

1 (50). Общие сведения о машинах переменного тока. Конструктивные особенности, классификация, области применения.

Машины переменного тока являются большим классом машин применяемые в производстве. Делятся на: синхронные и асинхронные. Наибольшее распространения получили трёхфазные машины. Машины асинхронные, как двигатель, синхронные, как генератор. Асинхронные машины установлены в 70 % электропривод. общепромышленных механизмов. Они различаются конструкцией ротора и подразделяются на: АМФ – асинхронные машины с фазным ротором, АМКЗР – асинхронные машины с коротко замкнутым ротором.

Коротко замкнутые машины просты по конструкции, надёжны, и используются в большинстве электроприводов общепромышленных механизмов.

Асинхронный двигатель был изобретён в 1889 г. М.О. Доливо-Добровольским.

В трёхфазном варианте нормальная работа асинхронной машины возможно при наличии вращающегося магнитного поля. Машины нормального исполнения имеют неподвижный статор с трёхфазной обмоткой, которая соединяется в звезду или треугольник. Вращающийся ротор фазных машин тоже имеет трёхфазную обмотку соединённую в звезду. У машин КЗ обмотка состоит из стержня и 2 колец, образующих «беличью клетку».

(2) 51. Принцип действия асинхронного двигателя.

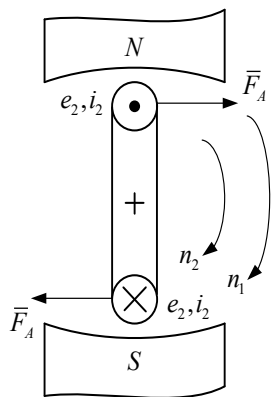


Рис.4.3. Принцип действия асинхронного двигателя

При неподвижном роторе магнитное поле, представленное в виде постоянного магнита, вращается в зазоре с частотой n_1 . Оно пересекает проводники короткозамкнутого витка на роторе и индуцирует в них эдс e_2 . Направление действия эдс в данный момент времени определяется по правилу правой руки. Под действием e_2 возникает ток i_2 , имеющий такое же направление, что и вызвавшая его эдс. Взаимодействие тока i_2 с магнитным полем статора приводит к образованию силы \vec{F}_A . Направление действия \vec{F}_A определяется по правилу левой руки. Сила \vec{F}_A образует электромагнитный момент M , под действием которого ротор начинает вращаться с частотой n_2 . Направления вращения магнитного поля статора и ротора совпадают. Эдс и ток ротора, электромагнитный момент при неподвижном роторе имеют максимальное значение. При увеличении n_2 эти параметры уменьшаются, т.к. магнитное поле пересекает проводники ротора с уменьшающейся частотой. При условии $n_2 = n_1$ асинхронный двигатель устойчиво работать не может, поскольку эдс в обмотке ротора перестает индуцироваться, исчезает ток и момент, снижается частота вращения ротора. При условии $n_2 < n_1$ в роторе появляются эдс и ток, возникает момент. Он направлен на преодоление сил трения или иных воздействий, приложенных к валу. Следовательно, асинхронный двигатель работает с частотой вращения, которая определяется нагрузкой на его валу. Условие $n_2 < n_1$ представляет собой основное отличие асинхронных машин от синхронных машин, для которых $n_2 = n_1$.

Величина, отражающая условие $n_2 \neq n_1$, называется скольжением $s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$.

Частота вращения ротора n_2 определяется как: $n_2 = n_1(1 - s)$

Номинальное скольжение s_H соответствует номинальной частоте вращения двигателя n_{2H} . Частота эдс и тока

в обмотке ротора при его вращении пропорциональна частоте вращения магнитного поля статора относительно ротора $n_s = n_1 - n_2$; $f_2 = \frac{p(n_1 - n_2)}{60} = f_1 s$

Частота вращения магнитодвижущей силы статора относительно ротора равна $n_2 = \frac{60f_2}{p} = n_1 s$

(3) 52. Конструкция асинхронной машины.

Асинхронные машины делятся на два типа, которые отличаются машины с короткозамкнутым ротором и машины с фазным ротором.

Статор асинхронной машины состоит из корпуса, сердечника и обмотки. Корпус изготавливают стальным, чугунным, алюминиевым, пластмассовым. Снаружи располагают коробку, в которую помещают концы обмоток статора для соединения между собой и подключения к сети. Сердечник набирают из покрытых лаком листов электротехнической стали толщиной 0,35-0,5 мм. На внутренней поверхности сердечника выполнены пазы, в которые уложена трехфазная обмотка. Обмотка выполняется по шаблону изолированным медным или алюминиевым проводом. Она укладывается в пазах таким образом, чтобы пространственный сдвиг между каждой фазой составлял $120^\circ_{эл}$ для создания кругового поля асинхронной машины. Обмотка каждой фазы содержит несколько катушек, которые могут соединяться последовательно или параллельно. В зависимости от числа катушек на одну фазу, способа их соединения получают обмотки с различным числом пар полюсов p . Фазы могут быть соединены по схемам «звезда» или «треугольник». Фазное напряжение обмотки статора должно оставаться постоянным. Части витков, расположенные в пазах, называют активными сторонами, поскольку в них индуцируются эдс. Части витков, соединяющие активные стороны и расположенные на торцевых частях статора или ротора, называют лобовыми соединениями.

Ротор асинхронной машины состоит из вала, сердечника и обмотки. Вал изготовлен из стали и закреплен в подшипниковых щитах. На валу закреплен сердечник, на внешней стороне которого выполнены скошенные пазы для обмотки. Сердечники статора и ротора образуют магнитную систему машины. У короткозамкнутых машин обмотка ротора выполнена из алюминия в виде «беличьей клетки». Обмотка ротора в этом случае выполняется путем заливки пазов расплавленным алюминием. Одновременно отливают замыкающие кольца вместе с лопатками для вентиляции. Обмотка фазного ротора имеет конструкцию по аналогии с обмоткой статора. Она содержит то же число пар полюсов p . Применение скошенных пазов ведет к более равномерному распределению магнитного поля в зазоре вдоль активных проводников и снижению шума машины. Концы обмоток фазного ротора соединены в общую точку. Начала обмоток выведены на контактные кольца, расположенные на валу. Контактные кольца выполняются преимущественно из латуни. Они изолированы друг от друга и от вала. К кольцам прижаты щетки, которые посредством отводов от них, можно замыкать накоротко. В цепь ротора можно включать активные, индуктивные, емкостные сопротивления, а также источники эдс. Такие меры позволяют увеличить пусковой момент, понизить пусковые токи, обеспечить плавность пуска двигателя.

(4) 53. Вращающееся поле асинхронной машины (двигательный режим).

Пусть обмотка статора соединена в звезду, сопротивление фаз одинаково, система симметрична. Обмотки трехфазного статора равномерно распределены по его сердечнику. В обмотке статора протекает ток:

$$\begin{aligned} i_A &= I_{Am} \sin \omega t, \\ i_B &= I_{Bm} \sin(\omega t - 120^\circ_{эл}); \\ i_C &= I_{Cm} \sin(\omega t + 120^\circ_{эл}). \end{aligned}$$

Электрические градусы связаны с геометрическими градусами: $\alpha_{эл} = p \alpha_{геом}$, где p – число пар полюсов, количество которых зависит от способа включения обмоток каждой фазы.

Токи каждой фазы создают пульсирующие магнитодвижущие силы, совокупное действие которых приводит к созданию результирующей магнитодвижущей силы, создающей магнитный поток машины. Ее вектор вращается относительно статора.

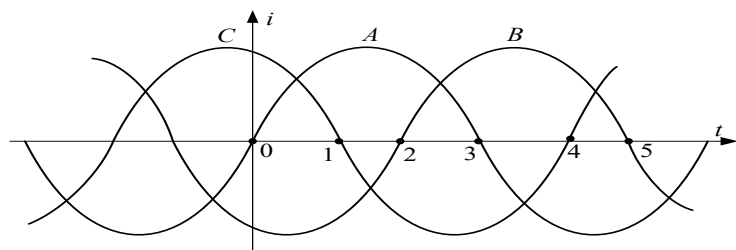


Рис. 4.1. Система трехфазных токов в обмотке статора асинхронного двигателя

Следует определить направление токов всех фазных обмоток в обозначенных точках. При условии $i > 0$ ток протекает от начала обмотки к ее концу. Если $i < 0$, то ток протекает в обмотке от ее конца к началу. Вектор магнитодвижущей силы обмотки статора при переходе от одного указанного момента времени к другому поворачивается на $60^\circ_{эл}$ и совершает полный оборот за период. Частота его вращения (об/мин) равна $n_1 = \frac{60f_1}{p}$ где f_1 – частота тока в обмотке статора, Гц.

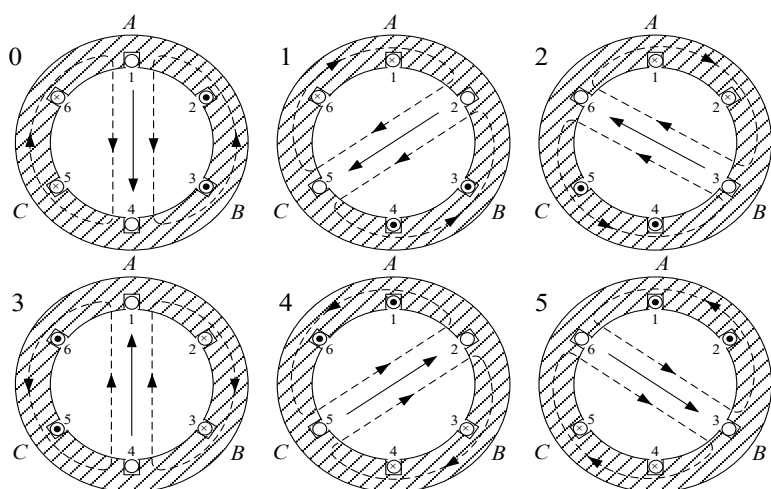


Рис. 4.2. Принцип получения магнитодвижущей силы вращающегося магнитного поля

При повреждениях фазных обмоток (обрыв, ненадежный контакт) поле в зазоре перестает быть круговым. В этих случаях оно имеет эллиптический или пульсирующий характер. Нормальные условия работы асинхронного двигателя нарушаются. Это ведет к ухудшению качества работы приводимых агрегатов и сокращает срок службы самого двигателя.

(5) 54. Режимы работы асинхронной машины. Диапазоны изменения частоты вращения ротора и скольжения. Работа асинхронной машины с заторможенным ротором (режимы холостого хода и короткого замыкания). Операция приведения в асинхронных машинах.

Асинхронные машины работают в 3-х режимах:

- 1) Двигательный режим $0 < \omega < \omega_0, 1 > s > 0$
- 2) Генераторный режим $\omega_0 < \omega < +\infty, 0 > s > -\infty$
- 3) Тормозной режим $0 > \omega > -\infty, 1 < s < +\infty$

В своей теории асинхронная машина имеет много общего с трансформатором, разница только состоит в способе наведения ЭДС во вторичной цепи в обмотке ротора. Х.Х. асинхронной машины организуется путём различ. обмотки ротора у фазных машин, и работы без нагрузки на валу у машин КЗ.

Воздушный зазор между сердечником статора и ротора увеличивает сопротивление магнитной цепи машины. В следствии этого для достижения магнитного потока и создания рабочего момента на валу требуется больший ток Х.Х., чем у трансформатора.

Величину воздушного зазора стараются минимизировать с продолжительн. режимом работы. Воздушный зазор относительно мал, и ток Х.Х. $I_{0A0} = (0,2 \dots 0,4)I_H$

У машин, которые работают с часто меняющимся и ударной нагрузкой воздушный зазор несколько увеличили, поэтому $I_{0A0} = (0,4 \dots 0,75)I_H$, $I_{отр} \leq 0,1I_H$

Асинхронные машины в основном работают с вращающимся ротором. У некоторых машин специального назначения, ротор заторможен. (фазорегулятоор)

Асинхронные машины испытывают в режимах холостого хода для опытного определения тока и потерь холостого

хода. Обмотка статора подключается к источнику синусоидального напряжения U_1 от автотрансформатора или

индукционного регулятора напряжения, что позволяет менять его в широких пределах. Вал машины должен быть

свободным от механической нагрузки. При разомкнутой обмотке ротора под действием напряжения \bar{U}_1 в обмотке

статора протекает ток холостого хода \bar{I}_0 . Он создает магнитный поток $\bar{\Phi}_1$, являющийся совокупностью потоков

рассеивания $\bar{\Phi}_{1S}$ и полезного потока $\bar{\Phi}_{1m}$. Поток $\bar{\Phi}_{1S}$ индуцирует эдс рассеивания $-j\bar{I}_0 x_1$, а поток $\bar{\Phi}_{1m}$ наводит

в обмотках статора и ротора эдс \bar{E}_1 и \bar{E}_2 . Данные процессы позволяют составить систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \bar{U}_1 &= -\bar{E}_1 + j\bar{I}_0 x_1 + r_1 \bar{I}_0 = -\bar{E}_1 + z_1 \bar{I}_0; \\ z_1 &= r_1 + jx_1; \\ \bar{E}_2 &= \bar{U}_2. \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

Для трехфазной асинхронной машины с фазным ротором коэффициент трансформации эдс k_e определяется как среднеарифметическое значение. Оно получено от отношений измеренных фазных напряжений статорной обмотки к фазным эдс роторной обмотки, т.е.:

$$k_{eA} = \frac{U_{AX}}{E_{ax}}; k_{eB} = \frac{U_{BY}}{E_{by}}; k_{eC} = \frac{U_{CZ}}{E_{cz}}; \quad (4.10)$$

$$k_e = \frac{1}{3}(k_{eA} + k_{eB} + k_{eC}). \quad (4.11)$$

Для низковольтных машин (до 660В включительно) величину k_e устанавливают при номинальном напряжении питания, а машин на большее напряжение допустимо выявление k_e при пониженном напряжении [6].

Величины тока и потерь холостого хода определяются по соответствующим характеристикам при номинальном

напряжении U_{1H} . Обмотка фазного ротора замыкается накоротко. В обмотку статора включаются приборы по схеме,

аналогичной схеме рис. 2.2 первичной обмотки трансформатора. Величину напряжения U_1 меняют в диапазоне 0,4–

1,15 U_{1H} [6], фиксируя показания приборов в 6–8 точках. Вычисляются средние значения напряжений и токов по

формулам:

$$U_{лср} = \frac{1}{3}(U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}); \quad (4.12)$$

$$I_{\text{Лср}} = \frac{1}{3}(I_A + I_B + I_C). \quad (4.13)$$

В зависимости от схемы соединения обмотки определяют фазные значения напряжения $U_{1\phi}$ и тока $I_{1\phi}$. При соединении обмотки статора в звезду:

$$U_{1\phi} = U_0 = \frac{U_{\text{Лср}}}{\sqrt{3}}; \quad I_{1\phi} = I_0 = I_{\text{Лср}}. \quad (4.14)$$

Когда обмотки статора соединены в треугольник, то:

$$U_{1\phi} = U_0 = U_{\text{Лср}}; \quad I_{1\phi} = I_0 = \frac{I_{\text{Лср}}}{\sqrt{3}}. \quad (4.15)$$

Мощность, потребляемая машиной в режиме холостого хода P_0 , устанавливается по показаниям ваттметров, включенных согласно схеме, аналогичной схеме рис. 2.2:

$$P_0 = |P'_0 + P''_0| = 3I_0^2 r_1 + \Delta p_{c1} + \Delta p_{\text{мех}}, \quad (4.16)$$

где r_1 – активное сопротивление фазы обмотки статора при нагретой машине сразу после ее отключения от сети, Ом;

$3I_0^2 r_1$ – электрические потери в обмотке статора, Вт; Δp_{c1} – магнитные потери в сердечнике статора, Вт; $\Delta p_{\text{мех}}$ – механические потери, Вт.

Выражение (4.16) можно представить в виде

$$\Delta p_{c1} + \Delta p_{\text{мех}} = \Delta P = P_0 - 3I_0^2 r_1. \quad (4.17)$$

Коэффициент мощности $\cos \varphi_0$ для режима холостого хода:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{3U_0 I_0}. \quad (4.18)$$

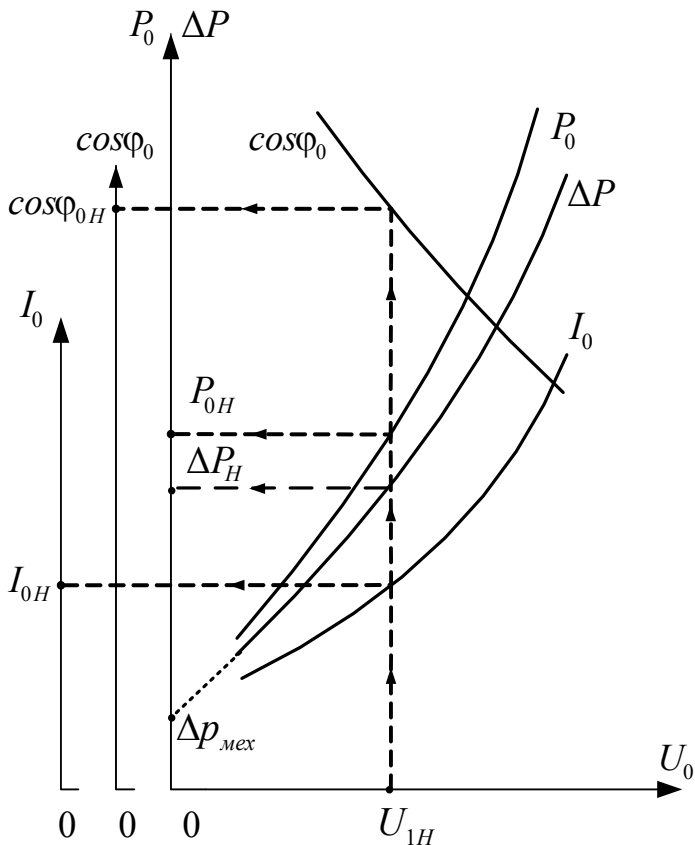


Рис. 4.6. Характеристики асинхронной машины в режиме холостого хода

По характеристикам, показанным на рис. 4.6, при условии $U_0 = U_{1H}$ находят ток I_{0H} , потери P_{0H} и ΔP_H , а также коэффициент мощности $\cos \varphi_{0H}$. Последовательность поиска указанных величин пояснена пунктирными линиями со стрелками. Потери и ток холостого хода, полученные в результате испытаний, должны соответствовать паспортным данным завода-изготовителя или находится в пределах допустимых отклонений от них. Если график $\Delta P = f(U_0)$ продолжить до пересечения с осью ординат ($U_1 = 0$), то получим величину потерь $\Delta p_{\text{мех}}$, которые считаются неизменными. Магнитные потери Δp_{c1} находятся из (4.17) с учетом установленного значения $\Delta p_{\text{мех}}$ [10].

В асинхронных машинах доля тока холостого хода I_0 значительно больше, чем у трансформаторов. Это объясняется наличием воздушного зазора между статором и ротором. В результате возрастает сопротивление магнитной цепи, а для создания заданного потока машины требуется больший ток I_0 . Величина воздушного зазора

различна. Она зависит от мощности машины, а также от режима ее работы. Ток холостого хода тем больше, чем больше величина воздушного зазора. Двигатели электроприводов продолжительного режима работы (вентиляторы, компрессоры и т.п.) имеют ток холостого хода, составляющий 20–30% номинального значения, а двигатели механизмов с частыми пусками и торможениями (крановые электроприводы и т.п.) – до 40–75% номинального значения [2].

Лобовые части обмоток характеризуются повышенными значениями величин сопротивлений r_1 и x_1 . Поэтому при холостом ходе падение напряжения на них у асинхронной машины достигает 5% от номинального значения напряжения (для трансформатора примерно 0,5%). Потребляемая на холостом ходу мощность расходуется в основном на покрытие потерь в стали статора и ротора. В то же время следует учитывать и потери в обмотках машины.

Для трехфазной асинхронной машины при расчете значений сопротивлений z_0 , r_0 и x_0 необходимо принимать во внимание схему соединения статорной обмотки. В случае соединения в звезду:

$$z_0 = \frac{U_{\text{Лср}}}{\sqrt{3}I_{\text{Лср}}}; \quad r_0 = \frac{P_0}{3I_{\text{Лср}}^2}; \quad x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}. \quad (4.19)$$

При соединении обмотки статора в треугольник:

$$z_0 = \frac{\sqrt{3}U_{\text{Лср}}}{I_{\text{Лср}}}; \quad r_0 = \frac{P_0}{I_{\text{Лср}}^2}; \quad x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}. \quad (4.20)$$

Векторная диаграмма и схема замещения асинхронной машины на холостом ходу при разомкнутой обмотке ротора аналогичны векторным диаграммам и схемам замещения трансформатора [1].

4.6. Операция приведения асинхронной машины

Операция приведения выполняется с целью построения схем замещения реальных асинхронных машин, в которых электромагнитные связи между обмотками статора и ротора заменяются электрическими. Будем рассматривать вместо реальной машины приведенную, статорные и роторные обмотки которой имеют одинаковое число витков. Обмотка ротора приводится к обмотке статора, т.е. реальная роторная обмотка с числом витков w_2 пересчитывают в эквивалентную ей обмотку с числом витков w_1 , т.е. $w_2 = w'_2 = w_1$. Число витков роторной обмотки изменяется в k_e раз. Операция приведения не должна сказываться на режиме работы статорной цепи, т.е. в приведенной асинхронной машине остаются те же потоки, мощности, потери. Исходя из указанных особенностей при условии $U_1 \approx E_1$, можно записать следующие зависимости.

Коэффициент трансформации эдс

$$k_e = \frac{E_1}{E_2} = \frac{4,44 f_1 w_1 k_{\text{об1}} \Phi_m}{4,44 f_2 w_2 k_{\text{об2}} \Phi_m} = \frac{w_1 k_{\text{об1}}}{w_2 k_{\text{об2}}}, \quad (4.20)$$

где $k_{\text{об1}}$, $k_{\text{об2}}$ – обмоточные коэффициенты, учитывающие распределение обмоток по пазам статора и ротора, w_1 ,

w_2 – число последовательно соединенных витков в фазных обмотках статора и ротора.

$$E'_2 = E_1 = k_e E_2. \quad (4.21)$$

Электромагнитная мощность машины и ток роторной обмотки определяется выражениями:

$$m_2 E_2 I_2 \cos \psi_2 = m_2 E'_2 I'_2 \cos \psi'_2; \quad \cos \psi_2 = \cos \psi'_2; \quad (4.22)$$

$$I'_2 = I_2 \frac{m_2}{m_1} \cdot \frac{1}{k_e} = I_2 \frac{m_2 w_2 k_{o62}}{m_1 w_1 k_{o61}} = I_2 \frac{1}{k_i}; \quad (4.23)$$

$$k_i = \frac{m_1 w_1 k_{o61}}{m_2 w_2 k_{o62}} = k_e, \quad (4.24)$$

где ψ_2 – угол фазового сдвига между эдс и током роторной обмотки, k_i – коэффициент трансформации токов, m_1 , m_2 – число фаз обмоток.

Приведенная обмотка имеет в k_e раз больше витков, поэтому из условия равенства потерь в реальной и приведенной обмотках, ее активное и реактивное сопротивления в k_e^2 раз больше, чем реальной обмотки:

$$r'_2 = \frac{m_2}{m_1} \cdot \frac{m_1 w_1 k_{o61}}{m_2 w_2 k_{o62}} \cdot \frac{m_1 w_1 k_{o61}}{m_2 w_2 k_{o62}} r_2 = k_e k_i r_2 = k_e^2 r_2; \quad (4.25)$$

$$x'_2 = \frac{m_2}{m_1} \cdot \frac{m_1 w_1 k_{o61}}{m_2 w_2 k_{o62}} \cdot \frac{m_1 w_1 k_{o61}}{m_2 w_2 k_{o62}} x_2 = k_e k_i x_2 = k_e^2 x_2. \quad (4.26)$$

Значение угла фазового сдвига ψ_2 между эдс и током вторичной обмотки определяется выражением:

$$\psi_2 = \psi'_2 = \arctg \frac{x_2}{r_2} = \arctg \frac{x'_2}{r'_2}. \quad (4.27)$$

Приведенные значения могут быть использованы для исследования режимов работы асинхронных машин [2].

4.7. Опыт короткого замыкания асинхронной машины

Опыт короткого замыкания асинхронной машины проводится по той же схеме, что и опыт холостого хода, но при этом обмотка фазного ротора замкнута накоротко, а ротор должен быть застопорен. Положение ротора должно соответствовать среднему току короткого замыкания, которое выставляется при подведении пониженного напряжения питания. При выполнении опыта короткого замыкания для учебных целей принято ограничивать ток значением 1,5–2,5

I_{1H} . Данный опыт позволяет определить напряжение, потери короткого замыкания, пусковой момент и его кратность.

Результатом испытаний трехфазной асинхронной машины является построение характеристик короткого замыкания. Опыт короткого замыкания проводят для ряда значений подводимого напряжения U_K , которое регулируют таким образом, чтобы ток в обмотках изменялся в пределах (0,5–1,2) I_H [6]. Электроизмерительными приборами контролируют между фазами величину питающего напряжения, ток по фазам, а также потребляемую мощность. Для построения характеристик величины U_K и I_K определяются как средние арифметические по результатам измерения, выполненных в соответствии со схемой рис. 2.7 для каждого значения подводимого напряжения.

$$U_K = U_{KL} = \frac{1}{3}(U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}); \quad (4.28)$$

$$I_K = I_{KL} = \frac{1}{3}(I_A + I_B + I_C). \quad (4.29)$$

Мощность, потребляемая в режиме короткого замыкания P_K , установленная согласно схеме, аналогичной испытанию трехфазного трансформатора определяется по показаниям ваттметров:

$$P_K = |P'_K + P''_K|. \quad (4.30)$$

По характеристикам, аналогичным рис. 2.8, при условии $I_K = I_{1H}$ находят напряжение U_{KH} , потери P_{KH} ,

коэффициент мощности $\cos \varphi_{KH}$ короткого замыкания. Последовательность поиска указанных величин пояснена

пунктирными линиями со стрелками. Полученные в результате испытаний потери и напряжение короткого замыкания должны соответствовать паспортным данным завода-изготовителя или находится в пределах допустимых отклонений от них. Величина напряжения короткого замыкания определяется в процентах $u_{KH}\%$. Она должна составлять 15–25% от номинального значения напряжения U_{1H} , причем, чем машина мощнее, тем эта доля меньше.

Обмотку статора машины обычно соединяют звездой. Значения ее сопротивлений z_K , r_K и x_K определяются выражениями:

$$z_K = \frac{U_{KL}}{\sqrt{3}I_{KL}}; \quad r_K = \frac{P_K}{3I_{KL}^2}; \quad x_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2}, \quad (4.31)$$

где $x_K = x_1 + x_2'$; $r_K = r_1 + r_2'$.

Коэффициент мощности $\cos \varphi_K$:

$$\cos \varphi_K = \frac{P_K}{\sqrt{3}U_{KL}I_{KL}}. \quad (4.32)$$

При определении параметров машины, так же как и у трансформатора, требуется измерить температуру окружающей среды θ_1 и считать ее равной температуре обмоток при опыте короткого замыкания. Величины z_K , r_K , P_{KH} ,

$\cos \varphi_{KH}$ и $u_{KH}\%$ приводятся к расчетной рабочей температуре 75°C , которая отражает эксплуатационный режим

работы машины. Приведенные величины r_{K75} и P_{KH75} получаются умножением r_K и P_{KH} на температурный

коэффициент k_θ . Величина коэффициента k_θ для меди составляет $\frac{310}{235 + \theta_1}$. Расчеты выполняются согласно

выражениям (2.43) – (2.45) и (2.50) – (2.58). Вся потребляемая машиной мощность расходуется на покрытие потерь в обмотках:

$$P_K = m_1 I_1^2 r_1 + m_2 I_2^2 r_2 = m_1 I_1^2 r_1 + m_1 (I_2')^2 r_2' = m_1 I_1^2 r_K. \quad (4.33)$$

Ток и мощность короткого замыкания пересчитывают на номинальное напряжение U_{1H} по формулам, не учитывающим насыщение:

$$I_K' = I_\Pi \approx I_{1H} \left(\frac{U_{1H}}{U_{KH}} \right); \quad (4.34)$$

$$P_K' \approx P_{KH} \left(\frac{U_{1H}}{U_{KH}} \right)^2. \quad (4.35)$$

Кратность пускового тока выражается отношением $\frac{I_\Pi}{I_{1H}}$. Электромагнитная мощность в режиме короткого замыкания,

передаваемая через воздушный зазор машины, равна электрическим потерям в обмотке ротора $\Delta p_{об2K}$.

Электромагнитный момент при опыте короткого замыкания определяется выражением:

$$M_K \approx M_\Pi = \frac{\Delta p_{об2K}}{\omega_1} = \frac{(P_{KH} - m_1 I_{KH}^2 r_1 - \Delta p_{сК})}{\omega_1}. \quad (4.36)$$

Магнитные потери Δp_{CK} в магнитопроводах статора и ротора приближенно определяются по характеристикам холостого хода, используя рис. 4.6 для напряжения $U_1 = U_K$. Начальный пусковой момент получают пересчетом момента M_K на начальный пусковой ток I_{II} :

$$M_{II} \approx M_K \left(\frac{I_{II}}{I_K} \right)^2. \quad (4.37)$$

Кратность пускового момента равна $\frac{M_{II}}{M_H}$.

Величины сопротивлений короткого замыкания Z_K , r_K и X_K используют для расчетов в схемах замещения, построении круговых диаграмм, аналитического расчета различных характеристик асинхронных машин [6].

(6) 55. Асинхронная машина при вращающемся роторе. Основные уравнения. Схемы замещения. Векторная диаграмма.

Полезный результирующий магнитный поток в воздушном зазоре машины Φ_m образуется в результате взаимодействия полезных магнитных потоков статора Φ_{1m} и ротора Φ_{2m} . Используя Φ_m можно определить эдс фазной обмотки статора: $E_1 = 4,44 f_1 w_1 k_{об1} \Phi_m$. Асинхронные машины преимущественно используются как двигатели, поэтому, прежде всего, представляет интерес их работа в этом режиме. Уравнения, характеризующие эдс трехфазного асинхронного двигателя для цепей статора и ротора: $\bar{U}_1 = -\bar{E}_1 + j\bar{I}_1 x_1 + \bar{I}_1 r_1$
 $0 = \bar{E}_2' - j\bar{I}_2' \bar{x}_2' - \bar{I}_2' \frac{R_2'}{s}$. $\bar{E}_2' = \bar{I}_2' \frac{R_2'}{s} + j\bar{I}_2' \bar{x}_2' = \bar{I}_2' \left(\frac{R_2'}{s} + j\bar{x}_2' \right) = \bar{I}_2' z_2'$

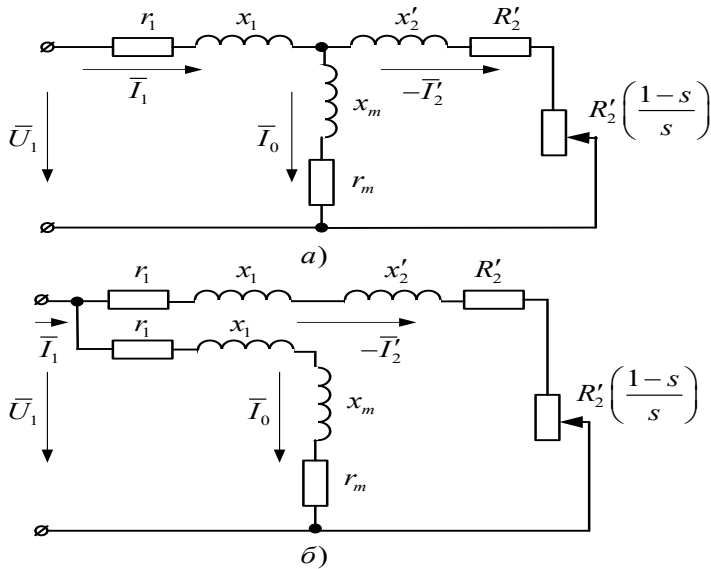


Рис. 4.7. Т-образная (а) и Г-образная (б) схемы замещения асинхронного двигателя

Схемы замещения применяются для облегчения расчетов машины, исследования протекающих в ней электромагнитных процессов, анализа работы машины в системе электроснабжения. Г-образная схема замещения позволяет получить выражение приведенного тока в цепи ротора асинхронного двигателя:

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + x_k^2}} \quad \text{где} \quad x_k = x_1 + x_2' - \text{индуктивное сопротивление}$$

короткого замыкания.

В схемах замещения величины r_m и x_m являются параметрами цепи намагничивания асинхронной машины. Параметры холостого хода $r_0 = r_1 + r_m$ и $x_0 = x_1 + x_m$. Сопротивления r_1 и x_1 значительно меньше соответственно r_m и x_m . Поэтому с большой точностью можно считать, что параметры холостого хода равны параметрам намагничивающей цепи, т.е. $r_0 \approx r_m$ и $x \approx x_m$.

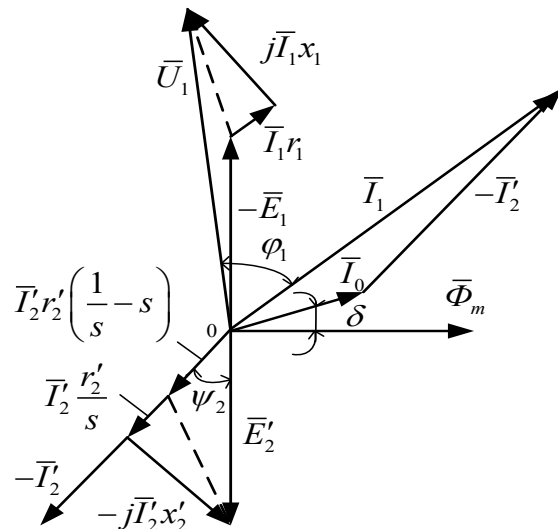


Рис. 4.8. Векторная диаграмма асинхронного двигателя

(7) 56.Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя. Способы улучшения энергетических показателей асинхронного двигателя.

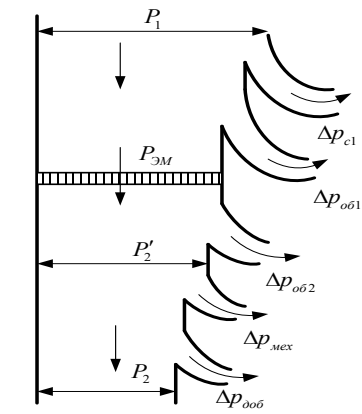


Рис. 4.9. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

Преобразование энергии в асинхронном двигателе, как и в других электрических машинах, связано с потерями энергии. Потери делятся на механические, магнитные, электрические и добавочные. Первые два вида потерь относятся к постоянным потерям, вторые два вида потерь – к переменным. Преобразование активной мощности асинхронного двигателя представлено на энергетической диаграмме (рис. 4.9). Мощность P_1 подводится из сети, за вычетом потерь в магнитопроводе Δp_{c1} и обмотке статора Δp_{ob1} преобразуется в электромагнитную мощность $P_{эм}$, которая передается через воздушный зазор машины в ротор. В нормальном режиме работы асинхронного двигателя потери в магнитопроводе ротора пропорциональны частоте f_2 . Электромагнитная мощность $P_{эм}$, благодаря которой возникает электромагнитный момент двигателя M , за вычетом потерь в обмотке ротора Δp_{ob2} , преобразуется в полную механическую мощность P'_2 . На преодоление сил трения, которые составляют механические потери $\Delta p_{мех}$, затрачивается часть электромагнитного момента, развиваемого на роторе двигателя. Этот момент называется моментом холостого хода M_0 . Добавочные потери $\Delta p_{доб}$, составляющие от 0,5 до 1 % подводимой к двигателю мощности P_1 в номинальном режиме работы, включают потери от пульсаций магнитного поля, высших гармонических составляющих, насыщения/ Потери $\Delta p_{доб}$, зависят от нагрузки двигателя β : $\Delta p_{доб} = \beta^2 \Delta p_{добH}$

Коэффициент полезного действия асинхронного двигателя: $\eta = 1 - \frac{\Delta p_{\Sigma}}{P_1}$

Кпд асинхронных двигателей средней и большой мощности составляет 0,85-0,92.

Для оптимизации работы двигателей в течение технологического процесса и улучшения их энергетических

показателей принимаются следующие меры:

- мощность двигателя выбирают в соответствии с нагрузкой на его валу, т.к. недогруженный двигатель работает с низким кпд;
- включение параллельно двигателю батарей конденсаторов, которые своей емкостью компенсируют сдвиг фаз, обусловленный индуктивностью двигателя (поперечная компенсация);
- переключение обмотки статора с треугольника на звезду;
- ограничение работы двигателей на холостом ходу;
- применение вентильных преобразователей напряжения и частоты для питания недогруженных двигателей.

(8) 57.Уравнение электромагнитного момента асинхронной машины и его анализ. Механическая характеристика асинхронной машины. Условия получения естественной механической характеристики. Рабочий участок механической характеристики.

Электромагнитный момент M создается в результате взаимодействия тока ротора с вращающимся в зазоре машины магнитным полем. $M = \frac{P_{эм}}{\omega_1} =$

$$\frac{m_1 I_2 E_2 \cos \psi_2}{\omega_1} = \frac{m_1 I_2 \frac{R_2}{s}}{\omega_1}, \text{ где } \omega_1 - \text{синхронная угловая скорость вращения поля статора, рад/с. } \omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p}.$$

$$M = \frac{m_1 U_1^2 p \frac{R_2}{s}}{2\pi f_1 ((r_1 + \frac{R_2}{s})^2 + x_k^2)}, \text{ где } x_k = x_1 + x_2' - \text{индуктивное сопротивление короткого замыкания.}$$

Задавая ряд значений скольжения s от $-\infty$ до $+\infty$ и принимая остальные параметры выражения неизменными, в результате можно получить зависимость $s = f(M)$, которая называется статической механической характеристикой асинхронной машины. Данная характеристика отображает три возможных режима работы асинхронной машины подключенной к сети;

- режим двигателя ($0 < s \leq 1$);
- режим генератора ($0 \geq s > -\infty$);
- режим электромагнитного тормоза ($1 \leq s < +\infty$).

Статическая механическая характеристика называется естественной, если она получена при условиях $U_1 = const = U_{1H}$, $f_1 = const = f_{1H}$ $R_2' = r_2' (r_{доб} = 0)$. При отклонении хотя бы одного из этих параметров от указанных значений характеристика является искусственной.

В случае неподвижного ротора ($s=1$) пусковой момент $M_{п}$:

$$M_{п} = \frac{m_1 U_1^2 p R_2}{2\pi f_1 ((r_1 + R_2)^2 + x_k^2)},$$

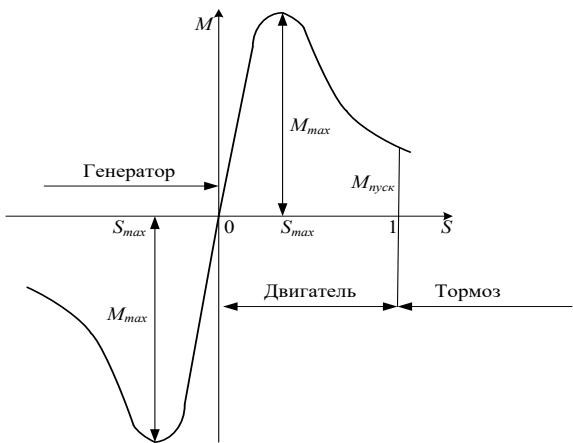


Рис 4.10. Статическая механическая характеристика асинхронной машины

s_m , при котором момент асинхронной машины максимален M_m . Такое значение скольжения и момента называют критическими.

$$s_m = \pm \frac{R_2}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}}$$

Статическая механическая характеристика может быть представлена в виде $\omega = f(M)$. Чтобы перейти от об/мин в рад/с $\omega = \frac{\pi n}{30} = \frac{n}{9,55}$

Статическая механическая характеристика асинхронной машины представлена на рис 4.10. При идеальном холостом ходе ($s = 0$) асинхронная машина не развивает момент, т.к. эдс и ток в роторной обмотке не индуцируются. С увеличением нагрузки на валу частота вращения ротора снижается, возрастают скольжение, эдс и ток в роторе, а так же момент. Увеличение скольжения s вызывает рост частоты тока в роторе f_2 и индуктивного сопротивления ротора x_2' . В связи с этим, начиная с некоторого значения скольжения s_m , момент, развиваемый двигателем, перестает нарастать, несмотря на нарастание тока в роторе. Активная составляющая тока в роторе

уменьшается из-за роста доли реактивного сопротивления. Момент зависит от активной составляющей тока ротора, он будет также снижаться. При генераторном режиме работы асинхронной машины ее максимальный момент больше, чем при двигательном режиме. Это объясняется тем, что в генераторном режиме часть потерь компенсируется за счет приводного двигателя, расположенного на одном валу с асинхронной машиной. Отдаваемая в сеть активная мощность должна быть равна по величине активной мощности, которая потребляется асинхронной машиной в режиме двигателя.

Перегрузочная способность: $k_m = \frac{M_m}{M_H}$, где M_H – номинальный момент, который можно определить как: $M_H = 9550 \frac{P_H}{n_H}$, где P_H – номинальная мощность двигателя, кВт.

Участок статической механической характеристики с пределами изменения скольжения от $-s_m$ до s_m называется рабочим участком механической характеристики или устойчивым участком работы асинхронной машины. Рабочий участок может быть рассчитан по формуле Клосса:

$$\frac{M}{M_m} = \frac{2(s_m + 1)}{\frac{s}{s_m} + 2s_m + \frac{s_m}{s}}$$

Асинхронный двигатель наиболее экономично работает на участке статической механической характеристики с пределами изменения скольжения от 0 до s_m , потому что электрические потери в обмотках ротора Δp_{062} пропорциональны скольжению: $\Delta p_{062} = P_{эм} s$.

(9) 58. Регулирование скорости асинхронного двигателя путем введения добавочного сопротивления в цепь ротора. Механические характеристики.

Способ нашел широкое распространение из-за простоты реализации. Однако он требует большого количества контактной аппаратуры, а применение активных сопротивлений увеличивает потери в роторе. Критическое скольжение s_m и пусковой момент $M_{п}$ прямо пропорциональны величине активного сопротивления цепи ротора R'_2 , а скорость вращения поля статора ω_1 и критический момент M_m не зависят от него, поэтому остаются неизменными в любом диапазоне изменения скорости ротора.

Можно подобрать добавочное сопротивление так, что пусковой момент $M_{п}$ двигателя будет равен максимальному моменту M_m . Величину $r_{доб}$ рассчитывают из выражения для скольжения $s_m = 1$:

$$s_m = 1 = \frac{R_2}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}} = \frac{r_2' + r_{доб}}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}}, \quad r_{доб} = \frac{\sqrt{r_1^2 + x_k^2} - r_2'}{k_e^2}$$

Рост величины R'_2 приводит к снижению тока ротора I_2 . Однако возрастает его активная составляющая, что вызывает увеличение электромагнитного момента M . Этим объясняется рост пускового момента $M_{п}$ до определенного значения, после чего $M_{п}$ уменьшается, т.к. ток ротора убывает быстрее, чем растет его активная составляющая. Реостат в цепи ротора является и регулировочным, и пусковым. Пусковой ток ротора из-за наличия контактных колец и щеток ограничивают величиной $I_{2п} = (2 - 2,5)I_{2H}$. Регулирование скорости ротора при данном моменте нагрузки на валу $M_c = M_H$ (рис. 4.11) происходит вниз от ее номинала.

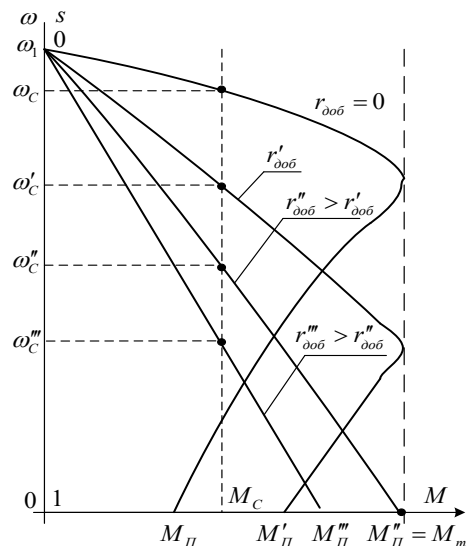


Рис. 4.11. Механические характеристики асинхронного двигателя при изменении в

роторе добавочного сопротивления $r_{доб}$

10 59. Регулирование скорости асинхронного двигателя путем изменения подводимого к статору напряжения. Механические характеристики.

Способ применим в равной мере для всех асинхронных двигателей. Момент двигателя M , а также моменты пусковой $M_{п}$ и критический M_m , пропорциональны квадрату напряжения, подведенного к цепи статора, U_1^2 . Скорость идеального холостого хода ω_1 и критическое скольжение s_m от уровня напряжения не зависят. Влияние напряжения U_1 на вид механических характеристик представлено на рис. 4.14.

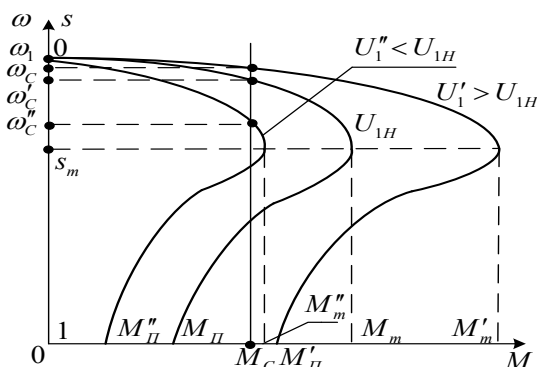


Рис. 4.14. Механические характеристики асинхронного двигателя при изменении напряжения, подводимого к статору

При условии $U_1' > U_{1H}$ характеристика проходит выше естественной. Хотя в данном случае возрастает пусковой момент двигателя, но увеличивается ток статора, насыщаются магнитопроводы и увеличиваются потери. Поэтому согласно стандартам для эксплуатации асинхронных двигателей допускается повышение питающего напряжения не более чем на 5% от номинального значения. Когда выполняется условие $U_1' > U_{1H}$, то характеристика проходит ниже естественной. Уменьшается пусковой момент и падает перегрузочная способность двигателя. Снижение питающего напряжения допускается не более чем на 10% от номинального значения. Изменение напряжения достигается в частности регуляторами напряжения на полупроводниковых элементах. При таком способе диапазон регулирования скорости невелик, а регулирование возможно только вниз от номинальной скорости.

11 60. Регулирование скорости асинхронного двигателя путем изменения числа пар полюсов. Механические характеристики.

Способ на практике реализуется для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. У двигателей с фазным ротором приходится менять число пар полюсов не только на статоре, но и на роторе, что усложняет схему управления. Изменение числа пар полюсов в обмотке статора достигается переключением ее частей с последовательного на параллельное соединение. На рис. 4.15 представлены направления токов в обмотках и потоков полюсов. В данном случае необходимо так же поменять местами фазы обмотки двигателя, чтобы сохранить прежним направление вращения поля статора.

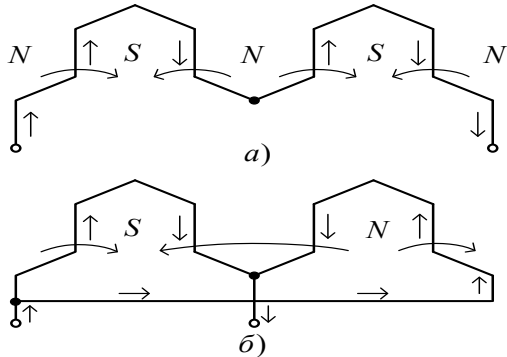


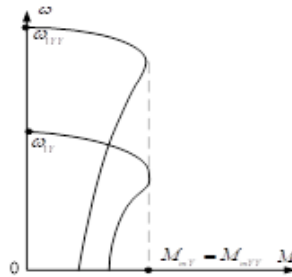
Рис. 4.15. Переход от числа полюсов $2p=4$ (а) к $2p=2$ (б)

Скорость асинхронного двигателя изменением числа пар полюсов можно регулировать двумя способами: при постоянном моменте ($M=const$) и при постоянной мощности ($P=const$). При условии $M=const$ уменьшение числа пар полюсов достигается переключением обмоток статора с соединения Y на YY (двойная звезда). Выражения потребляемых из сети активных мощностей при этом имеют вид:

$$P_{1Y} = 3 \frac{U_1}{\sqrt{3}} I_1 \cos \varphi_{1Y};$$

$$P_{1YY} = 3 \frac{U_1}{\sqrt{3}} 2I_1 \cos \varphi_{1Y} = 2P_{1Y}.$$

Коэффициенты мощности обеих схем примерно равны. Скорость идеального холостого хода $\omega_{1YY} = 2\omega_{1Y}$. Момент, развиваемый двигателем $M \approx \frac{P_1}{\omega_1}$, при этом $M_Y \approx M_{YY}$. Для рассматриваемого способа схемы переключения и механические характеристики двигателя представлены на рис. 4.16. Способ регулирования скорости при условии $M=const$ целесообразно применять в электроприводах с постоянно действующим моментом нагрузки при любой частоте вращения, например, в подъемно-транспортных механизмах.



При условии $P=const$ уменьшение числа пар полюсов достигается переключением обмоток статора с соединения Δ на YY. Выражения, отображающие потребляемые из сети активные мощности, при этом имеют вид: $P_{1Y} = 3U_1 I_1 \cos \varphi_{1\Delta}$;

$$P_{1YY} = 3 \frac{U_1}{\sqrt{3}} 2I_1 \cos \varphi_{1YY} = 2P_{1Y}.$$

Коэффициенты мощности обеих схем примерно равны. Потребляемая мощность $P_{1YY} = 1,15P_{1\Delta}$. Если разницей в 15% пренебречь, что упрощает анализ, то $P_{1YY} = P_{1\Delta}$, а скорость идеального холостого хода $\omega_{1YY} \approx 2\omega_{1\Delta}$. Момент двигателя при этом $M_{YY} \approx \frac{M_{\Delta}}{2}$. Схемы переключения и механические характеристики двигателя изображены на рис. 4.17. Способ регулирования скорости при условии $P=const$ целесообразно применять когда момент нагрузки меняется обратно пропорционально частоте вращения, например, в станочных электроприводах. В обоих вариантах регулирования сохраняется жесткость рабочих участков механических характеристик. При регулировании на разных скоростях остаются практически неизменными энергетические показатели двигателей.

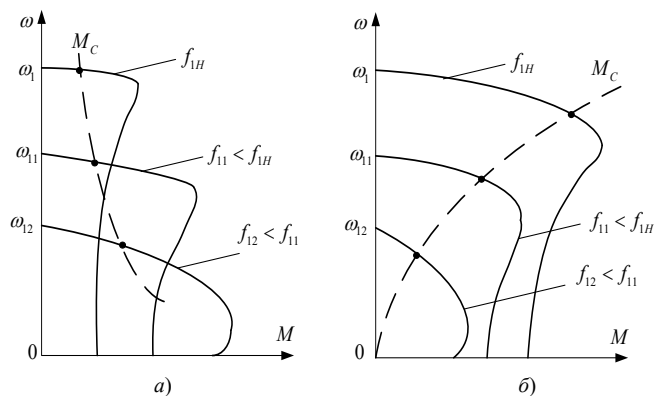
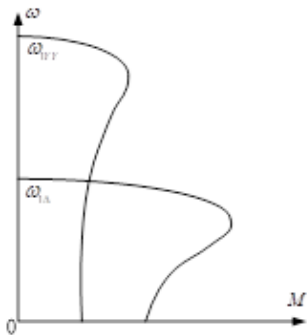


Рис. 4.19. Механические характеристики асинхронного двигателя при условии постоянства мощности (а) и вентиляторной нагрузки (б)

$$\frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = const, \frac{U_1}{f_1^2} = const. \text{ Механические характеристики для всех случаев.}$$

Регулирование скорости изменением частоты f_1 подведенного напряжения U_1 (частотное регулирование). Способ является наиболее перспективным в связи с широким применением преобразователей частоты, выполненных на полупроводниковых элементах. Он реализуется преимущественно на короткозамкнутых асинхронных двигателях ($R'_2 = r'_2$). Регулирование скорости двигателя происходит плавно в широком диапазоне как вверх, так и вниз от ее номинального значения. Способ является достаточно экономичным в плане энергопотребления, однако стоимость преобразователей частоты по сравнению со стоимостью двигателя относительно велика. Наиболее рациональное регулирование скорости достигается при условии поддержания неизменным магнитного потока двигателя Φ_m . При условии $U_1 \approx const$ и $r_1 \approx 0$ имеем:

$$U_1 \approx E_1 = c \cdot f_1 \cdot \Phi_m = const, \quad (4.66)$$

где c – постоянная, зависящая от параметров двигателя.

Из выражения (4.66) следует, что с увеличением частоты f_1 снижается магнитный поток Φ_m и развиваемый двигателем момент, а также его перегрузочная способность. Если же частота f_1 снижается, то происходит рост магнитного потока. Это приводит к насыщению магнитной цепи двигателя и повышению потерь. Для обеспечения условия постоянства магнитного потока ($\Phi_m = const$) требуется регулировать напряжение U_1 и частоту f_1 пропорционально друг другу, т. е. по закону

$$\frac{U_1}{f_1} = k = const. \quad (4.67)$$

Целесообразно проанализировать, как будут располагаться механические характеристики при регулировании скорости по (4.67). Скорость идеального холостого хода ω_1 пропорционально зависит от частоты питающего напряжения f_1 . Индуктивное сопротивление короткого замыкания $x_K = 2\pi f_1 L_K$.

Принимая, что $U_1 = k f_1$, выражения моментов трехфазного асинхронного двигателя (4.54) – (4.56) и критического скольжения S_m (4.52) при этом примут вид:

$$M = \frac{3k^2 f_1^2 \frac{r'_2}{s} p}{2\pi f_1 \left(\left(r_1 + \frac{r'_2}{s} \right)^2 + (2\pi f_1 L_K)^2 \right)}; \quad M \sim \frac{f_1^2}{f_1^3}; \quad (4.68)$$

$$M_{II} = \frac{3k^2 f_1^2 r'_2 p}{2\pi f_1 \left((r_1 + r')^2 + (2\pi f_1 L_K)^2 \right)}; \quad M_{II} \sim \frac{f_1^2}{f_1^3}; \quad (4.69)$$

$$M_m = \frac{3k^2 f_1^2 p}{4\pi \cdot f_1 \cdot (r_1 \pm \sqrt{r_1^2 + (2\pi f_1 L_K)^2})}; \quad M_m \sim \frac{f_1^2}{f_1^2}; \quad (4.70)$$

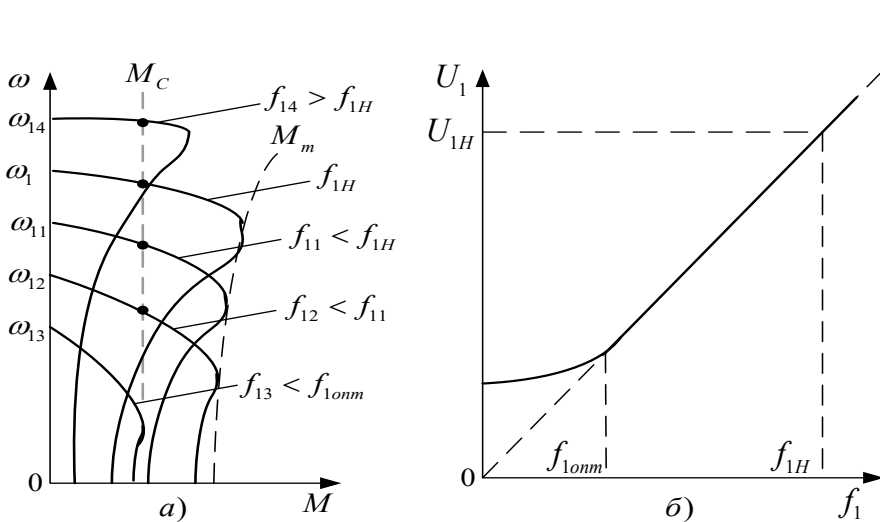


Рис. 4.18. Механические характеристики асинхронного двигателя при $M = const$ (а) и зависимость

$$U_1 = F(f_1) \quad (б)$$

$$S_m = \frac{r'_2}{\sqrt{r_1^2 + (2\pi f_1 L_K)^2}};$$

$$S_m \sim \frac{1}{f_1}. \quad (4.71)$$

Согласно полученным выражениям момент, развиваемый двигателем при пуске и работе, изменяется обратно пропорционально частоте f_1 .

Скольжение S_m меняется аналогичным образом, а жесткость механической характеристики возрастает. Максимальный момент M_m стабилизируется. Механические характеристики для рассмотренного случая представлены на рис.

4.18,а. При частотах $f_1 > f_{1H}$ напряжение

U_1 не повышают, поскольку это недопустимо по условиям эксплуатации двигателей, а оставляют равным номинальному. В результате снижается перегрузочная способность двигателя, что необходимо учитывать при выборе его нагрузки. Установлено, что для реальных условий в процессе регулирования

скорости при соблюдении закона $\frac{U_1}{f_1} = \text{const}$ с уменьшением частоты f_1 момент M_m несколько снижается. Это объясняется нарастающим

влиянием падения напряжения в статорной обмотке двигателя, что наиболее заметно у двигателей небольшой мощности. Пусковой момент двигателя M_{Π}

в то же время увеличивается с уменьшением частоты f_1 . Оптимальное значение $M_{\Pi \text{ onm}}$ наступает при частоте $f_{1 \text{ onm}}$ питающего напряжения

равной 15 – 20 Гц, определяемой по формуле, если $\frac{dM_{\Pi}}{df_1} = 0$:

$$f_{1 \text{ onm}} = \frac{r_1 + r_2'}{2\pi \cdot L_K}. \quad (4.72)$$

При частотах $f_1 < f_{1 \text{ onm}}$ следует менять напряжение U_1 в меньшей мере, чем частоту f_1 (рис. 4.18,б), поскольку регулирование по закону

$\frac{U_1}{f_1} = \text{const}$ приводит к существенному снижению M_m . Регулирование скорости асинхронного двигателя по данному закону целесообразно,

когда выполняется условие $M_C = \text{const}$. Для некоторых производственных механизмов, например, насосных установок, чрезмерное снижение скорости вращения двигателя может привести к выходу из строя их рабочего органа и другим неисправностям. Поэтому в преобразователях частоты не всегда целесообразно выставлять задание на минимальные скорости вращения двигателей, добиваясь глубокого ее регулирования. Работа с минимальной частотой вращения ограничивается ухудшением условий охлаждения двигателя с его самовентиляцией. В этом случае более эффективна независимая вентиляция.

Наряду с регулированием, при котором выполняется отношение $\frac{U_1}{f_1} = \text{const}$, используются в современных электроприводах и другие зависимости,

например $\frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = \text{const}$ (условие постоянства мощности) или $\frac{U_1}{f_1^2} = \text{const}$ (при вентиляторной нагрузке). Вид такой зависимости

определяется требованиями технологического процесса промышленных установок. Механические характеристики двигателей при использовании указанных зависимостей приведены на рис. 4.19. Применение вентильных преобразователей частоты улучшает технико-экономические показатели регулируемых электроприводов. Основным их недостатком является генерация высших гармоник, что приводит к возникновению дополнительных потерь, паразитных моментов, ухудшающих эксплуатационные свойства двигателя, ведущих к его перегреву, а также влиянию на качество электроэнергии у потребителей. Для снижения негативного воздействия высших гармоник используются сглаживающие фильтры, вентиляльные элементы с большой частотой коммутации, что позволяет приблизить кривую выходного напряжения к синусоиде [25].

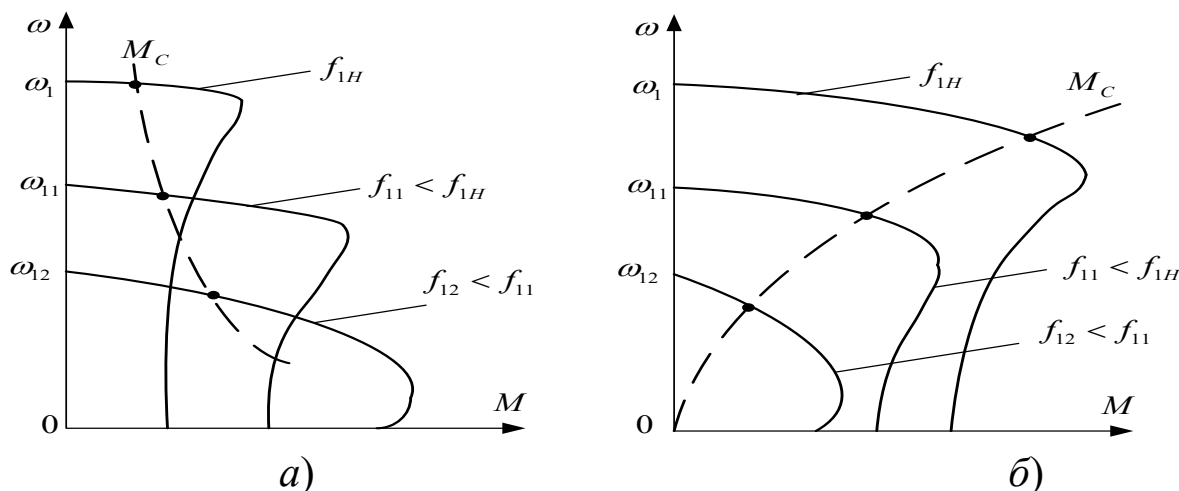


Рис. 4.19. Механические характеристики асинхронного двигателя при условии постоянства мощности (а) и вентиляторной нагрузки (б)

13 Способы пуска трехфазных асинхронных двигателей. Самозапуск.

Пуск асинхронных двигателей с фазным ротором проводится при условии ограничения тока из-за наличия скользящих контактов в цепи ротора. Для этой цели применяются реостаты, индукционные сопротивления,

каскадные схемы и др. На предприятиях эксплуатируется большое количество короткозамкнутых асинхронных двигателей, обмотки которых рассчитаны на большие, до нескольких номинальных значений, пусковые токи. Качественное регулирование их скорости достигается при использовании вентильных преобразователей. Значительная часть двигателей установлена на агрегатах, не требующих частого и плавного регулирования скорости (насосы, вентиляторы и т.д.). При пуске короткозамкнутых асинхронных двигателей требуется учитывать следующие условия [1]:

- двигатель должен развивать момент, превышающий момент нагрузки на валу M_C , что бы ротор мог прийти во вращение и достичь требуемой скорости;
- пусковой ток следует ограничивать, чтобы не вывести из строя двигатель и не нарушить нормальный режим работы сети;
- схема пуска должна быть по возможности простой.

На рис. 4.28 представлены однолинейные схемы пуска асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Наиболее простым является прямой пуск (рис. 4.28,а). Прямой пуск возможен, когда сеть достаточно мощная и пусковые токи не вызывают больших просадок напряжения сети U_1 (10–15 % от номинального значения). Ток при пуске двигателя $I_{ПД}$ является пусковым током сети $I_{П1}$:

$$I_{ПД} = I_{П1} = I_{П} = \frac{U_1}{Z_K}, \tag{4.90}$$

где Z_K – полное сопротивление двигателя при пуске.

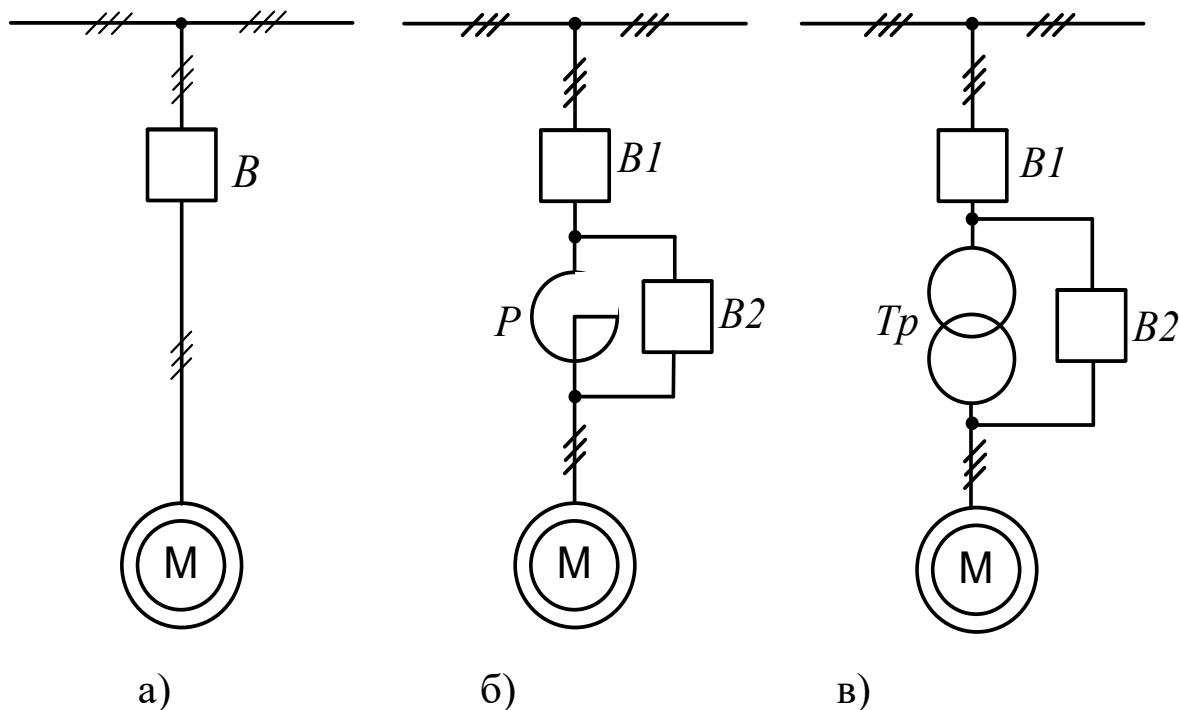


Рис. 4.28. Схемы пуска короткозамкнутых асинхронных двигателе:
а-прямой; б-реакторный;
в-трансформаторный (автотрансформаторный)

Если по условиям падения напряжения в сети прямой пуск невозможен, то применяют пониженное напряжение. Однако при этом снижается пусковой момент двигателя $M_{П}$. Он пропорционален квадрату

напряжения сети U_1^2 . Способ пуска на пониженном напряжении применим, если двигатели работают вхолостую или при неполной нагрузке на валу, а также для высоковольтных двигателей.

При реакторном пуске (рис. 4.28,б) сначала замыкают $B1$, происходит ограничение пускового тока. После разгона двигателя до определенной скорости замыкается $B2$, реактор оказывается шунтированным, а на статор подается напряжение сети U_1 . Пусковой ток двигателя $I_{пд}$ при этом равен:

$$I_{пд} = \frac{U_{д}}{Z_{к}} = \frac{U_{д}}{Z_{к}} \frac{U_1}{U_1} = I_{п} \frac{U_{д}}{U_1} = I_{п1}, \tag{4.91}$$

где $\frac{U_{д}}{U_1}$ – степень снижения напряжения двигателя в момент пуска; $I_{п}$ – ток двигателя при прямом пуске.

Момент при пуске уменьшается быстрее пускового тока:

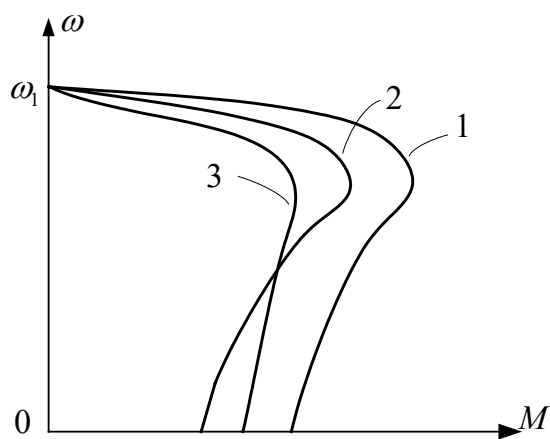
$$M_{пд} = M_{п} \left(\frac{U_{д}}{U_1} \right)^2, \tag{4.92}$$

где $M_{п}$ – момент двигателя при прямом пуске.

Трансформаторный (автотрансформаторный) пуск позволяет в большей степени понизить напряжение, подводимое к статору двигателя. Схема пуска представлена на рис. 4.28,в; работа коммутационных аппаратов аналогична работе при реакторном пуске. Пусковой ток двигателя $I_{пд}$ при этом равен:

$$I_{пд} = \frac{U_{д}}{Z_{к}} = \frac{U_{д}}{Z_{к}} \frac{U_1}{U_1} = I_{п} \frac{U_{д}}{U_1}. \tag{4.93}$$

Пренебрегая потерями в трансформаторе и считая, что мощность, потребляемая из сети равна мощности, подводимой к статору двигателя:



$$\left. \begin{aligned} I_{п1} U_1 &= I_{пд} U_{д}; \\ I_{п1} &= I_{пд} \frac{U_{д}}{U_1} = I_{п} \left(\frac{U_{д}}{U_1} \right)^2. \end{aligned} \right\} \tag{4.94}$$

Пусковые момент и ток уменьшается одновременно:

$$M_{пд} = M_{п} \left(\frac{U_{д}}{U_1} \right)^2. \tag{4.95}$$

Рис. 4.29. Механические характеристики асинхронного двигателя при прямом (1), трансформаторном (2) и

При трансформаторном (автотрансформаторном) пуске момент M и ток $I_{П1}$ уменьшаются в одинаковое число раз. Если значения пускового тока $I_{П1}$ при реакторном и трансформаторном (автотрансформаторном) пуске будут одинаковыми, то двигатель в последнем случае развивает больший пусковой момент. На рис. 4.29 изображены механические характеристики асинхронного двигателя при разных способах пуска [1].

При коротких замыканиях в электрических сетях случаются большие кратковременные понижения напряжения или перерывы питания. Подключенные к сети асинхронные двигатели в данном случае затормаживаются и останавливаются. При восстановлении напряжения двигатели, если они не были отключены нулевой защитой, снова запускаются в работу. Это процесс называется самозапуском [30]. Для многих производственных механизмов он желателен. Однако при одновременном пуске многих двигателей из-за значительного падения напряжения в сети, задерживается его восстановление, что приводит к увеличению времени самозапуска. Для асинхронных двигателей с фазным ротором самозапуск опасен по условиям коммутации. Этот процесс целесообразно использовать в электроприводах ответственных производственных механизмов. Двигатели следует снабжать релейной защитой.

14 Глубокопазные и двухклеточные двигатели. Особенности конструкции.

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором исключают возможность пуска под нагрузкой из-за относительно малого пускового момента $M_{П}$. Для достижения достаточного значения $M_{П}$ надо увеличить сопротивление роторной обмотки r_2 . Такая задача решается путем использования эффекта вытеснения тока в обмотке ротора, т.е. поверхностного эффекта. Поверхностный эффект сильнее проявляется чем глубже и уже пазы, а так же, чем выше частота тока в стержнях. Активное сопротивление стержня

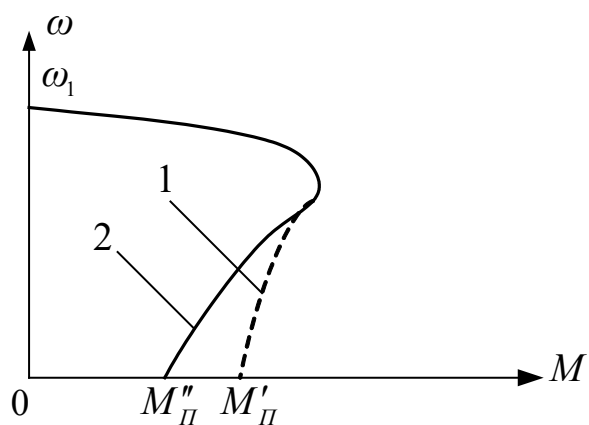


Рис. 4.30. Реальная (1) и расчетная (2) механические характеристики асинхронного двигателя при учете поверхностного эффекта

при пуске становится большим.

Наибольшая частота тока ротора f_2 при питании от сети имеет место при неподвижном роторе. Следовательно, параметры схемы замещения асинхронного двигателя не являются постоянными. Пусковой момент, реально развиваемый двигателем $M'_{П}$, становится больше расчетного $M''_{П}$ (рис. 4.30).

Поверхностный эффект наиболее сильно сказывается при пуске, а при скольжениях ниже критического s_m его можно не учитывать. Несмотря на благоприятные характеристики машин с

глубоким пазом, они выпускаются в ограниченном объеме, т.к. применение глубоких пазов приводит к увеличению диаметра ротора и габаритов машины. Помимо двигателей с глубокими пазами широко применяются обмотки с пазами колбообразного, бутылочного и трапецеидального профилей [1].

Двухклеточные двигатели имеют две короткозамкнутые «беличьи клетки», представляющие пусковую и рабочую обмотки (рис.4.31). Пусковая обмотка изготавливается из латуни или бронзы. Она обладает большим сопротивлением,

а рабочая обмотка – изготавливается из меди. Сечение стержней пусковой обмотки может быть несколько меньше, чем у рабочей. Однако она не должна чрезмерно перегреваться. Сопротивление пусковой обмотки в 2–4 раза превышает сопротивление обмотки рабочей. В двухклеточном двигателе при пуске происходит вытеснение тока ротора по направлению к воздушному зазору, как и в глубокопазном двигателе. Стержни обмоток присоединяются к отдельным кольцам в связи с неравномерным нагревом обмоток [8].

ИЗ ИНТЕРНЕТА

Устройство и принцип работы.

В § 25-2 было выяснено, что для достижения хорошего к. п. д. асинхронные двигатели должны иметь малое скольжение ($s_H \ll 1$; 0,02 -f- 0,05), в соответствии с чем активное сопротивление обмоток ротора R_2 у них должно быть достаточно мало. Однако, как было установлено там же, пусковой момент двигателя с таким сопротивлением обмотки ротора будет значительно меньше номинального. Это исключает возможность пуска таких двигателей с короткозамкнутым ротором под нагрузкой, а искажение кривой момента под воздействием высших гармоник поля может вызвать затруднения даже при пуске с небольшой нагрузкой. Для получения достаточного пускового момента необходимо увеличить g_2 . Таким образом, возникает задача создания таких асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, у которых активное сопротивление обмотки ротора при пуске достаточно велико и уменьшается при переходе к нормальному режиму работы. Эту задачу решают путем использования эффекта вытеснения тока в обмотке ротора, применяя обмотку специальной конструкции.

Одной из разновидностей таких двигателей являются двигатели с глубокими пазами на роторе и высокими (30—60 мм) стержнями беличьей клетки. Вытеснение тока в стержнях клетки происходит в результате действия э. д. с, индуцируемых пазовыми потоками рассеяния Φ_a . Можно представить себе, что стержень состоит из множества волокон, включенных параллельно. Нижние волокна охватываются большим, а верхние волокна — малым количеством линий потока Φ_o . При пуске, когда частота в роторе велика: в нижних волокнах стержня индуцируется большая э. д. с. самоиндукции, чем в верхних, и плотность тока распределяется по высоте проводника весьма неравномерно. Можно также сказать, что такое неравномерное распределение тока обусловлено тем, что нижние волокна стержня имеют большее индуктивное сопротивление, чем верхние. Таким образом, ток в стержне вытесняется по направлению к воздушному зазору. Под влиянием вытеснения тока, или поверхностного эффекта, активное сопротивление стержня при пуске двигателя становится большим.

По мере разбега двигателя при его пуске частота тока в роторе уменьшается и по достижении номинальной скорости вращения становится весьма малой равномерно по сечению стержня. Активное сопротивление стержня при этом становится малым, и двигатель работает с хорошим к. п. д.

56.2. Двухклеточные двигатели

Устройство и принцип работы.

Двухклеточные двигатели имеют на роторе две короткозамкнутые беличьи клетки, одна из которых представляет собой так называемую пусковую обмотку, а вторая — рабочую. Рабочая обмотка выполняется из медных стержней и размещается в нижних частях пазов, а пусковая обмотка изготавливается из латунных или бронзовых стержней и располагается в верхних частях пазов, ближе к воздушному зазору (рис. 27-5, а слева). Сечение стержней пусковой обмотки может быть несколько меньше, чем у рабочей обмотки. Однако сечение и теплостойкость стержней пусковой обмотки должны быть достаточно велики, чтобы предотвратить чрезмерный нагрев этой обмотки при пуске. Иногда рабочую и пусковую обмотки размещают в отдельных пазах.

Вращающееся магнитное поле двигателя индуцирует в обеих обмотках ротора одинаковые э. д. с.

При пуске вследствие большой частоты тока ротора индуктивное сопротивление рабочей обмотки относительно велико и значительно больше полного сопротивления пусковой обмотки. Поэтому при пуске нагружена током в основном только пусковая обмотка, и ввиду большой величины ее активного сопротивления двигатель развивает большой пусковой момент. При разбеге двигателя частота тока ротора уменьшается, и при нормальной скорости вращения ($s = 0,02$ - $0,05$) индуктивные сопротивления рассеяния обмоток ротора будут в 20—50 раз меньше, чем при пуске. Поэтому в рабочем режиме активные сопротивления обмоток ротора значительно больше индуктивных и полные сопротивления обмотки определяются величинами активных сопротивлений. Вследствие этого при работе двигателя полное сопротивление рабочей обмотки значительно меньше, чем полное сопротивление пусковой, и током нагружена главным образом рабочая обмотка. Ввиду малости активного сопротивления этой обмотки двигатель имеет хороший к. п. д.

Таким образом, в двухклеточном двигателе при пуске происходит вытеснение тока ротора по направлению к воздушному зазору, как и в глубокопазном двигателе.

15 Однофазные асинхронные двигатели. Способы пуска трехфазных асинхронных двигателей от однофазной сети. Принципиальные схемы.

Однофазные асинхронные двигатели выполняются мощностью до нескольких киловатт. Они применяются для привода различных механизмов

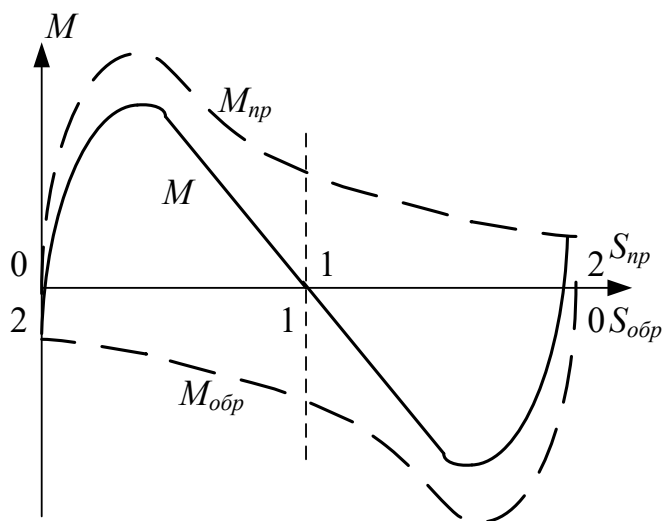


Рис. 4.35. Механическая характеристика однофазного асинхронного двигателя

при отсутствии трехфазной сети. Такие двигатели имеют однофазную обмотку на статоре, а ротор представляет «беличью клетку» как у трехфазных асинхронных двигателей нормального исполнения. Если у трехфазного двигателя отключить одну фазу, то магнитное поле в зазоре будет не круговым, а пульсирующим и его можно рассматривать как совокупность двух одинаковых круговых полей, которые вращаются с одинаковыми скоростями в противоположные стороны. Трехфазный асинхронный двигатель в однофазном режиме можно рассматривать как два одинаковых трехфазных двигателя, которые подключены к общей сети,

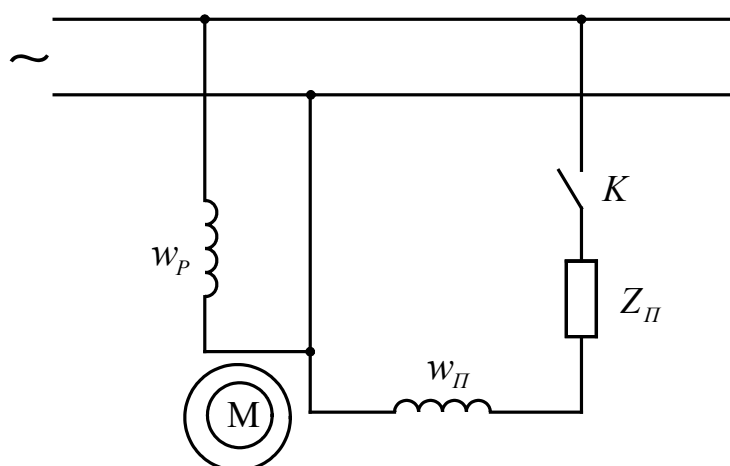


Рис. 4.36. Схема подключения к сети однофазного асинхронного двигателя

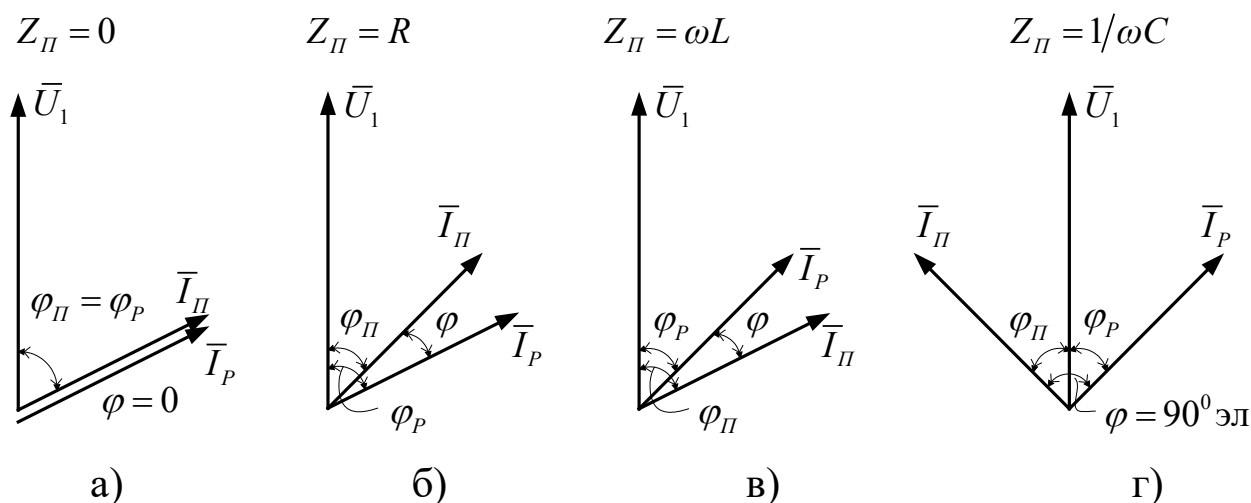
находясь на одном валу, но имеют разные чередования фаз. Такой режим работы приводит к его перегреву. На рис. 4.35 показана механическая характеристика асинхронного двигателя в однофазном режиме. Двигатель при этом не развивает пускового момента, поэтому принимаются специальные меры, чтобы получить в зазоре круговое магнитное поле.

Чтобы обеспечить нормальный пуск и работу однофазного

асинхронного двигателя необходимо соблюдать следующие требования [1]:

- оси обмоток должны находиться под углом 90° эл друг к другу;
- токи обмоток должны иметь фазовый сдвиг в четверть периода;
- намагничивающие силы обмоток должны быть одинаковыми.

Для создания кругового магнитного поля в зазоре однофазного асин-



хронного двигателя служат пусковая и рабочая обмотки, имеющие w_Π и w_P число витков. Пусковая обмотка обладает повышенным

Рис. 4.37. Векторные диаграммы при отсутствии пускового сопротивления (а) и при использовании активных (б), индуктивных (в), емкостных (г) элементов для пуска

активным сопротивлением. Схема подключения однофазного асинхронного двигателя к сети представлена на рис. 4.36. Для получения фазового сдвига используют активные, индуктивные и емкостные элементы сопротивлением Z_Π , включаемые в пусковую обмотку. На рис. 4.37 изображены векторные диаграммы однофазного асинхронного двигателя при различных Z_Π . Круговое вращающееся поле в зазоре обеспечивает правильно подобранная величина емкости C . В данном случае $Z_\Pi = 1/\omega C$, а $M_\Pi = (1,6 - 2,0)M_H$. Пусковая обмотка отключается с помощью контакта K при достижении двигателем определенной скорости. Механические характеристики при этом представлены на рис. 4.38. Его мощность составляет приблизительно 40–45% от мощности трехфазного двигателя при одинаковых габаритах. На практике широко применяются конденсаторные асинхронные двигатели. В них параллельно основному конденсатору $C_{раб}$ в пусковой обмотке включается дополнительно пусковой конденсатор $C_\Pi = (2 - 7)C_{раб}$. При малых скольжениях двигателя конденсатор C_Π отключается во избежание резонансных явлений в обмотках двигателя, приводящих к выходу его из строя. Конденсаторные асинхронные двигатели обладают коэффициентом мощности 0,8–0,95.

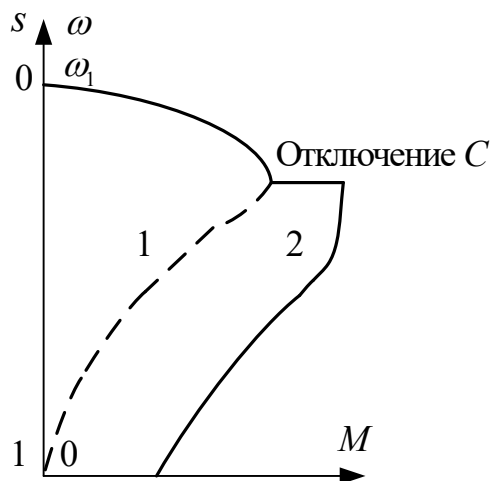


Рис. 4.38. Механические характеристики однофазного асинхронного двигателя при отсутствии (1) и при наличии емкости C (2)

Практический интерес представляет включение трехфазного асинхронного двигателя небольшой мощности в однофазную сеть. При этом могут быть использованы как постоянно включенные рабочие конденсаторы $C_{раб}$, так и включаемые на время пуска пусковые конденсаторы $C_{п}$. На рис. 4.39 представлены отдельные схемы подключения конденсаторов при питании трехфазного асинхронного двигателя от однофазной сети. Величина емкости $C_{п}$ выбирается приблизительно из расчета 4–10 мкФ на 100 Вт мощности двигателя. Предварительное значение емкости рабочего конденсатора $C_{раб}$ при частоте тока 50 Гц определяется по формуле:

$$C_{раб} \approx 2700 \frac{I_{1H}}{U_{1H}}, \quad (4.99)$$

где I_{1H} — номинальный фазный ток в обмотке статора; U_{1H} — номинальное напряжение однофазной сети.

Окончательно значение $C_{раб}$ уточняется экспериментально, при этом токи в обмотках фаз двигателя при его работе с нагрузкой не должны превышать номинальное значение. Номинальная мощность трехфазного двигателя при работе от однофазной сети составляет 40-50% от мощности в трехфазном режиме, а с рабочим конденсатором $C_{раб}$ — 75-80% [27].

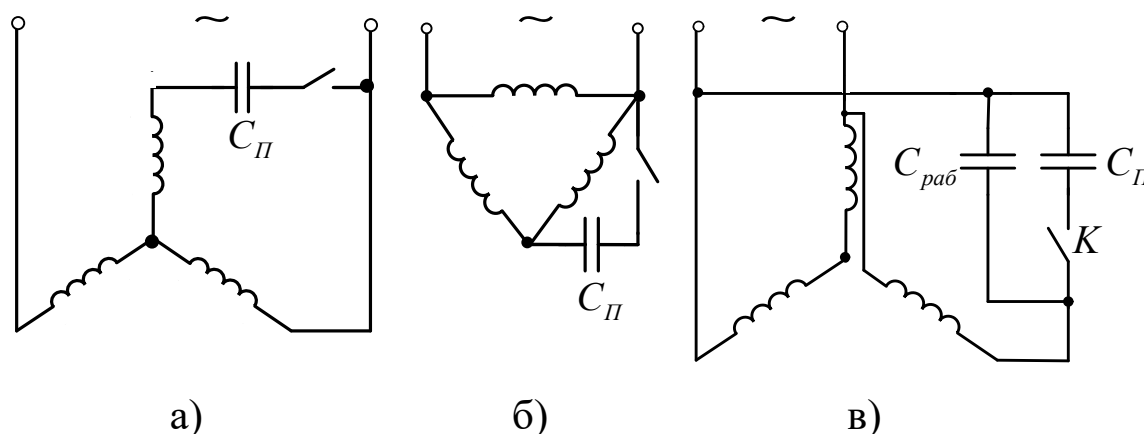


Рис. 4.39. Схемы включения трехфазного асинхронного двигателя в однофазную сеть.

а- по схеме Y; б- по схеме Δ ; в- с рабочим конденсатором $C_{раб}$

Одн
офазные
конденса
торные
асинхрон
ные
двигател
и
являются
машинам
и малой
мощност
и. Они

преимущественно применяются в различных автоматических устройствах наряду с другими однофазными и трехфазными асинхронными машинами нетрадиционной конструкции (сельсинами, исполнительными двигателями, тахогенераторами и др.) [2].

16 Асинхронный генератор. Принцип действия. Самовозбуждение.

4.17. Асинхронный генератор

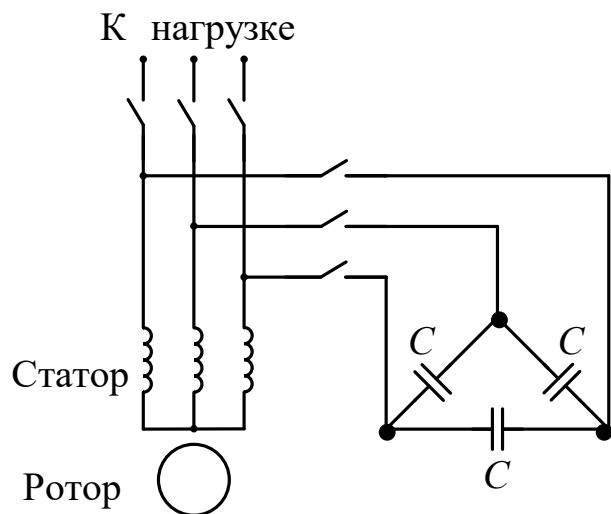


Рис. 4.33. Автономная энергетическая система с асинхронным генератором

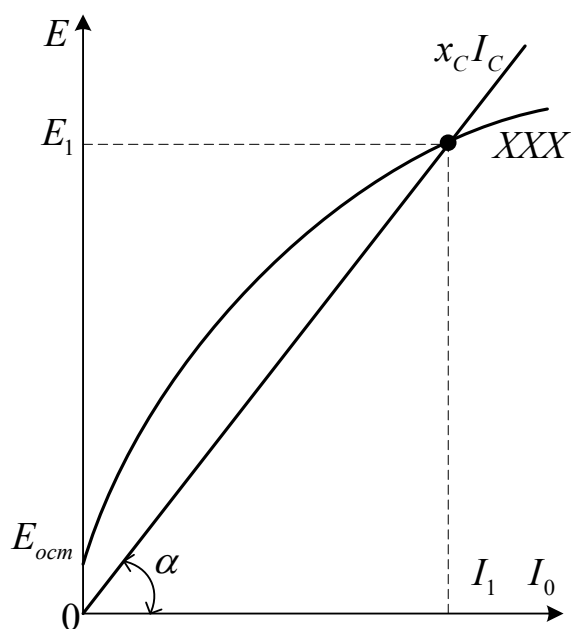


Рис.4.34. Самовозбуждение асинхронного генератора

Асинхронные машины используются преимущественно в качестве двигателей. Применение их в качестве генераторов ограничивается тем, что асинхронная машина не является источником реактивной мощности. При работе в генераторном режиме машина отдает в сеть активную и потребляет из сети реактивную мощность. Реактивная мощность необходима для создания магнитного поля машины. Источниками реактивной энергии могут являться синхронные машины, работающие в сети параллельно с асинхронной машиной или, в автономных энергетических

установках, батареи конденсаторов (рис. 4.33). В генераторном режиме асинхронная машина подключается к сети, ротор вращается в сторону вращения поля с частотой, превышающую синхронную частоту вращения поля. Ток холостого хода остается практически неизменным во всех режимах работы. При пуске асинхронный генератор доводят до подсинхронной скорости, а затем включают в сеть. Генератор возбуждается и принимает нагрузку, соответствующую мощности приводного двигателя. Активная мощность изменяется путем регулирования вращающего момента двигателя. Если нагрузка резко падает, например, при коротком замыкании, то генератор теряет

возбуждение, резко снижается его электромагнитный момент, возрастает частота вращения агрегата, во избежание чего принимают специальные меры [1].

При работе асинхронного генератора на отдельную сеть для его возбуждения применяют батареи конденсаторов. Этот процесс, характеристики которого представлены на рис. 4.34, называется самовозбуждением. Он протекает следующим образом. При вращении ротора генератора приводным двигателем с частотой близкой к номинальной в каждой фазе обмотки статора наводится эдс $E_{ост}$, которая вызвана остаточным магнитным потоком $\Phi_{ост}$. С включением обмоток статора на емкости C в цепи между статором генератора и батареей конденсаторов под действием $E_{ост}$ протекает ток I_C . Ток I_C создает поток Φ_C , направленный согласно $\Phi_{ост}$. В результате общий магнитный поток растет и вызывает рост эдс и тока в статоре. С ростом тока происходит дальнейшее увеличение магнитного потока и т.д. Процесс самовозбуждения идет до тех пор, пока эдс обмотки статора $I_C \omega_1 L_1$ не будет равна падению напряжения на конденсаторах $I_C \frac{1}{\omega_1 C_1}$, т.е. пока их значения не установятся в точке пересечения

характеристики холостого хода генератора с вольтамперной характеристикой цепи конденсаторов $I_C x_C$ и не станут равными току I_1 и эдс E_1 . Напряжение на выводах генератора зависит от емкости конденсаторов C (чем меньше емкость, тем больше угол α), а также от вида характеристики намагничивания. При малых емкостях машина не возбуждается. Насыщение генератора можно менять путем подмагничивания статора постоянным током при постоянной емкости конденсаторов. В процессе работы генератора с самовозбуждением следует поддерживать постоянной частоты вырабатываемого напряжения f_1 . Например, с ростом нагрузки надо увеличить частоту вращения ротора. Асинхронные генераторы могут найти практическое применение в электроустановках вспомогательного назначения небольшой мощности [8].

17 Линейные и дуговые асинхронные машины

Дуговой двигатель.

Дуговой двигатель характеризуется расположением обмотки на части окружности, как это показано на рис. 3. Особенностью этого двигателя является зависимость частоты вращения его статора 1 от длины дуги, на которой располагаются обмотки 2 статора 3.

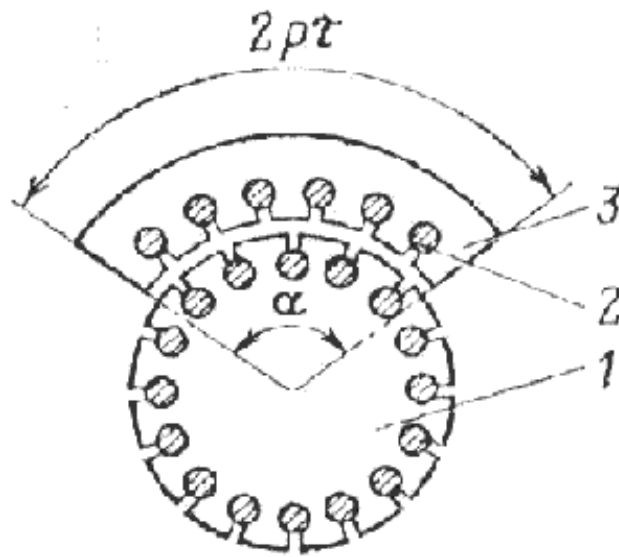


Рис. 3

Пусть обмотки статора располагаются на дуге, длина которой соответствует центральному углу $\alpha = 2p\tau$, где τ - длина полюсного деления и p - число пар полюсов. Тогда за один период тока вращающееся поле статора совершит поворот на угол $2p\tau/p = \alpha$, а в течение одной минуты поле повернется на $n = \alpha/p \cdot 60f/2\pi$ оборотов, т. е. будет иметь частоту вращения n , об/мин.

Выбирая различные α , можно выполнять дуговые двигатели с различными частотами вращения ротора.

4.19.2. Линейный асинхронный двигатель. Рабочие органы многих производственных механизмов совершают поступательное или возвратно-поступательное движение. Снижение потерь мощности, повышение кпд, надежности достигается применением линейных асинхронных двигателей (рис.4.42). Принципиальное отличие их от двигателей нормального исполнения

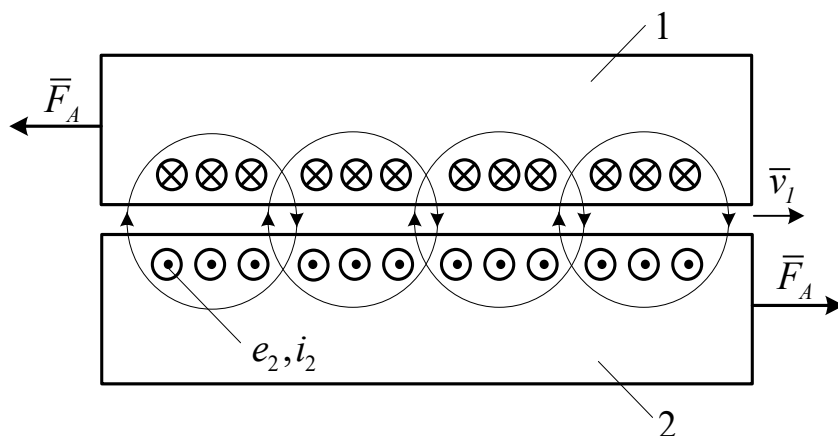


Рис. 4.42. Структурная схема линейного асинхронного двигателя.

1 – статор (индуктор); 2 – ротор (бегун)

состоит в том, что трехфазная обмотка статора (индуктора), включаемая по схеме Y или Δ , создает не вращающееся, а бегущее магнитное поле. Индуктор линейного асинхронного двигателя получается, если разрезать вдоль оси и развернуть на плоскости статор обычного асинхронного двигателя. Бегущее магнитное поле будет перемещаться вдоль развернутой поверхности сердечника индуктора с

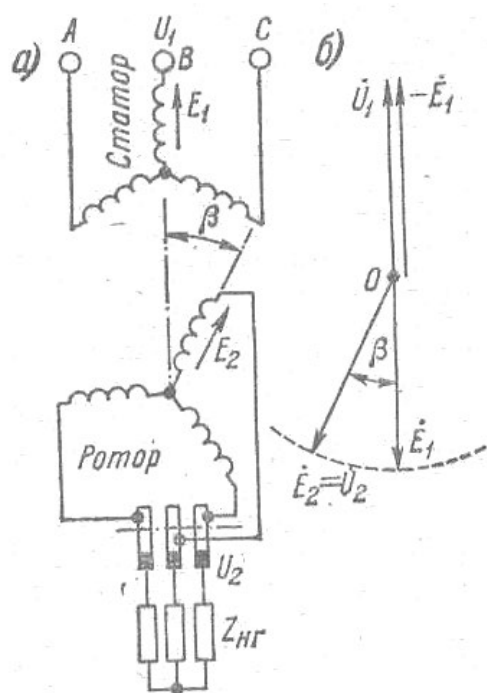
синхронной скоростью \bar{v}_1 . Обычно индуктор жестко закреплен, а подвижная часть, бегун, передвигается вдоль оси двигателя со скоростью $\bar{v}_2 < \bar{v}_1$ (иногда индуктор перемещается относительно бегуна). Бегущее поле индуктора сцепляется с короткозамкнутой обмоткой бегуна, наводит в ней эдс e_2 и ток i_2 . Ток в обмотке бегуна взаимодействует с полем индуктора, в результате чего

возникают электромагнитные силы \bar{F}_A (силы Ампера), перемещающие бегун относительно индуктора. В некоторых конструкциях линейных асинхронных двигателей бегун изготавливают из полос меди, алюминия, ферромагнитной стали. Линейные асинхронные двигатели применяют в электроприводах заслонок, ленточных конвейеров, подъемно-транспортных механизмов; мощные двигатели используются как тяговые на электрическом транспорте. Основным их недостаток – явление краевого эффекта, обусловленного конструкцией индуктора и приводящего к негативным воздействиям на подвижную часть двигателя. Линейные асинхронные двигатели имеют худшие рабочие характеристики и энергетические показатели по сравнению с двигателями нормального исполнения [2].

Практическое применение находят магнитогидродинамические машины (МГД-двигатели и МГД-генераторы). Подвижной частью машин данного исполнения является жидкость. Магнитное поле наводит в ней ток, а возникающие электромагнитные силы увлекают жидкость. МГД-двигатели используются в металлургии для перемешивания жидких металлов, в системах охлаждения атомных реакторов. МГД-генераторы на выходе обычно выдают постоянный ток. Их подвижной частью являются высокотемпературный газ или плазма. Избыточная тепловая энергия, выделяемая при этом, преобразуется в электрическую энергию на тепловых электростанциях [8].

18 Фазорегулятор и индукционный регулятор напряжения.

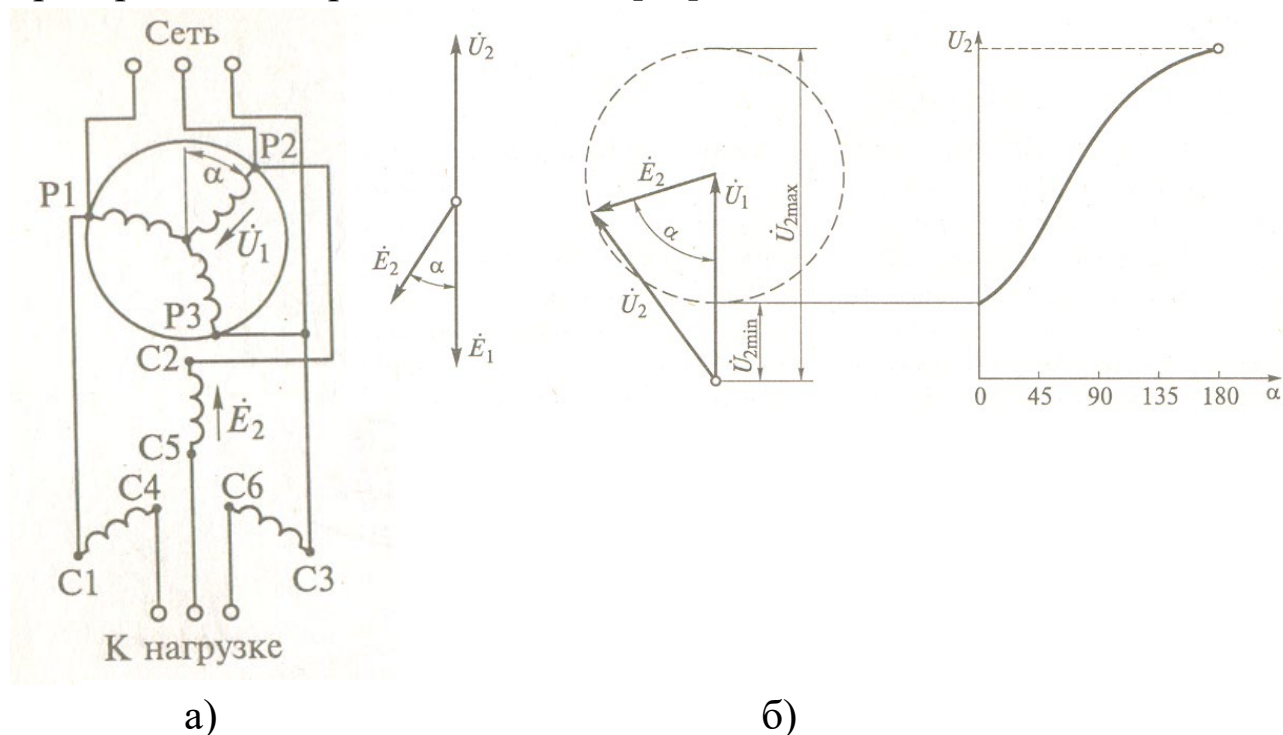
Асинхронные машины с заторможенным ротором. Теория асинхронных машин имеет много общего с теорией трансформаторов: обмотка статора является первичной, а обмотка ротора – вторичной. Обмотки не имеют электрической связи, передача энергии из обмотки статора в обмотку ротора происходит через воздушный зазор. Принципиальное отличие от трансформатора состоит в способе наведения эдс в обмотках, поскольку обмотка ротора (вторичная обмотка) является вращающейся. Уточнение параметров обмотки ротора достигается введением в них показателя работы асинхронного двигателя – скольжения [1].



Трехфазные асинхронные машины данного типа имеют фазный ротор, обмотка которого может подключаться как к нагрузке, так и к питающей сети. Ротор можно плавно поворачивать с помощью какого-либо механизма, либо от руки, в результате чего достигается регулирование напряжения по фазе (фазорегулятор) и величине (индукционный регулятор напряжения). Фазорегулятор (рис. 4.40) изменяет фазу вторичного напряжения, являющегося постоянным, относительно

Рис. 4.40. Схема соединения фазорегулятора (а) и векторная диаграмма (б)

первичного напряжения. Обмотки статора и ротора имеют трансформаторную связь, поэтому фазорегулятор называется также поворотным трансформатором. Ротор заторможен и может быть повернут в любую сторону относительно статора на 360^0 эл. Обмотка статора присоединяется к сети, обмотка ротора – к нагрузке. Сопротивлениями обмоток машины пренебрегаем. При совпадении осей обмоток одноименных фаз статора и ротора магнитное поле одновременно набегает на обе обмотки, индуцируя в них эдс $\bar{E}_1 = -\bar{U}_1$ и $\bar{E}_2 = \bar{U}_2$, совпадающие по фазе. Ротор поворачивается на угол β относительно статора, при этом эдс \bar{E}_1 и \bar{E}_2 , сдвигаются друг относительно друга на этот угол. Таким образом, эдс ротора \bar{E}_2 неизменна по величине и плавно регулируется по фазе. Фазорегуляторы применяют в устройствах автоматики для фазового управления и в измерительной технике при проверке ваттметров и счетчиков [11].



Индукционный регулятор напряжения (ИРН), представленный на рис. 4.41, а, плавно регулирует напряжение по величине. Ротор заторможен и может быть

Рис. 4.41. Схема соединения индукционного регулятора напряжения (а) и его векторные диаграммы (б)

повернут в любую сторону относительно статора на 360^0 эл. Обмотки статора и ротора имеют автотрансформаторную связь, поэтому ИРН называется также поворотным автотрансформатором. Напряжение сети \bar{U}_1 подводится к обмотке ротора, который создает вращающееся магнитное поле, наводящее в обмотке ротора эдс $\bar{E}_1 = -\bar{U}_1$, а в обмотке статора – эдс \bar{E}_2 . При совпадении осей обмоток ($\alpha = 0$) эдс \bar{E}_1 и \bar{E}_2 совпадают по фазе. При $\alpha = 180^0$ эл эдс \bar{E}_1 и \bar{E}_2 окажутся в противофазе (\bar{E}_2 и \bar{U}_1 по фазе совпадают). Если сопротивлениями обмоток пренебрегаем, то напряжение на выходе ИРН определяется как:

$$\bar{U}_2 = \bar{U}_1 + \bar{E}_2 \quad (4.100)$$

При повороте ротора ИРН концы векторов \bar{E}_2 и \bar{U}_2 описывают окружности

(рис. 4.41,б), напряжение \bar{U}_2 меняется от $\bar{U}_{2\min} = \bar{U}_1 - \bar{E}_2$ ($\alpha = 0$) и до $\bar{U}_{2\max} = \bar{U}_1 + \bar{E}_2$ ($\alpha = 180^\circ$ эл). Индукционный регулятор напряжения применяют в лабораторных исследованиях и для настройки оборудования [22].