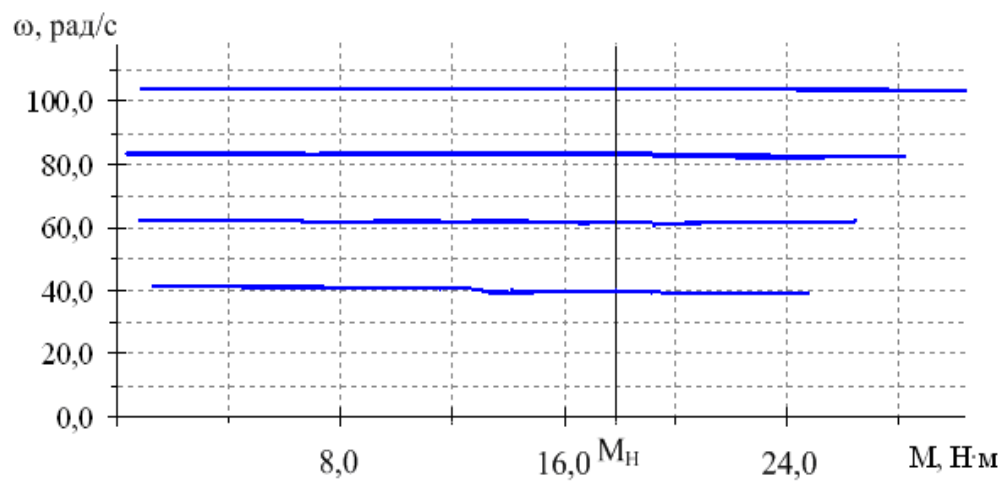


Рис. 2.30. Механические характеристики синхронного двигателя $P_H=3$ кВт
при частотном управлении

Угол регулирования α практически полностью определяет угол θ . Если считать, что $\alpha \approx \theta$, то при условиях $f_1 = \text{const}$ и $I_B = \text{const}$ выражение (3.8) принимает вид

$$M = \frac{mU_1 E_0}{x_{cH} \omega_1} \sin \theta = cU_1 \sin \theta = \text{const}. \quad (2.45)$$

При изменении угла регулирования $\alpha \approx \theta$ для выполнения условия $M = \text{const}$ нужно регулировать напряжение U_1 , подводимое к двигателю от преобразователя. На рис. 2.29, б показано несколько положений векторов \bar{U}_1 , \bar{I}_a и $-\bar{I}_a x_c$ при $E_0 = \text{const}$ и различных углах опережения α . Если $\alpha = \theta_1$, то ток \bar{I}_{a1} имеет минимальное значение и совпадает по фазе с напряжением \bar{U}_{11} . При уменьшении угла α до значения θ_2 подводимое к двигателю напряжение увеличивается до значения \bar{U}_{12} . Ток \bar{I}_{a2} будет отставать от напряжения \bar{U}_{12} на угол φ_2 . При увеличении угла α до значения θ_3 подводимое к двигателю напряжение уменьшается до значения \bar{U}_{13} . Ток \bar{I}_{a3} будет опережать напряжение \bar{U}_{13} на угол φ_3 . Величина $U_1 \sin \theta$ на векторной диаграмме выражается отрезком AB . При изменении угла α конец вектора напряжения $-\bar{U}_1$ перемещается по прямой BAC , которая проходит через точку A и параллельна вектору \bar{E}_0 . Ток якоря \bar{I}_a при таком регулировании может значительно увеличиться, а максимальный момент двигателя при отставшем токе \bar{I}_a – уменьшится. Пределы изменения угла опережения α необходимо определять при настройке преобразователя частоты, чтобы обеспечить надежность и требуемое качество работы электроприводов [2, 16].

2.11. Математическая модель явнополюсного синхронного двигателя с демпферной обмоткой

Описание электромагнитных и электромеханических процессов в трехфазном синхронном двигателе при различных способах управления наиболее полно и точно может быть выполнено в естественной системе координат АВС, оси которой сдвинуты друг относительно друга на 120^0 , что соответствует конструкции СД. При этом следует отметить, что математическое моделирование и аналитические расчеты в трехфазной системе координат очень сложны и трудоемки, особенно при построении систем автоматического регулирования СД. Поэтому более удобна математическая модель эквивалентного двухфазного явнополюсного синхронного двигателя с демпферной обмоткой в системе координат d-q, связанной с ротором и вращающейся вместе с ним [40], представленная на рис. 2.31.

Данная модель является частным случаем модели двухфазной машины двойного питания с гладким цилиндрическим ротором с учетом следующих принятых [8, 40] допущений:

- равномерный воздушный зазор;
- отсутствие потерь на гистерезис и вихревые токи;
- двухфазные обмотки статора симметричные и расположены под прямым электрическим углом на поверхности статора;
- двухфазные демпферные обмотки симметричные и расположены таким же образом на поверхности ротора;
- по обмоткам статора протекают синусоидальные токи;
- к обмотке возбуждения ротора прикладывается напряжение постоянного тока;
- фазные токи статора не содержат токов нулевой последовательности;
- магнитная система машины не насыщена.

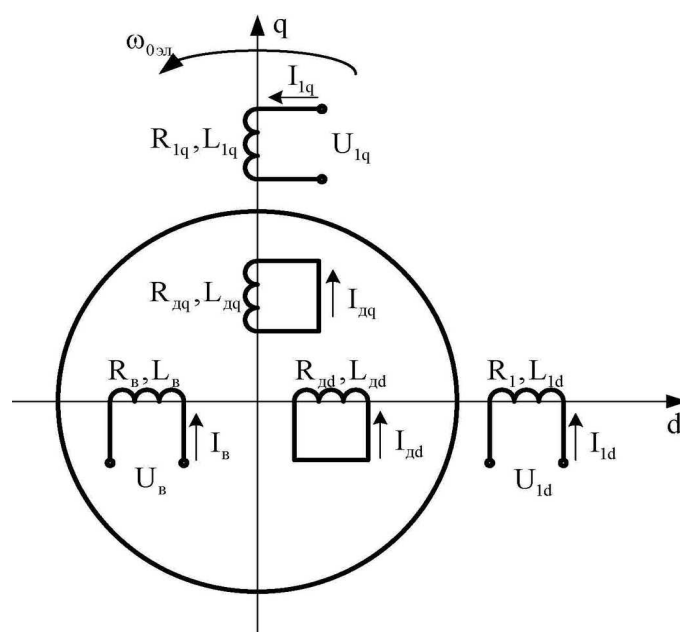


Рис. 2.31. Модель синхронного двигателя во вращающейся системе координат

В модели трехфазная обмотка статора заменена двумя неподвижными относительно вращающейся системы координат d-q обмотками, которые характеризуются активным сопротивлением R_1 и индуктивностями L_{1d} и L_{1q} . Оси этих обмоток направлены по осям координат d и q. К ним приложены напряжения постоянного тока по прямой и квадратурной осям U_{1d} и U_{1q} , в результате чего по обмоткам протекают токи I_{1d} и I_{1q} . К обмотке возбуждения с сопротивлением $R_в$ и индуктивностью $L_в$ приложено напряжение возбуждения $U_в$, ток в ней обозначен как $I_в$.

Помимо обмотки возбуждения на роторе располагается демпферная обмотка. Так как точный учет демпферных контуров довольно сложен, то, аналогично обмотке статора, ее можно представить в виде двух обмоток, оси которых направлены по осям d и q. Они характеризуются активными сопротивлениями $R_{дd}$, $R_{дq}$ и индуктивностями $L_{дd}$ и $L_{дq}$, а токи обозначены как $I_{дd}$ и $I_{дq}$. Из рис. 2.31 видно, что при принятом направлении осей координат потокосцепление статора по оси d определяется токами I_{1d} , $I_в$ и $I_{дd}$, а

по оси q – токами I_{1q} и I_{dq} . Математическая модель синхронного двигателя с демпферной обмоткой имеет вид [8, 39]:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{1d} = R_1 I_{1d} + p\Psi_{1d} - \omega_{0эл} \Psi_{1q}; \\ U_{1q} = R_1 I_{1q} + p\Psi_{1q} + \omega_{0эл} \Psi_{1d}; \\ U_B = R_B I_B + p\Psi_B; \\ 0 = R_{dd} I_{dd} + p\Psi_{dd}; \\ 0 = R_{dq} I_{dq} + p\Psi_{dq}; \\ \Psi_{1d} = L_{1d} I_{1d} + M_{dB} I_B + M_{dd} I_{dd}; \\ \Psi_{1q} = L_{1q} I_{1q} + M_{qd} I_{dq}; \\ \Psi_B = L_B I_B + M_{Bd} I_{1d} + M_{Bd} I_{dd}; \\ \Psi_{dd} = L_{dd} I_{dd} + M_{dd} I_{1d} + M_{dB} I_B; \\ \Psi_{dq} = L_{dq} I_{dq} + M_{dq} I_{1q}, \end{array} \right. \quad (2.46)$$

где $\omega_{0эл} = 2\pi f_1$ – синхронная скорость поля ротора; f_1 – частота напряжения питания; Ψ_{1d} , Ψ_{1q} – потокосцепления статорной обмотки по осям d и q ; Ψ_B – потокосцепление обмотки возбуждения; Ψ_{dd} , Ψ_{dq} – потокосцепления демпферной обмотки по осям d и q ; $M_{dB} = M_{Bd}$ – коэффициент взаимной индукции между обмоткой возбуждения и обмоткой статора по оси d ; $M_{dd} = M_{dd}$ – коэффициент взаимной индукции между обмоткой статора и демпферной обмоткой по оси d ; $M_{qd} = M_{dq}$ – коэффициент взаимной индукции между обмоткой статора и демпферной обмоткой по оси q . При этом коэффициенты взаимной индуктивности между обмотками статора и ротора по осям d и q можно обозначить как L_{12d} и L_{12q} , соответственно.

Изменение нагрузки при постоянном модуле вектора напряжения статора U_1 приводит к изменению между его проекциями на осях вращающейся системы координат $d - q$, которые определяются системой уравнений:

$$\begin{cases} U_{ld} = U_{lmax} \sin \theta; \\ U_{lq} = -U_{lmax} \cos \theta, \end{cases} \quad (2.47)$$

где U_{lmax} - амплитудное значение напряжения статора; $\theta = (\omega_{0y\bar{e}} - p_i \omega_l)/p$ - угол нагрузки; p_n - количество пар полюсов.

Электромагнитный момент трехфазного синхронного двигателя, с учетом условия сохранения электромагнитной мощности, может быть представлен выражением:

$$M_{дв} = \frac{3}{2} p_n (I_{lq} \Psi_{ld} - I_{ld} \Psi_{lq}). \quad (2.48)$$

Уравнение динамики имеет вид:

$$M_{дв} - M_c = J_l p \omega_l, \quad (2.49)$$

где ω_l - частота вращения ротора, J_l - момент инерции двигателя; M_c - статический момент на валу двигателя.

При построении модели СД необходимо произвести операцию приведения параметров роторной обмотки к статорной. Для этого возможно использование коэффициентов приведения токов, напряжений и сопротивлений, зависящих от числа фаз, числа последовательно соединенных витков обмотки фазы, активных и индуктивных сопротивлений обмоток двигателя. Далее под параметрами вторичной обмотки ротора будут подразумеваться параметры приведенной вторичной обмотки ротора.

Точный учет насыщения магнитной цепи СД при моделировании достаточно трудоемок [39], но при построении и исследовании систем регулирования его необходимо производить, так как оно существенным образом изменяет свойства СД. При математическом моделировании можно воспользоваться приближенной методикой учета насыщения по основному потоку, основанной на кусочно-линейной аппроксимации кривой намагничивания

СД. Для этого на основе характеристики холостого хода двигателя $E=f(I_B)$, представленной на рис. 2.32, строят зависимость $\Psi=f(I_\Sigma L_a)$ (рис. 2.33).

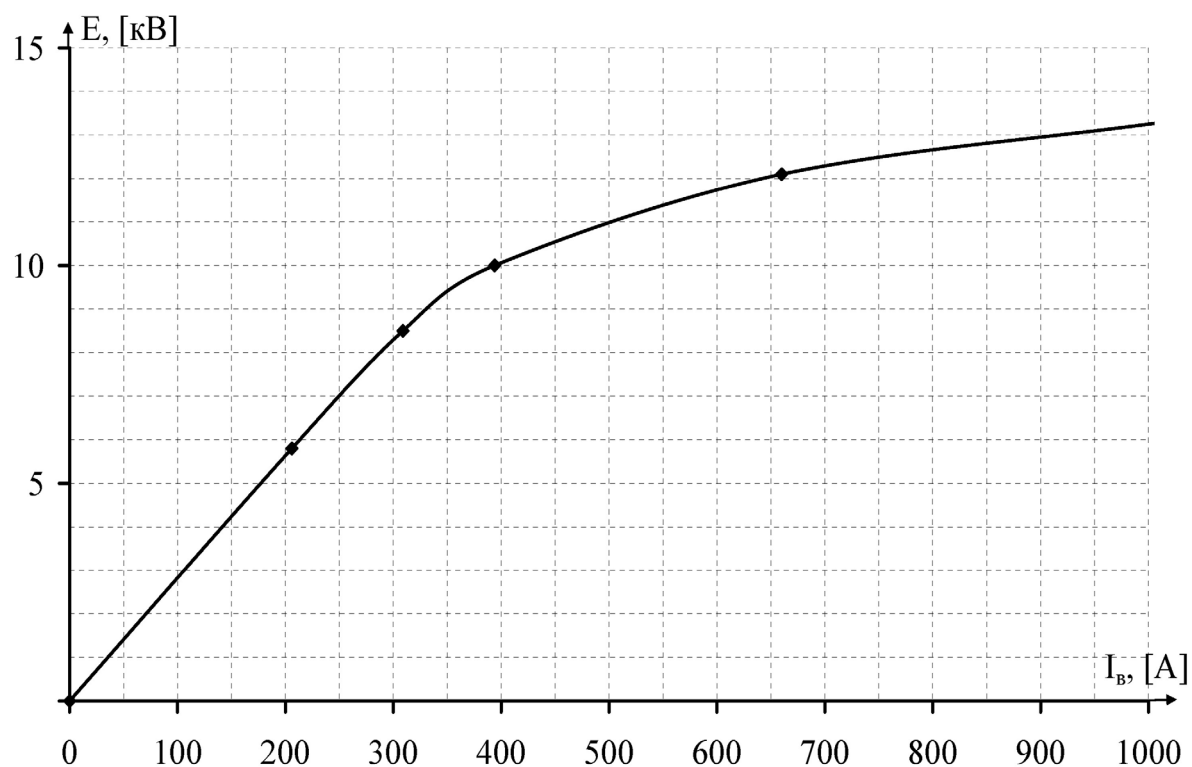


Рис. 2.32. Характеристика холостого хода синхронного двигателя СДСЗ-490-18/40

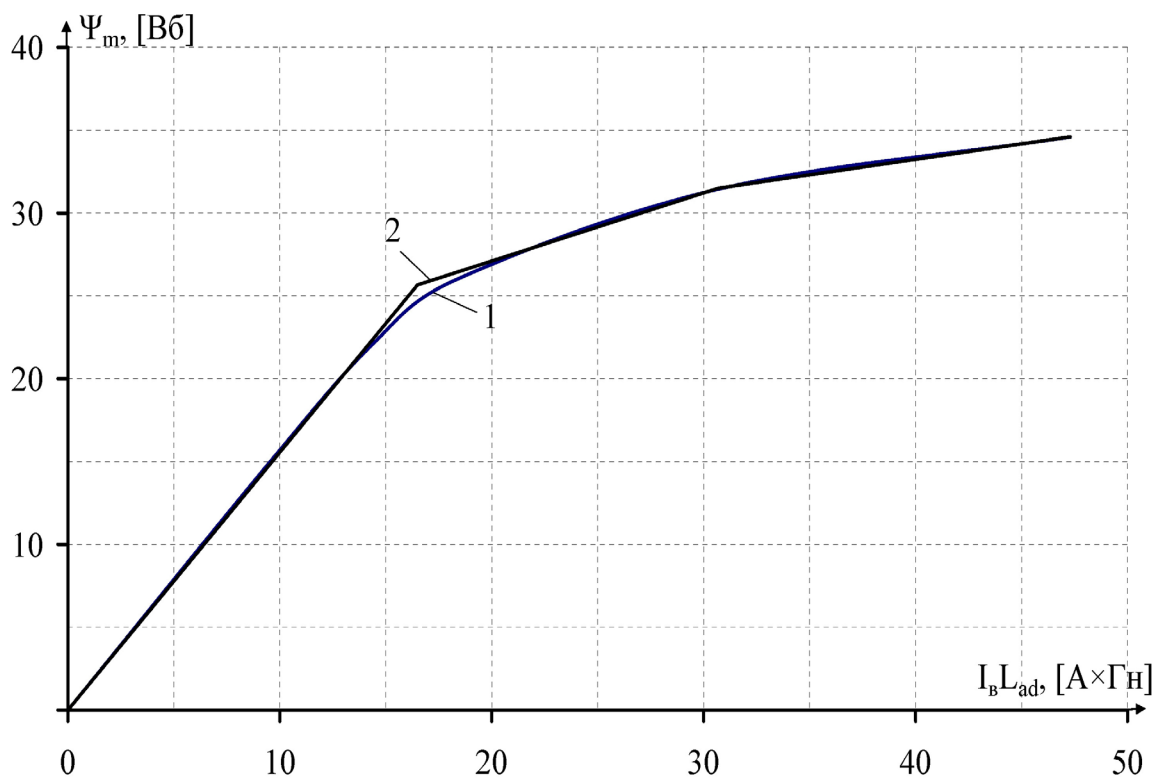


Рис. 2.33. Кусочно-линейная аппроксимация приведенной кривой намагничивания СД:

1 - исходная характеристика; 2 - аппроксимирующая характеристика

Структурная схема математической модели явнополюсного трехфазного синхронного двигателя с демпферной обмоткой, построенная в осях ортогональной системы координат d-q, приведена на рис. 2.34. Математическая модель, представленная в виде структурной схемы, наиболее удобна для исследования динамических режимов работы синхронного двигателя с помощью пакета прикладных программ, например, Simylink.

На рис. 2.35 представлены графики зависимостей $\omega(t)$, $M(t)$ при пуске двигателя вхолостую. После разгона скорость ротора достигает номинального значения, момент двигателя в установившемся режиме при холостом ходе равен нулю.

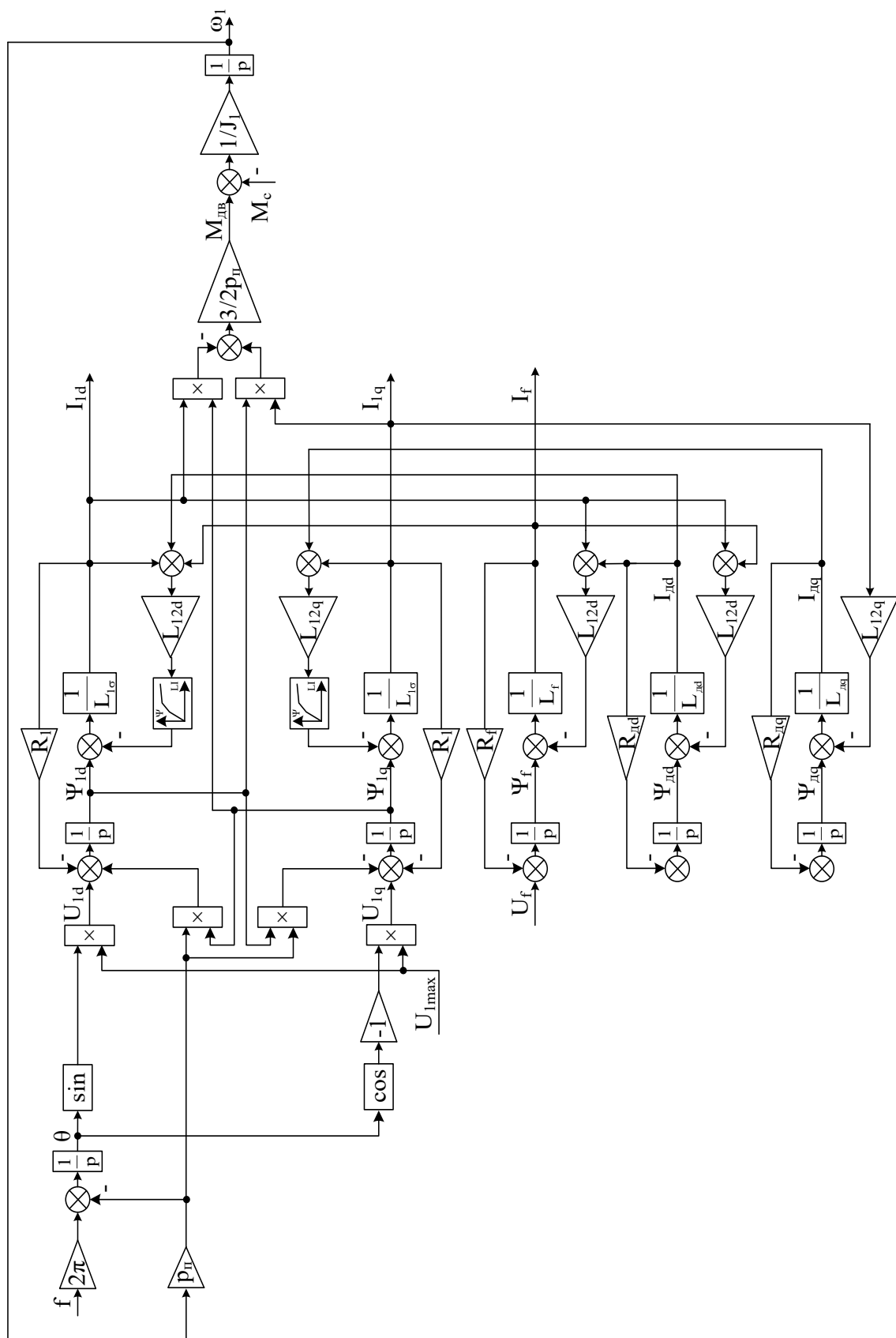


Рис. 2.34. Структурная схема математической модели трехфазного синхронного двигателя

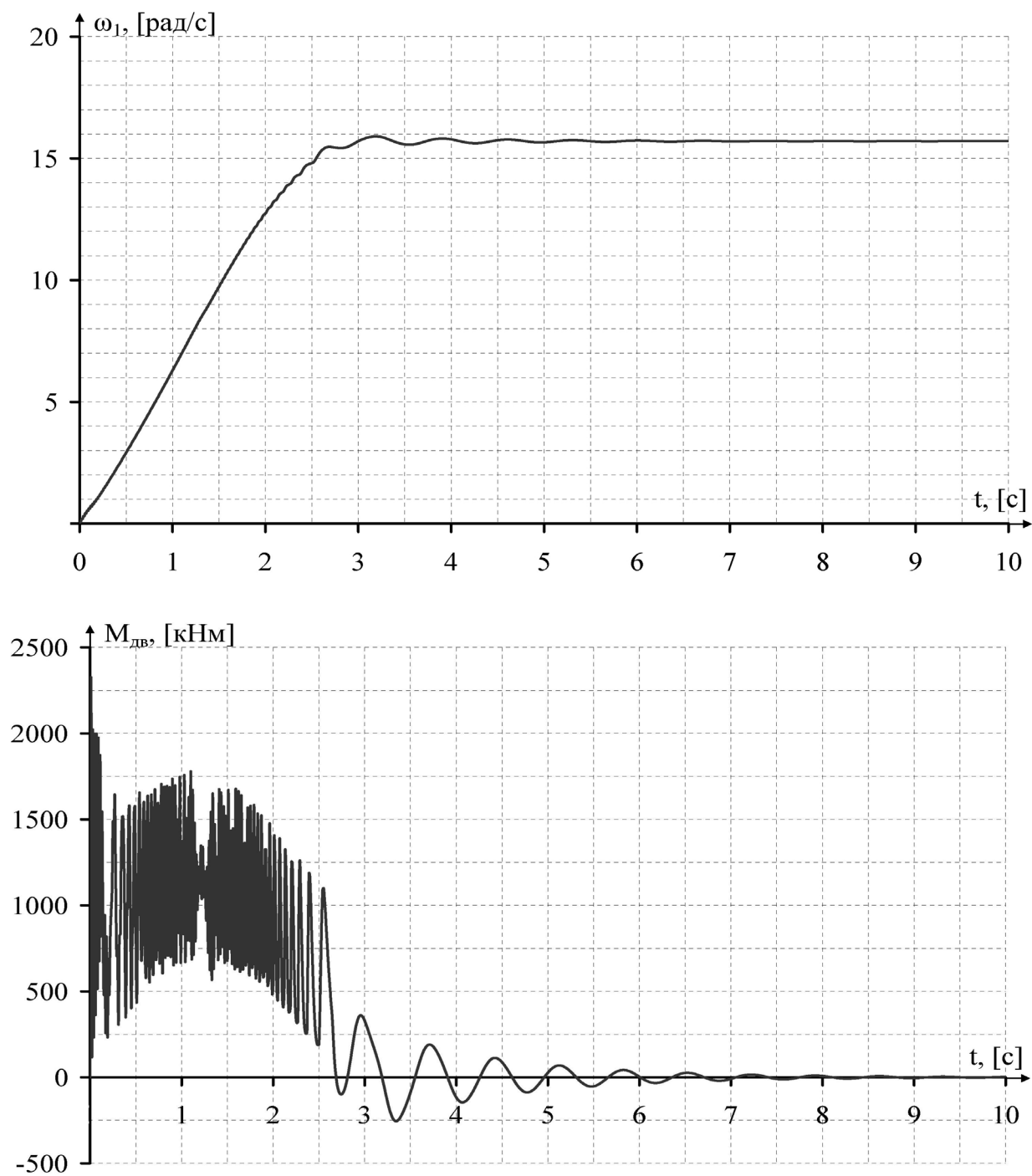


Рис. 2.35. Графики зависимостей $\omega(t)$, $M(t)$ при пуске синхронного двигателя СДСЗ-490-18/40 вхолостую

2.12. Параллельная работа синхронных генераторов

Параллельная работа синхронных генераторов в единой энергосистеме в сравнении с их автономной работой, обеспечивает важные преимущества:

- увеличение общей мощности электростанции;
- повышение надежности энергоснабжения потребителей;
- снижение резерва мощности при аварии или ремонте;
- возможность переадресации энергии в другие районы при изменениях нагрузки.

В единой энергосистеме работает много генераторов разных типов и мощностей. При включении генераторов в сеть на параллельную работу с другими генераторами необходимо избегать чрезмерно большого толчка тока в замкнутом контуре, образованном сетью и обмоткой статора генератора, а также возникновения ударных электромагнитных моментов, которые могут вывести из строя сам генератор, работающее с ним электрооборудование, приводной агрегат, нарушить работу сетей и энергосистемы. Мощность каждого генератора, подключаемого к сети, незначительна по сравнению с мощностью энергосистемы. Поэтому принято считать, что генератор работает на сеть бесконечно большой мощности. Такая сеть характеризуется постоянным по величине и синусоидальным по форме напряжением U_c и постоянной по величине частотой f_c . Эти параметры не зависят от нагрузки данного генератора. Подключение генераторов на параллельную работу с сетью требует соблюдения следующих условий [16]:

- напряжения генератора $U_{ген}$ и сети U_c должны быть одинаковыми;
- частоты генератора $f_{ген}$ и сети f_c должны быть одинаковыми;
- напряжения генератора $U_{ген}$ и сети U_c должны совпадать по фазе;
- чередование фаз генератора и сети должно быть одинаковым.

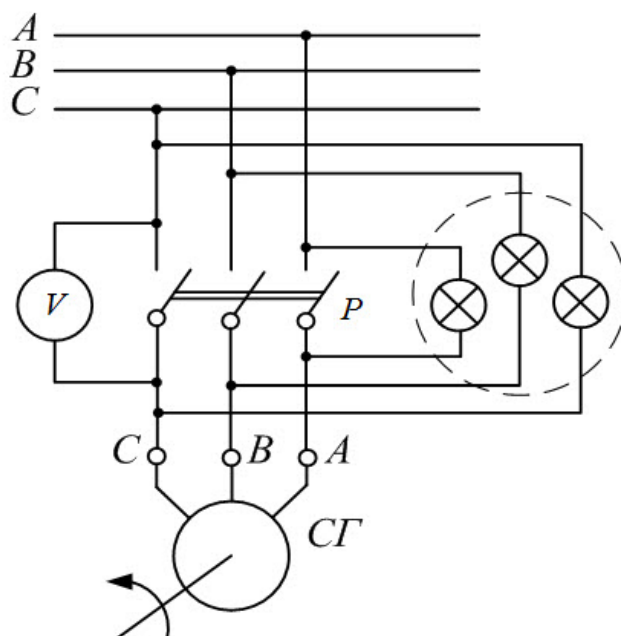


Рис. 2.36. Включение синхронного генератора на параллельную работу с сетью

Равенство напряжений $U_{ген}$ и U_c достигается путем регулирования тока возбуждения. Изменение частоты синхронного генератора $f_{ген}$ и фазы его напряжения достигается изменением частоты вращения ротора. Совпадение напряжений $U_{ген}$ и U_c по фазе контролируется с помощью ламп, нулевых вольтметров, синхроскопов. Чередование фаз проверяется после монтажа генератора или сборки схемы. Условия включения генераторов на параллельную работу характеризуют метод точной синхронизации. Схема включения синхронного генератора по данному методу представлена на рис. 2.36 [19]. При неодинаковом чередовании фаз генератора и сети лампы включены на линейное напряжение и будут гореть наиболее ярко. При различных частотах генератора $f_{ген}$ и сети f_c лампы одновременно мигают. Чем ближе совпадение частот $f_{ген}$ и f_c , тем частота мигания ламп $(f_{ген} - f_c)$ меньше. При одновременно невыполнении обоих этих условий в схеме происходит движение света. Вольтметр V позволяет точно выбрать момент подключения генератора к сети с помощью рубильника P , когда разница мгновенных зна-

чений напряжений $u_{ген}$ и u_c будут равна нулю. Подключение генератора к сети по схеме рис. 4.1 происходит в следующем порядке [1]:

- невозбужденный ротор разгоняют до подсинхронной скорости $(0,95 - 0,98)n_1$;
- плавно увеличивают ток возбуждения, добиваясь одинаковых значений напряжений генератора $U_{ген}$ и сети U_c ;
- чередование фаз верное, если лампы мигают одновременно;
- частоту вращения ротора генератора подгоняют до значения, при котором частота мигания ламп $(f_{ген} - f_c)$ минимальна. В середине «темного» полупериода замыкают рубильник P (более точно момент включения можно определить по вольтметру V).

После включения генератора в сеть дальнейшая синхронизация частоты его вращения происходит автоматически. На электростанциях широко распространен метод самосинхронизации, в результате которого в сеть включается невозбужденный генератор ($U_{ген} = 0$) при частоте вращения, близкой к синхронной n_1 . Обмотка возбуждения замыкается на активное сопротивление во избежание повреждения изоляции от возможных перенапряжений. В данном случае нет необходимости в точном выравнивании частот, значения и фазы напряжений генератора и сети. После включения невозбужденного генератора в сеть немедленно подается ток в обмотку возбуждения, и генератор втягивается в синхронизм с сетью. Его частота вращения становится равной синхронной n_1 . При самосинхронизации имеют место сложные электро-механические переходные процессы. Кратковременно в обмотке статора возникает броски тока. Они согласно стандартам не должны превышать $3,5I_{aH}$. Влияние переходных процессов на обмотки синхронной машины и используемый приводной агрегат учитывается на стадии проектирования. Ограничение тока достигается так же применением в цепи возбуждения сопротивле-

ния гашения поля, что способствует быстрому затуханию переходных процессов, а также конструктивными способами [1].

2.13. Особенности параллельной работы синхронного генератора с сетью бесконечной мощности

После включения синхронного генератора в сеть его напряжение $U_{ген}$ становится равным напряжению сети U_c . Относительно внешней нагрузки напряжения $U_{ген}$ и U_c совпадают по фазе, а по контуру «генератор – сеть» находятся в противофазе: $\bar{U}_{ген} = -\bar{U}_c$. При полном выполнении указанных условий по синхронизации генератора с сетью его ток I_a после подключения равен нулю (рис. 2.37,а). Силу тока I_a для неявнополюсного генератора регулируют изменением эдс E_0 по величине или по фазе [9]:

$$\bar{I}_a = \frac{(\bar{E}_0 - \bar{U}_c)}{jx_c} = -j \frac{(\bar{E}_0 - \bar{U}_c)}{x_c}. \quad (2.50)$$

Синхронная машина, работающая параллельно с сетью бесконечной мощности, стремится поддержать синхронную частоту вращения n_1 в некотором диапазоне изменения момента на валу. Машина работает вхолостую, затем возрастает момент приводного двигателя, и ротор получает ускорение, при этом $n_2 > n_1$. Вектор \bar{E}_0 смещается относительно вектора $\bar{U}_{ген}$ на угол θ в направлении вращения векторов. Возникающая при этом небалансная эдс $\Delta \bar{E} = -j\bar{I}_a x_c$ приводит, согласно (4.1), к появлению тока I_a (рис. 2.37,б). Полагая, что для мощных синхронных машин $r_a \approx 0$, считают ток I_a чисто индуктивным. В данном случае коэффициент мощности $\cos\psi > 0$. Машина генерирует в сеть активную мощность и развивает тормозной момент.

Чем больше внешний момент, приложенный к валу генератора, тем больше угол θ , ток и мощность, отдаваемые им в сеть.

Если к валу синхронного генератора приложить внешний тормозной момент, ротор замедляется ($n_2 < n_1$), вектор \bar{E}_0 отстает от вектора $\bar{U}_{ген}$ на угол θ (рис. 2.37, в). Коэффициент мощности $\cos\psi < 0$, машина потребляет из сети активную мощность, находится в двигательном режиме, развивает вращающий момент. Регулирование нагрузки генератора достигается изменением приложенного к его валу вращающего момента приводного двигателя [2].

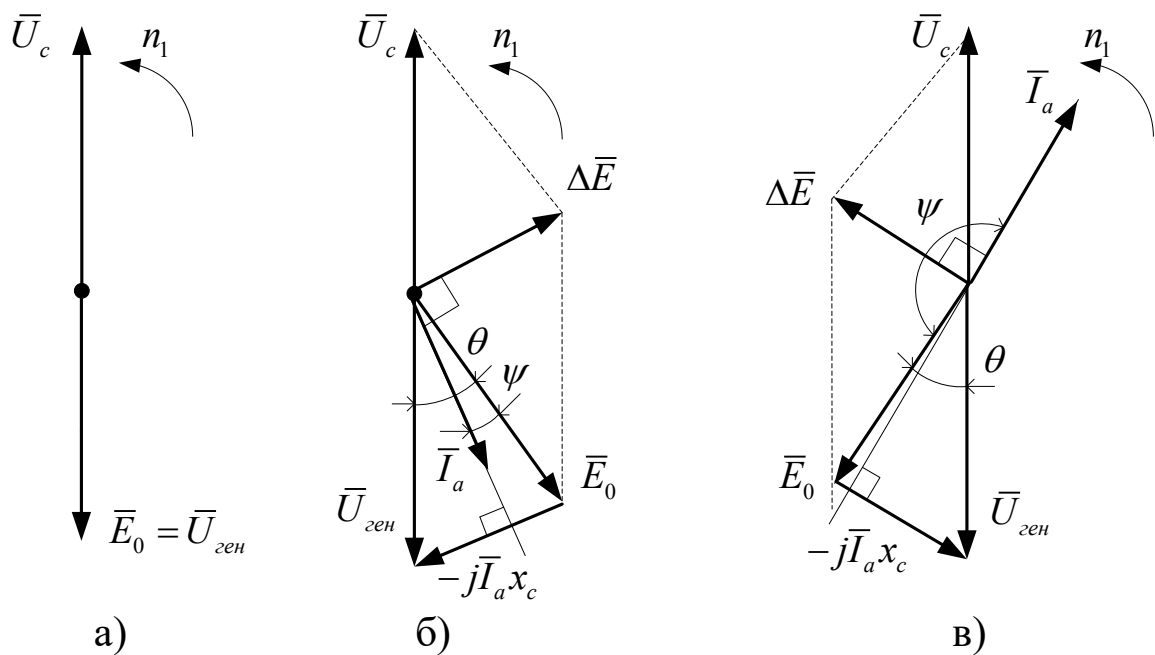


Рис. 2.37. Упрощенные векторные диаграммы неявнополюсного генератора при параллельной работе с сетью

Синхронная машина, работающая параллельно с сетью бесконечной мощности, стремится сохранить неизменным магнитный поток при изменении в некотором диапазоне тока обмотки возбуждения. Машина работает вхолостую (рис. 2.38,а). Возрастание тока возбуждения приводит к образованию эдс $\Delta \bar{E}$. В контуре «генератор – сеть» возникает ток I_a . Эдс \bar{E}_0 превышает напряжение $\bar{U}_{ген}$ на величину $\Delta \bar{E} = -\bar{jI}_a x_c$. При условии $r_a \approx 0$ ток I_a считается чисто индуктивным по отношению к $\Delta \bar{E}$ (рис. 2.38,б). Возникает

продольно размагничивающая реакция якоря, в результате чего поток машины стабилизируется. Относительно напряжения сети U_c ток I_a является чисто емкостным. Синхронная машина при $E_0 > U_{ген}$ называется перевозбужденной. Она для сети эквивалентна емкости [16].

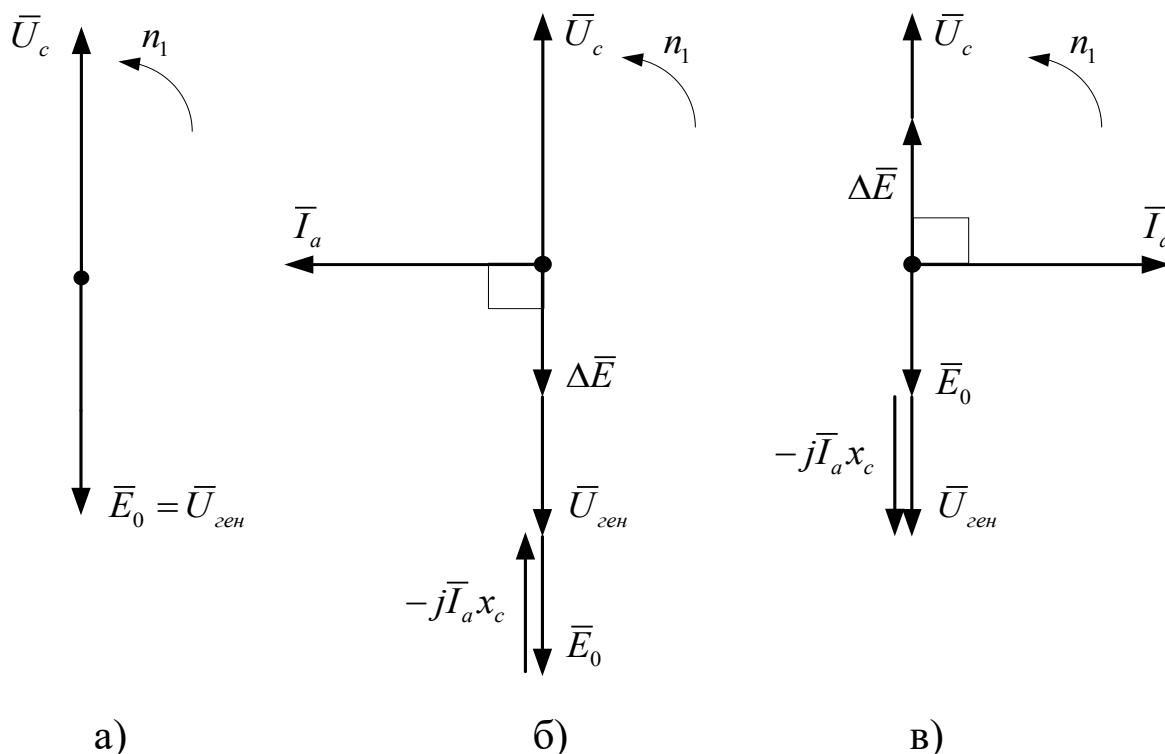


Рис. 2.38. Упрощенные векторные диаграммы неявнополюсного генератора при параллельной работе с сетью и отсутствии активной нагрузки

Снижение тока возбуждения $E_0 < U_{ген}$ приводит к возникновению емкостного тока I_a по отношению к $\Delta \bar{E}$ (рис. 2.38, в). Возникает продольно намагничивающая реакция якоря, в результате чего поток машины стабилизируется. Относительно напряжения сети U_c ток I_a является чисто индуктивным. Синхронная машина при этом называется недовозбужденной. Она для сети эквивалентна индуктивной нагрузке.

Изменение тока возбуждения синхронной машины приводит к изменению только реактивной составляющей тока \bar{I}_a , а следовательно ее реактивной мощности. Работа в режимах перевозбуждения и недовозбуждения ис-

пользуется в синхронных компенсаторах для повышения коэффициента мощности электроустановок, снижения потерь и стабилизации напряжения в электрических сетях [16].

Возникновение реактивной составляющей тока \bar{I}_a физически объясняется тем, что при работе синхронной машины на сеть бесконечно большой мощности суммарный магнитный поток $\bar{\Phi}_\Sigma = \bar{\Phi}_\delta + \bar{\Phi}_a + \bar{\Phi}_\sigma$, сцепленный с каждой из фаз, не зависит от тока возбуждения и при всех условиях остается неизменным, поскольку

$$\bar{U}_{ген} = \bar{E}_0 + \bar{E}_a + \bar{E}_\sigma = -\bar{U}_c = const. \quad (2.51)$$

При превышении током возбуждения необходимого значения возникает отстающая составляющая тока \bar{I}_a , которая создает размагничивающий поток реакции якоря $\bar{\Phi}_a$. Если ток возбуждения ниже необходимого значения, то возникает опережающая составляющая тока \bar{I}_a , которая создает намагничивающий поток реакции якоря $\bar{\Phi}_a$. Суммарный поток машины $\bar{\Phi}_\Sigma$ автоматически поддерживается неизменным [16].

2.14. Режимы работы синхронного генератора при параллельной работе с сетью. U – образные характеристики синхронного генератора

Изменение активной и реактивной мощностей синхронного генератора, работающего параллельно с сетью большой мощности, проводится путем изменения внешнего момента и тока возбуждения. Для обеспечения требуемого режима работы генератора регулируют оба этих параметра [16].

2.14.1. Работа генератора с неизменным током возбуждения. На рис. 239,а представлена векторная диаграмма неявнополюсного синхронного

генератора при условии $\bar{U}_{ген} = -\bar{U}_c$. При работе генератора с $\cos\varphi = 1$ ток якоря \bar{I}_{a1} совпадает по направлению с вектором напряжения $\bar{U}_{ген}$, а вектор эдс \bar{E}_0 опережает эти векторы на угол θ_1 . При возрастании нагрузки от пер-

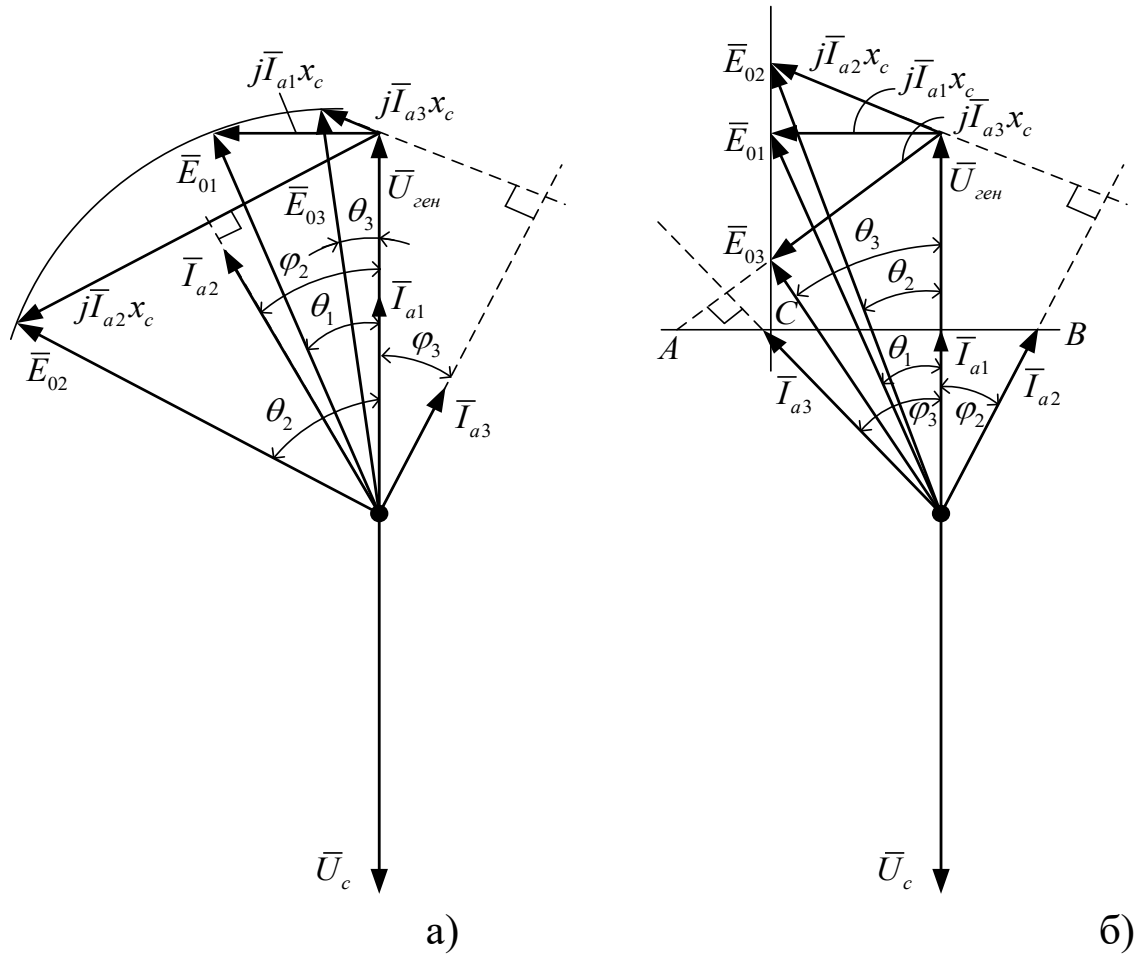


Рис. 2.39. Векторные диаграммы синхронного генератора при различных режимах нагрузки

воначального значения увеличивается момент, приложенный к валу генератора, и угол нагрузки возрастает до значения $\theta_2 > \theta_1$. Вектор эдс \bar{E}_0 поворачивается в сторону опережения, его конец скользит по окружности радиусом, равным \bar{E}_0 , т.к. ток возбуждения остается неизменным. При уменьшении нагрузки от первоначального значения уменьшают момент, приложенный к валу генератора, и угол нагрузки уменьшается до значения $\theta_3 < \theta_1$. Построение всех векторов на диаграмме аналогично.

Диаграммы на рис. 2.39, а показывают, что при изменении внешнего момента, приложенного к валу синхронного генератора, работающего параллельно с сетью, изменяется и активная, и реактивная мощность. Для обеспечения требуемого режима работы генератора при изменении активной мощности необходимо регулировать и ток возбуждения [16].

2.14.2. Работа генератора с неизменным моментом. Неизменность внешнего момента на валу генератора эквивалентна постоянству его активной мощности $P = mU_{ген}I_a \cos\varphi$. При работе на мощную сеть $U_{ген} = U_c = const$ при изменении тока возбуждения остается постоянной активная составляющая тока якоря $I_a \cos\varphi = const$. На рис. 4.4, б представлена векторная диаграмма, где конец вектора \bar{I}_a скользит по прямой AB , которая перпендикулярна вектору напряжения $\bar{U}_{ген}$. Для неявнополюсного синхронного генератора, согласно (2.23), изменение тока возбуждения приводит к изменению величин E_0 и $\sin\theta$. При $P = const$ выполняется условие $E_0 \sin\theta = const$. На диаграмме это условие выражается в том, что конец вектора \bar{E}_0 скользит по прямой CD , которая параллельна вектору напряжения $\bar{U}_{ген}$. Чем меньше ток возбуждения, тем меньше по модулю вектор \bar{E}_0 , но больше угол θ . На рис. 2.39,б выполнены построения для трех значений тока возбуждения. Минимальному значению тока \bar{I}_a соответствует режим работы при $\cos\varphi = 1$, чему соответствует определенный ток возбуждения. При изменении тока возбуждения относительно этого значения ток I_a возрастает [16].

Зависимость тока якоря I_a от тока возбуждения I_e при условии $P = const$ называется U – образной характеристикой, она представлена на рис. 2.40 U-образная характеристика синхронных машин позволяет определить ток возбуждения, при котором для заданной нагрузки ток якоря минимален [16]. В точке A генератор работает вхолостую. Участок AB линейный,

поскольку магнитная цепь машины ненасыщена. В этом режиме ток в обмотке якоря является индуктивным по отношению к напряжению сети U_c и емкостным по отношению к напряжению генератора $U_{ген}$.

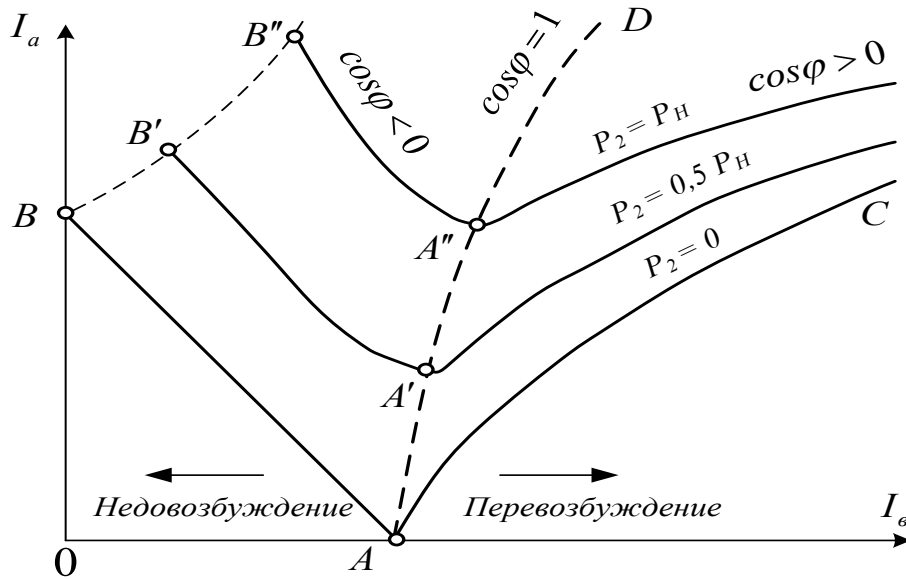


Рис. 2.40. U – образная характеристика синхронного генератора

Возникает размагничивающая реакция якоря, в результате чего $U_{ген} = const$. Синхронная машина работает с отстающим коэффициентом мощности ($cos\varphi < 0$), т.е. в режиме недовозбуждения. Участок AC нелинейен, поскольку магнитная цепь насыщена. Ток якоря является емкостным по отношению к напряжению сети и индуктивным по отношению к напряжению генератора. Для соблюдения условия $U_{ген} = const$ возникает намагничивающая реакция якоря. Синхронная машина работает с опережающим коэффициентом мощности ($cos\varphi > 0$), т.е. в режиме перевозбуждения, выполняя роль компенсатора реактивной мощности, что способствует повышению коэффициента мощности в сети. В точках A , A' , A'' ток якоря становится чисто активным ($cos\varphi = 1$). Отклонение кривой AD вправо с ростом нагрузки генератора связано с необходимостью компенсации падения напряжения на активном сопротивлении машины и компенсации действия поперечной реак-

ции якоря путем увеличения тока возбуждения. Участки U – образной характеристики AD , AC и AB представляет собой регулировочные характеристики соответственно при чисто активной, емкостной и индуктивной нагрузках. Получение U -образной характеристики входит в программу приемосдаточных испытаний синхронных машин [6].

Совместный анализ угловой, U -образной и регулировочных характеристик синхронного генератора позволяет сделать выводы:

- регулирование активной мощности синхронной машины может идти только путем изменения момента, приложенного к ее валу;
- одновременно с регулированием активной мощности следует изменять ток возбуждения в соответствии с регулировочной характеристикой;
- изменение реактивной мощности производится регулированием тока возбуждения, при этом перевозбужденная машина потребляет из сети индуктивный ток, а недовозбужденная – емкостной;
- потребление из сети индуктивного тока равносильно генерированию в сеть тока емкостного и наоборот [1].

2.15. Синхронный компенсатор

Синхронный компенсатор представляет собой синхронный двигатель, который работает без нагрузки на валу. Он служит для генерирования реактивной мощности, которая необходима для работы различных приемников электроэнергии (асинхронных двигателей, трансформаторов и т.д.). Синхронный компенсатор применяется в режимах повышения коэффициента мощности и стабилизации напряжения в сети [2].

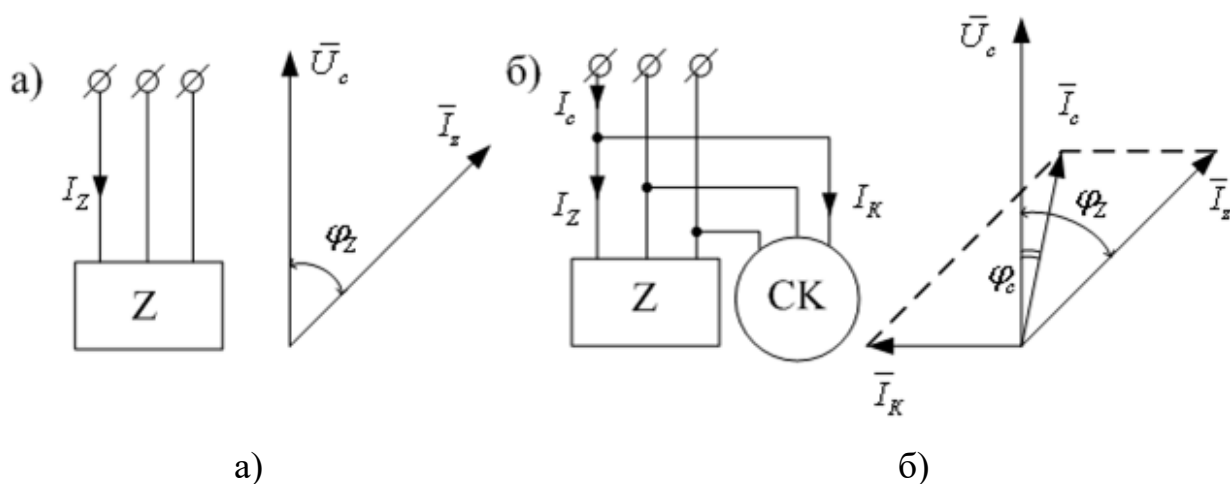


Рис. 2.41. Применение синхронного компенсатора для повышения коэффициента мощности

Если генераторы электростанций и линии электропередачи загружены отстающим реактивным током, то синхронный компенсатор работает в режиме перевозбуждения. На рис. 2.41, а показана векторная диаграмма напряжения сети \bar{U}_c и тока \bar{I}_z в цепи нагрузки Z . Ток \bar{I}_z отстает по фазе от напряжения \bar{U}_c на угол φ_z . После подключения параллельно нагрузке Z перевозбужденного синхронного компенсатора $СК$ с опережающим реактивным током \bar{I}_K (рис. 2.41, б) в цепи возникает ток $\bar{I}_c = \bar{I}_z + \bar{I}_K$. Угол φ_c между векторами \bar{U}_c и \bar{I}_c будет значительно меньше угла φ_z . Величина тока в сети будет меньше ($I_c < I_z$). Генераторы электростанций и линии электропередачи разгружаются, потери энергии уменьшаются. Мощность синхронного компенсатора определяется величиной реактивной мощности, которую он должен компенсировать. Реактивная мощность компенсатора $Q_K = mU_c I_K$ отличается от его полной мощности S_K на величину потерь. Эти потери близки к потерям холостого хода P_0 . Активная мощность, потребляемая из сети, идет на покрытие потерь в компенсаторе. Номинальной мощностью синхронного компенсатора является мощность при перевозбуж-

дении, поскольку при опережающем токе наблюдается повышенный нагрев его обмоток [16].

В режиме стабилизации напряжения ток возбуждения синхронного компенсатора устанавливается постоянным. При этом значение эдс E_0 равняется номинальному напряжению сети U_{cH} . Падение напряжения в сети

$$\Delta U \approx I_c R_c \cos \varphi_c + I_c X_c \sin \varphi_c, \quad (2.52)$$

где R_c и X_c – активное и индуктивное сопротивление сети.

Если напряжение в сети несколько понижается из-за возрастания тока нагрузки и становится меньше номинального, то компенсатор работает в режиме перевозбуждения. Он забирает из сети реактивный опережающий ток \bar{I}_a . Падение напряжения в сети уменьшится на величину $I_a X_c$. При малых нагрузках (например, во время ночного минимума) под влиянием емкостных сопротивлений линии напряжение у потребителей может быть выше, чем на подстанции. Для стабилизации напряжения в сети компенсатор работает в режиме недовозбуждения и загружает сеть реактивным отстающим током \bar{I}_a . Падение напряжения в сети увеличится на величину $I_a X_c$. При достаточной мощности синхронного компенсатора колебания напряжения в сети не превышают 0,5 – 1,0%. Недостатком данного метода стабилизации напряжения является, то, что синхронный компенсатор загружает линию реактивным током. Это увеличивает потери в ней [2].

Синхронные компенсаторы изготавливаются на мощности до 160 МВАр и напряжением до 16 кВ при частоте 50 Гц. Они преимущественно выполняются с горизонтальным расположением вала, явнополусным ротором с пусковыми обмотками, имеют водородное охлаждение. Синхронные компенсаторы не развивают активной мощности. В связи с этим отпадает необходимость в решении вопросов об их статической устойчивости при работе в сети и перегрузочной способности. Поэтому компенсаторы выполня-

ются с меньшим воздушным зазором, чем синхронные генераторы и двигатели. Это облегчает их конструкцию и снижает стоимость. Наиболее важны для синхронного компенсатора его U-образные характеристики. Они определяют основные параметры – значения токов в обмотке статора и в обмотке возбуждения. Регулирование возбуждения синхронных компенсаторов выполняется автоматически [16].

2.16. Переходные процессы в синхронных машинах

Переходные процессы, возникающие при внезапных коротких замыканиях, изменениях нагрузки, могут привести к аварии, нарушить параллельную работу синхронных генераторов и электроснабжение потребителей. На практике необходимо иметь представление о физических процессах, которые протекают в машинах, для расчета аварийных токов, настройки устройств релейной защиты, выбора элементов систем электроснабжения.

Установившиеся режимы работы синхронного генератора с симметричной нагрузкой характеризуются тем, что в сердечнике и обмотках ротора не индуцируются никакие токи. При переходных процессах и несимметричных нагрузках между статором и ротором возникают трансформаторные связи [16].

2.16.1. Внезапное короткое замыкание.

При рассмотрении переходного процесса синхронного генератора большой мощности пренебрегают сопротивлением его обмоток. Пусть предварительно синхронный генератор работает в режиме холостого хода. В этом режиме имеет место только магнитный поток $\Phi_{\text{в}}$ обмотки возбуждения, который вызван током $I_{\text{в0}}$. При коротком замыкании появляется магнитный поток статора по продольной оси $\Phi_{\text{ад}}$, поскольку обмотка статора представляет собой чисто индуктивную нагрузку. Этот поток вращается синхронно с ротором и направлен против потока $\Phi_{\text{в}}$. При этом в обмотке возбуждения и

успокоительной обмотке будут индуцироваться дополнительные токи $i_{ДВ}$ и $i_{ДУ}$. Эти токи в соответствии с правилом Ленца препятствуют изменению результирующего магнитного потока в машине. Магнитные потоки $\Phi_{ДВ}$ и $\Phi_{ДУ}$, индуцированные соответствующими токами, противодействуют проникновению потока Φ_{ad} в сердечник ротора. Они вытесняют его в воздушный зазор между полюсами (рис. 4.7,а). В результате этого поток статора значительно уменьшается до значения $\Phi_{ad}'' < \Phi_{ad}$. Уменьшается также индуктивное сопротивление обмотки статора по продольной оси, т.е. $x_d'' < x_d$. Его называют сверхпереходным индуктивным сопротивлением, относительное значение $x_d''^* = 0,12 - 0,35$ [16]. В начальный момент процесса короткого замыкания эдс синхронного генератора близка по величине к эдс холостого хода E_0 . Это вызывает бросок тока, амплитудное значение которого в обмотке статора при сверхпереходном процессе определяется выражением

$$I_{Km}'' = \frac{E_0 \sqrt{2}}{x_d''} = \frac{E_m}{x_d''}. \quad (2.53)$$

Обмотка возбуждения и успокоительная обмотка имеют активное сопротивление. Поэтому токи $i_{ДВ}$ и $i_{ДУ}$ будут постепенно затухать. Этот процесс быстрее идет в успокоительной обмотке, поскольку обмотка возбуждения имеет большее число витков и обладает большей индуктивностью.

При сверхпереходном процессе постоянная времени $T_d'' = 0,12 - 0,35$ с определяет затухание тока статора и зависит в основном от параметров успокоительной обмотки [16]. Когда ток $i_{ДУ}$ уменьшается до нуля дополнительный ток $i_{ДВ}$ еще имеет некоторое значение. При этом магнитный поток реакции якоря частично будет проходить через ротор, отчего его величина несколько возрастет до значения $\Phi_{ad}' > \Phi_{ad}''$.

Сопротивление обмотки статора по продольной оси также возрастает, т.е. $x'_{ad} > x''_{ad}$. Оно называется переходным индуктивным сопротивлением и его относительное значение $x'_d{}^* = 0,2 - 0,5$ [30]. Наибольшее амплитудное значение тока короткого замыкания в обмотке статора при переходном процессе уменьшится до значения

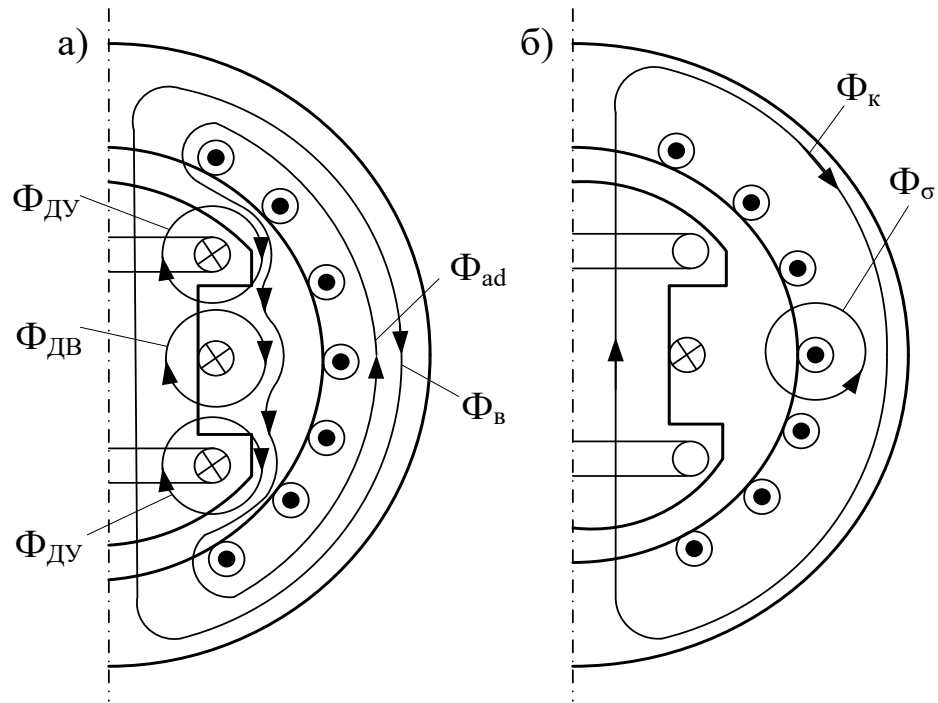


Рис. 2.42. Картина магнитного поля при внезапном коротком замыкании синхронного генератора

$$I'_{Km} = \frac{E_m}{x'_d}. \quad (2.54)$$

Скорость уменьшения тока в обмотке статора определяется переходной постоянной времени $T'_d = 0,4 - 3,0$ с, которая зависит в основном от параметров обмотки возбуждения [16]. Через некоторое время добавочный ток $i_{ДВ}$ уменьшится до нуля. Результирующий ток обмотки возбуждения снизится до установившегося значения I_{B0} , которое предшествовало переходному процессу. При этом поток статора будет полностью замыкаться через ро-

тор. Его величина снова возрастет, т.е. $\Phi_{ad} > \Phi'_{ad}$. Сопротивление обмотки статора по продольной оси достигает значения $x_{ad} > x'_{ad}$. В генераторе устанавливается результирующий магнитный поток (рис. 2.42)

$$\Phi_K = \Phi_B - \Phi_{ad}. \quad (2.55)$$

С уменьшением магнитного потока, сцепленного с обмоткой статора, уменьшается эдс статора. Это приводит к уменьшению тока короткого замыкания до установившегося значения, который меняется с амплитудой

$$I_{Km} = \frac{E_m}{x_d}. \quad (2.56)$$

На рис. 2.43 представлены осциллограммы токов синхронного генератора при внезапном коротком замыкании [16].

Закон изменения тока статора подобен изменению тока трансформатора при коротком замыкании. Однако переходный процесс в синхронной машине сложнее из-за наличия нескольких обмоток, которые влияют друг на друга. Синхронный генератор предварительно работал в режиме холостого хода. При переходном процессе ток статора имеет периодическую и апериодическую составляющие [16].

$$i_K = i_{KП} + i_{КА}. \quad (2.57)$$

При коротком замыкании генератора с течением времени уменьшается амплитуда периодической составляющей тока статора $i_{KП}$ (рис. 2.44). Она становится равной амплитуде установившегося тока короткого замыкания. Процесс изменения $i_{KП}$ описывается выражением

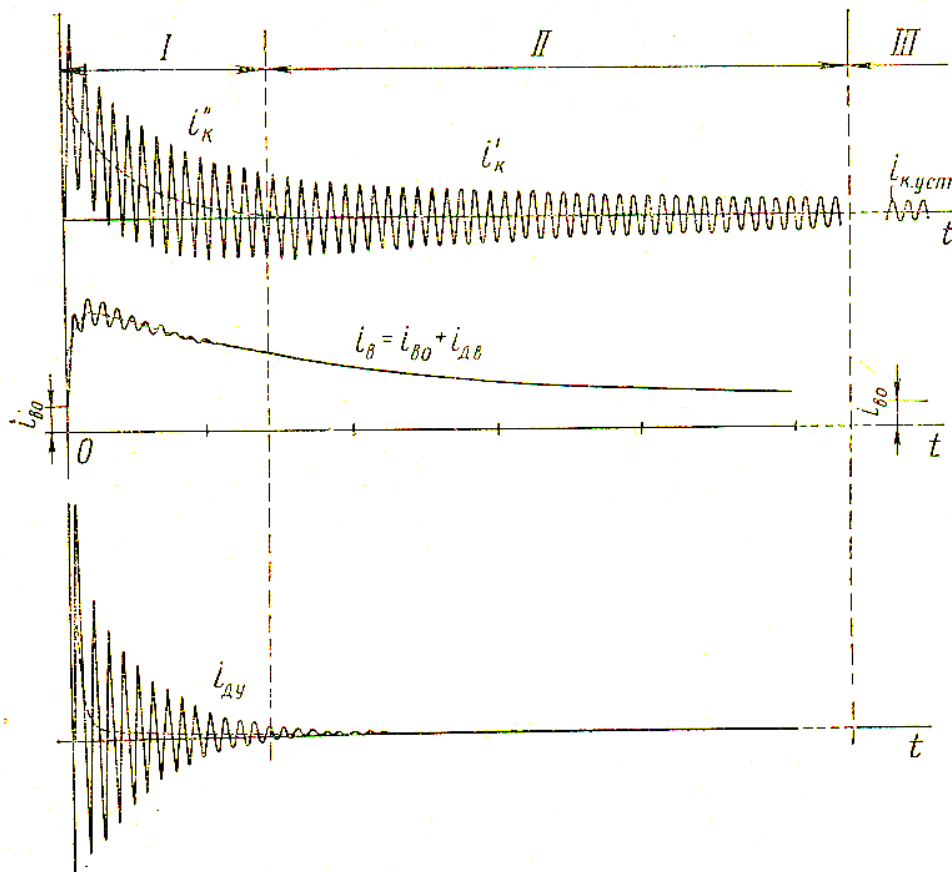


Рис. 2.43. Осциллограммы токов при внезапном коротком замыкании синхронного генератора.

I – сверхпереходный процесс; II – переходный процесс;
III – установившееся короткое замыкание

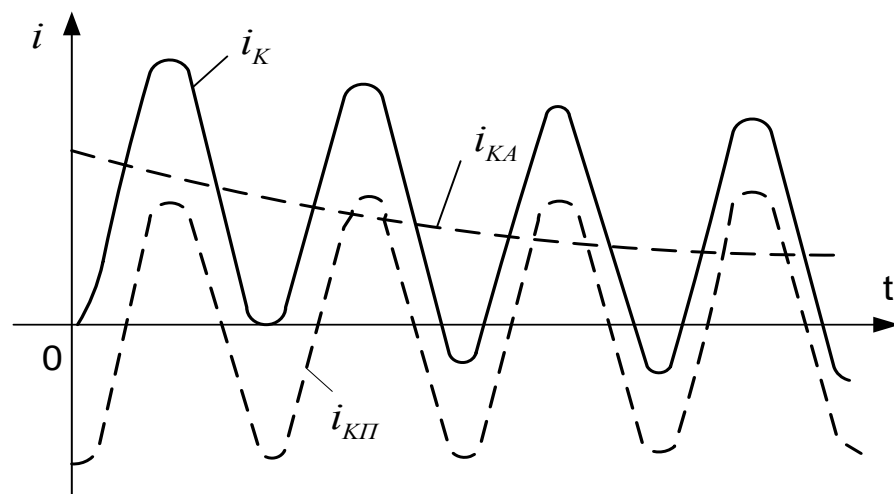


Рис. 2.44. График изменения тока в обмотке статора при коротком замыкании

$$\begin{aligned}
i_{KII} &= \left((I''_{Km} - I'_{Km}) e^{\frac{t}{T''_d}} + (I'_{Km} - I_{Km}) e^{\frac{t}{T'_d}} + I_{Km} \right) \sin(\omega t + \alpha_0 - \varphi_K) = \\
&= \left(\left(\frac{E_m}{x''_d} - \frac{E_m}{x'_d} \right) e^{\frac{t}{T''_d}} + \left(\frac{E_m}{x'_d} - \frac{E_m}{x_d} \right) e^{\frac{t}{T'_d}} + \frac{E_m}{x_d} \right) \cos(\omega t + \alpha_0),
\end{aligned} \tag{2.58}$$

где $\varphi_K = \arctg \frac{x_K}{r_K} \approx \frac{\pi}{2}$; α_0 – начальный угол, характеризующий в данный момент времени величины эдс и тока в фазах обмотки синхронного генератора.

Апериодические составляющие токов в фазах статора создают неподвижное в пространстве магнитное поле, которое пересекает вращающийся ротор. В результате в обмотках ротора возникают периодические эдс и токи. Ротор несимметричен по осям d и q из-за разных величин воздушного зазора в явнополусных машинах, а также расположения по продольной оси обмотки возбуждения. В апериодическом токе якоря появляется переменная составляющая двойной частоты, которая описывается выражением

$$i_{KA} = -\frac{E_m}{2} \left(\left(\frac{1}{x''_d} + \frac{1}{x''_q} \right) \cos \alpha_0 + \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x''_q} \right) \cos(2\omega t + \alpha_0) \right) e^{\frac{t}{T_a}}, \tag{2.59}$$

где x''_q – поперечное сверхпереходное индуктивное сопротивление обмотки якоря; T_a – постоянная времени апериодического тока якоря.

$$T_a = \frac{(x''_d + x''_q)}{\omega r_a}. \tag{2.60}$$

Величины x''_d и x''_q определяются экспериментально. При наличии успокоительной обмотки $x''_d \approx x''_q$. Выражение (4.10) примет вид

$$i_{KA} = -\frac{E_m}{x_d''} e^{-\frac{t}{T_a}} \cos \alpha_0. \quad (2.61)$$

Выражение (4.8), характеризующее полный ток короткого замыкания, с учетом (4.9) и (4.12) запишется как

$$i_K = i_{KI} + i_{KA} \approx \left(\left(\frac{E_m}{x_d''} - \frac{E_m}{x_d'} \right) e^{-\frac{t}{T_d''}} + \left(\frac{E_m}{x_d'} - \frac{E_m}{x_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} + \frac{E_m}{x_d} \right) \times \\ \times \cos(\omega t + \alpha_0) - \frac{E_m}{x_d''} e^{-\frac{t}{T_a}} \cos \alpha_0. \quad (2.62)$$

Значение тока i_K максимально в той фазе, где $\alpha_0 = 0$ (примерно через полпериода после начала короткого замыкания). Это значение называют ударным током

$$I_{y\Delta} = 1,05 \cdot 1,8 \sqrt{2} \frac{U_{aH}}{x_d''}, \quad (2.63)$$

где коэффициенты 1,05 и 1,8 учитывают затухания токов в обмотках и возможность работы при повышенном напряжении [2, 16].

Значение ударного тока не должно превышать амплитуду номинального тока статора более чем в 15 раз. При этом установившийся ток короткого замыкания $I_{K\ ycm}$ превышает номинальный ток примерно в 1,5 раза у турбогенераторов и примерно в 2,5 раза у гидрогенераторов. Кратность ударного тока не ограничивается. Синхронные машины должны выдерживать ударный ток короткого замыкания при напряжении холостого хода, равном 105% номинального. Значения $I_{K\ ycm}$ могут оказаться меньше номинального. Это вызвано размагничивающим действием реакции якоря при установившемся коротком замыкании. Для ограничения ударного тока в цепи якоря применяют реакторы. Нагрев обмоток, вызванный неустановившимися токами короткого замыкания, невелик. Он опасен, когда ток $I_{K\ ycm}$ выше номинального и ко-

роткое замыкание долго не устраняется. При замыкании витков внутри обмотки ток в них достигает большой величины и долго не затухает. В результате изоляция прогорает и происходит замыкание короткозамкнутой секции машины на корпус [2, 16].

При внезапном коротком замыкании синхронного генератора возникают значительные электромагнитные силы. Они представляют опасность для лобовых частей обмоток статора. Электромагнитные моменты, действующие на ротор и статор, могут превышать значения для номинального режима в 10 раз. Это необходимо учитывать при механических расчетах деталей машины и надежности ее крепления к фундаменту [2, 16].

2.16.2. Гашение магнитного поля.

При коротких замыканиях во внешней цепи срабатывает релейная защита, которая отключает синхронный генератор от нагрузки или сети. При внутренних коротких замыканиях отключение от сети не ликвидирует этот режим, поскольку в обмотке статора индуцируется эдс и по ней протекает большой ток. Для устранения режима короткого замыкания необходимо резко уменьшить магнитный поток машины, т.е. прекратить прохождение тока по обмотке возбуждения. Эту операцию называют гашением магнитного поля. На практике применяются способы гашения магнитного поля, которые обеспечивают уменьшение тока возбуждения с ограниченной скоростью. Такое ограничение предотвращает возникновение в обмотке возбуждения чрезмерных перенапряжений. Гашение поля осуществляется двумя способами. Первый заключается в отключении обмотки возбуждения от источника питания и замыкании ее на гасящий резистор, который рассчитывается на длительный ток. Его сопротивление превышает сопротивление обмотки возбуждения в несколько раз. Второй способ заключается в том, что скорость уменьшения тока возбуждения ограничивается путем увеличения времени горения дуги в автомате гашения поля (АГП). Это достигается настройкой данного аппарата и выбором конструкции дугогасительной камеры. В обоих способах изоляция обмотки возбуждения должна быть усилена. Гашение по-

ля уменьшает время, в течение которого по обмотке проходит ток короткого замыкания. Это снижает вероятность повреждения машины этим током [16].

4.5.3. Колебания синхронных машин.

При резких изменениях нагрузки синхронной машины, работающей параллельно с сетью, возникают колебания ротора около установившегося значения угла θ . Они называются качаниями. Например, генератор подключен к сети и работает под нагрузкой, развивая момент $M_1 = M_{\text{вн1}}$. Этой нагрузке соответствует угол θ_1 (рис. 2.45).

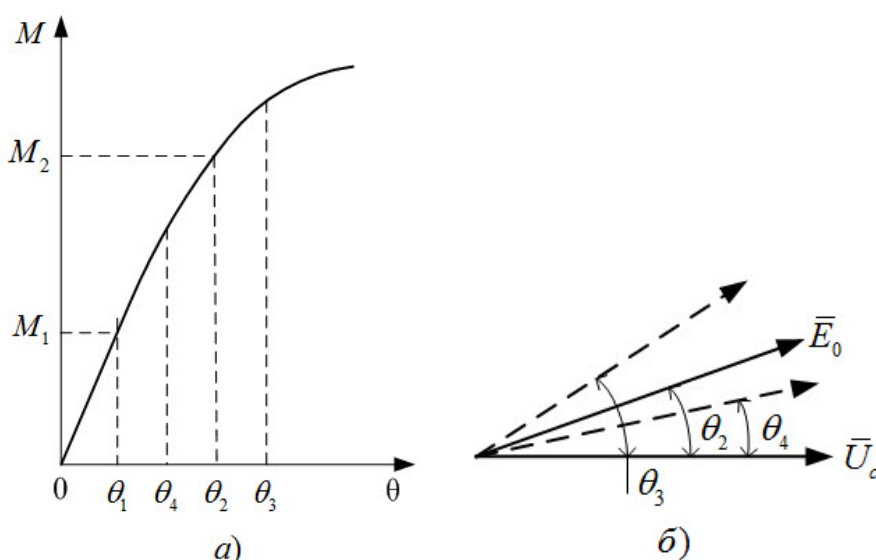


Рис. 2.45. Угловая характеристика (а) синхронного генератора при качаниях ротора и векторная диаграмма (б)

При резком увеличении внешнего момента до величины $M_{\text{вн2}}$ в генераторе возрастает отдаваемая мощность. Угол θ постепенно возрастает до величины θ_2 . Он соответствует новому значению электромагнитного момента $M_2 = M_{\text{вн2}}$. Однако из-за инерции вращающихся масс машины и приводного двигателя ротор повернется на угол $\theta_3 > \theta_2$. Затем под действием синхронизирующего момента ротор начинает поворачиваться в сторону уменьшения угла θ . Силы инерции и в этом случае помешают ему остановиться в положении, соответствующем углу θ_2 . Они переведут ротор в положение

$\theta_4 < \theta_2$. Затем угол θ будет снова возрастать. Ротор совершает колебательные движения (качания) около среднего положения θ_2 , в котором вращающий и электромагнитный моменты уравниваются друг друга. При качаниях из-за инерции ротора угол θ может превысить значение $\theta_{кр}$. В результате машина выпадает из синхронизма [2, 9].

В явнополюсных машинах значительное уменьшение колебаний достигается применением демпферной обмотки. В ее стержнях при изменении частоты вращения ротора индуцируется эдс, по ним проходит ток и возникают потери энергии. Преимущественно это магнитные потери от вихревых токов в сердечнике ротора. Взаимодействие этих токов с магнитным полем статора способствует затуханию качаний. В неявнополюсных машинах колебания устраняются лишь действием вихревых токов в сердечнике ротора [2].

Колебания ротора бывают собственными и вынужденными. Первые связаны с изменением вращающего момента приводного двигателя, изменением нагрузки генератора. Особенно часто такие колебания возникают при холостом ходе, когда на валу нет внешнего момента. Вторые – из-за неравномерного вращения ротора. При совпадении частот колебаний происходит резонанс и параллельная работа генераторов невозможна. Изложенное выше относится и к синхронным двигателям [2].

2.17. Несимметричные режимы работы синхронных генераторов

Несимметрия фазных токов синхронных генераторов вызвана различными однофазными нагрузками (осветительные сети, тяговые подстанции, отдельные мощные приемники и т.д.). Анализ несимметричных режимов производится методом симметричных составляющих. При этом трехфазная несимметричная система токов \bar{I}_A , \bar{I}_B и \bar{I}_C разлагается на системы токов прямой, обратной и нулевой последовательностей. Система токов прямой по-

следовательности \bar{I}_{A1} , \bar{I}_{B1} и \bar{I}_{C1} создает в трехфазной синхронной машине магнитодвижущую силу якоря, которая вращается синхронно с ротором. Индуктивное сопротивление фазы для токов прямой последовательности $x_{np} = x_c$.

Система токов обратной последовательности \bar{I}_{A2} , \bar{I}_{B2} и \bar{I}_{C2} создает магнитодвижущую силу якоря, которая вращается в сторону, противоположную вращению ротора. Оно индуцирует в обмотке возбуждения и демпферной обмотке эдс с частотой, превышающей в два раза частоту эдс обмотки якоря. Токи двойной частоты в обмотках и в массивном роторе вызывают дополнительные потери. Это может вызвать их опасный нагрев и снизить КПД машины. Увеличение сечения стержней демпферной обмотки для снижения активного сопротивления и потерь не всегда эффективно, поскольку при двойной частоте имеет место поверхностный эффект. Нагрев ротора и может вызвать его деформацию и повредить изоляцию обмотки возбуждения. В результате взаимодействия потока возбуждения и потока обратной последовательности статора, поля прямой последовательности статора и поля токов двойной частоты ротора возникают знакопеременные колебательные моменты. Они действуют на статор и ротор, вызывают шум машины и вибрацию. Снижается механическая прочность отдельных деталей, развиваются дефекты в них.

Система токов нулевой последовательности \bar{I}_{A0} , \bar{I}_{B0} и \bar{I}_{C0} совпадают во всех трех фазах магнитодвижущие силы, которые совпадают по времени. Влияние токов нулевой последовательности на процессы, протекающие в машине, незначительно.

Искажение симметрии напряжений происходит при несимметричной нагрузке. Она определяется токами обратной последовательности, которые вызывают в фазах обмотки статора падения напряжения. Их векторы ориентированы относительно напряжений прямой последовательности в разных фазах неодинаково. Напряжения более загруженных фаз будут меньше. Это

ухудшает условия работы приемников, особенно асинхронных двигателей. В синхронных машинах с демпферными обмотками и массивными роторами потоки обратной последовательности статора компенсируются потоками, которые индуцируются в роторе токами двойной частоты.

При несимметричной нагрузке синхронного генератора возникают высшие гармоники, искажающие форму кривой тока в обмотке статора. При наличии в ней емкостей (длинные линии электропередачи, батареи конденсаторов) может наступить резонанс напряжений. На зажимах генератора возникают напряжения повышенной частоты, действие которых может привести к повреждению изоляции. При наличии демпферных обмоток форма тока приближается к синусоиде и снижается уровень опасных перенапряжений.

Допустимая несимметрия нагрузки ограничивается необходимостью предотвращения недопустимых перегрева ротора и вибрации машины. Длительная работа синхронных генераторов с несимметричной нагрузкой допускается, если токи фаз не превышают номинальных значений и разность токов в фазах не превышает 10% номинального тока фазы.

Система токов прямой, обратной и нулевой последовательностей используется также для определения токов аварийного короткого замыкания. При одно- и двухфазном замыкании ток больше, чем при трехфазном. Это связано с размагничивающим действием реакции якоря каждой фазы машины. При аварийных несимметричных коротких замыканиях возникают апериодическая и периодическая составляющие тока. Определение результирующего тока короткого замыкания при несимметричных режимах производится так же, как и при трехфазном коротком замыкании [2, 9].

2.18. Эксплуатация синхронных машин

2.18.1. Нормальные режимы работы и допустимые перегрузки генераторов.

Нормальными режимами генератора являются такие режимы, при которых он работает с номинальными параметрами, указанными в паспортных данных, или с допустимыми по стандартам или техническим условиями отклонениями. Основными параметрами генератора являются: полная мощность, напряжение и ток статора, ток ротора, коэффициент мощности, частота, температура и давление окружающей среды. При эксплуатации генераторов пользуются так называемой режимной картой. В нее заносятся значения длительно допустимых токов статора и ротора в зависимости от значений температуры и давления охлаждающих агентов (воздуха, водорода, воды). Составляя режимную карту, исходят из соображений обеспечения нормального режима работы и возможности регулирования параметров генератора. Например, токи статора и ротора должны быть снижены, если температура охлаждающей среды или давление газа отличаются от номинального в сторону ухудшения охлаждения; если температура охлаждающей среды ниже номинальной, то разрешается повысить мощность генератора. Следует также контролировать чистоту охлаждающего агента и следить за работой системы охлаждения и смазки [12].

Все генераторы допускают работу с номинальной мощностью при изменении напряжения в пределах $\pm 5\%$ от номинального значения и допустимых в эксплуатации изменениях частоты. Длительно допустимые отклонения напряжения не должны превышать $\pm 10\%$ номинального. При отклонении напряжения свыше $\pm 5\%$ полная мощность генератора уменьшается согласно указанию завода изготовителя или на основании испытаний. Повышение напряжения свыше 105% номинального связано с повышением тока возбуждения и магнитной индукции генератора. Это вызывает повышенный нагрев стали статора, возрастание дополнительных потерь в роторе и в конструктивных элементах статора. Чтобы не превысить нагрева обмотки ротора и стали

статора сверх допустимого в эксплуатации, нагрузка генератора при повышении напряжения сверх 105% должна понижаться. Уменьшение мощности генератора при снижении напряжения ниже 95% номинального вызвано тем, что повышать ток свыше 105% номинального недопустимо.

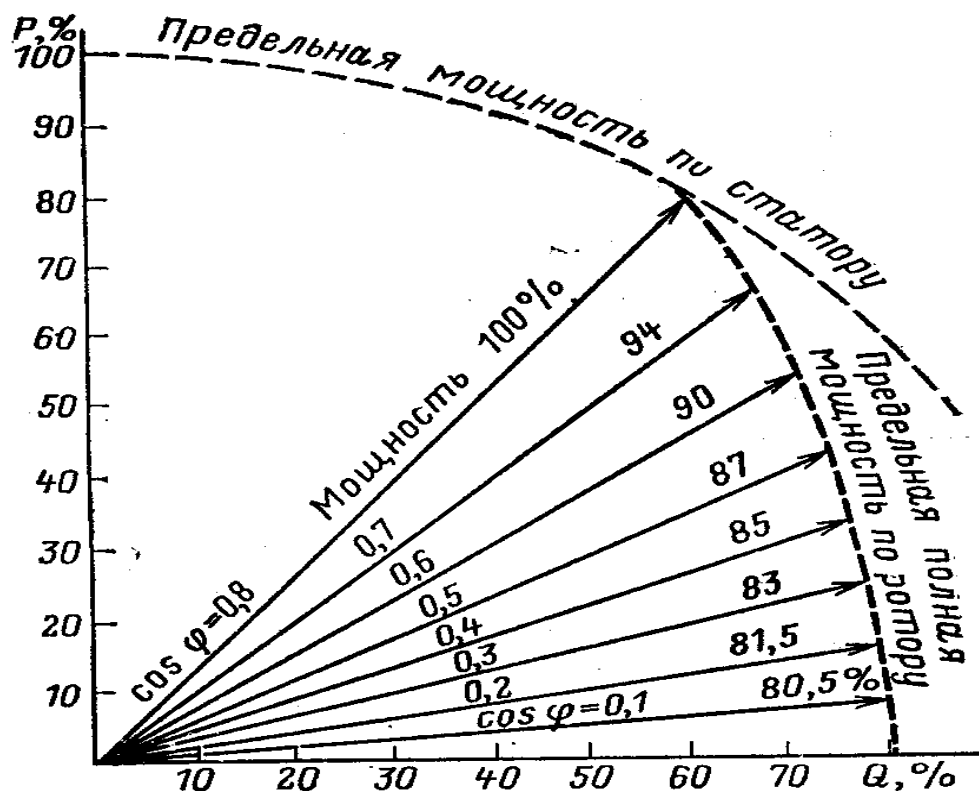


Рис. 2.46. Диаграмма мощности синхронного генератора

Повышение напряжения свыше 110% недопустимо из-за резкого усиления местных перегревов активной стали сердечника статора в результате роста при этом магнитного потока рассеивания.

При работе генератора с различными коэффициентами мощности его полная мощность ограничивается следующими параметрами (рис. 2.46) [1, 12]:

- в зоне перевозбуждения при коэффициенте мощности меньшего номинального – нагревом обмотки ротора, поскольку для увеличения реактивной нагрузки необходимо увеличивать ток ротора;
- в зоне номинального значения коэффициента мощности - нагревом обмотки

статора или допустимой мощностью приводного агрегата;

- в зоне недовозбуждения – мощностью приводного агрегата, током статора, нагревом торцевых элементов сердечника ротора.

Допустимая длительная нагрузка при повышении коэффициента мощности от номинального до единицы для генераторов с непосредственным охлаждением должна определяться на основании специальных испытаний или директивных материалов с учетом обеспечения устойчивости параллельной работы в сети. Для генераторов с косвенным охлаждением разрешается длительная работа при повышении коэффициента мощности от номинального до единицы с сохранением номинального значения полной мощности.

При регулярной работе генератора в режимах недовозбуждения должно быть обеспечено автоматическое ограничение минимального тока возбуждения для исключения потери устойчивости в случаях внезапного повышения напряжения в сети.

Параллельная работа двух соизмеримых по мощности генераторов должна обеспечивать условие $U_c = const$, а также постоянство коэффициента мощности нагрузки $\cos\varphi_{нг}$. Для соблюдения условия $U_c = const$ токи возбуждения требуется менять одновременно – увеличивать у одного генератора и уменьшать у другого. При этом коэффициент мощности отдельных генераторов должен быть равен $\cos\varphi_{нг}$. При параллельной работе на сеть ограниченной мощности для повышения напряжения в сети необходимо увеличивать токи возбуждения всех генераторов. Для перераспределения общей реактивной мощности между отдельными генераторами при $U_c = const$ нужно токи возбуждения одних генераторов увеличивать, а других – уменьшать. При увеличении вращающих моментов или мощностей приводных агрегатов, то их скорость вращения и частота сети f_c будут возрастать. Повышается мощность потребителей. Повышение частоты будет происходить до тех пор, пока не наступит баланс мощностей между приводными агрегатами и потребителями с учетом потерь в генераторе и сети. Для сохранения усло-

вия $f_c = const$ при увеличении мощности приводного агрегата одного генератора мощность приводного агрегата второго генератора нужно уменьшить. В результате происходит перераспределение активных мощностей. Чтобы осуществить перевод нагрузки с одного генератора на другой требуется одновременно увеличить момент приводного агрегата нагружаемого генератора. Для сохранения коэффициента мощности постоянным одновременно надо увеличивать ток возбуждения нагружаемого генератора и уменьшать его у генератора разгружаемого. Скорость подъема активной нагрузки после включения турбогенератора в сеть определяется допустимой скоростью набора нагрузки на турбину согласно инструкциям для каждого типа турбогенератора. Ограничения по скорости набора реактивной нагрузки связаны с конструкцией и способом охлаждения машины [12].

При недостатке генерируемой активной мощности в системе частота f_c будет падать. Это нарушит нормальное электроснабжение потребителей. В результате некоторая их часть отключается от сети устройством автоматической частотной разгрузки (АЧР). При недостатке генерируемой реактивной мощности в системе (невозможность поддерживать на необходимом уровне реактивную мощность генераторов электростанций и синхронных компенсаторов во избежание их перегрузки током) напряжение системы будет падать. Поэтому сохранение в системе баланса активных и реактивных мощностей является важной задачей [12].

В аварийных условиях генераторы и синхронные компенсаторы разрешается кратковременно перегружать по токам статора и ротора согласно техническим условиям. Кратности перегрузки по токам статора и ротора указываются в справочных данных. Допустимая перегрузка по току возбуждения у машин с косвенным охлаждением обмоток определяется допустимой перегрузкой статора. Длительность перегрузок генераторов и компенсаторов при авариях в энергосистеме ограничивается недопустимостью перегрева обмоток по условию сохранения электрических и механических свойств изоляции, а также превышением температуры меди обмоток и корпуса ротора [12]. Для

поддержания необходимого уровня напряжения в системе генераторы иногда используют как синхронные компенсаторы. При этом в приводной агрегат прекращается подача пара, воды и др. [12].

2.18.2. Асинхронные режимы синхронных машин.

При эксплуатации случается выпадение из синхронизма отдельных машин. При этом их роторы начинают вращаться относительно поля статора асинхронно со скольжением s . Выпадение из синхронизма происходит вследствие перегрузки машин, значительного падения напряжения в сети, потери возбуждения, ошибочного срабатывания автомата гашения поля. При выпадении из синхронизма синхронная машина ведет себя подобно асинхронной, но из-за различия конструкций ротора и наличия в общем случае тока возбуждения асинхронный режим синхронной машины имеет ряд особенностей. Асинхронные режимы возбужденной и не возбужденной синхронной машины различаются [1].

При потере возбуждения у синхронного генератора нарушается равновесие между уменьшающимся до нуля синхронным электромагнитным моментом и вращающимся моментом приводного агрегата. Частота вращения генератора возрастает сверх синхронной. Под воздействием магнитного поля от тока статора в роторе и обмотке возбуждения при ее замыкании на цепь возбудителя или резистор самосинхронизации появятся токи с частотой скольжения. При малых скольжениях поверхностный эффект в корпусе ротора у турбогенераторов проявляется слабо, активное сопротивление корпуса ротора мало. Магнитный поток от этих токов, взаимодействуя с магнитным полем статора, создает тормозной асинхронный момент. В результате генератор выдает активную мощность в сеть. Асинхронный тормозной момент с увеличением скольжения ротора возрастает и может достигать больших значений. Турбогенераторы могут развивать при этом относительно большую мощность. Потери в роторе $\Delta p_{об2} = sP_{эм}$ малы и не представляют опасности в отношении его нагрева. Когда он станет равным вращающему моменту приводного агрегата, дальнейшее повышение скольжения прекратится и

наступит установившийся асинхронный режим. Допустимая мощность турбогенератора в асинхронном режиме ограничивает ток статора, который из-за большого тока намагничивания достигает номинального значения при меньшей, чем в нормальном режиме, активной мощности. Для уменьшения активной мощности сокращается поступление пара в турбину [12].

Асинхронный режим работы генератора при потере возбуждения используют на время, которое необходимо для перевода на резервное возбуждение или перевести нагрузку на другие генераторы. В большинстве случаев это позволяет избежать аварийных остановок генераторов. При этом потери в роторе и статоре не должны превышать потерь в номинальном режиме и потребление реактивной мощности с точки зрения работы энергосистемы допустимо. Для турбогенераторов в зависимости от условий охлаждения активная нагрузка должна быть не выше 40 – 60% номинальной. Продолжительность режима без возбуждения составляет 15 – 30 мин. Время разгрузки генераторов в зависимости от их мощности составляет 0,5 – 2 мин. При потере возбуждения необходимо снизить активную нагрузку до допустимых значений и попытаться восстановить возбуждение. Если сделать это не удастся, то следует перейти на резервное возбуждение с отключением на время перехода аппарата гашения поля. Работа гидрогенераторов в асинхронном режиме не допускается. При потере возбуждения они отключаются от сети [12].

Генераторы выпадают из синхронизма при недостаточном возбуждении или в результате аварии в системе. Для восстановления синхронизма увеличивают ток возбуждения и снижают активную нагрузку. Генератор отключают от сети, если он не войдет в синхронизм.

При асинхронном пуске синхронных двигателей и компенсаторов пусковой момент $M_{II} \geq (0,8 - 1,0) M_H$. Для лучшего втягивания в синхронизм требуется, чтобы момент вхождения $M_{ex} \approx M_{II}$. Увеличение M_{II} достигается увеличением сопротивления пусковой обмотки, а для увеличения M_{ex} надо его уменьшить. Для запуска двигателей необходимо определить нагруз-

ку на валу, при которой пуск и вхождение в синхронизм с сетью были бы возможны [8].

2.18.3. Самовозбуждение синхронных машин.

Самовозбуждение возможно при наличии в цепях статора емкостей (между проводами длинных линий передачи, проводами и землей, батареи конденсаторов для продольной и поперечной компенсации индуктивного сопротивления линий). Оно происходит, когда на выводах вращающейся машины возникает напряжение при отсутствии тока возбуждения. Магнитное поле в синхронной машине при этом создается емкостным током I , который машина отдает в сеть.

При самовозбуждении ротор синхронной машины может вращаться синхронно с магнитным полем статора (синхронное самовозбуждение) или асинхронно с ним (асинхронное самовозбуждение). Схема работы синхронного генератора на емкостную нагрузку показана на рис. 2.47, а.

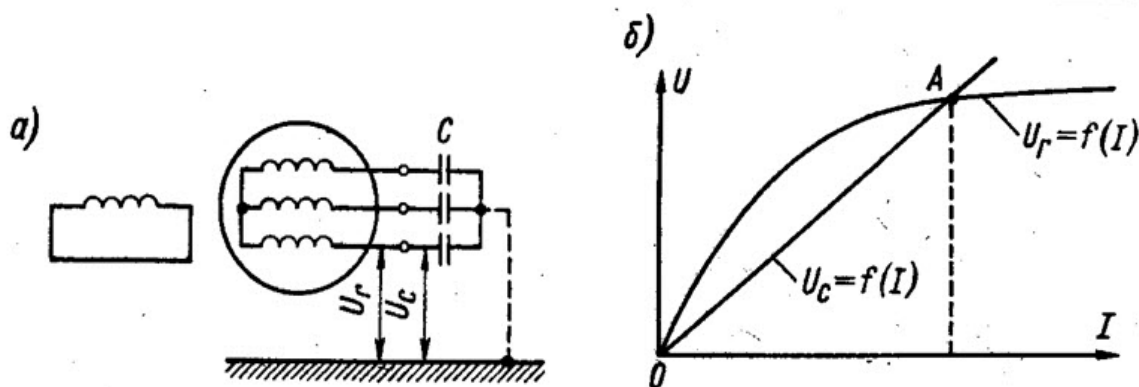


Рис. 2.47. Схема работы синхронного генератора на емкостную нагрузку (а) и его характеристики при синхронном самовозбуждении (б)

При синхронном самовозбуждении остаточный магнитный поток во вращающемся роторе наводит эдс E в обмотке якоря, которая вызывает в ней емкостной ток I . Этот ток создает намагничивающую реакцию якоря. В результате магнитный поток, эдс E и ток I увеличиваются. Зависимость

напряжения генератора U_G от емкостного тока якоря I показана на рис. 5.2,б. Она повторяет форму характеристики холостого хода.

При условии $r_a = 0$ напряжение $U_G = x_d I$. Под влиянием насыщения величина x_d меняется вдоль кривой $U_G = f(I)$. Зависимость напряжения на конденсаторах U_C от тока $U_C = f(I)$ линейная.

$$U_C = x_C I = \frac{1}{\omega C} I. \quad (2.64)$$

Самовозбуждение возможно при наличии остаточного магнитного потока, а также когда $U_G > U_C$ и $x_d > x_C$. Процесс заканчивается в точке A на рис. 2.47,б, когда $U_G = U_C$. Самовозбуждение невозможно, когда $x_{d\infty} < x_C$ и кривая U_C пойдет выше кривой U_G .

Реактивная мощность в режиме самовозбуждения

$$Q = m U_G I = m \frac{U_G^2}{x_d}. \quad (2.65)$$

Зарядная мощность генератора и зарядная мощность присоединенной к нему линии передачи равны

$$Q_{3Г} = m \frac{U_G^2}{x_{d\infty}}; \quad (2.66)$$

$$Q_{3Л} = m \frac{U_H^2}{x_C} = m U_H^2 \omega C. \quad (2.67)$$

Самовозбуждение невозможно, если $Q_{3Г} > Q_{3Л}$. Включение на параллельную работу в сеть нескольких генераторов снижает возможность возникновения этого явления. В реальных условиях $r_a \neq 0$ и генератор должен при синхронном самовозбуждении развивать активную мощность. Это возможно только явнополусных машин за счет возникающих в них реактивных

моментов как при протекании тока в обмотке возбуждения I_B , так и при его отсутствии. Синхронное самовозбуждение при $r_a \neq 0$ и $I_B = 0$ у неявнополюсных машин не происходит. При больших значениях r_a синхронное самовозбуждение невозможно, т.к. при этом активная мощность окажется большей, чем может развить явнополюсная машина в устойчивом синхронном режиме работы без возбуждения. Синхронное самовозбуждение происходит при условии $x_d > x_C > x_q$.

Асинхронное самовозбуждение синхронных машин происходит при больших емкостях в цепи якоря. На роторе должны быть замкнутые обмотки или контуры тока, в которых при асинхронном вращении ротора относительно поля якоря индуцируются токи. В зависимости от соотношения сопротивлений емкостных элементов, сверхпереходных и переходных сопротивлений машины ток якоря имеет постоянную амплитуду или пульсирует.

Самовозбуждение нежелательно, поскольку развивается неуправляемо, а напряжения и токи при этом могут достичь опасных значений [8].

2.19. Испытания, проверки и ремонт синхронных машин

Программа приемо-сдаточных испытаний включает в себя следующие операции [6]:

- измерения сопротивления изоляции обмоток относительно корпуса машины и между обмотками и сопротивления обмоток постоянному току в практически холодном состоянии;
- испытания при повышенной частоте вращения, изоляции обмоток относительно корпуса и между обмотками на электрическую прочность и межвитковой изоляции обмоток переменного тока на электрическую прочность;
- определение характеристик холостого хода, установившегося трехфазного короткого замыкания и третьей гармоники тока (при работе машины с обмоткой статора, соединенной в треугольник);

- измерение тока возбуждения в режиме ненагруженного перевозбужденного двигателя при номинальном напряжении и номинальном токе статора и определение U-образной характеристики;
- определение номинального тока возбуждения, номинального изменения напряжения и регулировочной характеристики;
- испытания на кратковременную перегрузку по току;
- определении кпд.

В стандартах на отдельные виды синхронных машин приведены дополнительные требования по программе испытаний.

Осмотры и проверки синхронных генераторов проводятся персоналом электрического цеха станции перед пуском и во время работы. Перед пуском генератора после ремонта проверяется завершенность всех работ и наличие записи в журнале о завершении работ. Проверяется состояние щеточно-контактного аппарата синхронной машины, состояние возбудителя, отсутствие следов нагрева контактных соединений, загрязнение изоляции щеточных контактов, работа систем охлаждения и подачи масла и др. Измеряется сопротивление изоляции обмоток статора и ротора. При осмотре генератора находящегося в работе проверяют искрение под щетками, вибрацию и температуру подшипников, параметры систем охлаждения и подачи масла и др. При обнаружении ненормальных моментов в работе генератора следует выяснить причины и по возможности принять меры к их устранению. Если обнаружены неисправности, которые сменный персонал сам устранить не может, то об их наличии сообщают руководству цеха [6].

Наблюдение за работой генератора ведется по измерительным приборам и визуально. Контролируются электрические параметры генератора, температура стали, обмотки статора, охлаждающей среды, масла, подшипников. Они записываются не реже двух раз в смену. Осмотр генератора проводится в установленные сроки.

Капитальный и текущий ремонты синхронных машин совмещаются с соответствующими ремонтами их приводных агрегатов. Первый ремонт

впервые введенных в работу машин проводится не позднее 8000 часов работы после ввода в эксплуатацию. В этот период происходит приработка различных частей, деталей и выявляется большая часть дефектов, допущенных при изготовлении [11]. Текущий ремонт проводится, как правило, по мере необходимости не реже 1 раза в год. Его объем определяется с учетом состояния генератора.

2.20. Контрольные вопросы к главе 2

Поясните принцип действия и устройство синхронных машин.

2. В чем отличие явнополюсных и неявнополюсных машин?
3. Как устроена демпферная обмотка синхронной машины?
4. В чем отличие турбогенераторов и гидрогенераторов?
5. Что такое реакция якоря синхронных машин?
6. Постройте упрощенную векторную диаграмму синхронного генератора.
7. Приведите основные характеристики синхронного генератора.
8. Как строится диаграмма Потье?
9. Как рассчитывается электромагнитный момент синхронной машины?
10. Что называют критическим углом нагрузки явнополюсных синхронных машин?
12. Постройте упрощенную векторную диаграмму синхронного двигателя.
13. Как осуществляется пуск синхронного двигателя?
14. Какие механические характеристики имеет синхронный двигатель при частотном управлении?
15. Какие характеристики синхронного генератора называют U – образными?
16. Что называют синхронным компенсатором?
17. Что происходит при внезапном коротком замыкании синхронного генератора?