

1. АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

1.1. Общие сведения. Классификация асинхронных машин

Асинхронные машины имеют относительно простую и надежную конструкцию, а также низкую стоимость. Асинхронные машины нормального исполнения имеют две основные части – неподвижную (статор) и вращающуюся (ротор). Роторы асинхронных машин выполняются короткозамкнутыми или фазными. Конструкция ротора определяет рабочие и регулировочные свойства машин, на которые также влияет величина воздушного зазора между статором и ротором. Для создания магнитного поля в зазоре необходима реактивная мощность, которая потребляется из сети или от других источников реактивной мощности, например, батарей конденсаторов. Трехфазные асинхронные машины с короткозамкнутым ротором являются наиболее распространенным видом электрических машин.

Асинхронные машины находят наибольшее применение в качестве двигателей. Они потребляют более 60% всей вырабатываемой электроэнергии и являются основными элементами систем электропривода в разных отраслях промышленности. Диапазон их мощностей меняется в пределах от долей ватт до нескольких десятков мегаватт. Асинхронные двигатели изготавливаются на номинальное напряжение до 10 кВ и различные частоты вращения. В генераторном режиме асинхронные машины применяются редко [2].

Асинхронные короткозамкнутые двигатели широко используются в нерегулируемых электроприводах типовых общепромышленных механизмов (насосы, компрессоры, вентиляторы, подъемно-транспортные механизмы и т.д.). В таких механизмах не требуется регулирование частоты вращения ротора, поэтому применяются относительно простые схемы управления двигателя. Изменение частоты вращения ротора асинхронного короткозамкнутого двигателя в широком диапазоне при обеспечении необходимых динамиче-

ских характеристик электроприводов достигается применением вентильных преобразователей частоты питающего напряжения [25]. В асинхронных двигателях с фазным ротором регулирование частоты вращения ротора может осуществляться путем включения в цепь ротора добавочного регулируемого сопротивления или подведения к роторной обмотке добавочного напряжения питания (асинхронно-вентильные каскады, машины двойного питания) [26], что позволяет повысить энергетические показатели и регулировочную способность электропривода.

Асинхронные машины выпускаются едиными сериями, которые применяются для привода типовых механизмов, не предъявляющих особых требований к пусковым, регулировочным, энергетическим характеристикам, уровню шума и т.д. Вместе с тем в единых сериях предусматриваются электрические и конструктивные модификации, с учетом условий окружающей среды, требований к регулированию частоты вращения, условиям эксплуатации. В некоторых электроприводах, например, при частотном управлении, возникают требования, которым не могут удовлетворить машины единых серий. Для таких электроприводов создаются специализированные машины (металлургические, краново-металлургические и др.) [24].

1.2. Вращающееся магнитное поле в асинхронной машине

Обеспечение заданных свойств трехфазных асинхронных машин зависит от процесса формирования вращающегося магнитного поля, создаваемого обмоткой статора, которая может быть соединена по схеме «звезда» или «треугольник». В двигательном режиме работы асинхронной машины при включении в сеть статорной обмотки, соединенной, например, по схеме «звезда», в фазных обмотках статора протекают токи, описываемые выражениями:

$$\left. \begin{aligned} i_A &= I_{Am} \sin \omega t; \\ i_B &= I_{Bm} \sin(\omega t - 120_{\text{эл}}^0); \\ i_C &= I_{Cm} \sin(\omega t + 120_{\text{эл}}^0). \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

Электрические градусы связаны с геометрическими градусами выражением:

$$\alpha_{\text{эл}} = p \alpha_{\text{геом}}, \quad (1.2)$$

где p – число пар полюсов, количество которых зависит от способа включения обмоток каждой фазы.

Токи каждой фазы создают пульсирующие магнитодвижущие силы, результирующее действие которых приводит к созданию магнитодвижущей силы, результирующий вектор которой вращается относительно статора. Система токов в трехфазной двухполюсной обмотке статора асинхронного двигателя показана на рис. 1.1. Рассмотрим направление токов всех фазных обмоток в обозначенных точках, приняв, что при условии $i > 0$ ток

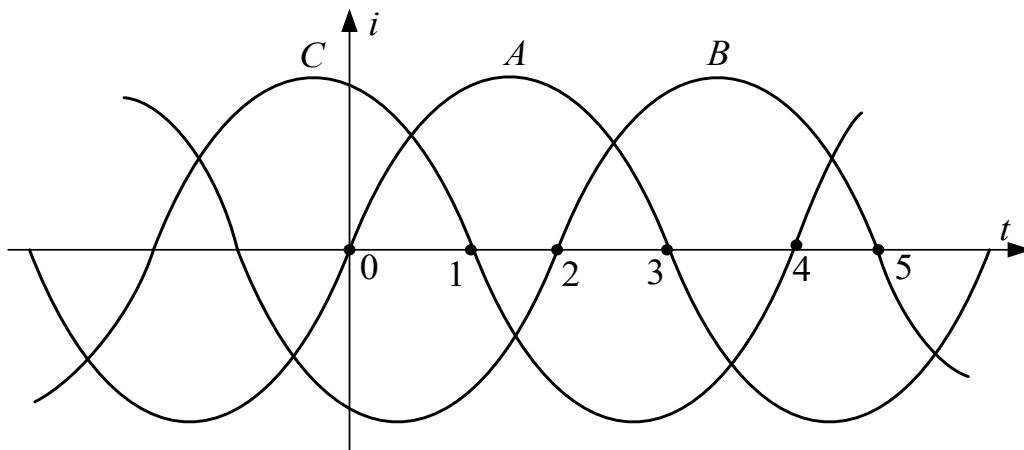


Рис. 1.1. Система трехфазных токов в обмотке статора асинхронного двигателя

протекает от начала обмотки к ее концу. Если $i < 0$, то ток протекает в обмотке от ее конца к началу. Принцип получения вращающегося (кругового) магнитного поля показан на рис. 1.2.

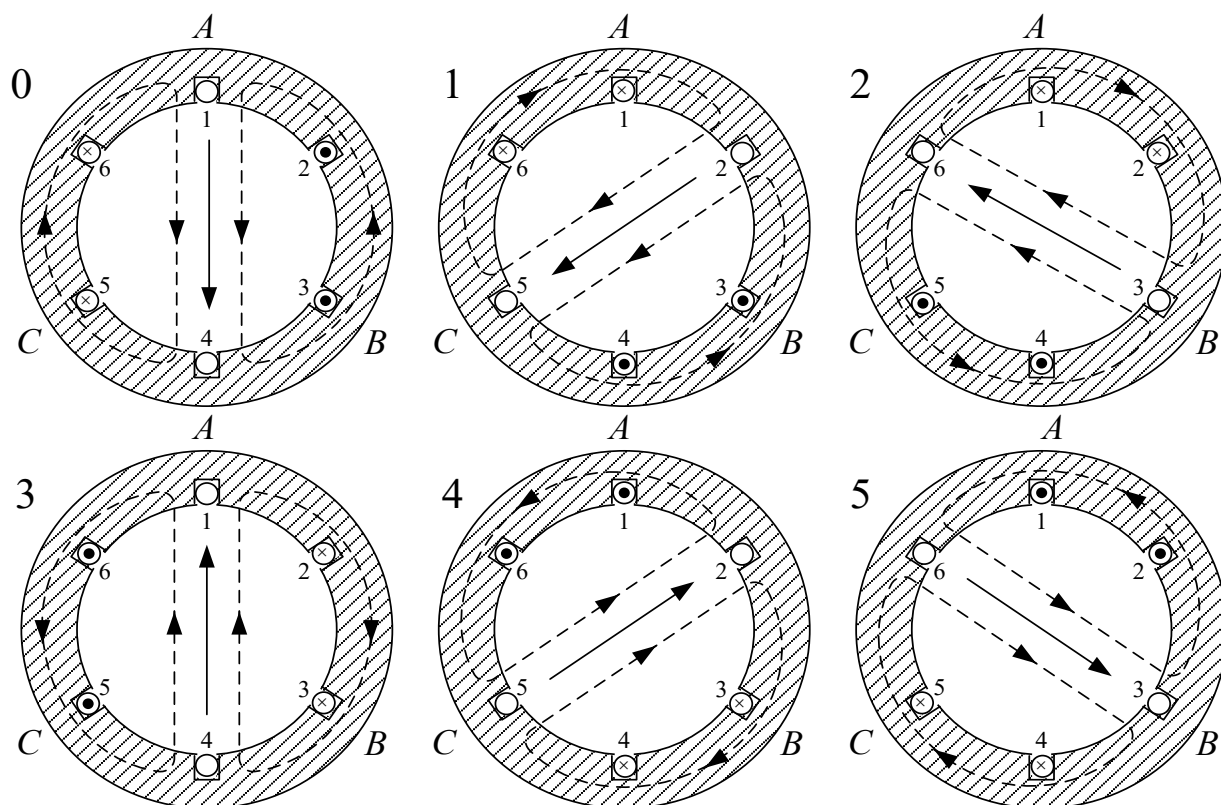


Рис. 1.2. Принцип получения магнитодвижущей силы вращающегося магнитного поля

Результирующий вектор магнитодвижущей силы обмотки статора при переходе от одного указанного момента времени к другому поворачивается на угол $60_{эл}^0$ и за период совершает полный оборот. Частота его вращения (об/мин) определяется

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}, \quad (1.3)$$

где f_1 – частота тока в обмотке статора, Гц.

При повреждениях фазных обмоток (обрыв, ненадежный контакт) электромагнитное поле в зазоре перестает быть круговым. Нормальные условия работы асинхронного двигателя нарушаются. В этих случаях электромагнитное поле имеет эллиптический или пульсирующий характер [27].

1.3. Принцип действия асинхронных машин

Рассмотрим принцип действия асинхронного двигателя на основе элементарной модели (рис. 1.3) [Ш]. При неподвижном роторе создадим с

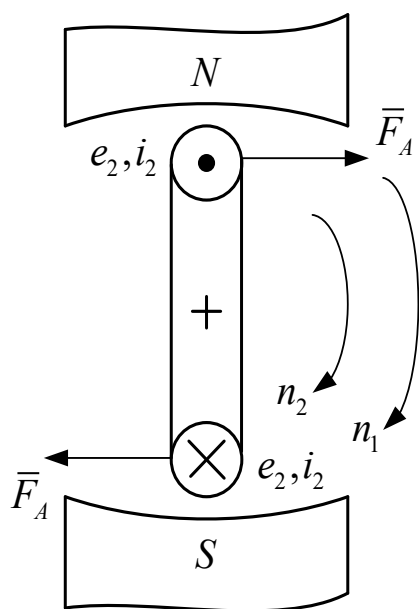


Рис.1.3. Принцип действия асинхронного двигателя

помощью вращающегося с частотой n_1 постоянного магнита магнитное поле, которое пересекает проводники короткозамкнутого витка на роторе, индуцируя 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 \bar{F}_A . Направление дей-

ствия \bar{F}_A определяется по правилу левой руки. Сила \bar{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 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 $n_2 = n_1$, когда частота вращения ротора равна частоте вращения поля статора, асинхронный двигатель устойчиво работать не может, поскольку эдс в обмотке ротора перестает индуцироваться, в результате исчезает ток ротора и момент, снижается частота вращения ротора. При условии $n_2 < n_1$ в роторе наводится эдс, появляется ток и возникает вращающий момент. Он направлен на преодоление сил трения в подшипниках и иных воздействий, приложенных к валу со стороны механизма, приводимого двигателем. Таким образом асинхронный двигатель работает с частотой вращения, которая определяется нагрузкой на его валу. Условие $n_2 < n_1$, характерное для двигательного режима работы, представляет собой основное отличие асинхронных машин от синхронных машин, для которых $n_2 = n_1$.

В реальной асинхронной машине направление вращения магнитного поля статора а, значит, и направление вращения ротора зависит от порядка чередования фаз подводимого к обмотке статора напряжения.

Величина, отражающая условие $n_2 \neq n_1$, называется скольжением

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}. \quad (1.4)$$

Из (1.4) частота вращения ротора n_2 определяется с помощью скольжения как:

$$n_2 = n_1 (1 - s). \quad (1.5)$$

Номинальное скольжение s_H соответствует номинальной частоте вращения двигателя n_{2H} . Частота эдс и тока в обмотке ротора при его вра-

щении пропорциональна скольжению, а также частоте вращения магнитного поля статора относительно ротора $n_s = n_1 - n_2$:

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n_2)}{60} = f_1 s. \quad (1.6)$$

Частота вращения магнитодвижущей силы статора относительно ротора равна

$$n_2 = \frac{60 f_2}{p} = n_1 s. \quad (1.7)$$

Частота вращения магнитодвижущей силы ротора относительно статора больше n_s на величину n_2 , т.е.

$$n_s + n_2 = n_1 s + n_1 (1 - s) = n_1. \quad (1.8)$$

Из (1.8) следует, что действующие в асинхронном двигателе магнитодвижущие силы статора и ротора вращаются в воздушном зазоре с синхронной частотой вращения n_1 независимо от частоты вращения ротора двигателя n_2 . Результирующее магнитное поле в зазоре машины образуется совокупным действием магнитодвижущих сил статора и ротора [2].

1.4. Устройство асинхронных машин

Асинхронные машины по своему устройству делятся на два типа, отличающиеся конструктивным исполнением ротора: машины с короткозамкнутым ротором (рис. 1.4) и машины с фазным ротором (рис. 1.5). По кон-

струкции статоров машины обоих типов аналогичны друг другу [2].

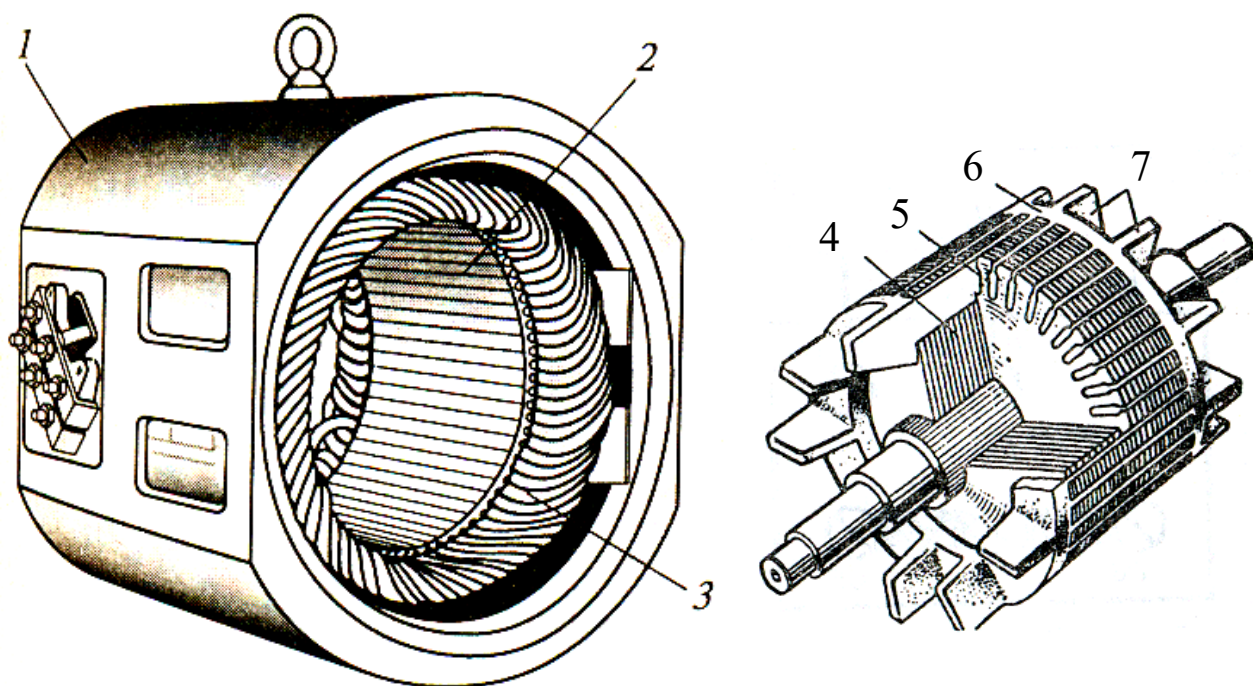


Рис. 1.4. Конструкция статора (а) и короткозамкнутого ротора (б) асинхронной машины:

1 – корпус; 2 – сердечник статора; 3 – обмотка; 4 – сердечник ротора; 5 – стержни обмотки; 6 – замыкающие кольца; 7 – лопажки

Статор асинхронной машины состоит из корпуса, сердечника и обмотки. Корпус изготавливают стальным, чугунным, алюминиевым, пластмассовым. Снаружи устанавливают коробку, в которую помещают выводы 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 выполняют пазы, в которые укладывают трехфазную обмотку. Обмотку статора выполняют по шаблонам изолированным медным или алюминиевым проводом. Она укладывается в пазах таким образом, чтобы пространственный сдвиг между каждой фазой составлял $120_{эл}^{\circ}$ для создания кругового поля асинхронной машины. Обмотка каждой фазы содержит несколько катушек, которые мо-

гут 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. Это условие отображается указанием соответствующего обозначения в паспорте машины или на ее табличке (Y/Δ: 380/220; 660/380 и т.д.). Части витков, расположенные в пазах, называют активными сторонами, поскольку в них индуктируются эдс. Части витков, соединяющие активные стороны и расположенные на торцевых частях статора или ротора, называют лобовыми соединениями [2].

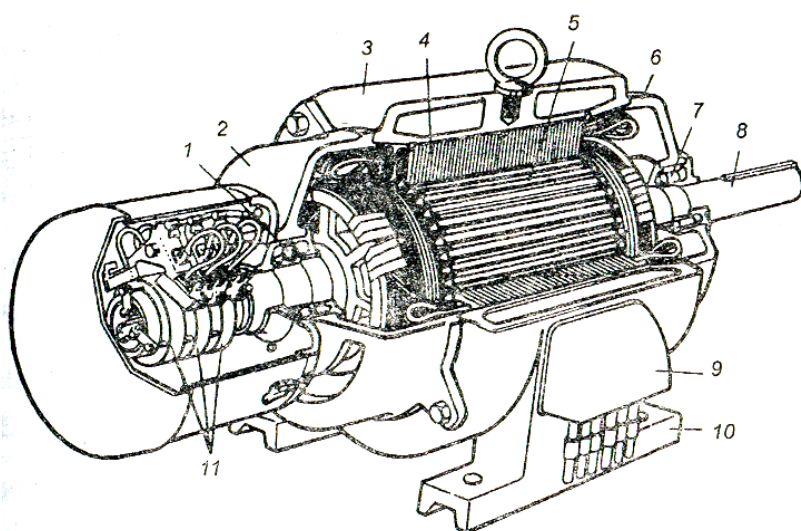


Рис. 1.5. Устройство асинхронной машины с фазным ротором: 1, 7 – подшипники; 2, 6 – щиты подшипниковые; 3 – корпус; 4 – статор; 5 – ротор; 8 – вал; 9 – коробка выводов; 10 – лапы; 11 – фазные кольца

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 [2]. В цепь ротора можно включать активные, индуктивные и комплексные сопротивления, а также источники эдс. Такие меры позволяют увеличить пусковой момент, понизить пусковые токи, обеспечить плавность пуска двигателя [19].

1.5. Опыт холостого хода асинхронной машины с фазным ротором

Испытания асинхронных машин в режиме холостого хода осуществляется для опытного определения тока и потерь холостого хода. Обмотка статора подключается к источнику регулируемого по амплитуде синусоидального напряжения U_1 - автотрансформатора или индукционного регулятора напряжения, что позволяет менять амплитуду напряжения в широких пределах. Вал машины должен быть свободным от механической нагрузки. В асинхронном двигателе с фазным ротором 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 главного потока $\bar{\Phi}_{1m}$. Поток $\bar{\Phi}_{1s}$ индуцирует эдс рассеивания $-j\bar{I}_0 x_1$, а главный поток $\bar{\Phi}_{1m}$ наводит в обмотках статора и ротора эдс \bar{E}_1 и \bar{E}_2 . Систему уравнений, описывающих данный процесс имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \bar{U}_1 &= -\bar{E}_1 + j\bar{I}_0 x_1 + r_1 \bar{I}_0 = -\bar{E}_1 + z_1 \bar{I}_0; \\ z_1 &= r_1 + jx_1; \\ \bar{E}_2 &= \bar{U}_2. \end{aligned} \right\} \quad (1.9)$$

Для трехфазной асинхронной машины с фазным ротором коэффициент трансформации эдс k_e определяется как среднеарифметическое значение, полученное по отношению измеренных фазных напряжений статорной обмотки к фазным эдс роторной обмотки, т.е.:

$$k_{eA} = \frac{U_{AX}}{E_{ax}}; \quad k_{eB} = \frac{U_{BY}}{E_{by}}; \quad k_{eC} = \frac{U_{CZ}}{E_{cz}}; \quad (1.10)$$

$$k_e = \frac{1}{3}(k_{eA} + k_{eB} + k_{eC}). \quad (1.11)$$

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, двигатель разгоняется до скорости холостого хода. В обмотку статора включаются приборы, необходимые для измерения тока и напряжения. Величину напряжения U_1 меняют в диапазоне $0,4-1,15U_{1H}$ [6], фиксируя показания приборов в 6–8 точках. Вычисляются средние значения напряжений и токов по формулам:

$$U_{\text{ср}} = \frac{1}{3}(U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}); \quad (1.12)$$

$$I_{\text{Лср}} = \frac{1}{3}(I_A + I_B + I_C). \quad (1.13)$$

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

$$U_{1\phi} = U_0 = \frac{U_{\text{Лср}}}{\sqrt{3}}; \quad I_{1\phi} = I_0 = I_{\text{Лср}}. \quad (1.14)$$

При соединении обмотки статора в треугольник:

$$U_{1\phi} = U_0 = U_{\text{Лср}}; \quad I_{1\phi} = I_0 = \frac{I_{\text{Лср}}}{\sqrt{3}}. \quad (1.15)$$

Мощность, потребляемая машиной в режиме холостого хода P_0 , может быть установлена по показаниям двух ваттметров:

$$P_0 = |P'_0 + P''_0| = 3I_0^2 r_1 + \Delta p_{c1} + \Delta p_{\text{мех}}, \quad (1.16)$$

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 (1.16) можно представить в виде

$$\Delta p_{c1} + \Delta p_{\text{мех}} = \Delta P = P_0 - 3I_0^2 r_1. \quad (1.17)$$

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

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{3U_0 I_0}. \quad (1.18)$$

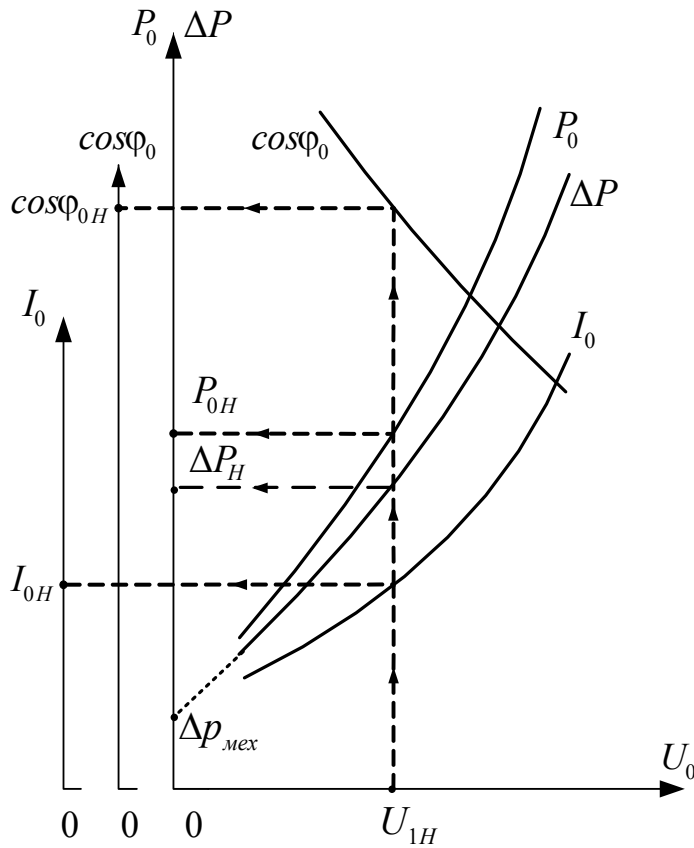


Рис. 1.6. Характеристики асинхронной машины в режиме холостого хода

По характеристикам, показанным на рис. 1.6, 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 Δp_{mex} , которые считаются неизменными. Магнитные потери Δp_{cl} находятся из (1.17) с учетом установленного значения Δp_{mex} [10].

В асинхронных машинах доля тока холостого хода I_0 значительно больше, чем у трансформаторов. Это объясняется наличием воздушного за-

зора между статором и ротором. В результате возрастает сопротивление магнитной цепи, и для создания заданного потока машины требуется больший ток I_0 . Величина воздушного зазора у асинхронных машин может быть различной. Она зависит от мощности машины, а также от условий 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 (краново-металлургической серии 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.

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:

$$z_0 = \frac{U_{\text{лср}}}{\sqrt{3}I_{\text{лср}}}; \quad r_0 = \frac{P_0}{3I_{\text{лср}}^2}; \quad x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}. \quad (1.19)$$

При соединении обмотки статора в треугольник:

$$z_0 = \frac{\sqrt{3}U_{\text{лср}}}{I_{\text{лср}}}; \quad r_0 = \frac{P_0}{I_{\text{лср}}^2}; \quad x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}. \quad (1.20)$$

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

1.6. Операция приведения асинхронной машины

Операция приведения выполняется с целью построения удобных для анализа схем замещения реальных асинхронных машин, в которых электромагнитные связи между обмотками статора и ротора заменяются электрическими. Будем рассматривать вместо реальной машины приведенную машину, статорные и роторные обмотки которой имеют одинаковое число витков. Обычно 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 [1].

Коэффициент трансформации эдс

$$k_e = \frac{E_1}{E_2} = \frac{4,44 f_1 w_1 k_{\sigma 1} \Phi_m}{4,44 f_2 w_2 k_{\sigma 2} \Phi_m} = \frac{w_1 k_{\sigma 1}}{w_2 k_{\sigma 2}}, \quad (1.21)$$

где $k_{\sigma 1}$, $k_{\sigma 2}$ – обмоточные коэффициенты, учитывающие распределение обмоток по пазам статора и ротора, w_1 , w_2 – число последовательно соединенных витков в фазных обмотках статора и ротора.

$$E'_2 = E_1 = k_e E_2. \quad (1.22)$$

Электромагнитная мощность машины и ток роторной обмотки определяется выражениями:

$$m_2 E_2 I_2 \cos \psi_2 = m_2 E'_2 I'_2 \cos \psi'_2; \quad \cos \psi_2 = \cos \psi'_2; \quad (1.23)$$

$$I'_2 = I_2 \frac{m_2}{m_1} \cdot \frac{1}{k_e} = I_2 \frac{m_2 w_2 k_{o62}}{m_1 w_1 k_{o61}} = I_2 \frac{1}{k_i}; \quad (1.24)$$

$$k_i = \frac{m_1 w_1 k_{o61}}{m_2 w_2 k_{o62}} = k_e, \quad (1.25)$$

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:

$$r'_2 = \frac{m_2}{m_1} \cdot \frac{m_1 w_1 k_{o61}}{m_2 w_2 k_{o62}} \cdot \frac{m_1 w_1 k_{o61}}{m_2 w_2 k_{o62}} r_2 = k_e k_i r_2 = k_e^2 r_2; \quad (1.26)$$

$$x'_2 = \frac{m_2}{m_1} \cdot \frac{m_1 w_1 k_{o61}}{m_2 w_2 k_{o62}} \cdot \frac{m_1 w_1 k_{o61}}{m_2 w_2 k_{o62}} x_2 = k_e k_i x_2 = k_e^2 x_2. \quad (1.27)$$

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

$$\psi_2 = \psi'_2 = \arctg \frac{x_2}{r_2} = \arctg \frac{x'_2}{r'_2}. \quad (1.28)$$

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

1.7. Опыт короткого замыкания асинхронной машины

При проведении опыта короткого замыкания асинхронной машины 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 $1,5\text{--}2,5 I_{1H}$. Данный опыт позволяет определить напряжение, потери короткого замыкания, пусковой момент и его кратность [1].

Конечным 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 $(0,5\text{--}1,2) I_H$ [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 измерений, выполненных для каждого значения подводимого напряжения.

$$U_K = U_{KL} = \frac{1}{3}(U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}); \quad (1.29)$$

$$I_K = I_{KL} = \frac{1}{3}(I_A + I_B + I_C). \quad (1.30)$$

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

$$P_K = |P'_K + P''_K|. \quad (1.31)$$

По характеристикам, взятым из справочной литературы [2], 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:

$$z_K = \frac{U_{KL}}{\sqrt{3}I_{KL}}; \quad r_K = \frac{P_K}{3I_{KL}^2}; \quad x_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2}, \quad (1.32)$$

где $x_K = x_1 + x'_2$; $r_K = r_1 + r'_2$.

Коэффициент мощности $\cos \varphi_K$:

$$\cos \varphi_K = \frac{P_K}{\sqrt{3} U_{KL} I_{KL}}. \quad (1.33)$$

При определении параметров машины, 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 75^0C , 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 следующим образом. Вся потребляемая машиной мощность расходуется на покрытие потерь в обмотках:

$$P_K = m_1 I_1^2 r_1 + m_2 I_2^2 r_2 = m_1 I_1^2 r_1 + m_1 (I'_2)^2 r'_2 = m_1 I_1^2 r_K. \quad (1.34)$$

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

$$I'_K = I_\Pi \approx I_{1H} \left(\frac{U_{1H}}{U_{KH}} \right); \quad (1.35)$$

$$P'_K \approx P_{KH} \left(\frac{U_{1H}}{U_{KH}} \right)^2. \quad (1.36)$$

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:

$$M_K \approx M_{\Pi} = \frac{\Delta p_{об2K}}{\omega_1} = \frac{(P_{KH} - m_1 I_{KH}^2 r_1 - \Delta p_{сK})}{\omega_1}. \quad (1.37)$$

Магнитные потери $\Delta p_{сK}$ в магнитопроводах статора и ротора приближенно определяются по характеристикам холостого хода, используя рис. 1.6 для напряжения $U_1 = U_K$. Начальный пусковой момент получают пересчетом момента M_K на начальный пусковой ток I_{Π} :

$$M_{\Pi} \approx M_K \left(\frac{I_{\Pi}}{I_K} \right)^2. \quad (1.38)$$

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

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].

1.8. Асинхронная машина с вращающимся ротором. Основные уравнения. Схемы замещения. Векторная диаграмма

Полезный или основной результирующий магнитный поток в воздушном зазоре машины $\bar{\Phi}_m$ образуется в результате взаимодействия полезных магнитных потоков статора $\bar{\Phi}_{1m}$ и ротора $\bar{\Phi}_{2m}$. Используя Φ_m можно определить эдс фазной обмотки статора:

$$E_1 = 4,44 f_1 w_1 k_{\text{об1}} \Phi_m. \quad (1.39)$$

Эдс фазной обмотки ротора, вращающегося со скольжением s :

$$E_2 = 4,44 f_2 w_2 k_{\text{об2}} \Phi_m = 4,44 f_1 s w_2 k_{\text{об2}} \Phi_m = E_2 s. \quad (1.40)$$

Для асинхронных машин, преимущественно использующихся как двигатели, прежде всего, представляет интерес их работа в этом режиме. Уравнения, характеризующие эдс трехфазного асинхронного двигателя для цепей статора и ротора имеют вид:

$$\bar{U}_1 = -\bar{E}_1 + j\bar{I}_1 x_1 + \bar{I}_1 r_1; \quad (1.41)$$

$$0 = \bar{E}_2' - j\bar{I}_2' x_2' - \bar{I}_2' \frac{R_2'}{s}, \quad (1.42)$$

где $R_2' = r_2' + r_{\text{доб}}'$ – приведенное значение полного активного сопротивления роторной цепи.

Уравнение (2.4) можно представить в виде:

$$\bar{E}'_2 = \bar{I}'_2 \frac{R'_2}{s} + j\bar{I}'_2 x'_2 = \bar{I}'_2 \left(\frac{R'_2}{s} + jx'_2 \right) = \bar{I}'_2 z'_2. \quad (1.43)$$

Значения величин E_2 и x_2 являются паспортными данными двигателя. Они приводятся в справочной для неподвижного ротора ($s = 1$). Уравнение токов имеет вид:

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_0 - \bar{I}'_2. \quad (1.44)$$

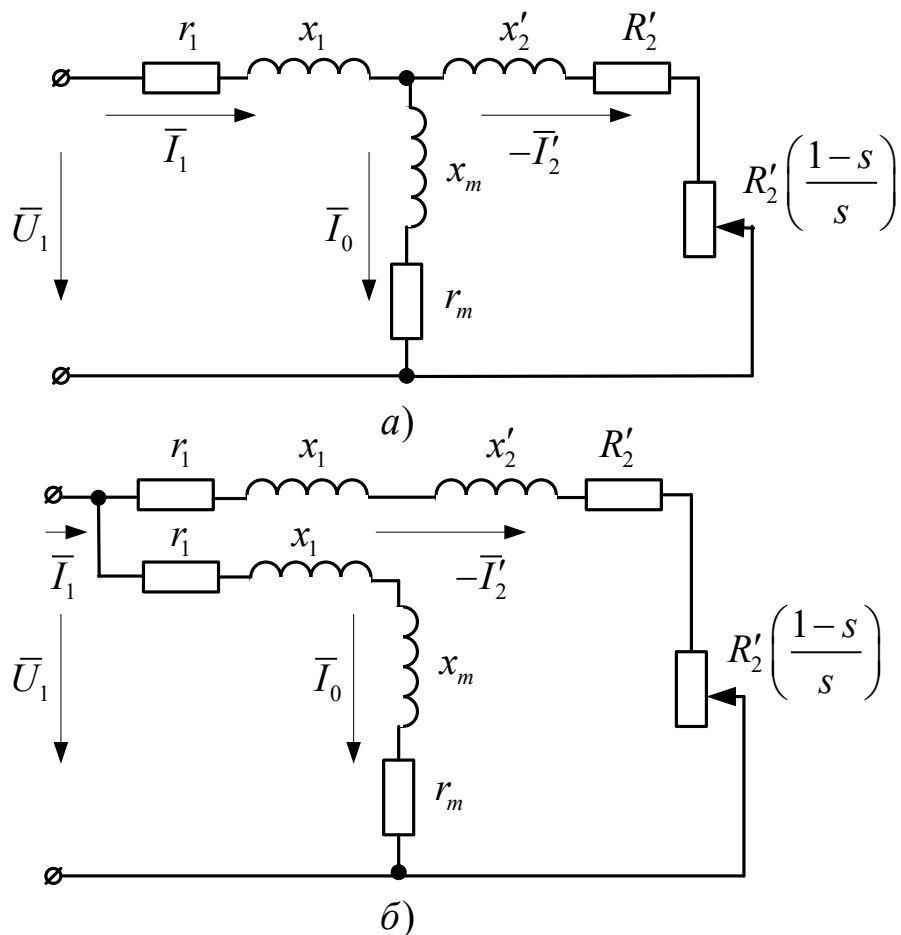


Рис. 1.7. Т-образная (а) и Г-образная (б) схемы замещения асинхронного двигателя

Уравнения (1.41) – (1.44) позволяют построить Т-образную схему замещения асинхронного двигателя, а после преобразований получить Г-

образную схему замещения, которые представлены на рис. 1.7. Схемы замещения применяются для облегчения расчетов машины, математического моделирования и 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:

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + x_K^2}}, \quad (1.45)$$

где $x_k = x_1 + x'_2$ – индуктивное сопротивление короткого замыкания.

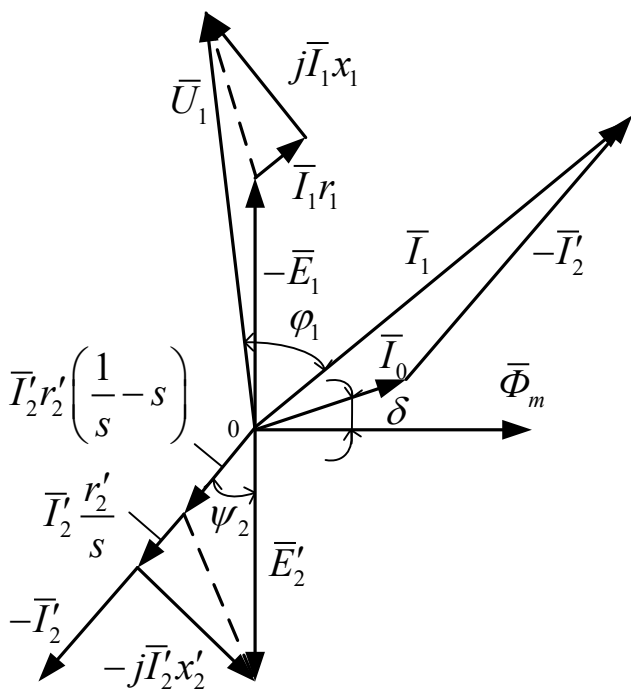


Рис. 1.8. Векторная диаграмма асинхронного двигателя

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

$x_0 \approx x_m$. Векторная диаграмма асинхронного двигателя показана на рис. 1.8 [1]. Она характеризует взаимное положение основных векторных перемен-

ных асинхронной машины.

1.9. Энергетическая диаграмма, потери и кпд, способы повышения энергетических показателей асинхронных двигателей

Преобразование энергии в асинхронном двигателе, как и в других электрических машинах, связано с потерями энергии. Потери делятся на

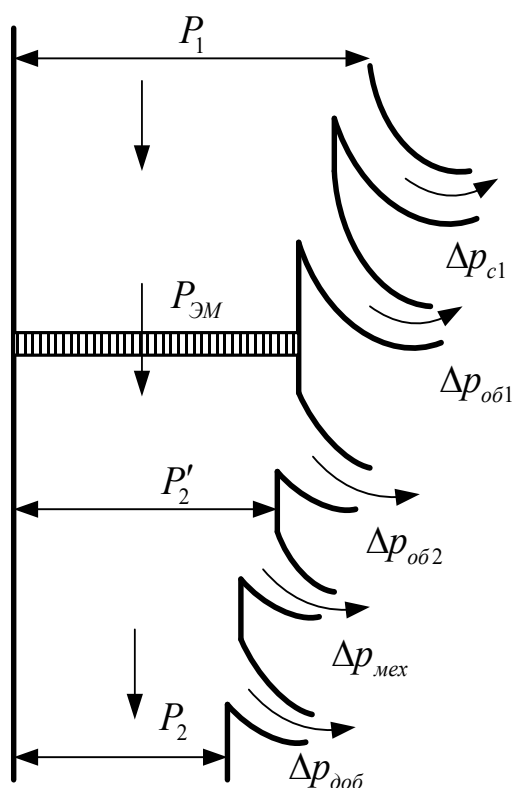


Рис. 1.9. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

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. 1.9) [1]. Мощность P_1 подводится из сети, за вычетом потерь в магнитопроводе Δp_{c1} и обмотке статора $\Delta p_{об1}$ преобразуется в электромагнитную мощность $P_{\Sigma M}$, которая передается через воздушный зазор машины в ротор. В нормальном режиме работы асинхронного двигателя потери в магнитопроводе ротора

пропорциональны частоте f_2 . Этими потерями можно пренебречь, т.к. $f_2 \ll f_1$. Электромагнитная мощность $P_{\Sigma M}$, благодаря которой возникает электромагнитный момент двигателя M , за вычетом потерь в обмотке ротора $\Delta p_{об2}$, преобразуется в полную механическую мощность P'_2 . На пре-

одоление 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 $\Delta p_{доб_H}$, 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, поверхностного эффекта и т.п. Потери $\Delta p_{доб}$ зависят от нагрузки двигателя β :

$$\Delta p_{доб} = \beta^2 \Delta p_{доб_H}. \quad (1.46)$$

Мощность P_2 – полезная мощность или мощность на валу двигателя.

Она характеризуется одноименным моментом M_2 :

$$M_2 = M - M_0, \quad (1.47)$$

Коэффициент полезного действия асинхронного двигателя:

$$\eta = 1 - \frac{\Delta p_{\Sigma}}{P_1} = 1 - \frac{\Delta p_{c1} + \Delta p_{об1} + \Delta p_{об2} + \Delta p_{мех} + \Delta p_{доб}}{P_1}. \quad (1.48)$$

Кпд асинхронных двигателей средней и большой мощности составляет 0,85-0,92. Большие значения кпд относятся к двигателям более высоких номинальных мощностей [2].

Электроприводы на базе асинхронных двигателей являются одними из основных приемников электрической энергии. При эксплуатации часто возникает необходимость оптимизации потребления ими реактивной мощности. Большинство асинхронных двигателей на механизмах общепромыш-

ленного назначения работают недогруженными или вхолостую. Такой режим работы является неэкономичным, т.к. он прежде всего вызывает неоправданные затраты электроэнергии. 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.

Следует добавить, что перегрузка двигателя, как и его недогрузка приводят к снижению кпд. Замена двигателя считается целесообразной, если средняя его нагрузка составляет менее 45% номинальной мощности. При нагрузке двигателя более 70% номинальной мощности замена в общем случае не целесообразна, а при нагрузке 45–70% целесообразность их замены должна быть подтверждена достаточным уменьшением потерь энергии. Применение батарей конденсаторов обеспечивает асинхронные двигатели реактивной мощностью, необходимой для создания вращающегося магнитного поля. Переключение схемы обмотки статора с треугольника на звезду приводит к уменьшению фазного напряжения в $\sqrt{3}$ раз. Примерно во столько же раз уменьшается поток, ток намагничивания и потери в стали двигателя, что ведет к повышению его коэффициента мощности и кпд. Для некоторых потребителей время работы двигателей на холостом ходу достигает 50–60% всей его работы. При промежутках работы на холостом ходу, превышающих 10 секунд, считается эффективным отключение двигателей

от сети с точки зрения экономии электроэнергии и потребления реактивной мощности [28].

1.10. Уравнение электромагнитного момента асинхронной машины

Электромагнитный момент M создаётся в результате взаимодействия тока ротора с вращающимся в зазоре машины магнитным полем. С учетом энергетической диаграммы (рис. 1.9) он определяется выражением:

$$M = \frac{P_{эм}}{\omega_1} = \frac{m_1 I_2' E_2' \cos \psi_2}{\omega_1} = \frac{m_1 I_2'^2 \frac{R_2'}{s}}{\omega_1}, \quad (1.49)$$

где ω_1 – синхронная угловая скорость вращения поля статора, рад/с.

$$\omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p}. \quad (1.50)$$

Выражение (1.45) получено согласно Г-образной схеме замещения (рис. 1.7,б). В соответствии с (1.49) выражение электромагнитного момента асинхронной машины будет иметь вид:

$$M = \frac{m_1 U_1^2 p \frac{R_2'}{s}}{2\pi f_1 \left(\left(r_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + x_K^2 \right)}, \quad (1.51)$$

где $x_K = x_1 + x_2'$ – индуктивное сопротивление короткого замыкания.

Задаваясь рядом значений скольжения s от $-\infty$ до $+\infty$ и принимая остальные параметры выражения (1.51) 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 [1]:

- 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 $U_1 = \text{const} = U_{1H}$, $f_1 = \text{const} = f_{1H}$, $R'_2 = r'_2$ ($r'_{доб} = 0$). При отклонении хотя бы одного из этих параметров от указанных значений характеристика является искусственной. В случае неподвижного ротора ($s = 1$) зависимость (1.51) представляет пусковой момент M_{II} :

$$M_{II} = \frac{m_1 U_1^2 p R'_2}{2\pi f_1 \left((r_1 + R')^2 + x_K^2 \right)}. \quad (1.52)$$

Дифференцируя выражение (1.51) по s и приравнявая полученный результат к нулю, определяем значение скольжения s_m , при котором момент асинхронной машины максимален M_m . Такое значение скольжения и момента называют критическими. Выражение для s_m имеет вид:

$$s_m = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{r_1^2 + x_K^2}}. \quad (1.53)$$

После подстановки (1.53) в (1.51) выражение для критического мо-

мента асинхронной машины M_m описывается равенством:

$$M_m = \frac{m_1 U_1^2 p}{4\pi \cdot f_1 \cdot [(r_1 \pm \sqrt{r_1^2 + x_K^2}]}. \quad (1.54)$$

В выражениях (1.53) и (1.54) знак «+» соответствует двигательному режиму, а знак «−» – генераторному режиму асинхронной машины. Для трехфазных асинхронных машин с учетом (1.50) выражения (1.51), (1.52), (1.54) преобразуются в выражения

$$M = \frac{3U_1^2 \frac{R'_2}{s}}{\omega_1 \left(\left(r_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + x_K^2 \right)}; \quad (1.55)$$

$$M_{II} = \frac{3U_1^2 R'_2}{\omega_1 \left((r_1 + R')^2 + x_K^2 \right)}; \quad (1.56)$$

$$M_m = \frac{3U_1^2}{2\omega_1 \cdot [(r_1 \pm \sqrt{r_1^2 + x_K^2}]}. \quad (1.57)$$

Статическая механическая характеристика может быть представлена в виде $\omega = f(M)$, т.к. при эксплуатации часто необходимо контролировать именно частоту вращения ротора. Для расчетов характеристик частоты вращения ω выражаются в рад/с, тогда как в паспортных данных машин частоты вращения n указаны в об/мин. Чтобы перейти от об/мин в рад/с целесообразно воспользоваться отношением

$$\omega = \frac{\pi n}{30} = \frac{n}{9,55}. \quad (1.58)$$

Статическая механическая характеристика асинхронной машины представлена на рис. 1.10. 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

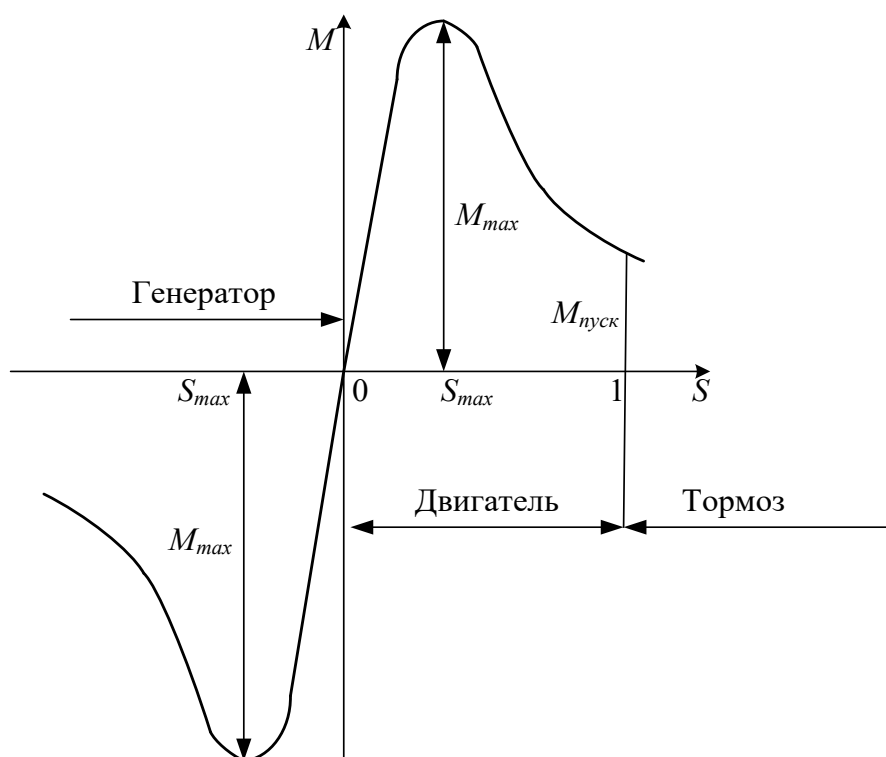


Рис. 1.10. Статическая механическая характеристика асинхронной машины

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 [2].

Асинхронные двигатели характеризуются таким важным параметром, входящим в их справочные данные как перегрузочная способность:

$$k_m = \frac{M_m}{M_H}, \quad (1.59)$$

где M_H – номинальный момент, который можно определить как:

$$M_H = 9550 \frac{P_H}{n_H}, \quad (1.60)$$

где P_H – номинальная мощность двигателя, кВт.

Для асинхронных двигателей общего применения перегрузочная способность $k_m = 1,7 - 2,5$. Длительная работа двигателя с моментом, равном максимальному M_m недопустима по условиям его нагрева. 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 [8]:

$$\frac{M}{M_m} = \frac{2(s_m + 1)}{\frac{s}{s_m} + 2s_m + \frac{s_m}{s}}. \quad (1.61)$$

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 $\Delta p_{об2}$ пропорциональны скольжению: $\Delta p_{об2} = P_{эм} s$ [2].

1.11. Тормозные режимы асинхронных двигателей

Асинхронные двигатели, работающие на механизмах циклического действия, необходимо переводить в тормозной режим. Различают три тормозных режима, являющиеся генераторными [20]:

- рекуперативное торможение;

- динамическое торможение;

- торможение противовключением (применяется для двигателей с фазным ротором и добавочным резистором в цепи ротора).

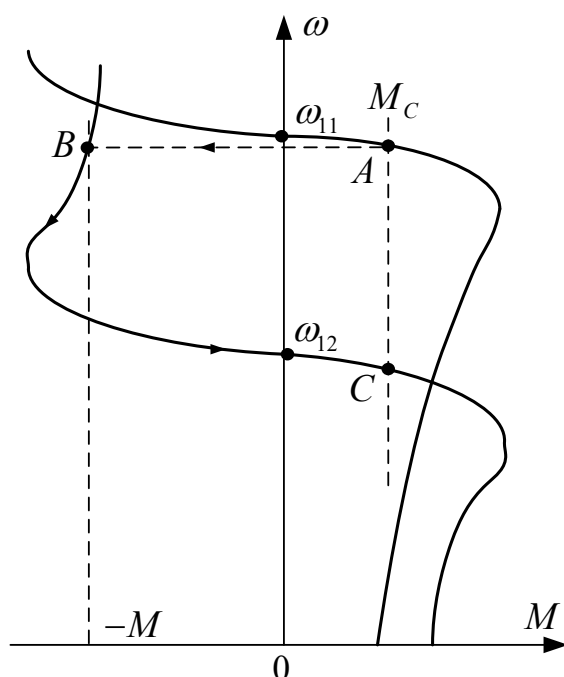


Рис. 1.11. Режим рекуперативного торможения асинхронного двигателя

1.2.4.1. Рекуперативное торможение асинхронных двигателей. Условием перехода двигателя в генераторный режим является превышение частоты вращения ротора относительно синхронной частоты вращения магнитного поля статора ($\omega_2 > \omega_1$). В этих условиях электромагнитный момент двигателя становится отрицательным, а

вырабатываемая электроэнергия отдается в сеть (рекуперируется). Данный

режим получают уменьшая синхронную частоту вращения ω_1 в работающем двигателе, переключив обмотку статора на большее число полюсов или уменьшив частоту f_1 питающего напряжения в случае работы двигателя от преобразователя частоты. Ротор двигателя, вращаясь по инерции с прежней частотой вращения ω_2 , будет обгонять вращающееся магнитное поле статора. Наступает генераторный режим, момент двигателя M становится тормозным, а вырабатываемая электроэнергия поступает в сеть. Механические характеристики при рекуперативном торможении показаны на рис. 1.11. Переход из точки A в точку B осуществляется при неизменных оборотах ротора двигателя. Рекуперативное торможение происходит на участке от точки B до синхронной скорости ω_{12} . В точке характеристики C двигатель работает со скоростью, определяемой нагрузкой на его валу. Режим рекуперативного торможения широко применяется в подъемно-транспортных механизмах во избежание резких ударов и толчков в механической части привода [22].

1.2.4.2. Динамическое торможение асинхронных двигателей.

Способ применим на всех асинхронных двигателях. Торможение осуществляется в результате отключения обмотки статора от сети и подключения ее к источнику постоянного тока или батареи конденсаторов. Для перевода в режим динамического торможения асинхронного двигателя с фазным ротором (рис. 1.12,а) переключатель SA переводят из положения 1 в положение 2. Постоянный ток, величина которого регулируется реостатом R , подается от независимого источника в статорную обмотку, создавая в ней неподвижное в пространстве и постоянное по величине магнитное поле.

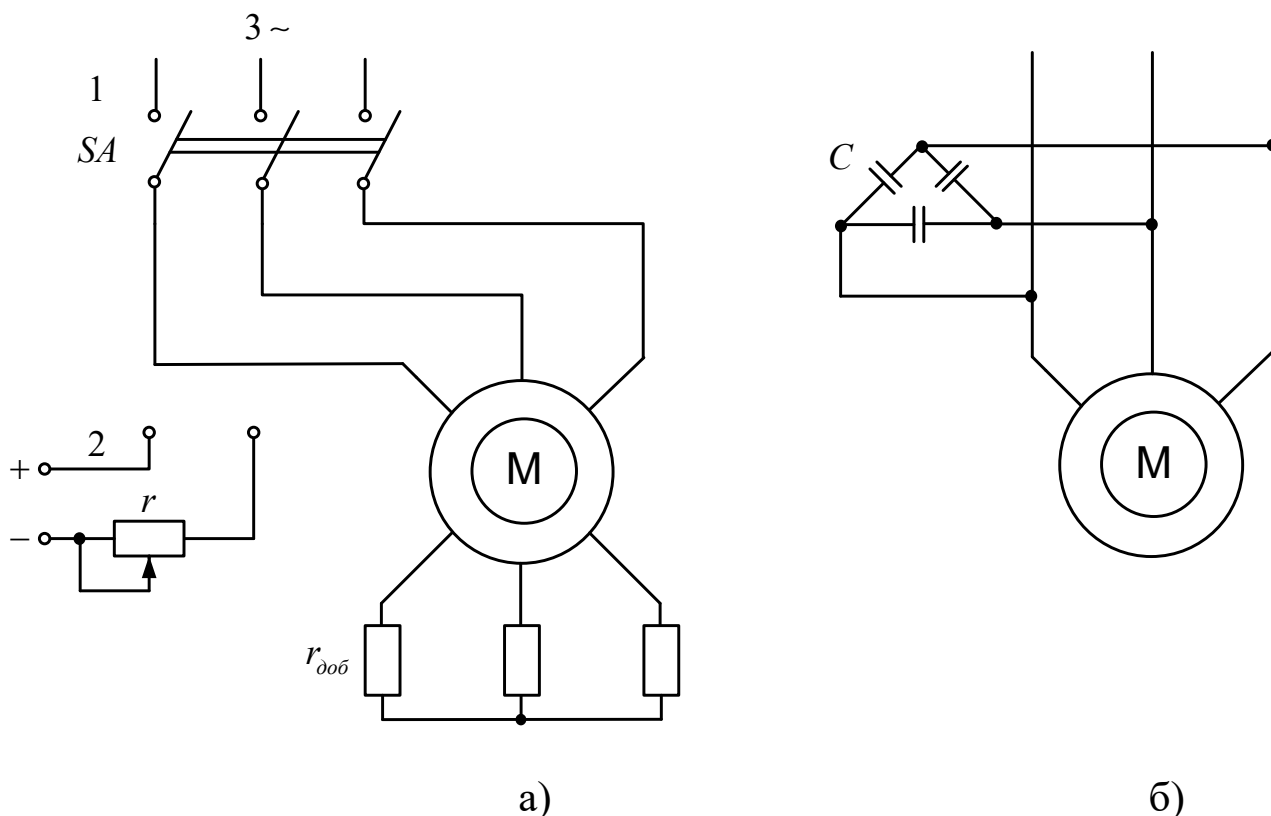


Рис. 1.12. Схемы включения асинхронных двигателей при динамическом торможении

При этом в обмотке ротора, который продолжает вращаться за счет кинетической энергии вращающихся частей электропривода, наводится переменная эдс E_2 , т.е. машина начинает генерировать электроэнергию. По действием эдс E_2 начинает протекать ток I_2 , который, взаимодействуя с полем статора, создает на роторе электромагнитный тормозной момент.

Двигатель работает на участке характеристики от точки B до начала координат при неизменном значении $r_{доб}$. Энергия вращающихся по инерции частей преобразуется в электроэнергию, которая расходуется на нагрев обмотки ротора и резисторов $r_{доб}$. При остановившемся роторе момент динамического торможения равен нулю. Резистор $r_{доб}$ в цепи ротора служит для повышения эффективности торможения. Величину сопротивления $r_{доб}$

в начале торможения устанавливают наибольшей, а затем постепенно уменьшают. Работа схемы торможения аналогична схеме реостатного пуска [21].

Конденсаторное торможение (рис. 1.12,б) является разновидностью динамического, его часто применяют для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. При отключении двигателя от сети происходит его самовозбуждение за счет остаточного магнетизма магнитной системы. Между двигателем и батареей конденсаторов происходит обмен энергией. Возникает ток в обмотке статора, создающий магнитный поток в машине. В роторе возникают эдс и ток, который взаимодействует с магнитным полем статора и создает тормозной момент. Двигатель работает на участке характеристики от точки B до точки C . Для проведения эффективного торможения требуется относительно большая емкость конденсаторов. При скорости ротора $(0,2 - 0,3)\omega_1$ происходит срыв самовозбуждения. Двигатель далее тормозится посредством самовыбега. На рис. 1.13 представлены механические

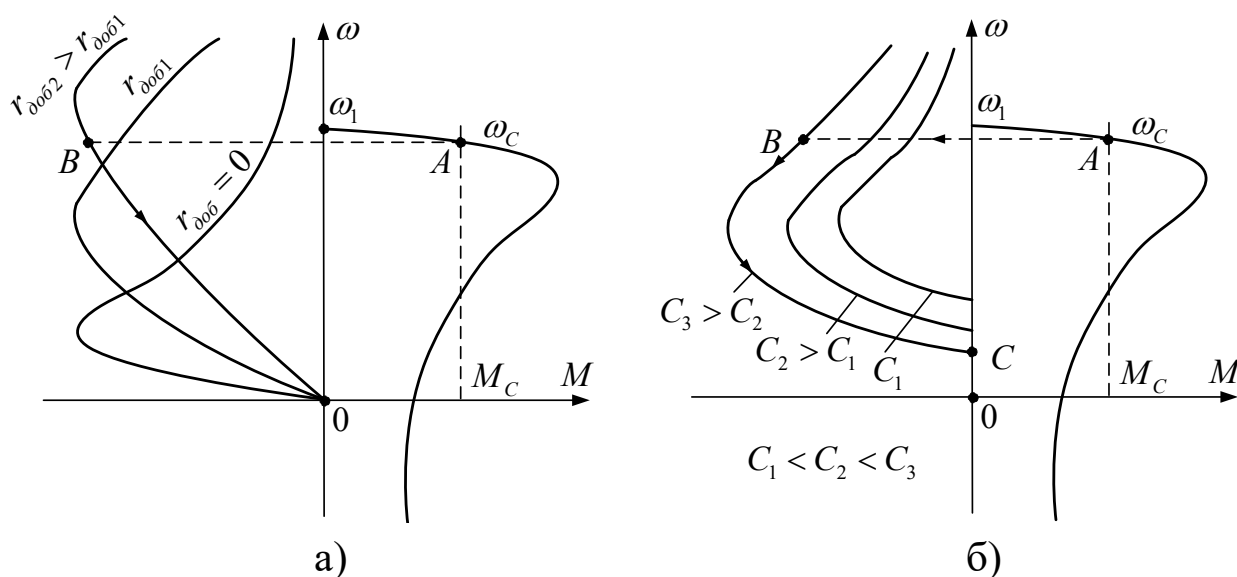


Рис. 1.13. Режим динамического торможения асинхронного двигателя.

- а) питание обмотки статора постоянным током;
- б) конденсаторное торможение

ские характеристики асинхронного двигателя при динамическом торможении [22]. Они имеют нелинейный характер.

1.2.4.3. Торможение асинхронных двигателей противовключением.

Способ применяется только на асинхронных двигателях с фазным ротором. Он позволяет получить большие тормозные моменты для быстрой остановки электроприводов. Механические характеристики двигателей приведены на рис. 1.14. При реактивной нагрузке электропривода (рис.

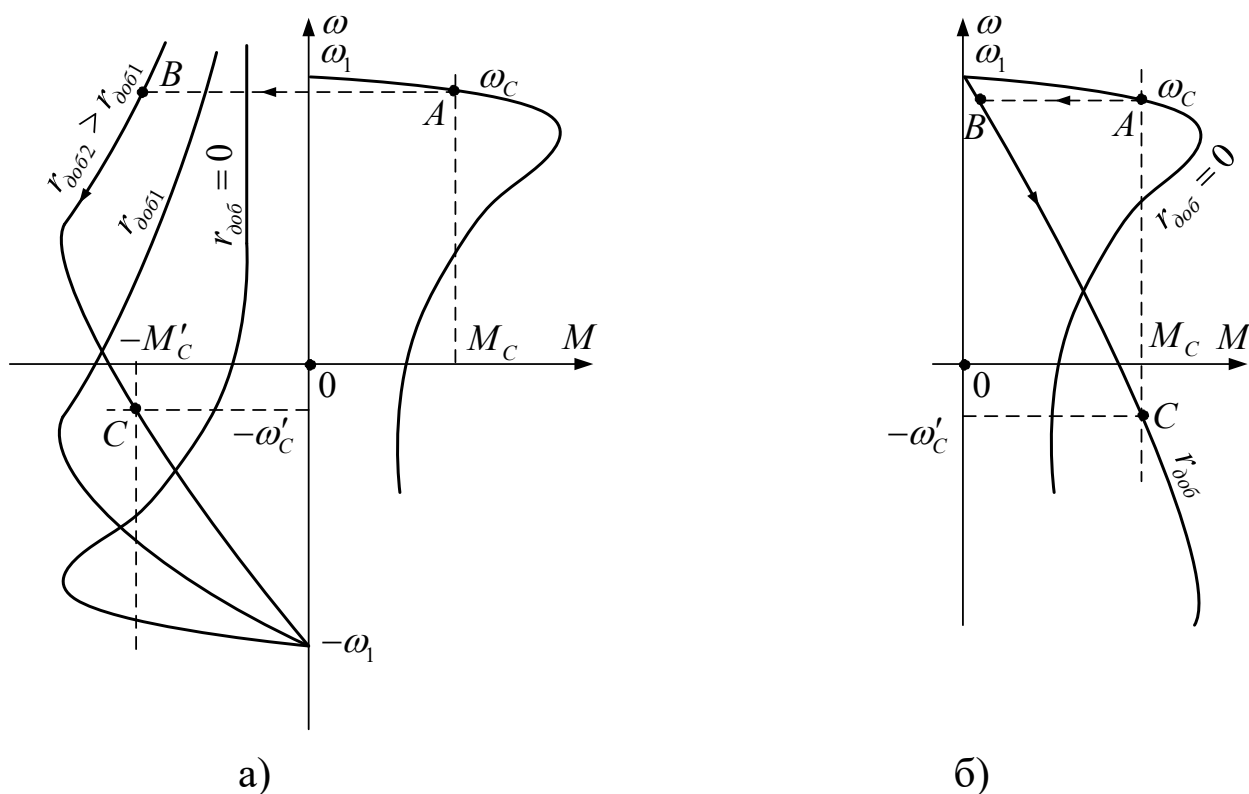


Рис. 1.14. Торможение противовключением асинхронного двигателя с фазным ротором.

а) реверс двигателя и введение в цепь ротора сопротивления $r'_{\partial\partial\partial}$;

б) введение в цепь ротора сопротивления $r'_{\partial\partial\partial}$

1.14,а) режим противовключения создается путем реверса двигателя (меняется чередование фаз на обмотке статора) и введением в цепь ротора активного добавочного сопротивления $r'_{\partial\partial\partial}$ большой величины. Для эффективности торможения используют несколько сопротивлений. Торможение начи-

нается при переходе от точки A на естественной характеристике к точке B при неизменных оборотах двигателя. Противовключение отображается участком характеристики, представленной во втором квадранте до $\omega = 0$. Далее для перехода до точки C в третьем квадранте наблюдается двигательный режим, где машина работает с установившейся скоростью $-\omega'_C$.

При активной нагрузке электропривода (рис. 1.14,б) режим противовключения создается введением в цепь ротора активного добавочного сопротивления $r_{доб}$ большой величины. Машина снижает скорость до $\omega = 0$, находясь в двигательном режиме, а затем переходит в режим противовключения. Данный режим будет соответствовать участку характеристики до точки C , расположенной в четвертом квадранте, где машина работает с установившейся скоростью $-\omega'_C$.

Величину $r_{доб}$ следует подбирать такой, чтобы обеспечить необходимые условия торможения двигателя. В данном случае используют семейства универсальных характеристик, составленных для двигателей различных серий. Режим противовключения применяют в электроприводах подъемно-транспортных механизмов при экстренном торможении [20].

1.12. Рабочие характеристики трехфазного асинхронного двигателя. Круговая диаграмма асинхронной машины

Свойства асинхронных машин, их пригодность к работе в заданных условиях определяются согласно рабочим характеристикам. Рабочие характеристики асинхронного двигателя, изображенные на рис. 1.16. Они представляют зависимость частоты вращения ротора ω , момента на валу M_2 , тока статора I_1 , коэффициента мощности $\cos\varphi_1$ и кпд η от полезной мощности двигателя P_2 . Их можно получить путем непосредственных испытаний двигателя после его предварительного прогрева при условиях:

$U_1 = \text{const} = U_{1H}$, $f_1 = \text{const} = f_{1H}$, $R'_2 = r'_2$. В машинах большой мощности проведение таких испытаний часто оказывается невозможным. Поэтому рабочие характеристики могут быть получены из круговой диаграммы, которая строится на основании опытов холостого хода и короткого замыкания. Результаты, полученные из круговой диаграммы, соответствуют результатам, полученным экспериментально. Для ее построения за основу принимаем Г-образную схему замещения асинхронной машины (рис. 1.7,б). Каждая

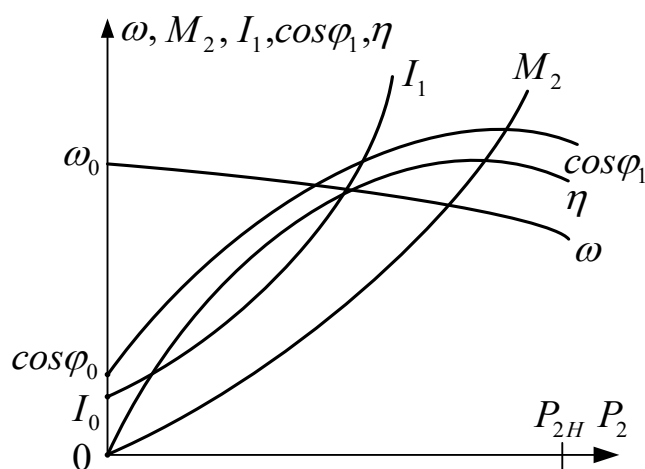


Рис. 1.15. Рабочие характеристики трехфазного асинхронного двигателя

из двух независимых цепей схемы замещения питается одним и тем же напряжением \bar{U}_1 . Токи \bar{I}_0 и $-\bar{I}'_2$ в сумме представляют собой ток статора \bar{I}_1 . Каждой ветви соответствует своя векторная диаграмма. На рис. 1.16 представлена диаграмма для контура намагничивания и рабочего контура схемы замещения.

Рабочий контур состоит из ин-

дуктивного постоянного $x_1 + x'_2$ и активного переменного сопротивления

$r_1 + \frac{r'_2}{s}$. При скольжении $s = 0$ величина $r_1 + \frac{r'_2}{s} = \infty$, а ток в контуре минимален: $I'_2 = 0$. Максимального значения ток в контуре достигает при сколь-

жении $s = -\frac{r'_2}{r_1}$, т.е. $I_2 = \frac{U_1}{x_1 + x'_2} = I'_{2max}$.

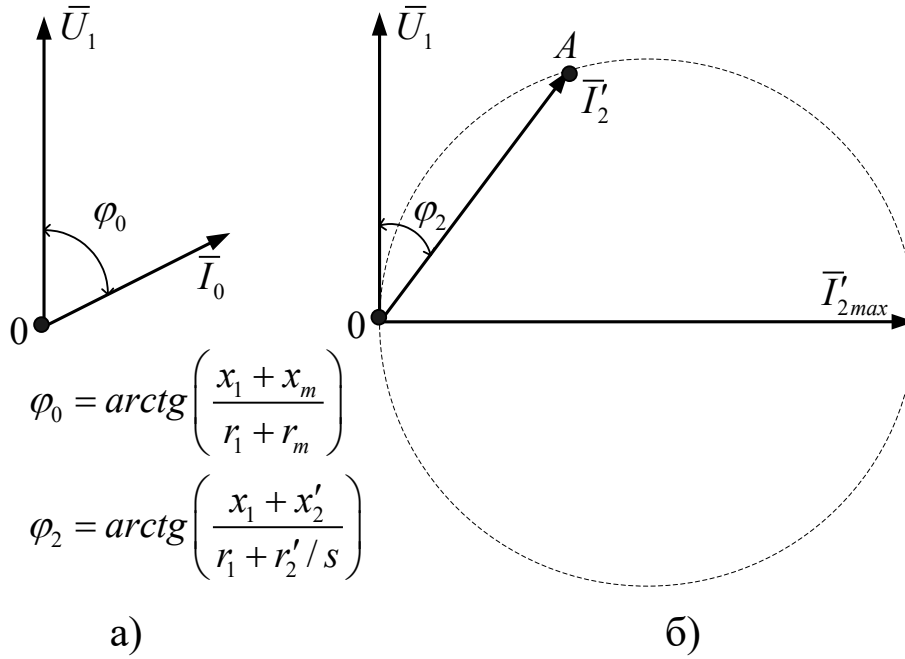


Рис. 1.16. Векторные диаграммы контура намагничивания (а) и рабочего контура (б) схемы замещения асинхронной машины

Геометрическим местом точек вектора тока \bar{I}'_2 является окружность, а вектор \bar{I}'_{2max} представляет ее диаметр. Точка A занимает соответствующее положение на окружности в зависимости от величины скольжения s . Величина тока в обмотке статора \bar{I}_1 получается при совмещении обеих диаграмм. Она показана на рис. 1.177, а ее изменение представляет круговую диаграмму асинхронной машины. Диаграмма отражает все возможные режимы работы: двигательный, генераторный и тормозной. Точки на окружности, характеризующие режимы работы машины, находятся под определенными углами к точке 0, величины которых определяются выражениями:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_s &= (90^\circ - \varphi_2); \\ \operatorname{tg} \alpha_s &= \operatorname{tg} (90^\circ - \varphi_2) = \operatorname{ctg} \varphi_2 = \frac{r_1 + r'_2/s}{x_1 + x'_2}. \end{aligned} \right\} \quad (1.62)$$

При значениях $s = 1$ и $s = \pm\infty$ соответственно:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha_s &= \frac{r_1 + r'_2}{x_1 + x'_2} = \operatorname{tg} \alpha_1; \\ \operatorname{tg} \alpha_s &= \frac{r_1}{x_1 + x'_2} = \operatorname{tg} \alpha_\infty. \end{aligned} \right\} \quad (1.63)$$

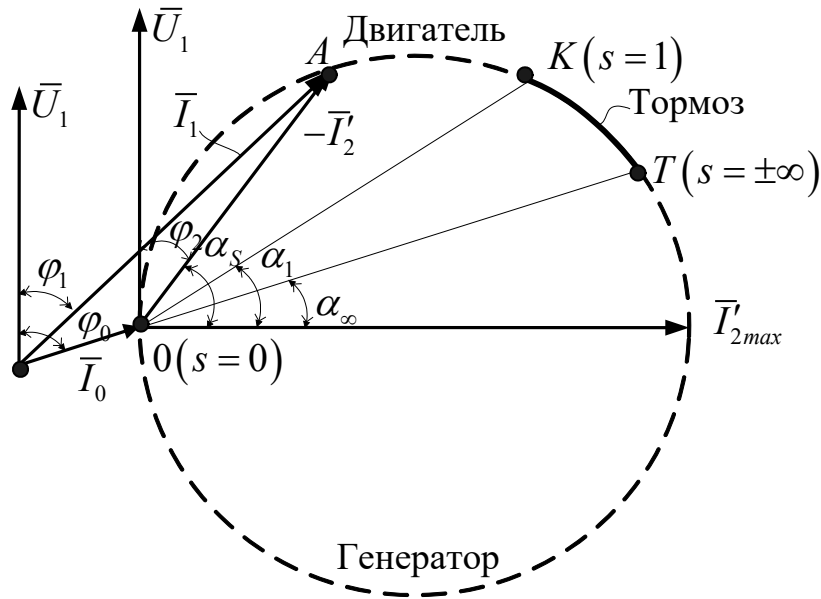


Рис. 1.17. Круговая диаграмма асинхронной машины

Круговая диаграмма асинхронной машины при некоторых дополнительных построениях, представленная на рис. 1.18, позволяет вычислить практически все показатели, характеризующие ее работу. Участок OBT характеризует генераторный режим; участок OAE – двигательный; участок KT – тормозной. Параметры машины определяются следующим образом [1].

Выбирается масштаб тока m_i , А/мм. Величины токов определяются как: $I_1 = O'A m_i$, $I_0 = O'O m_i$, $I'_2 = OA m_i$, $I'_{2max} = OB m_i$. Активная составляющая тока статора $I_{1a} = AC m_i$, реактивная составляющая $I_{1p} = O'C m_i$.

Подведенная к статору мощность P_1 устанавливается из выражения:



где $m_1 U_1 = const$.

50

ная мощность $P_{\text{ЭМ}} = 0$ при работе машины отображенной точками O и T .

Для точки A на окружности токов $P_{\text{ЭМ}} = m_P AE$.

Момент M выражается через электромагнитную мощность как

$$M = \frac{P_{\text{ЭМ}}}{\omega_1} = \frac{m_P AE}{\omega_1} = m_M AE, \quad (1.65)$$

где $m_M = \frac{m_P}{\omega_1}$ – масштаб момента M , Нм/мм.

На круговой диаграмме отрезок OT – линия электромагнитной мощности $P_{\text{ЭМ}}$ и электромагнитного момента M . Отрезок qn отображает максимальный момент M_{max} двигателя:

$$M_{\text{max}} = m_M qn. \quad (1.66)$$

Для рассматриваемой точки A на окружности токов при работе двигателя в номинальном режиме его перегрузочная способность k_m равна

$$\frac{M_{\text{max}}}{M_H} = \frac{qn}{AE}. \quad (1.67)$$

Начальный пусковой момент асинхронного двигателя M_{Π} определяется при $s = 1$ (точка K):

$$M_{\Pi} = m_M KL. \quad (1.68)$$

Выбирается масштаб сопротивлений m_z , Ом/мм. Для расчета сопротивлений обмоток используют следующие выражения:

$$\left. \begin{aligned} tg\alpha_{\infty} &= \frac{ED}{OD} = \frac{r_1}{x_1 + x'_2}; \\ tg\alpha_1 &= \frac{DF}{OD} = \frac{r_1 + r'_2}{x_1 + x'_2}. \end{aligned} \right\} \quad (1.69)$$

Из решения(2.31) получаем:

$$x_1 + x'_2 = m_z OD; \quad r_1 = m_z ED; \quad r'_2 = m_z EF. \quad (1.70)$$

В соответствии с выполненными расчетами потери в статорной обмотке будут:

$$\Delta p_{об1} = m_1 (I'_2)^2 r_1 = m_p ED. \quad (1.71)$$

Для определения потерь в роторной обмотке необходимо установить мощность рабочего контура $P_{раб}$. Она равна:

$$\begin{aligned} P_{раб} &= P_1 - P_0 = P_1 - m_1 U_1 I_0 \cdot \cos\varphi_0 = \\ &= m_p (AC - CD) = m_p AD = m_1 (I'_2)^2 \left(r_1 + \frac{r'_2}{s} \right). \end{aligned} \quad (1.72)$$

Электромагнитная мощность $P_{ЭМ}$ может быть определена как

$$P_{\Sigma M} = P_{\text{паб}} - \Delta p_{\text{об1}} = m_1 (I'_2)^2 (r_1 + r'_2 / s) - m_1 (I'_2)^2 r_1 = m_1 (I'_2)^2 (r'_2 / s) = m_p AE. \quad (1.73)$$

Потери в обмотке ротора $\Delta p_{\text{об2}}$ отображаются выражением:

$$\Delta p_{\text{об2}} = m_1 (I'_2)^2 r'_2 = m_p EF. \quad (1.74)$$

Скольжение s при работе двигателя характеризуется точкой A на окружности токов рассчитывается по формуле:

$$s = \frac{\Delta p_{\text{об2}}}{P_{\Sigma M}} = \frac{EF}{AF}. \quad (1.75)$$

Кпд асинхронного двигателя приближенно можно найти как

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{AF}{AC}. \quad (1.76)$$

Для учета всех видов потерь целесообразнее пользоваться формулой:

$$\eta = 1 - \frac{\Delta p_{\Sigma}}{P_1}. \quad (1.77)$$

Суммарные потери Δp_{Σ} в формуле (1.77) равны:

$$\begin{aligned}\Delta p_{\Sigma} &= (\Delta p_{\text{мех}} + \Delta p_{c1}) + \Delta p_{o61} + \Delta p_{o62} + \Delta p_{\text{дооб}} = \\ &= (P_{\theta} - m_1 I_0^2 r_1) + m_1 I_1^2 r_1 + P_{\text{ЭМ}} s + \Delta p_{\text{дообН}} \left(\frac{I_1}{I_{1H}} \right)^2,\end{aligned}\quad (1.78)$$

где $\Delta p_{\text{дообН}} = (0,005 \dots 0,01) P_{1H}$.

Построение круговых диаграмм для асинхронных машин различного исполнения должно осуществляться с учетом их конструктивных особенностей [6].

1.13. Способы пуска асинхронных двигателей

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. 1.19 представлены однолинейные схемы пуска асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Наиболее простым является прямой пуск (рис. 1.19,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 $I_{п1}$:

$$I_{пд} = I_{п1} = I_{п} = \frac{U_1}{z_K}, \quad (1.79)$$

где z_K – полное сопротивление двигателя при пуске.

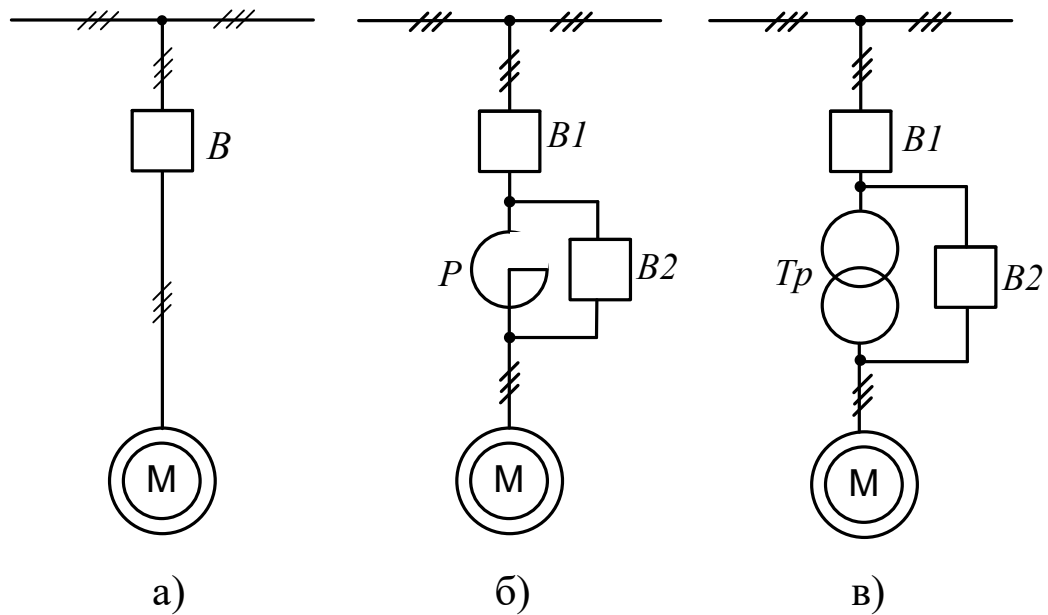


Рис. 1.19. Схемы пуска короткозамкнутых асинхронных двигателе:

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_{Π} . 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. 1.19,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 $I_{\Pi\Delta}$ при этом равен:

$$I_{\Pi\Delta} = \frac{U_{\Delta}}{Z_K} = \frac{U_{\Delta}}{Z_K} \frac{U_1}{U_1} = I_{\Pi} \frac{U_{\Delta}}{U_1} = I_{\Pi 1}, \quad (1.80)$$

где $\frac{U_{\Delta}}{U_1}$ – степень снижения напряжения двигателя в момент пуска;

I_{Π} – ток двигателя при прямом пуске.

Момент при пуске уменьшается быстрее пускового тока:

$$M_{\Pi\Delta} = M_{\Pi} \left(\frac{U_{\Delta}}{U_1} \right)^2, \quad (1.81)$$

где M_{Π} – момент двигателя при прямом пуске.

Трансформаторный (автотрансформаторный) пуск позволяет в большей степени понизить напряжение, подводимое к статору двигателя. Схема пуска представлена на рис. 1.19,в; работа коммутационных аппаратов аналогична работе при реакторном пуске. Пусковой ток двигателя $I_{\Pi\Delta}$ при этом равен:

$$I_{\text{пд}} = \frac{U_{\text{д}}}{Z_{\text{к}}} = \frac{U_{\text{д}}}{Z_{\text{к}}} \frac{U_1}{U_1} = I_{\text{п}} \frac{U_{\text{д}}}{U_1}. \quad (1.82)$$

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

$$\left. \begin{aligned} I_{\text{п1}} U_1 &= I_{\text{пд}} U_{\text{д}}; \\ I_{\text{п1}} &= I_{\text{пд}} \frac{U_{\text{д}}}{U_1} = I_{\text{п}} \left(\frac{U_{\text{д}}}{U_1} \right)^2. \end{aligned} \right\} \quad (1.83)$$

Пусковые момент и ток уменьшается одновременно:

$$M_{\text{пд}} = M_{\text{п}} \left(\frac{U_{\text{д}}}{U_1} \right)^2. \quad (1.84)$$

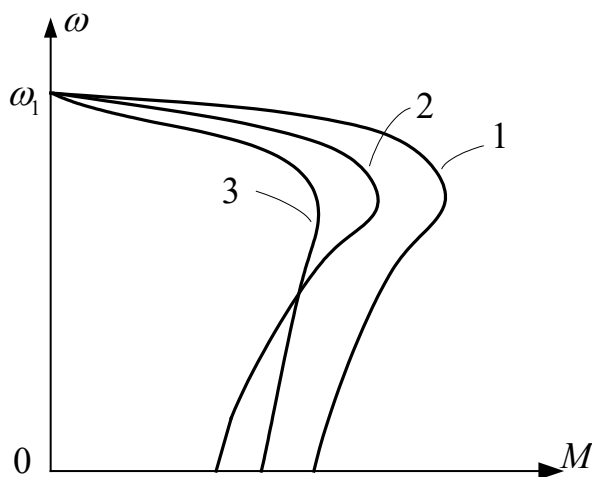


Рис. 1.20. Механические характеристики асинхронного двигателя при прямом (1), трансформаторном (2) и реакторном (3) пуске

При трансформаторном (автотрансформаторном) пуске момент M и ток $I_{\text{п1}}$ уменьшаются в одинаковое число раз. Если значения пускового тока $I_{\text{п1}}$ при реакторном и трансформаторном (автотрансформаторном) пуске будут одинаковыми, то двигатель в последнем случае разви-

вает большой пусковой момент. На рис. 1.20 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.

1.14. Влияние поверхностного эффекта на вид механической характеристики трехфазного асинхронного двигателя.

Глубокопазные и двухклеточные двигатели

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором исключают возможность пуска под нагрузкой из-за относительно малого пускового момента M_{Π} . Для достижения достаточного значения M_{Π} 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 при пуске становится большим. Наибольшая частота тока ротора

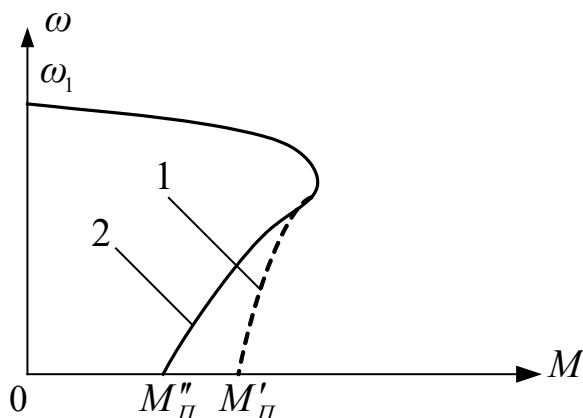


Рис. 1.21. Реальная (1) и расчетная (2) механические характеристики асинхронного двигателя при учете поверхностного эффекта

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'_Π , становится больше расчетного M''_Π (рис. 1.21). 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].

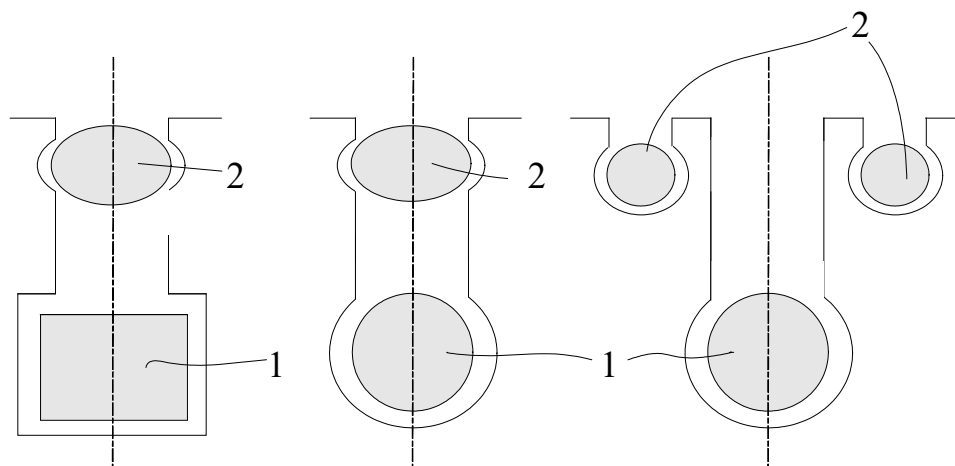


Рис. 1.22. Примеры выполнения рабочей (1) и пусковой (2) обмоток двухклеточного асинхронного двигателя

Двухклеточные двигатели имеют две короткозамкнутые «беличьи клетки», представляющие пусковую и рабочую обмотки (рис. 1.22). 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].

1.15. Работа трехфазных асинхронных двигателей в ненормальных условиях

Асинхронные двигатели имеют номинальные паспортные данные, позволяющие им работать в условиях, оговоренных предприятиями-изготовителями. При работе в ненормальных условиях номинальные данные изменяются. Ненормальные условия могут иметь как климатический, так и производственный характер. В случае работы на высоте над уровнем моря, превышающей указанную предприятием-изготовителем, и при повышенной температуре окружающего воздуха условия охлаждения ухудшаются. Это приводит к необходимости снижения номинальной мощности двигателей. Производственный характер ненормальных условий связан с качеством электрической энергии, параметры которой определяются Государственным стандартом [31].

Работа двигателя в производственных условиях зависит от частоты питающего напряжения f_{1H} , его величины U_{1H} и симметрии. Режим, при

котором указанные параметры не выходят за пределы установленных стандартом отклонений, называется допустимым режимом работы. Асинхронные двигатели допускают длительную работу с номинальной нагрузкой при изменении питающего напряжения в диапазоне $(0,95 - 1,10)U_{1H}$ и его частоты в пределах $\pm 2,5\%$ от номинальной. В случае одновременного отклонения напряжения и частоты сети от номинальных значений двигатели должны сохранять номинальную мощность. Сумма абсолютных процентных значений этих отклонений не должна превосходить 10%, а каждое отклонение не превышать нормы. Отклонения напряжения и частоты от номинальных значений приводит к изменению момента двигателя и потерь мощности в нем. При неизменной частоте f_{1H} отклонения напряжения в указанных пределах практически не оказывают влияние на суммарные потери в двигателе и температуру его частей. Понижение напряжения более чем на 5% номинального приводит к заметному снижению перегрузочной способности двигателя. Нагрузку следует уменьшать, т.к. рост потерь в обмотке статора не компенсируется снижением потерь в стали. При этом температура обмотки статора будет превышает максимально допустимую. Повышение напряжения более чем на 10% номинального вызывает нагрев магнитопровода. Тока намагничивания заметно возрастает при незначительном повышении напряжения, поскольку двигатели проектируют на работу с умеренным насыщением. Ток статора следует уменьшить на величину, соответствующую номинальной нагрузке. Помимо опасности перегрева активной стали, при дальнейшем повышении напряжения возникает опасность для изоляции, особенно для высоковольтных двигателей.

Снижение частоты питающего напряжения приводит к возрастанию магнитного потока двигателя и насыщению магнитной цепи. В результате чего нагревается обмотка статора. Увеличение частоты при неизменном моменте на валу двигателя приводит к снижению его магнитного потока и

возрастанию токов в обмотках статора и ротора, а следовательно к их перегреву [2].

При эксплуатации асинхронных двигателей возможна их работа на несимметричном питающем напряжении. Например в случае подключения двигателей к трехфазной сети с мощными однофазными нагрузками (электрических печей и др.) или аварии. Несимметричная система питающих линейных напряжений может быть разложена на две симметричные системы напряжений прямой и обратной последовательностей. Система напряжений прямой последовательности U_{11} создает в обмотках статора и ротора токи прямой последовательности, образующие вращающееся поле, в направлении которого двигается ротор. Ротор по отношению к полю прямой последовательности имеет скольжение:

$$s_1 = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1}. \quad (1.85)$$

Система напряжений обратной последовательности U_{12} создает в обмотках токи обратной последовательности, которые создают обратно вращающееся магнитное поле, причем $U_{12} < U_{11}$. Ротор по отношению к магнитному полю отстает со скольжением:

$$s_2 = \frac{\omega_1 + \omega_2}{\omega_1} = \frac{\omega_1 + \omega_1(1 - s_1)}{\omega_1} = 2 - s_1. \quad (1.86)$$

Токи ротора прямой и обратной последовательностей при взаимодействии со своими полями создают моменты прямой M_1 и обратной M_2 последовательностей, которые направлены в противоположные стороны. Результирующий момент двигателя M равен:

$$M = M_1 + M_2. \quad (1.87)$$

Механическая характеристика асинхронного двигателя при несимметричном напряжении питающей сети показана на рис. 1.23. Искажение сим-

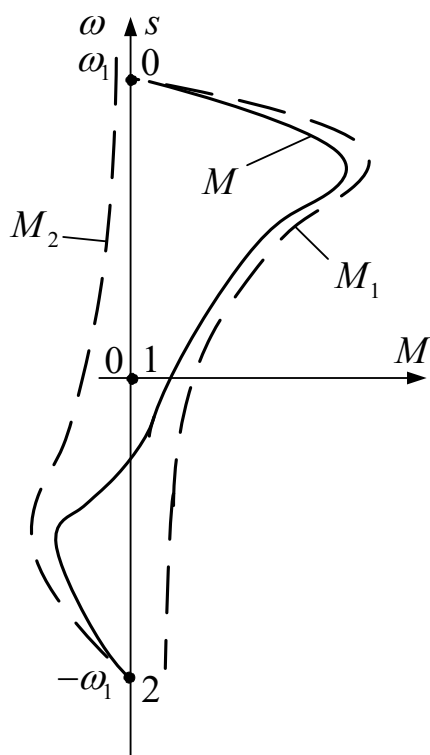


Рис. 1.23. Механическая характеристика асинхронного двигателя при несимметричном питающем напряжении

метрии питающего напряжения приводит к уменьшению максимального и пускового моментов. Это отрицательно сказывается на характеристиках двигателя, поскольку номинальный момент имеет место при больших скольжения и соответственно при больших токах. Электрические потери для постоянного значения полезной мощности асинхронного двигателя и несимметричного питающего напряжения больше, чем при симметричном. Частота тока ротора обратной последовательности в номинальном режиме $f_2 \approx 2f_1$, что приводит к росту магнитных потерь. В то же время асинхронный двигатель, включенный в сеть с несимметричным напряжением,

создает уравнивающий эффект, т.е. симметрия напряжений несколько уменьшается. Этот эффект связан с частичной компенсацией токов обратной последовательности нагрузки в линии токами обратной последовательности асинхронного двигателя [8].

1.16. Асинхронный генератор

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. 1.24). В генераторном режиме асинхронная машина под-

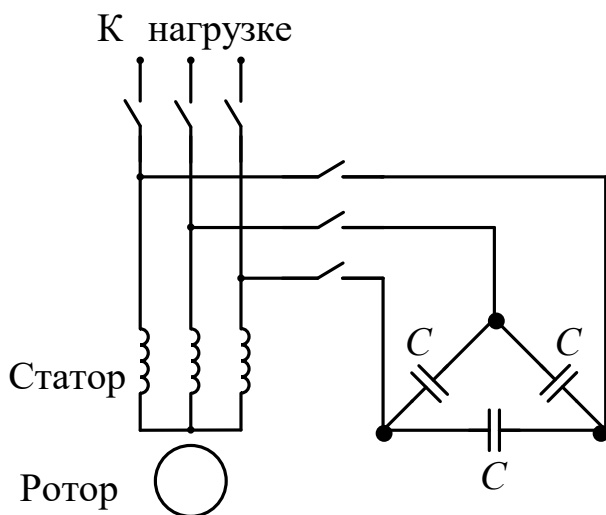


Рис. 1.24. Автономная энергетическая система с асинхронным генератором

ключается 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 пред-

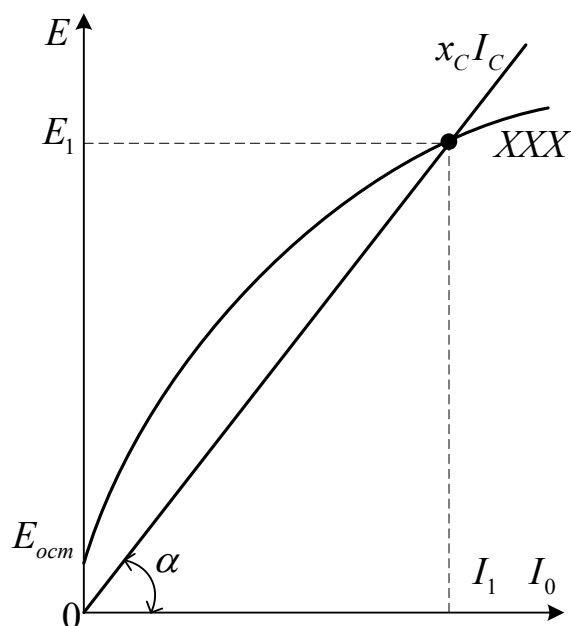


Рис. 1.25. Самовозбуждение асинхронного генератора

ставлены на рис. 2.25, 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].

1.17. Однофазные асинхронные двигатели

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

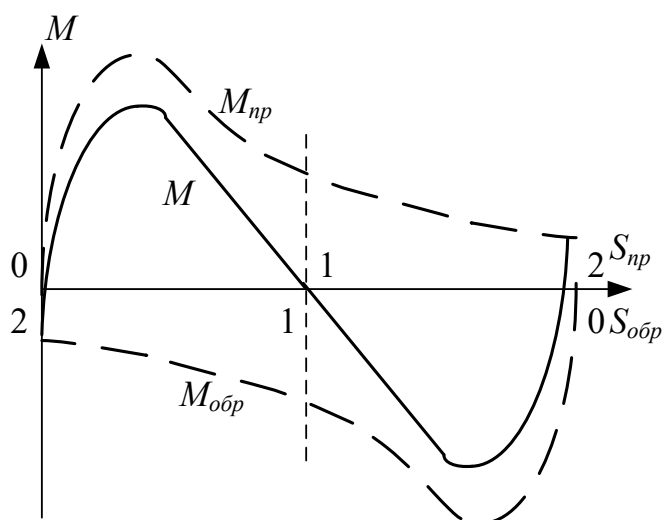


Рис. 1.26. Механическая характеристика однофазного асинхронного двигателя

ми в противоположные стороны. Трехфазный асинхронный двигатель в однофазном режиме можно рассматривать как два одинаковых трехфазных двигателя, которые подключены к общей сети, находятся на одном валу, но имеют разные чередования фаз. Такой режим работы приводит к его перегреву. На рис. 1.26 показана механическая характери-

стика асинхронного двигателя в однофазном режиме. Двигатель при этом не развивает пускового момента, поэтому принимаются специальные меры,

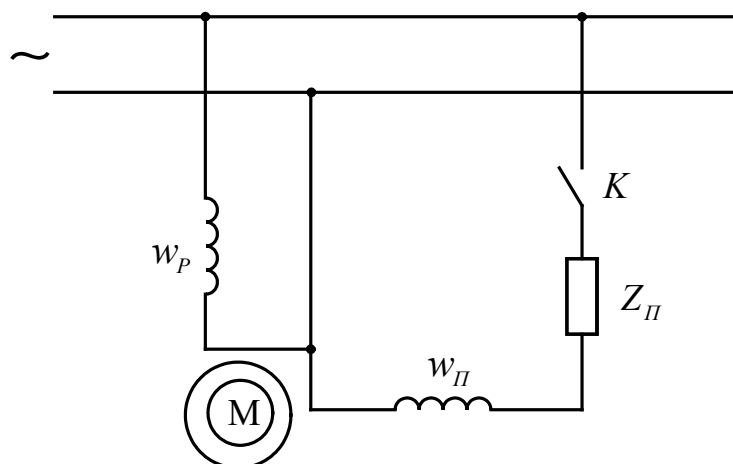


Рис. 1.27. Схема подключения к сети однофазного асинхронного двигателя

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° 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 асинхронного двигателя служат пусковая и рабочая обмотки, имеющие w_{II} и

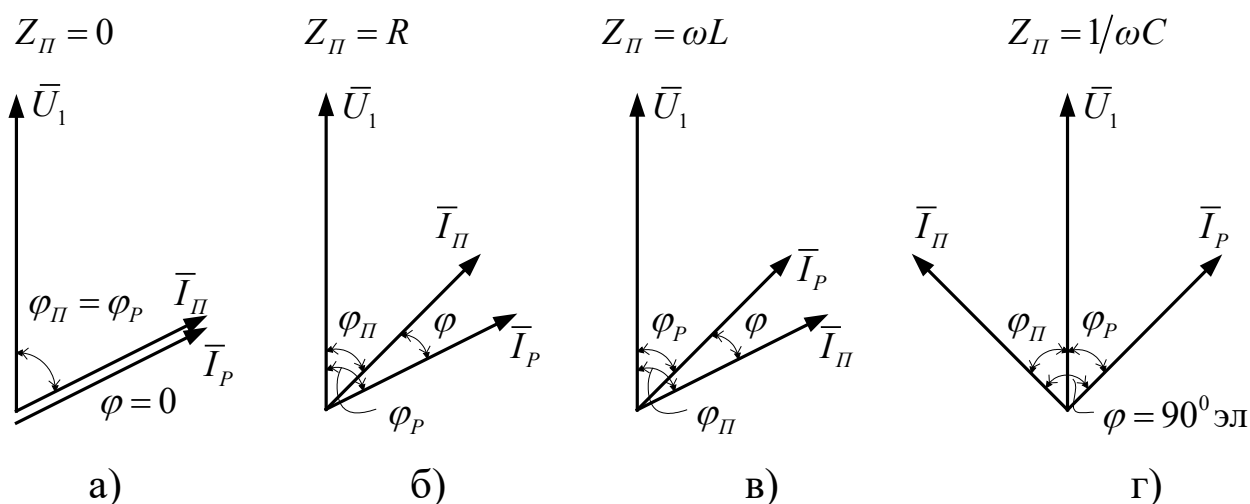


Рис. 1.28. Векторные диаграммы при отсутствии пускового сопротивления (а) и при использовании активных (б), индуктивных (в), емкостных (г) элементов для пуска однофазного асинхронного двигателя

w_p число витков. Пусковая обмотка обладает повышенным активным сопротивлением. Схема подключения однофазного асинхронного двигателя к сети представлена на рис. 1.27. Для получения фазового сдвига используют активные, индуктивные и емкостные элементы сопротивлением Z_{II} , включаемые в пусковую обмотку. На рис. 1.28 изображены векторные диаграммы однофазного асинхронного двигателя при различных Z_{II} . Круговое вращающееся поле в зазоре обеспечивает правильно подобранная величина емкости C . В данном случае $Z_{II} = 1/\omega C$, а $M_{II} = (1,6 - 2,0)M_H$. Пусковая обмотка отключается с помощью контакта K при достижении двигателем определенной скорости. Механические характеристики при этом представлены на рис. 1.29. 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

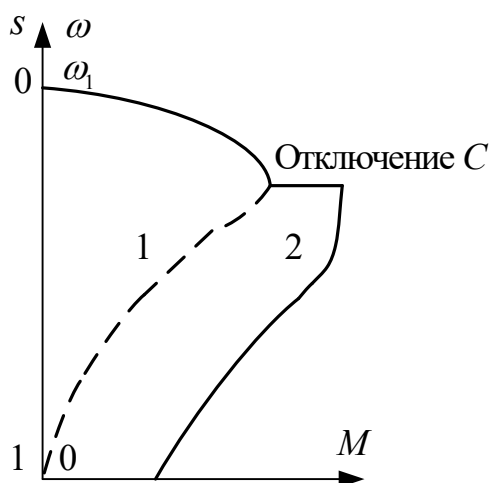


Рис. 1.29. Механические характеристики однофазного асинхронного двигателя при отсутствии (1) и при наличии емкости C (2)

дополнительно пусковой конденсатор $C_{II} = (2 - 7)C_{раб}$. При малых скольжениях двигателя конденсатор C_{II} отключается во избежание резонансных явлений в обмотках двигателя, приводящих к выходу его из строя. Конденсаторные асинхронные двигатели обладают коэффициентом мощности 0,8–0,95.

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. 1.30 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:

$$C_{раб} \approx 2700 \frac{I_{1H}}{U_{1H}}, \quad (1.88)$$

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

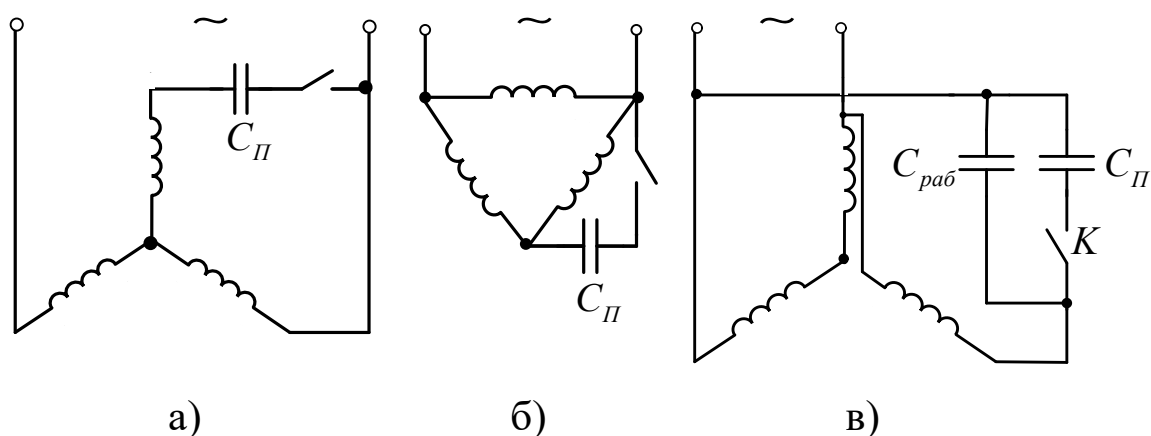


Рис. 1.30. Схемы включения трехфазного асинхронного двигателя в однофазную сеть.

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

трехфазном режиме, а с рабочим конденсатором $C_{\text{раб}}$ – 75-80% [27].

Однофазные конденсаторные асинхронные двигатели являются машинами малой мощности. Они преимущественно применяются в различных автоматических устройствах наряду с другими однофазными и трехфазными асинхронными машинами нетрадиционной конструкции (сельсинами, исполнительными двигателями, тахогенераторами и др.) [2].

1.18. Асинхронные машины нетрадиционной конструкции

1.2.11.1. Асинхронные машины с заторможенным ротором.

Теория асинхронных машин имеет много общего с теорией трансформаторов: обмотка статора является первичной, а обмотка ротора – вторичной.

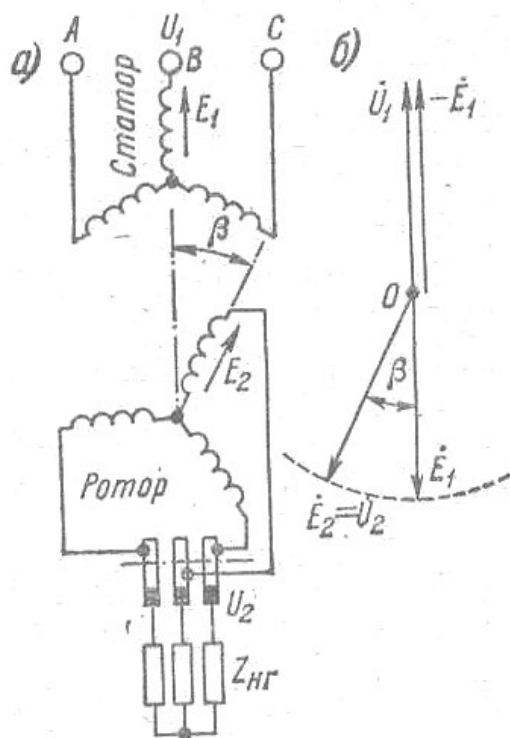


Рис. 1.31. Схема соединения фазорегулятора (а) и векторная диаграмма (б)

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. 1.31) изменяет фазу вторичного напряжения, являющегося постоянным, относительно 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. 1.31,а, плавно регулирует напряжение по величине. Ротор заторможен и может быть 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

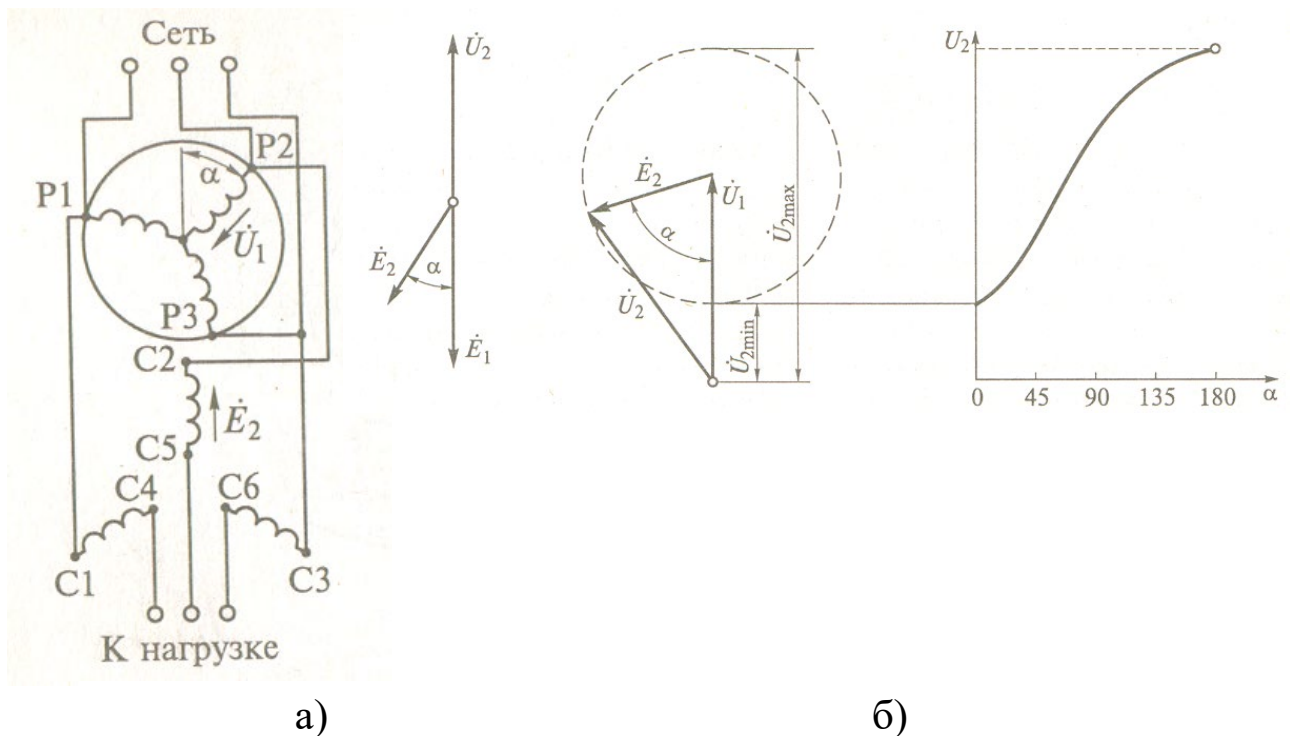


Рис. 1.32. Схема соединения индукционного регулятора напряжения (а) и его векторные диаграммы (б)

фазе совпадают). Если сопротивлениями обмоток пренебрегаем, то напряжение на выходе ИРН определяется как:

$$\bar{U}_2 = \bar{U}_1 + \bar{E}_2 \quad (1.89)$$

При повороте ротора ИРН концы векторов \bar{E}_2 и \bar{U}_2 описывают окружности (рис. 1.32,б), напряжение \bar{U}_2 меняется от $\bar{U}_{2min} = \bar{U}_1 - \bar{E}_2$ ($\alpha = 0$) и до $\bar{U}_{2max} = \bar{U}_1 + \bar{E}_2$ ($\alpha = 180^\circ$ эл). Индукционный регулятор напряжения применяют в лабораторных исследованиях и для настройки оборудования [22].

1.2.11.2. Линейный асинхронный двигатель

Рабочие органы многих производственных механизмов совершают поступательное или возвратно-поступательное движение. Снижение потерь

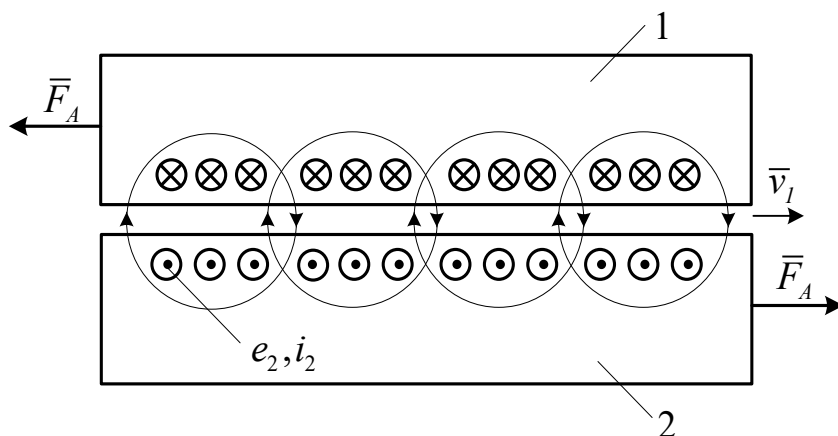


Рис. 1.33. Структурная схема линейного асинхронного двигателя.

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

мощности, повышение кпд, надежности достигается применением линейных асинхронных двигателей (рис. 1.33). Принципиальное отличие их от двигателей нормального

исполнения 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 ста-

ли. Линейные асинхронные двигатели применяют в электроприводах заслонок, ленточных конвейеров, подъемно-транспортных механизмов; мощные двигатели используются как тяговые на электрическом транспорте. Основной 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].

1.19. Испытания, эксплуатация и ремонт асинхронных машин

Программа приемо-сдаточных испытаний для асинхронных машин включает следующие мероприятия [6]:

- измерение сопротивления изоляции обмоток по отношению к корпусу машины и между обмотками, а также сопротивлений обмоток при постоянном токе в практически холодном состоянии;
- определение коэффициента трансформации (для машин с фазным ротором);

- испытания изоляции обмоток на электрическую прочность по отношению к корпусу машины и между обмотками, а также на электрическую прочность межвитковой изоляции обмоток статора и фазного ротора;
- определение токов и потерь в режимах холостого хода и короткого замыкания;
- испытания при повышенной частоте вращения и на нагревание;
- определение кпд, коэффициента мощности и скольжения;
- испытание на кратковременную перегрузку по току.

Объем приемо-сдаточных испытаний может быть увеличен в зависимости от величины, назначения асинхронной машины, потребности в определении данных для наладочных работ или, если машина не подвергалась контрольным и типовым испытаниям [10].

Режимы работы асинхронных двигателей определяются параметрами качества электрической энергии, а также организацией системы электропитания и технологией производства. В процессе эксплуатации периодически проводится контроль нагрузки двигателей, температуры подшипников, охлаждающего воздуха, систем охлаждения мощных двигателей, уровня масла в подшипниках. На ряде технологических установок предусматривается возможность самозапуска двигателей после восстановления нормального уровня напряжения в сети. Самозапуск проводится с учетом требований технологии производства и осуществляется путем поэтапного включения двигателей в зависимости от приоритета конкретной установки [30].

Перечень неисправностей асинхронных двигателей, их причины и способы устранения представлены в справочной литературе. Для проверки состояния двигателей и устранения неисправностей периодически проводятся капитальные и текущие ремонты. Капитальный ремонт предусматривает полную разборку двигателя, проверку его составных частей и при необходимости их замену. Объем текущего ремонта предусматривает проверку

смазки подшипников и ее замену при необходимости, чистку и обдувку статора и ротора при снятой задней крышке, осмотр обмоток в доступных местах. Периодичность капитальных и текущих ремонтов устанавливается по местным условиям в зависимости от температуры и загрязненности окружающего воздуха, а также с учетом требований предприятий-изготовителей. Ремонты двигателей совмещают с ремонтами приводимых ими механизмов. Текущий ремонт проводят 1-2 раза в год, капитальный не реже одного раза в 3-5 лет. Периодически контролируют параметры изоляции обмоток, при необходимости проводят сушку двигателя [12].

Асинхронные двигатели являются основными двигателями для большинства электроприводов. Они выпускаются сериями, имеющими различные специализированные исполнения (тропическое, химическое, на частоту 60 Гц, металлургическое, крановое и т.д.) и конструкции (со встроенным электромагнитным тормозом, температурной защитой и т.д.) [2]. Важной задачей является оптимальное проектирование и рациональная эксплуатация асинхронных двигателей [32].

1.20. Основные способы регулирования скорости асинхронных двигателей

Большинство механизмов общепромышленного назначения приводятся в действие от асинхронных двигателей. Согласно технологическим процессам в той или иной степени необходимо регулировать частоту их вращения или скорость. При регулировании скорости руководствуются критериями плавности хода, энергетикой электроприводов и систем электроснабжения, глубиной регулирования и т.д. Управление скоростью асинхронных двигателей сопряжено с трудностями. Они обусловлены нелинейностью характеристик и сравнительно узким диапазоном изменения скорости на их рабочем участке, где работа двигателя устойчива.

Регулирование скорости проводится внесением изменений в схему статорной и роторной обмоток, а также путем регулирования от внешних преобразователей по цепям статора, ротора или по обеим цепям (схемы с регуляторами напряжения, преобразователями частоты на вентильных элементах, каскадные схемы и т.д.). Выбор способа регулирования производится на основании конструкции асинхронного двигателя, а также требований к технологическому процессу, в котором задействован механизм, энергопотреблению, динамическим показателям электропривода [20].

Возможность регулирования скорости асинхронных двигателей необходимо увязывать с анализом их механических характеристик. Выбор элементов силовых схем или устройств регулирования зависит от нагрузки на валу. На статических механических характеристиках асинхронных двигателей следует выделять как минимум три характерные точки, изменение координат которых при регулировании необходимо отслеживать. К таким точкам относятся [22]:

- идеальный холостой ход ($s = 0$; $\omega_2 = \omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p}$; $M = 0$);
- достижение двигателем своей перегрузочной способности ($s = s_K$; $\omega_2 = \omega_{2m} = \omega_1 (1 - s_m)$; $M = M_m$);
- пуск двигателя ($s = 1$; $\omega_2 = 0$; $M = M_{II}$).

Регулирование скорости ротора асинхронного двигателя проводится следующими способами [2]:

- изменением добавочного сопротивления $r'_{доб}$ в цепи ротора (только для двигателей с фазным ротором);
- изменением напряжения, подводимого к статору U_1 ;
- изменением числа пар полюсов p обмотки статора (только для двигателей с короткозамкнутым ротором, имеющих на статоре несколько обмоток на каждой фазе);

- изменением напряжения U_1 и частоты f_1 (практически применяется для двигателей с короткозамкнутым ротором).

1.21. Регулирование скорости асинхронного двигателя с фазным ротором изменением добавочного сопротивления $r_{доб}$ в цепи ротора (реостатное регулирование)

Способ нашел широкое распространение из-за простоты реализации. Однако он требует большого количества контактной аппаратуры, а применение активных сопротивлений увеличивает потери в роторе. Критическое

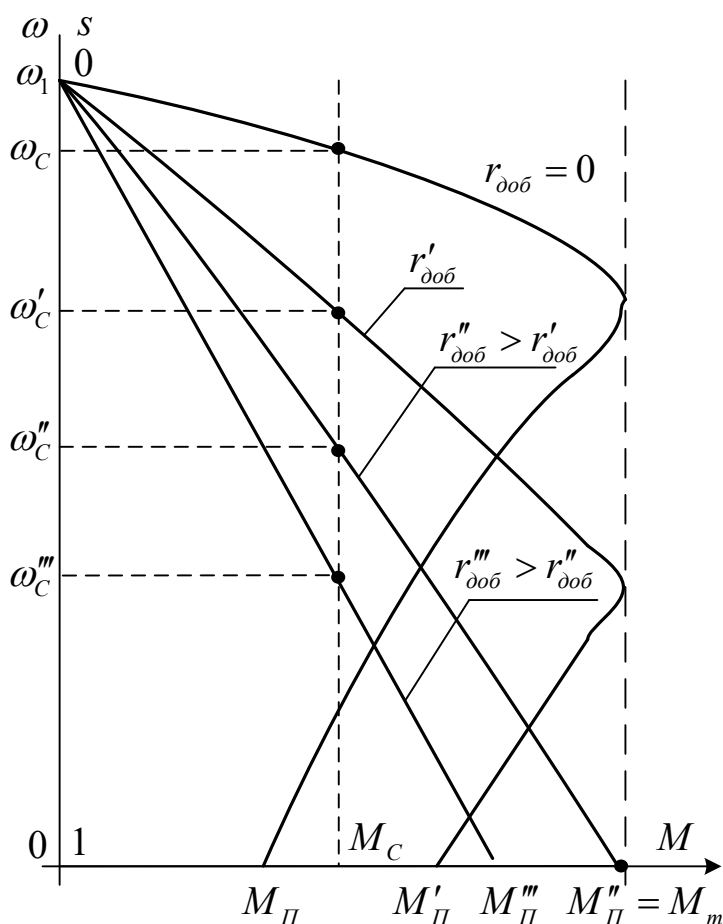


Рис. 1.34. Механические характеристики асинхронного двигателя при изменении в роторе добавочного сопротивления $r_{доб}$

скольжение s_m и пусковой момент M_{Π} 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. Механические характеристики при реостатном регулировании представлены на рис. 1.34. Можно подобрать добавочное сопротивление так, что пусковой момент

двигателя M_{Π} будет равен максимальному моменту M_m . Величину $r_{доб}$ рассчитывают из выражения для скольжения $s_m = 1$:

$$s_m = 1 = \frac{R'_2}{\sqrt{r_1^2 + x_K^2}} = \frac{r'_2 + r'_{доб}}{\sqrt{r_1^2 + x_K^2}}; \quad (1.90)$$

$$r_{доб} = \frac{\sqrt{r_1^2 + x_K^2} - r'_2}{k_e^2}, \quad (1.91)$$

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_{Π} до

определенного значения, после чего M_{Π} 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 $I_{2\Pi} = (2 - 2,5)I_{2H}$. Регулирование скорости ротора при данном моменте нагрузки на валу $M_C = M_H$ (рис. 1.34) происходит вниз от ее номинала.

Для асинхронных двигателей с фазным ротором применяют рео-

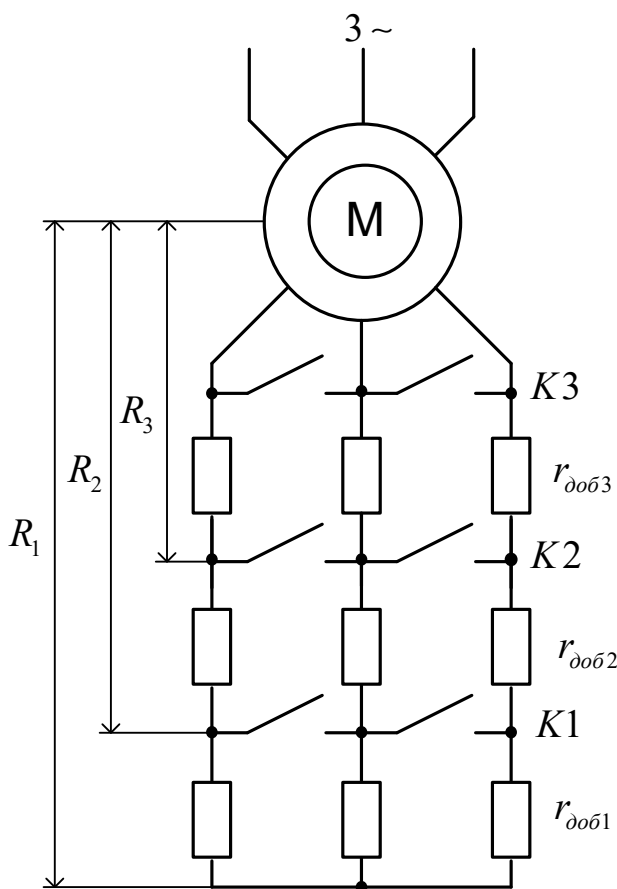


Рис. 1.35. Схема реостатного пуска асинхронного двигателя

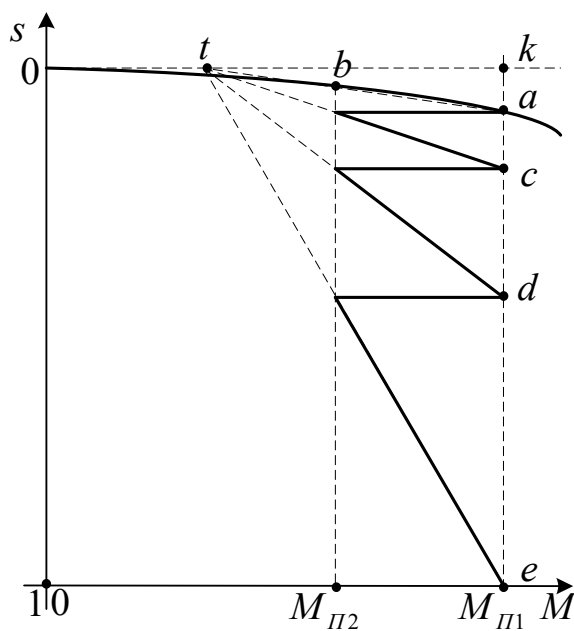


Рис. 1.36. Построение лучевой диаграммы для асинхронного двигателя

статный пуск в несколько ступеней, количество которых зависит от мощности двигателя. В качестве примера рассмотрим трехступенчатый реостатный пуск, осуществляемый согласно схеме, представленной на рис. 1.35. Величины пусковых сопротивлений $r_{доб_i}$ рассчитываются графо-аналитическим методом лучевой диаграммы, изображенной на рис. 1.36. Рабочие участки механических характеристик в пределах построения лучевой

диаграммы можно считать линейными. Для построения пусковой диаграммы и расчета пускового сопротивления требуется выполнить следующие действия [21]:

- построить естественную механическую характеристику $s = f(M)$;
- задать значения пускового момента $M_{П1} = 0,8M_m$ и момента переключения $M_{П2} = 1,2M_C$ (значение момента M_C определяют в зависимости от типа механизма);
- через точки на естественной характеристике a и b , соответствующие $M_{П1}$ и $M_{П2}$, строится первый луч до пресечения с прямой $s = 0$ в точке t ;
- остальные лучи строятся с соблюдением равенства моментов $M_{П1}$ и $M_{П2}$ на всех ступенях, начиная с луча te ;
- проводится прямая через точку a на естественной характеристике и точку e , соответствующую пусковому моменту $M_{П1}$ при неподвижном

двигателе, до пересечения с прямой, соответствующей $s = 0$ в точке k ;

- при неодинаковых значениях моментов $M_{\Pi 1}$ и $M_{\Pi 2}$ на ступенях следует изменить $M_{\Pi 2}$, повторив расчеты и построения;

- рассчитываются сопротивления пусковых ступеней $r_{\partial\partial\delta_i}$ и полные активные сопротивления цепи ротора R_i .

Величины сопротивлений пусковых реостатов $r_{\partial\partial\delta_i}$ и полных сопротивлений цепи ротора R_i определяются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} r_{\partial\partial\delta 1} &= r_2 \frac{de}{ka}; \\ r_{\partial\partial\delta 2} &= r_2 \frac{cd}{ka}; \\ r_{\partial\partial\delta 3} &= r_2 \frac{ac}{ka}; \end{aligned} \right\} \quad \left. \begin{aligned} R_1 &= r_2 \frac{ke}{ka}; \\ R_2 &= r_2 \frac{kd}{ka}; \\ R_3 &= r_2 \frac{kc}{ka}. \end{aligned} \right\} \quad (1.92)$$

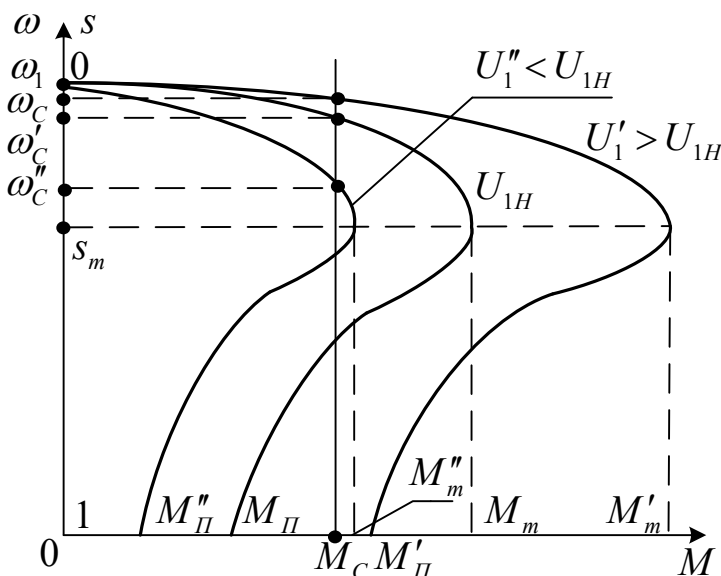


Рис. 1.37. Механические характеристики асинхронного двигателя при изменении напряжения, подводимого к статору

При ином числе пусковых ступеней расчет сопротивлений выполняется аналогично. Чем больше ступеней, тем плавнее происходит пуск двигателя, но при этом растет количество пусковой аппаратуры.

1.22. Регулирование скорости изменением напряжения U_1 , подведённого к статору двигателя

Способ применим в равной мере для всех асинхронных двигателей. Момент двигателя M , а также моменты пусковой M_{Π} 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. 1.37. 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. Например, при снижении напряжения на 20% ($0,8U_{1H}$) момент уменьшится в $0,8^2 = 0,64$ раза, т.е. на 36%. 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. В процессе эксплуатации асинхронных двигателей данный способ регулирования не нашел широкого применения [2].

1.23. Регулирование скорости изменением числа пар полюсов p

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

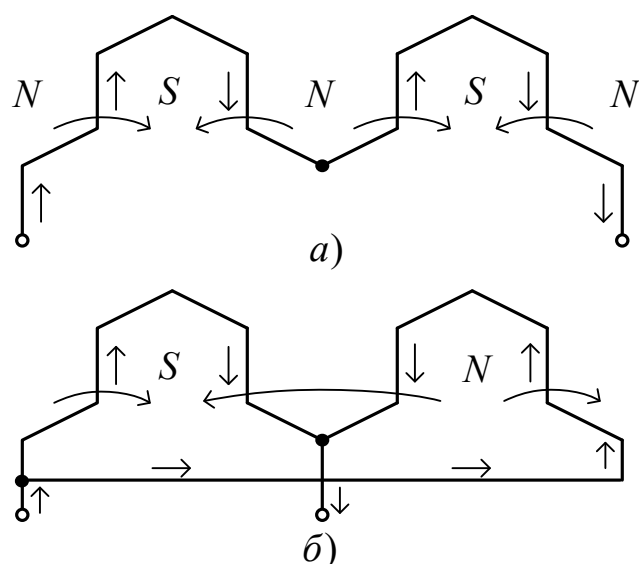


Рис. 1.38. Переход от числа полюсов $2p = 4$ (а) к $2p = 2$ (б)

схему управления. Асинхронные двигатели, в которых реализуется данный способ регулирования скорости, выпускаются на несколько скоростей вращения, например на 1500/1000/750/500 об/мин. Такие двигатели называются многоскоростными. Изменение числа пар полюсов в обмотке статора достигается переключением ее частей с последовательно-

го на параллельное соединение. На рис. 1.38 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.

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:

$$\left. \begin{aligned} P_{1Y} &= 3 \frac{U_1}{\sqrt{3}} I_1 \cos \varphi_{1Y}; \\ P_{1YY} &= 3 \frac{U_1}{\sqrt{3}} 2 I_1 \cos \varphi_{1YY} = 2 P_{1Y}. \end{aligned} \right\} \quad (1.93)$$

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. 1.39.

Способ регулирования скорости при условии $M = \text{const}$ целесообразно применять в электроприводах с постоянно действующим моментом нагрузки при любой частоте вращения, например, в подъемно-транспортных механизмах.

При условии $P = \text{const}$ уменьшение числа пар полюсов достигается переключением обмоток статора с соединения Δ на YY . Выражения, отображающие потребляемые из сети активные мощности, при этом имеют вид:

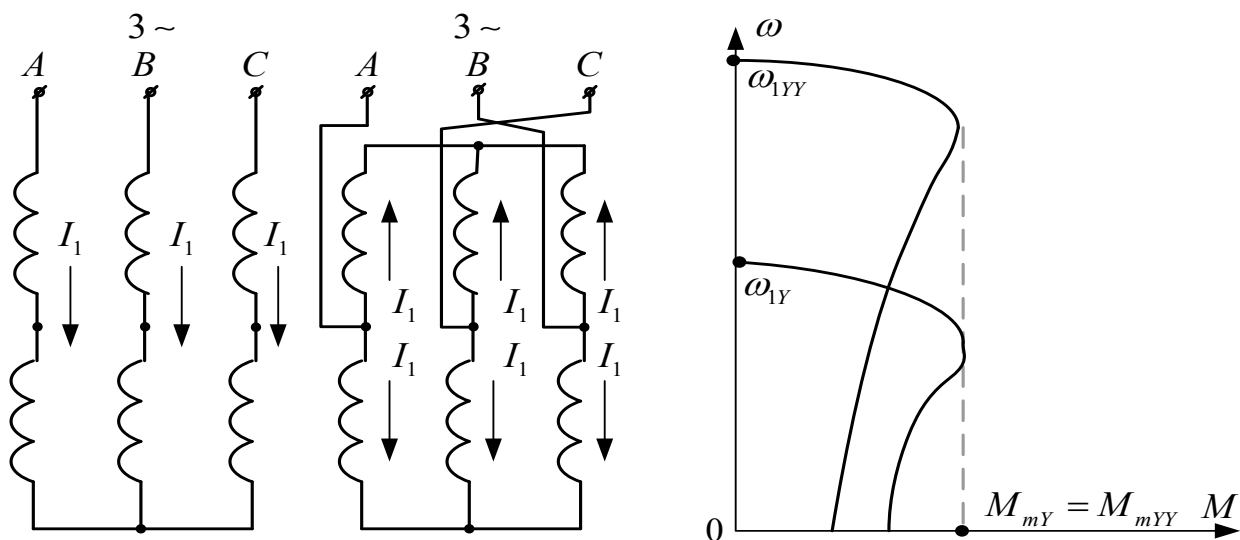


Рис. 1.39. Схемы переключения числа пар полюсов и механические характеристики асинхронного двигателя при $M = const$

$$\left. \begin{aligned} P_{1\Delta} &= 3U_1 I_1 \cos \varphi_{1\Delta}; \\ P_{1YY} &= 3 \frac{U_1}{\sqrt{3}} 2I_1 \cos \varphi_{1YY} = 2P_{1Y}. \end{aligned} \right\} \quad (1.94)$$

Коэффициенты мощности обеих схем примерно равны. Потребляемая мощность $P_{1YY} = 1,15P_{1\Delta}$. Если разницей в 15% пренебречь, что упрощает анализ, то $P_{1YY} \approx P_{1\Delta}$, 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. 1.40. Способ регулирования скорости при условии $P=const$ целесообразно применять когда момент нагрузки меняется обратно пропорционально частоте вращения, например, в станочных электропроводах. В обоих вариантах регулирования сохраняется жесткость рабочих участков механических характеристик. Многоскоростные асинхронные двигатели применяются в электроприводах,

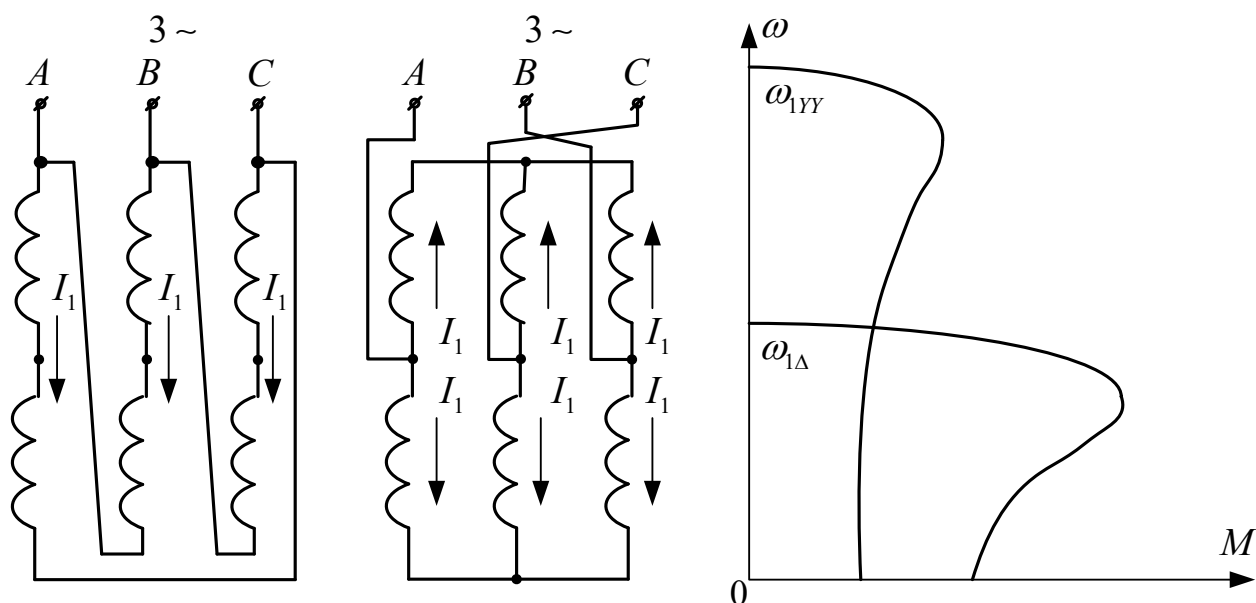


Рис. 1.40. Схемы переключения числа пар полюсов и механические характеристики асинхронного двигателя при $P = const$

допускающих ступенчатое регулирование скорости (лифты, станки, вентиляторы и т.п.). При регулировании на разных скоростях остаются практически неизменными энергетические показатели двигателей. Однако двигатели имеют повышенные габариты, сложную коммутационную аппаратуру и относительно дороги [1].

1.24. Регулирование скорости изменением частоты f_1 и 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 базе короткозамкнутых асинхронных двигателей. Регулирование скорости двигателя происходит плавно в широком диапазоне как вверх, так и вниз от ее номинального значения.

При частотном управлении относительное скольжение определяется

$$S_{\alpha} = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1}, \quad (1.95)$$

где ω_1 - частота вращения поля статора; ω - частота вращения ротора.

Если рассматриваются процессы при регулировании частоты f_1 , то наиболее удобно регулируемые параметры представлять в относительных единицах

$$\alpha = \frac{f_1}{f_{1н}}; \quad (1.96)$$

$$\beta = \frac{f_2}{f_{1н}}. \quad (1.97)$$

Параметр α является относительным значением частоты питания; параметр β - абсолютным скольжением.

Абсолютное и относительное скольжения связаны соотношениями

$$\beta = \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \alpha \cdot S_{\alpha}, \quad (1.89)$$

где ω_0 – частота вращения поля статора при номинальной частоте $f_{1н}$.

При частотном управлении относительное значение первой гармоники напряжения питания двигателя определяется:

$$\gamma = \frac{U_1}{U_{1н}}. \quad (1.99)$$

На основании схемы замещения асинхронного двигателя (рис. 1.41) для установившегося режима можно записать:

$$\dot{U}_{1н} \cdot \gamma = \dot{E}_1 \cdot \alpha + \dot{I}_1 \cdot (R_1 + jx_1 \cdot \alpha). \quad (1.100)$$

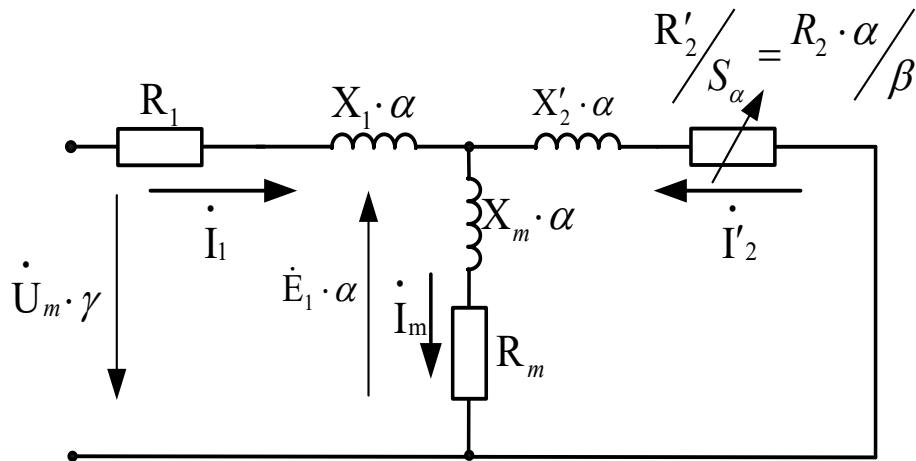


Рис. 1.41. Схема замещения асинхронного двигателя при частотном управлении

Взаимосвязь эдс, частоты и потока в воздушном зазоре имеет вид

$$E_1 \cdot \alpha = 4,44 \cdot \kappa_{об} \cdot W \cdot \Phi_\delta \cdot f_{1н} \cdot \alpha = c_e \cdot \Phi_\delta \cdot f_1, \quad (1.101)$$

где $\kappa_{об}$ - обмоточный коэффициент; W - число витков в фазе; Φ_δ - поток в воздушном зазоре.

В соответствии со схемой замещения ток статора двигателя определяется

$$I_1 = \frac{\dot{U}_{1н} \cdot \gamma}{(R_1 + jx_1 \cdot \alpha) + \left(\frac{\dot{z}_\mu}{\dot{z}_m + z_2'} \right) \cdot z_2' \cdot \alpha}, \quad (1.102)$$

где

$$\dot{z}_m = R_m + jx_m; \quad (1.103)$$

$$z_2' = \frac{R_2'}{\beta} + jx_2'. \quad (1.104)$$

Электромагнитный момент двигателя

$$M = \frac{3 \cdot R_2' \cdot I_2'^2}{\omega_0 \cdot \beta}. \quad (1.105)$$

В [22] показано, что

$$I_2' = \frac{U_{1н} \cdot \gamma}{\sqrt{A(\alpha, \beta)}}, \quad (1.106)$$

где

$$A(\alpha, \beta) = (b^2 + c^2 d^2) + (\alpha^2 + l^2 \alpha^2) \cdot \frac{R_2'^2}{\beta^2} + 2R_1 \alpha \frac{R_2'}{\beta}; \quad (1.107)$$

$$\sigma = R_1 \cdot \left(1 + \frac{x_2'}{x_m}\right); \quad (1.108)$$

$$c = x_1 + x_2' \cdot \left(1 + \frac{x_1}{x_m}\right); \quad (1.109)$$

$$d = \frac{R_1}{x_m}; \quad (1.110)$$

$$l = 1 + \frac{x_1}{x_m}; \quad (1.111)$$

$$M = \frac{3 \cdot U_{1H}^2 \cdot \gamma^2}{\omega_0 \cdot [(b^2 + c^2 \alpha^2) \cdot \frac{\beta}{R_2'} + (d^2 + l^2 \alpha^2) \cdot \frac{R_2'}{\beta} + 2R_1 \alpha]}. \quad (1.112)$$

Критическое значение абсолютного скольжения

$$\beta_{\kappa} = \pm R_2' \sqrt{\frac{d^2 + c^2 \alpha^2}{b^2 + c^2 \alpha^2}} = S_{\kappa(\alpha)} \cdot \alpha. \quad (1.113)$$

Критическое значение момента

$$M_{\kappa(\alpha, \gamma)} = \frac{3 \cdot U_{1H}^2 \cdot \gamma^2}{2\omega_0 \left[\sqrt{(b^2 + c^2 \alpha^2)(d^2 + l^2 \alpha^2)} \pm R_1 \alpha \right]}. \quad (1.114)$$

В формулах (3.84), (3.85): «плюс» - для двигательного режима, «минус» - для генераторного.

Таким образом, электромагнитный момент двигателя зависит не только от абсолютного скольжения, но и от параметров γ и α [8].

$$M = \frac{2M_{\kappa(\alpha, \gamma)} \cdot (1 + \varepsilon_{\alpha})}{\frac{\beta}{\beta_{\kappa}} + \frac{\beta_{\kappa}}{\beta} + 2\varepsilon_{\alpha}}, \quad (1.115)$$

где

$$\varepsilon_{\alpha} = \frac{R_1 \cdot \alpha \cdot \beta_{\kappa}}{R_2'(\alpha^2 + l^2 \alpha^2)} . \quad (1.116)$$

Для обеспечения одинаковой перегрузочной способности электропривода при работе на естественной механической характеристике и искусственной механической характеристике, реализуемой с помощью преобразователя частоты, необходимо правильно выбрать закон регулирования частоты и напряжения на выходе инвертора. Если пренебречь падением напряжения на активном сопротивлении статора R_1 , то можно записать закон частотного регулирования, отражающий связь изменения напряжения питания U_1 с изменением частоты f_1 и момента нагрузки M_c через относительные параметры

$$\gamma = \alpha \sqrt{\frac{M_c}{M_{сн}}} , \quad (1.117)$$

где $M_c, M_{сн}$ – текущий и номинальный моменты нагрузки.

Выражение (3.88) показывает квадратичную связь напряжения с электромагнитным моментом двигателя. Из него следует, что при регулировании частоты α для обеспечения постоянства перегрузочной способности напряжение γ надо изменять в соответствии с законом изменения нагрузки.

Падение напряжения на активном сопротивлении обмотки статора R_1 оказывает влияние на величину электромагнитного момента и перегрузочной способности двигателя

$$K_n = \frac{M_{\max}}{M_{ном}} . \quad (1.118)$$

Решая совместно уравнения (1.100) – (1.101), можно получить выражение

$$\dot{\Phi}_m = \frac{\frac{\gamma}{\alpha} \cdot \dot{U}_{1n} - I_1 \cdot \left(\frac{R_1}{\alpha} + jx_1 \right)}{c_E \cdot f_{1n}} \quad (1.119)$$

Очевидно, что при использовании линейного закона управления

$$\frac{\gamma}{\alpha} = const, \quad (1.120)$$

или

$$\frac{U_1}{f_1} = k = const, \quad (1.121)$$

по мере уменьшения α возрастает значение $\frac{R_1}{\alpha}$, что приводит к снижению магнитного потока. Регулировочные механические характеристики, полученные при этом законе регулирования показаны на рис. 1.42 сплошными линиями.

При частотах $f_1 < f_{1onm}$ следует менять напряжение U_1 в меньшей мере, чем частоту f_1 (рис. 1.43), поскольку регулирование по закону

$\frac{\gamma}{\alpha} = const$ приводит к существенному снижению M_m . Для обеспечения

постоянства критического момента соотношение $\frac{\gamma}{\alpha}$ изменяют по нелинейным законам, осуществляя компенсацию падения напряжения на активном сопротивлении обмотки статора. Регулирование скорости асинхронного

двигателя по данному закону целесообразно, когда выполняется условие $M_c = const$.

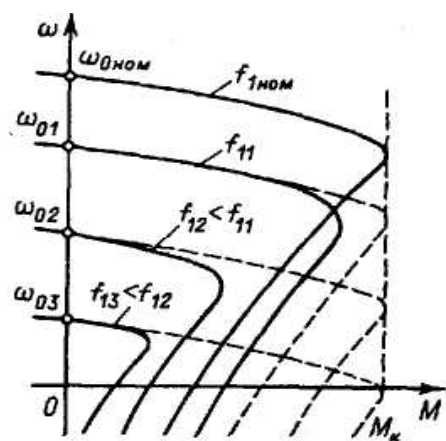


Рис. 1.42. Механические характеристики АД при частотном управлении

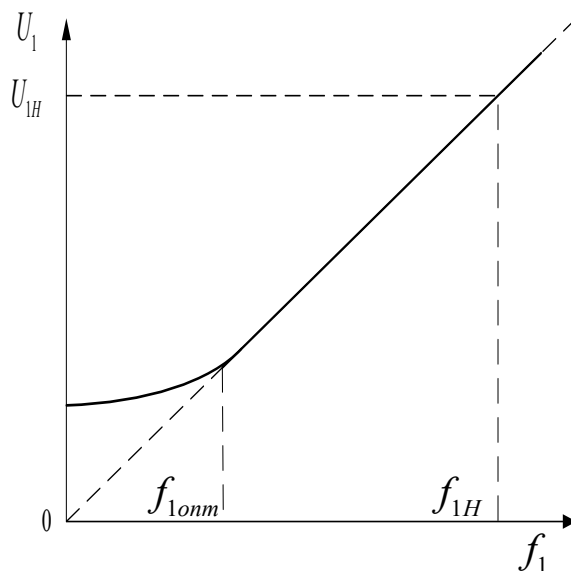


Рис. 1.43. Зависимость $U_1 = F(f_1)$

Наиболее рациональное регулирование скорости достигается при условии поддержания на неизменном уровне магнитного потока двигателя Φ_m , механические характеристики показаны на рис. 1.42 пунктирными линиями.

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 $\frac{U_1}{f_1} = const$, используются в современных электроприводах и другие зави-

симости, например $\frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = const$ (условие постоянства мощности) или

$\frac{U_1}{f_1^2} = const$ (при вентиляторной нагрузке). Механические характеристики

двигателей при нелинейных законах частотного управления приведены на рис. 1.44.

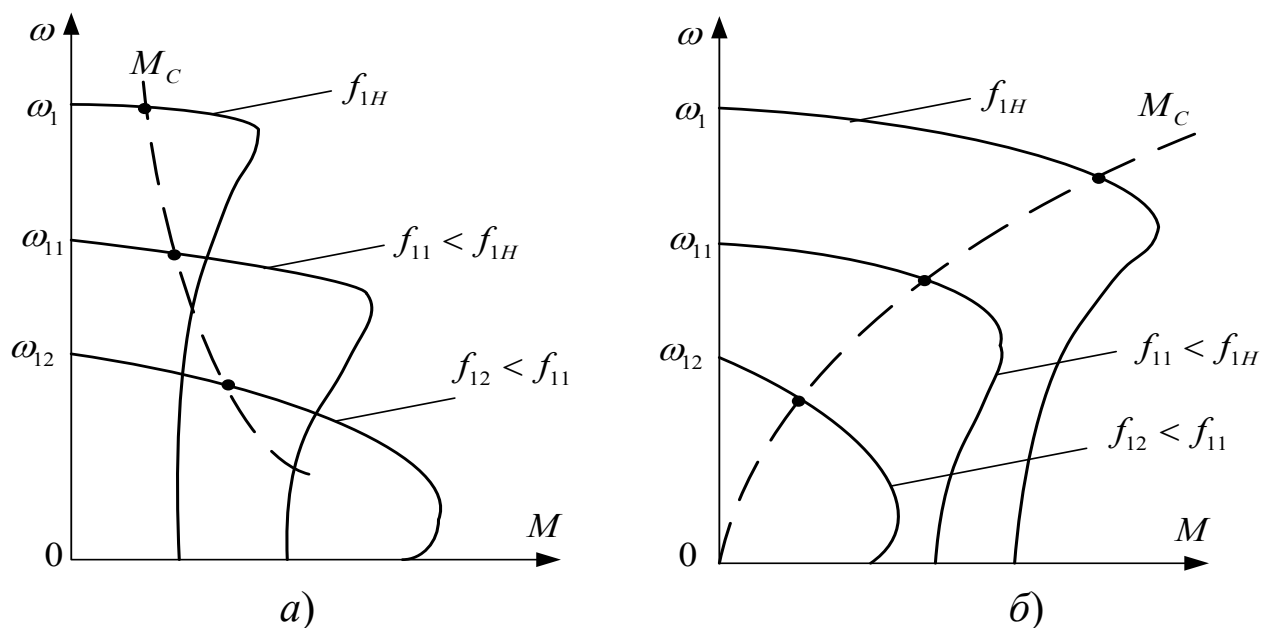


Рис. 1.44. Механические характеристики асинхронного двигателя при условии постоянства мощности (а) и вентиляторной нагрузки (б)

Выбор нелинейных законов частотного управления определяется требованиями технологического процесса промышленных установок.

1.25. Математическое описание электромеханических переходных процессов в асинхронном двигателе

Асинхронный двигатель представляет собой сложную динамическую структуру, описываемую системой нелинейных дифференциальных уравнений. Особенностью системы дифференциальных уравнений трехфазного асинхронного двигателя является то, что в них описывается взаимосвязь между мгновенными значениями напряжений, токов, магнитных потоков существующих в трех фазах. Для упрощения записи уравнений и их анализа можно использовать представление переменных двигателя в виде обобщенных векторов, находящихся в естественной трехфазной системе координат A, B, C или в прямоугольной неподвижной системе координат α, β .

При построении математических моделей асинхронного двигателя делаются следующие допущения:

- не учитывается влияние высших пространственных гармоник;
- насыщение и потери в стали отсутствуют;
- фазные обмотки имеют одинаковое число витков, т.е. двигатель симметричен;
- не учитывается влияние пазов;
- не учитывается емкостное сопротивление обмоток и энергия электростатического поля.

Уравнения напряжений статора u_1 и ротора u'_2 трехфазного АД для неподвижной системы координат статора, имеют вид

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= R_1 i_1 + \frac{d}{dt} \psi_1; \\ u'_2 &= \frac{R'_2}{s} i'_2 + \frac{d}{dt} \psi_2 = 0, \end{aligned} \right\} \quad (1.122)$$

где

$$u_1 = \begin{bmatrix} u_{1a} \\ u_{1b} \\ u_{1c} \end{bmatrix}; \quad i_1 = \begin{bmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \\ i_{1c} \end{bmatrix}; \quad \psi_1 = \begin{bmatrix} \psi_{1a} \\ \psi_{1b} \\ \psi_{1c} \end{bmatrix};$$

$$u'_2 = \begin{bmatrix} u'_{2a} \\ u'_{2b} \\ u'_{2c} \end{bmatrix}; \quad i'_2 = \begin{bmatrix} i'_{2a} \\ i'_{2b} \\ i'_{2c} \end{bmatrix}; \quad \psi_2 = \begin{bmatrix} \psi_{2a} \\ \psi_{2b} \\ \psi_{2c} \end{bmatrix};$$

где $i_{1a}, i_{1b}, i_{1c}, i'_{2a}, i'_{2b}, i'_{2c}, \psi_{1a}, \psi_{1b}, \psi_{1c}, \psi_{2a}, \psi_{2b}, \psi_{2c}$ - соответственно токи и потокосцепления статора и ротора; R_1, R'_2 - соответственно активное сопротивление статора и приведенное к статору активное сопротивление ротора; s – скольжение двигателя; для короткозамкнутого асинхронного двигателя $u'_2 = 0$.

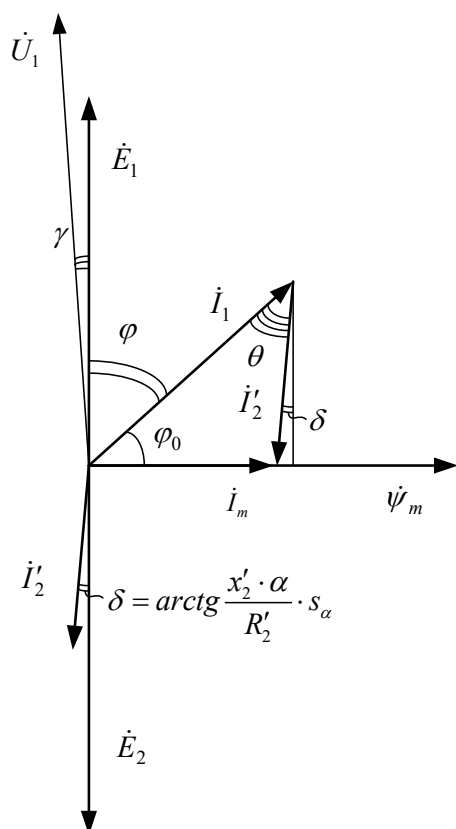
Для симметричной асинхронной машины с синусными обмотками

$$\left. \begin{aligned} \psi_1 &= L_1 i_1 + L_m i'_2; \\ \psi_2 &= L_m i_1 + L'_2 i'_2; \end{aligned} \right\} \quad (1.123)$$

где $L_1 = L_{1\sigma} + L_m$ - полная индуктивность статора; $L_2 = L'_{2\sigma} + L_m$ - приведенная к статору индуктивность ротора; L_m - взаимная индуктивности фаз статора и ротора.

Трехфазный асинхронный двигатель, несмотря на достаточно простую конструкцию, характеризуется сложными электромагнитными и электромеханическими динамическими процессами, что связано со сложным характером взаимодействия магнитных полей, создаваемых фазными обмотками при наличии движения ротора с изменяющейся скоростью.

Схема замещения фазы асинхронного двигателя при частотном управлении приведена на рис. 1.41, векторная диаграмма – на рис. 1.45. Взаимная ориентация векторов результирующих векторов потокосцеплений показана на рис. 1.46.



В системах векторного управления при изменении абсолютного скольжения β изменяется и угол δ .

Момент АД можно выразить через различные пары векторов электромагнитных переменных поля статора, ротора или комбинаций векторов статора и ротора, приведенных в одну и ту же систему координат. На основании теории обобщенной электрической машины можно записать следующие векторные уравнения для электромагнитного момента

$$\left. \begin{aligned} \overline{M} &= \frac{3}{2} p_{\Pi} L_m (\bar{i}'_2 \times \bar{i}_1); \overline{M} = \frac{3}{2} p_{\Pi} (\overline{\Psi}_1 \times \bar{i}_1), \\ \overline{M} &= \frac{3}{2} p_{\Pi} (\overline{\Psi}_2 \times \bar{i}'_2); \overline{M} = \frac{3}{2} p_{\Pi} k_r (\overline{\Psi}_2 \times \bar{i}_1), \\ \overline{M} &= \frac{3}{2} p_{\Pi} k_s (\overline{\Psi}_1 \times \bar{i}'_2); \overline{M} = \frac{3}{2} \frac{p_{\Pi} k_s}{L_2 \sigma} (\overline{\Psi}_2 \times \overline{\Psi}_1), \\ \overline{M} &= \frac{3}{2} p_{\Pi} (\overline{\Psi}_m \times \bar{i}'_2); \overline{M} = \frac{3}{2} p_{\Pi} (\overline{\Psi}_{12} \times \bar{i}_1), \end{aligned} \right\} \quad (1.125)$$

где $\overline{\Psi}_2, \overline{\Psi}_1, \overline{\Psi}_m$ - пространственные векторы потокоцеплений статора, ротора и взаимоиндукции; \bar{i}_1, \bar{i}'_2 - пространственные векторы тока статора и приведенного тока ротора; \overline{M} - вектор электромагнитного момента; k_r, k_s - коэффициент магнитной связи ротора и статора; σ - коэффициент рассеяния; L_m - наибольшее значение взаимной индуктивности между статором и ротором; L_2 - полная индуктивность ротора; p_{Π} - число пар полюсов двигателя.

Электромагнитный момент двигателя получает максимальное значение, если векторы, создающие момент, сдвинуты друг относительно друга на 90^0 эл. [3,4]. Однако реализовать такое взаимное положение моментобразующих векторов в асинхронном двигателе затруднительно, поэтому обычно в системах асинхронного электропривода используется более просто достигаемая взаимная ориентация векторов. При прямом подключении асинхронного двигателя к питающей сети взаимная ориентация моменто-

образующих векторов происходит самопроизвольно, определяется взаимодействием переменных двигателя и зависит от нагрузки на валу.

Уравнение движения двигателя имеет вид:

$$M - M_c = J_\Sigma \frac{d\omega}{dt}, \quad (1.126)$$

где M_c - статический момент на валу двигателя; ω - частота вращения двигателя; J_Σ - суммарный приведенный момент инерции электропривода.

Математическая модель асинхронного двигателя, описывающая его электромеханические процессы в трехфазной естественной системе координат, достаточно громоздка. Известно множество задач, при решении которых целесообразно использовать переход от трехфазной модели к двухфазной обобщенной модели двигателя переменного тока в целях упрощения моделирования динамических процессов, более наглядного анализа и облегчения расчетов. Если в двухфазной математической модели прямоугольные координаты неподвижны относительно обмоток статора $\omega_k = 0$, то их принято обозначать α, β .

Для обобщенного вектора \bar{X} , рассматриваемого в естественной трехфазной системе координат А,В,С и ортогональной системе координат α, β , при совпадении положения осей А и α , справедливы соотношения [4]:

$$\left. \begin{aligned} X_\alpha &= \frac{3}{2} k_c X_A = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{2}{3}} X_A = \sqrt{\frac{3}{2}} X_A; \\ X_\beta &= \frac{\sqrt{3}}{2} k_c (X_B - X_C) = \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{\frac{2}{3}} (X_B - X_C) = \frac{1}{\sqrt{2}} (X_B - X_C), \end{aligned} \right\} \quad (1.127)$$

где k_c - согласующий коэффициент пропорциональности, выбор которого осуществляется из условий инвариантности мощности реальной трехфазной машины и приведенной двухфазной машины ($k_c = \sqrt{2/3}$).

Формулы обратного преобразования напряжений имеют вид

$$\begin{aligned} X_A &= k_c X_\alpha = \sqrt{\frac{2}{3}} X_\alpha; \\ X_B &= k_c \left(-\frac{1}{2} X_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} X_\beta \right) = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(-\frac{1}{2} X_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} X_\beta \right); \\ X_C &= k_c \left(-\frac{1}{2} X_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} X_\beta \right) = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(-\frac{1}{2} X_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} X_\beta \right). \end{aligned} \quad (1.128)$$

Данные выражения можно привести к виду

$$X_{1a} = \sqrt{\frac{2}{3}} X_{1\alpha}; \quad X_{1b} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(-\frac{1}{\sqrt{3}} X_{1\alpha} + X_{1\beta} \right); \quad X_{1c} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(-\frac{1}{\sqrt{3}} X_{1\alpha} - X_{1\beta} \right). \quad (1.129)$$

Количественная связь между переменными трехфазной машины и ее двухфазной модели в статических режимах может быть установлена при условии расположения изображающего вектора переменной \bar{X} на оси α , совпадающей с осью А реальной машины (рис. 1.47), при этом $X_{1\beta} = 0$, и амплитуды переменных связаны уравнениями

$$X_{1\max (2\phi)} = \frac{3}{2} k_c \cdot X_{1\max (3\phi)}; \quad X_{1\max (3\phi)} = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{k_c} \cdot X_{1\max (2\phi)} = k_c \cdot X_{1\max (2\phi)} \quad (1.130)$$

Переход от трехфазной системы координат к двухфазной неподвижной системе α, β в матричной форме осуществляется в соответствии с известными выражениями [5].

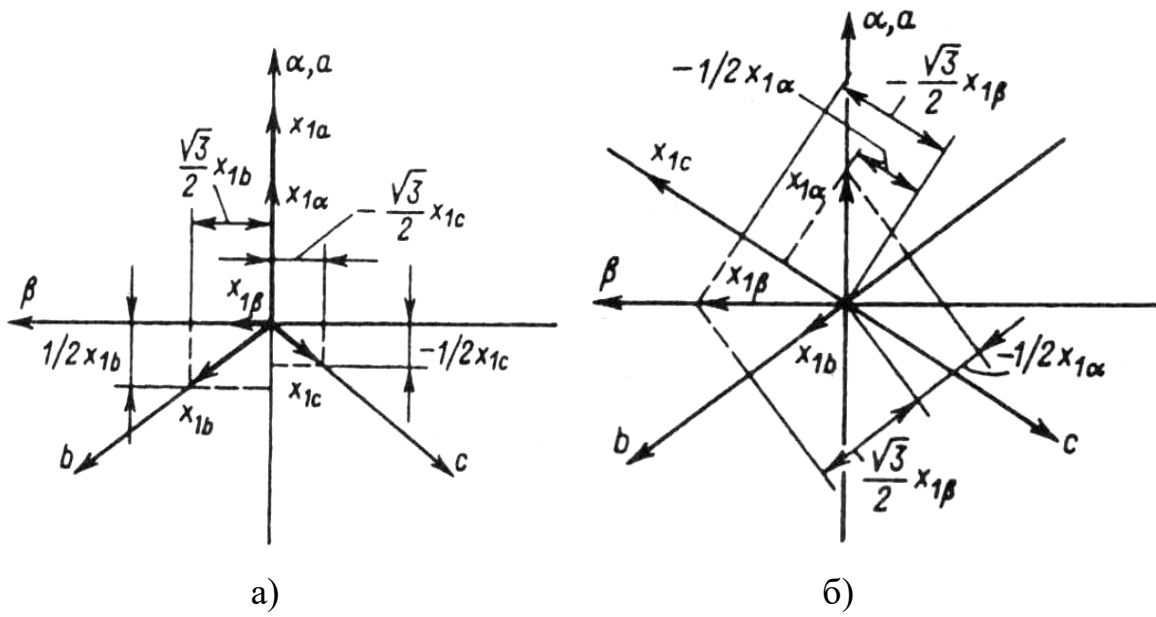


Рис. 1.47. Координатные преобразования переменных АД:

а) преобразование $3 \rightarrow 2$; б) преобразование $2 \rightarrow 3$

Матричное описание асинхронного двигателя в системе координат α, β с учетом преобразования переменных по Лапласу имеет вид:

$$\begin{bmatrix} u_{1\alpha} \\ u_{1\beta} \\ u'_{2\alpha} \\ u'_{2\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + pL_1 & 0 & pL_m & 0 \\ 0 & R_1 + pL_1 & 0 & pL_m \\ pL_m & w_1 L_m & R_2 + pL_2 & p \cdot w_1 L_2 \\ -w_1 L_m & pL_m & -w_1 L_2 & R_2 + pL_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{1\alpha} \\ i_{1\beta} \\ i'_{2\alpha} \\ i'_{2\beta} \end{bmatrix}, \quad (1.131)$$

Электромагнитный момент двигателя в системе координат α, β определяется

$$M = \frac{3}{2} P_n \frac{L_m}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} (\Psi_{1\beta} \Psi_{2\alpha} - \Psi_{1\alpha} \Psi_{2\beta}). \quad (1.132)$$

Если скорость прямоугольной системы координат равна скорости вращения поля статора $\omega_k = \omega_l$, то такую систему координат принято обозначать X, Y . Данная математическая модель используется при построении векторных систем управления АД, т.к. при переходе от неподвижных систем координат к данной системе координат гармонические переменные двигателя представляются постоянными величинами.

Рассматривая схему замещения фазы АД (рис. 1.48), в которой переменные и параметры схемы представлены в операторной форме, можно определить уравнения связи, а также передаточные функции между различными переменными АД [1,6].

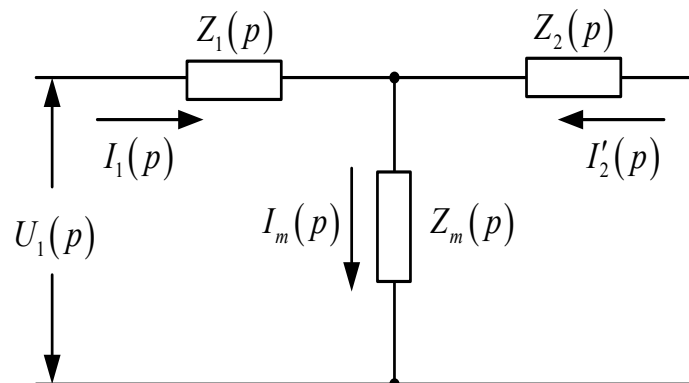


Рис. 1.48. Схема замещения АД при представлении параметров в операторной форме

$$\begin{aligned}
 I_1(p) &= \frac{U_1(p)}{Z_1(p) + \frac{Z_2(p) \cdot Z_m(p)}{Z_2(p) + Z_m(p)}} = \\
 &= \frac{U_1(p) \cdot [Z_2(p) + Z_m(p)]}{Z_1(p) \cdot Z_2(p) + Z_1(p) \cdot Z_m(p) + Z_2(p) \cdot Z_m(p)} \quad ; \quad (1.133)
 \end{aligned}$$

$$E_1(p) = U_1(p) - I_1(p)Z_1(p) = \frac{U_1(p) \cdot Z_2(p) \cdot Z_m(p)}{Z_1(p) \cdot Z_2(p) + Z_1(p) \cdot Z_m(p) + Z_2(p) \cdot Z_m(p)} ; \quad (1.134)$$

$$I_m(p) = \frac{E_1(p)}{Z_m(p)} = U_1(p) \frac{Z_2(p)}{Z_1(p)Z_2(p) + Z_1(p)Z_m(p) + Z_2(p)Z_m(p)} ; \quad (1.135)$$

$$I'_2(p) = \frac{E'_2(p)}{Z_2(p)} = \frac{E_1(p)}{Z_2(p)} = I_1(p) \frac{Z_m(p)}{Z_2(p) + Z_m(p)} . \quad (1.136)$$

Сопротивления схемы замещения

$$Z_1(p) = L_{1\sigma}p + R_1 ; \quad (1.137)$$

$$Z_2(p) = L'_{2\sigma} \cdot p + \frac{R'_2}{S_\alpha} ; \quad (1.138)$$

$$Z_m(p) = L_mp . \quad (1.139)$$

В [40] выполнены преобразования и определены передаточные функции между переменными структурной схемы асинхронного двигателя.

Описание электромагнитных и электромеханических процессов в трехфазном асинхронном двигателе при различных способах управления наиболее полно и точно может быть выполнено в естественной системе координат А,В,С, оси которой сдвинуты друг относительно друга на 120^0 , что соответствует конструкции АД. Необходимость такого детального описания возникает при решении задач, связанных с исследованием динамических электромагнитных и электромеханических процессов в самой электрической машине. В то же время математическое моделирование и аналитические расчеты в трехфазной системе координат сложны и трудоемки.

На рис. 1.49 приведена структурная схема математической модели асинхронного двигателя, в которой переменные, входящие в состав блоков, зависят от скольжения двигателя s . В таблице 1 приведены передаточные

функции между переменными структурной схемы. При математическом моделировании для выполнения расчета момента двигателя необходимо осуществлять переход от естественной трехфазной системы координат А,В,С к ортогональной системе координат α, β .

На рис. 1.50 приведены результаты математического моделирования процесса пуска асинхронного короткозамкнутого двигателя, выполненного с использованием модели (рис. 1.49). Полученные графики дают достаточно полное представление о динамических процессах, происходящих при пуске асинхронного двигателя.

1.26. Математические модели для описания динамических режимов асинхронного двигателя в ортогональной системе координат X,Y

Асинхронный двигатель с фазным ротором может быть описан уравнениями, в которых переменные являются обобщенными векторами. В векторной форме уравнения, описывающие процессы в цепи статора и ротора, имеют вид:

$$\dot{U}_1 = i_1 R_1 + \frac{d\dot{\Psi}_1}{dt} - j\omega_\kappa \dot{\Psi}_1; \quad (1.140)$$

для асинхронного короткозамкнутого двигателя

$$0 = i_2' \cdot R_2' + \frac{d\dot{\Psi}_2}{dt} - j(\omega_\kappa - \omega) \cdot \dot{\Psi}_1; \quad (1.141)$$

для асинхронного двигателя с фазным ротором - при введении в цепь ротора добавочного напряжения в режиме двойного питания

$$\dot{U}_2' = i_2' \cdot R_2' + \frac{d\dot{\Psi}_2}{dt} - j(\omega_\kappa - \omega) \cdot \dot{\Psi}_1; \quad (1.142)$$

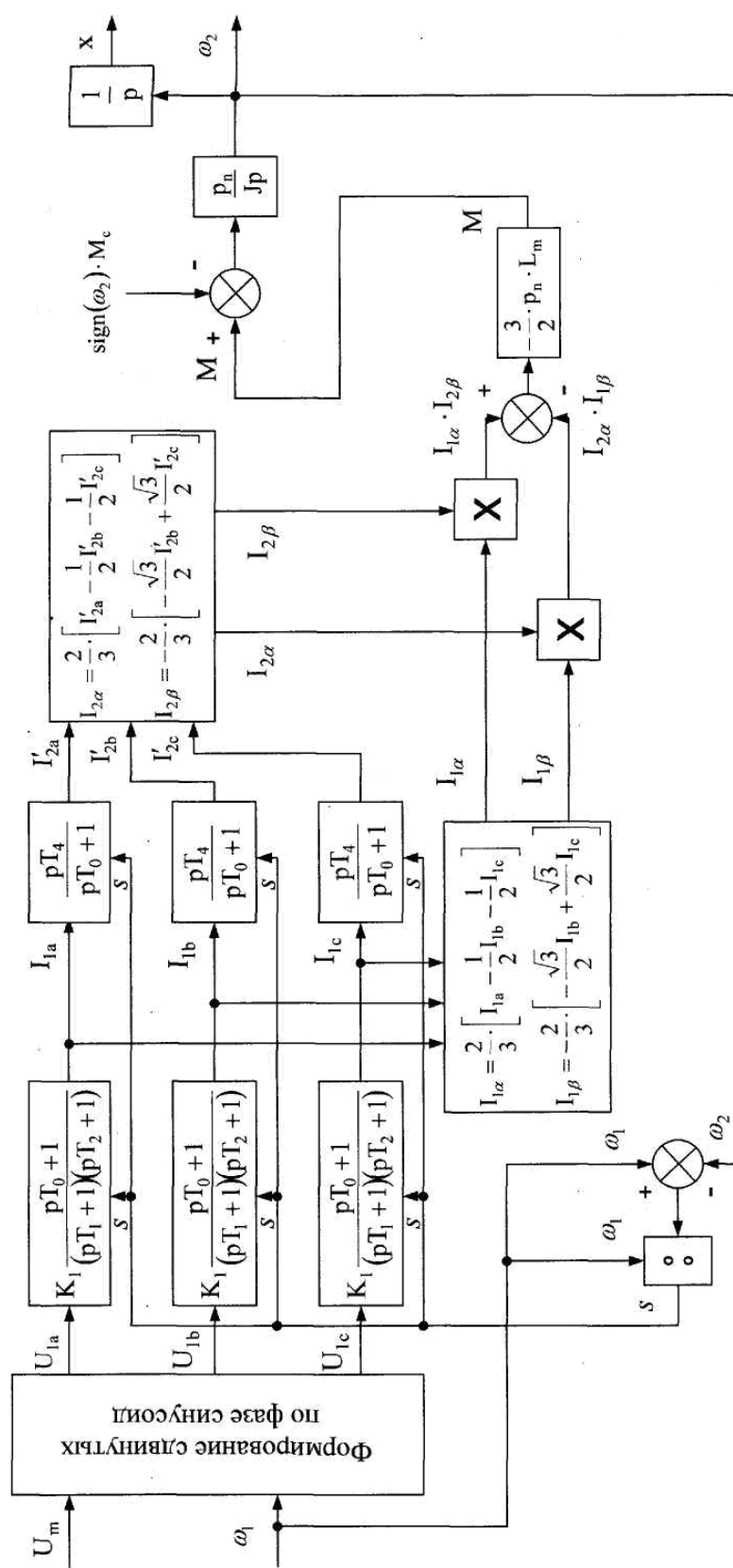


Рис.1.5. Структурная схема модели вращающегося АД с короткозамкнутым ротором

Постоянные времени как функции скольжения для модели в координатах А,В,С равны:

$$T_0(s) = \frac{L'_2 + L_m}{R'_2} \cdot s;$$

$$T_1(s) = \frac{(L'_2 + L_m) \cdot s \cdot R_1 + (L_1 + L_m) \cdot R'_2}{2 \cdot R_1 \cdot R'_2} + \frac{\sqrt{((L'_2 + L_m) \cdot s \cdot R_1 + (L_1 + L_m) \cdot R'_2)^2 - 4 \cdot R_1 \cdot R'_2 \cdot s \cdot (L_1 \cdot (L'_2 + L_m) + L'_2 \cdot L_m)}}{2 \cdot R_1 \cdot R'_2};$$

$$T_2(s) = \frac{(L'_2 + L_m) \cdot s \cdot R_1 + (L_1 + L_m) \cdot R'_2}{2 \cdot R_1 \cdot R'_2} - \frac{\sqrt{((L'_2 + L_m) \cdot s \cdot R_1 + (L_1 + L_m) \cdot R'_2)^2 - 4 \cdot R_1 \cdot R'_2 \cdot s \cdot (L_1 \cdot (L'_2 + L_m) + L'_2 \cdot L_m)}}{2 \cdot R_1 \cdot R'_2};$$

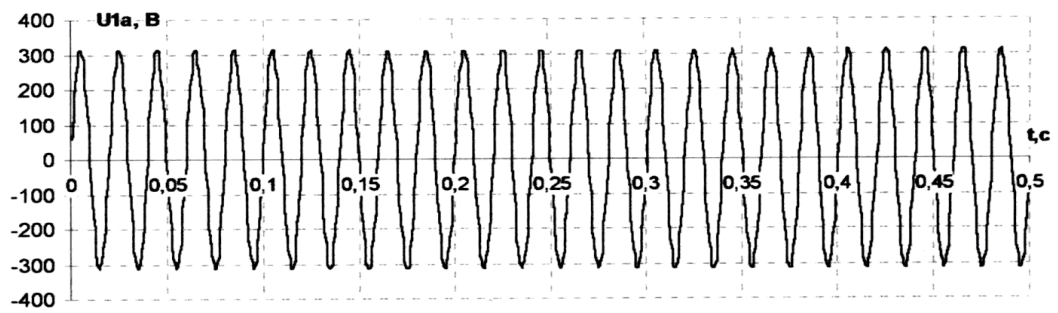
$$T_3(s) = \frac{L'_2}{R'_2} \cdot s;$$

$$T_4(s) = \frac{L_m}{R'_2} \cdot s.$$

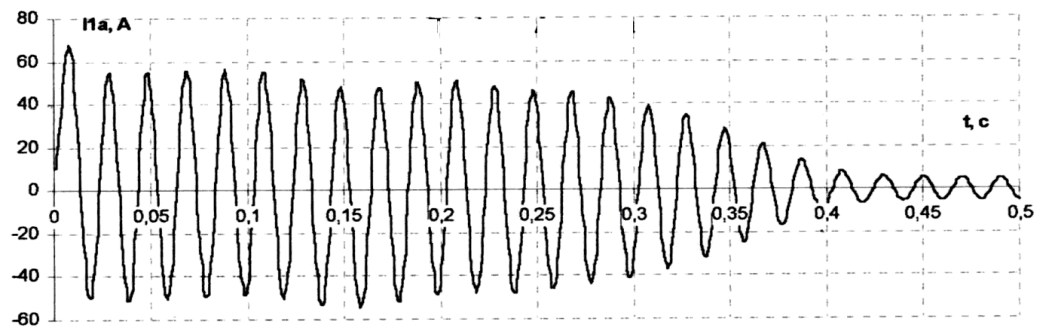
Таблица 1

Передаточные функции модели А,В,С

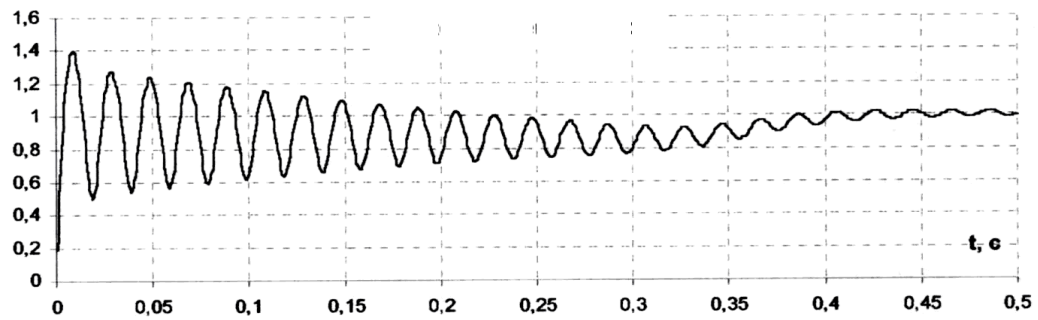
Наименование выражений	Выражения
Коэффициенты усиления и постоянные времени	$K_1 = K_2 = K_3 = \text{const}; K_{lm} = \text{const}$ $T_0 = f_0(s); \quad T_1 = f_1(s); \quad T_2 = f_2(s);$ $T_3 = f_3(s); \quad T_4 = f_4(s);$
Передаточные функции для токов фазы по питающему напряжению и комплексные сопротивления токам фазы в операторной форме	$W_{1\phi}(p) = \frac{I_{1\phi}(p)}{U_{1\phi}(p)} = K_1 \frac{pT_0 + 1}{(pT_1 + 1)(pT_2 + 1)} = \frac{1}{Z_{1\phi}(p)};$ $W_{2\phi}(p) = \frac{I'_{2\phi}(p)}{U_{1\phi}(p)} = K_2 \frac{pT_4}{(pT_1 + 1)(pT_2 + 1)} = \frac{1}{Z_{2\phi}(p)};$ $W_{m\phi}(p) = \frac{I_{m\phi}(p)}{U_{1\phi}(p)} = K_3 \frac{pT_3 + 1}{(pT_1 + 1)(pT_2 + 1)} = \frac{1}{Z_{m\phi}(p)};$
Передаточные функция для тока намагничивания по току статора	$W_{m1\phi}(p) = \frac{I_{m\phi}(p)}{I_{1\phi}(p)} = K_{lm} \frac{pT_3 + 1}{pT_0 + 1}.$



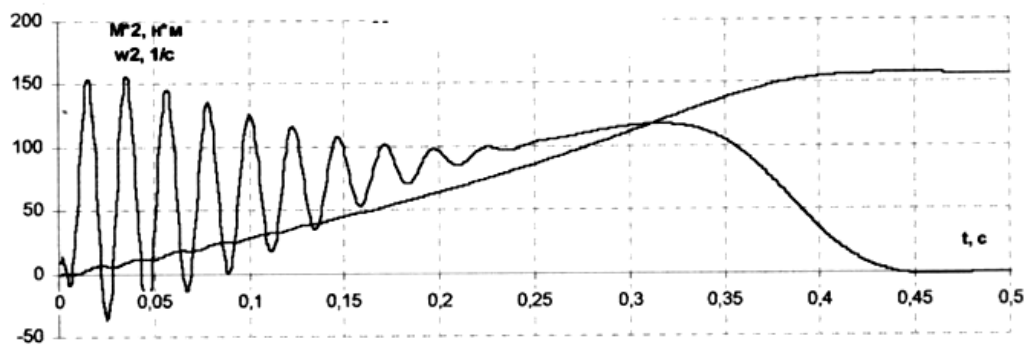
а)



б)



в)



г)

Рис. 1.50. Переходные процессы при пуске асинхронного двигателя:

а) напряжение фазы обмотки статора $U_{1\phi} = f(t)$; б) ток статора $I_1 = f(t)$;

в) потокосцепление статора $\Psi_{1l} = f(t)$; г) электромагнитный момент и скорость двигателя $M = f(t)$; $\omega = f(t)$

где ω_K - угловая скорость вращения координатных осей.

Векторные величины, входящие в выражения (4.19)-(4.20), отмечены сверху точкой. Штрихом отмечены параметры, приведенные к цепи статора. Вектора потокосцепления связаны с векторами токов зависимостями (4.2).

Наглядной формой математического описания электромеханических систем, к которым относится и асинхронный двигатель, является структурная схема, в которой все параметры и переменные представлены в виде операторных изображений. Структурные схемы АД рассмотрены в ряде публикаций [56,91,101], с их помощью удобно проводить аналитические исследования и моделировать динамические процессы в двигателе.

Для моделирования АД как объекта динамической системы используется его представление в различных системах координат - естественной А,В,С, а также прямоугольных α, β ; XY ; dq , описывающих процессы, происходящие в электрической машине на основе уравнений обобщенной двухфазной электрической машины. Анализируя математические модели в прямоугольных системах, можно сделать вывод об их полной равнозначности, для анализа собственно электрической машины выбор системы координат не играет существенной роли. При аналитических исследованиях и моделировании динамических процессов в системах асинхронного электропривода более удобна модель в системе координат X, Y .

В установившемся режиме при постоянстве частоты питания ω_1^* , при условии симметрии поля в воздушном зазоре машины, обобщенный вектор напряжения сети, а также оси координат X, Y , будут совершать относительно неподвижного статора вращательное движение со скоростью $\omega_K = \omega_0$. Если частота равна номинальному значению $f_1 = f_{1н} = 50$ Гц, то поле статора и оси координат вращаются с частотой $\omega_0 = 314/P_n$. Обобщенные векторы всех электромагнитных величин будут неподвижны относительно коор-

динатных осей, благодаря чему в уравнениях, описывающих процессы в двигателе, исходные гармонические величины становятся величинами постоянными, на вход модели подается скачкообразный сигнал. Электромагнитные процессы в асинхронном двигателе (в общем случае с фазным ротором) в системе координат X, Y описываются дифференциальными и алгебраическими уравнениями [18,62]:

$$\left. \begin{aligned}
 U_{1x} &= i_{1x} \cdot R_1 + \frac{d\Psi_{1x}}{dt} + \omega_1^* \cdot \Psi_{1y}; \\
 U_{1y} &= i_{1y} \cdot R_1 + \frac{d\Psi_{1y}}{dt} - \omega_1^* \cdot \Psi_{1x}; \\
 -U'_{2x} &= i'_{2x} \cdot R'_2 + \frac{d\Psi_{2x}}{dt} + \omega_1^* \cdot S \cdot \Psi_{2y}; \\
 -U'_{2y} &= i'_{2y} \cdot R'_2 + \frac{d\Psi_{2y}}{dt} - \omega_1^* \cdot S \cdot \Psi_{2x}; \\
 \Psi_{1x} &= L_1 i_{1x} + L_m i'_{2x}; \\
 \Psi_{1y} &= L_1 i_{1y} + L_m i'_{2y}; \\
 \Psi_{2x} &= L_2 i_{2x} + L_m i_{1x}; \\
 \Psi_{2y} &= L_2 i_{2y} + L_m i_{1y}; \\
 i_{1x}(P) &= \frac{L'_2}{L_1 L'_2 - L_m^2} \cdot \Psi_{1x}(P) - \frac{L_m}{L_1 L'_2 - L_m^2} \cdot \Psi_{2x}(P); \\
 i_{1y}(P) &= \frac{L'_2}{L_1 L'_2 - L_m^2} \cdot \Psi_{1y}(P) - \frac{L_m}{L_1 L'_2 - L_m^2} \cdot \Psi_{2y}(P); \\
 i'_{2x}(P) &= -\frac{L_m}{L_1 L'_2 - L_m^2} \cdot \Psi_{1x}(P) + \frac{L_1}{L_1 L'_2 - L_m^2} \cdot \Psi_{2x}(P); \\
 i'_{2y}(P) &= -\frac{L_m}{L_1 L'_2 - L_m^2} \cdot \Psi_{1y}(P) + \frac{L_1}{L_1 L'_2 - L_m^2} \cdot \Psi_{2y}(P); \\
 S &= \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1}; \\
 \omega_1^* &= 2\pi f_l = \omega_1 p_n; \\
 M &= \frac{3}{2} P_n (\Psi_{1x} i_{1y} - \Psi_{1y} i_{1x}); \\
 M - M_c &= J \frac{d\omega}{dt},
 \end{aligned} \right\} \quad (1.143)$$

где U_{1x}, U_{1y} - проекции на оси координат вектора напряжения, подведённого к статору двигателя; U_{2x}, U_{2y} - проекции на оси координат вектора добавочного напряжения $\overline{U_2}$ (вводится при исследовании систем двойного питания АД); i_{1x}, i_{1y} - координаты вектора тока статора; i_{2x}, i_{2y} - координаты вектора тока ротора; Ψ_{1x}, Ψ_{1y} - координаты вектора потокосцепления статора; Ψ_{2x}, Ψ_{2y} - координаты вектора потокосцепления ротора; ω_1^* - круговая частота напряжения питания; ω_1 - скорость вращения поля статора; ω - скорость двигателя.

На основании преобразований уравнений (1.143) по Лапласу, можно построить структурную схему асинхронного двигателя (рис. 1.51).

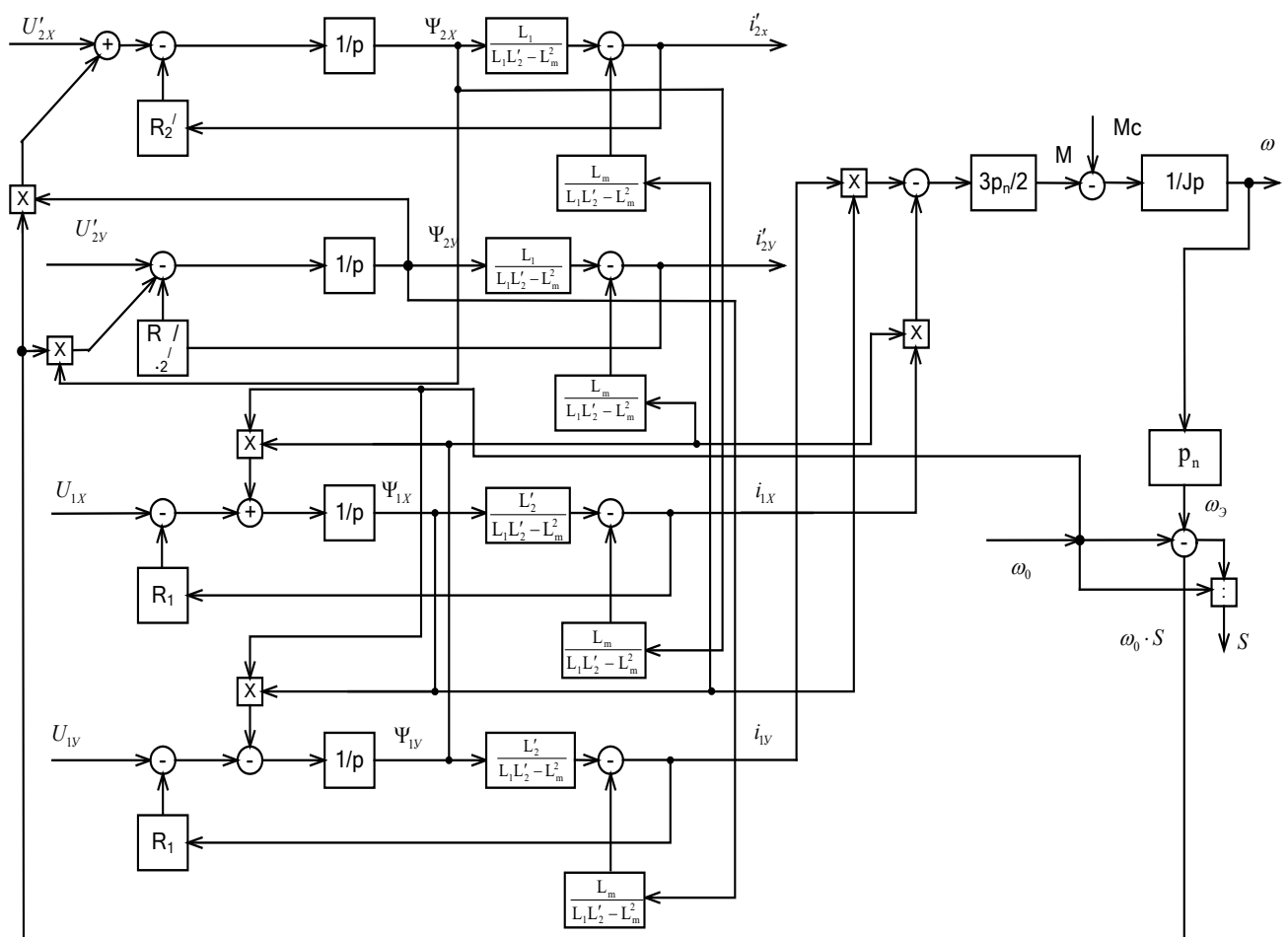


Рис. 1.51. Структурная схема асинхронного двигателя в системе координат X,Y

Структурные схемы АД рассмотрены в ряде публикаций [18, 25], с их помощью удобно проводить аналитические исследования и моделировать динамические процессы в двигателе.

Пусковые характеристики короткозамкнутого асинхронного двигателя МТФ012-6, полученные в результате математического моделирования на ЦВМ, приведены на рис. 1.52.

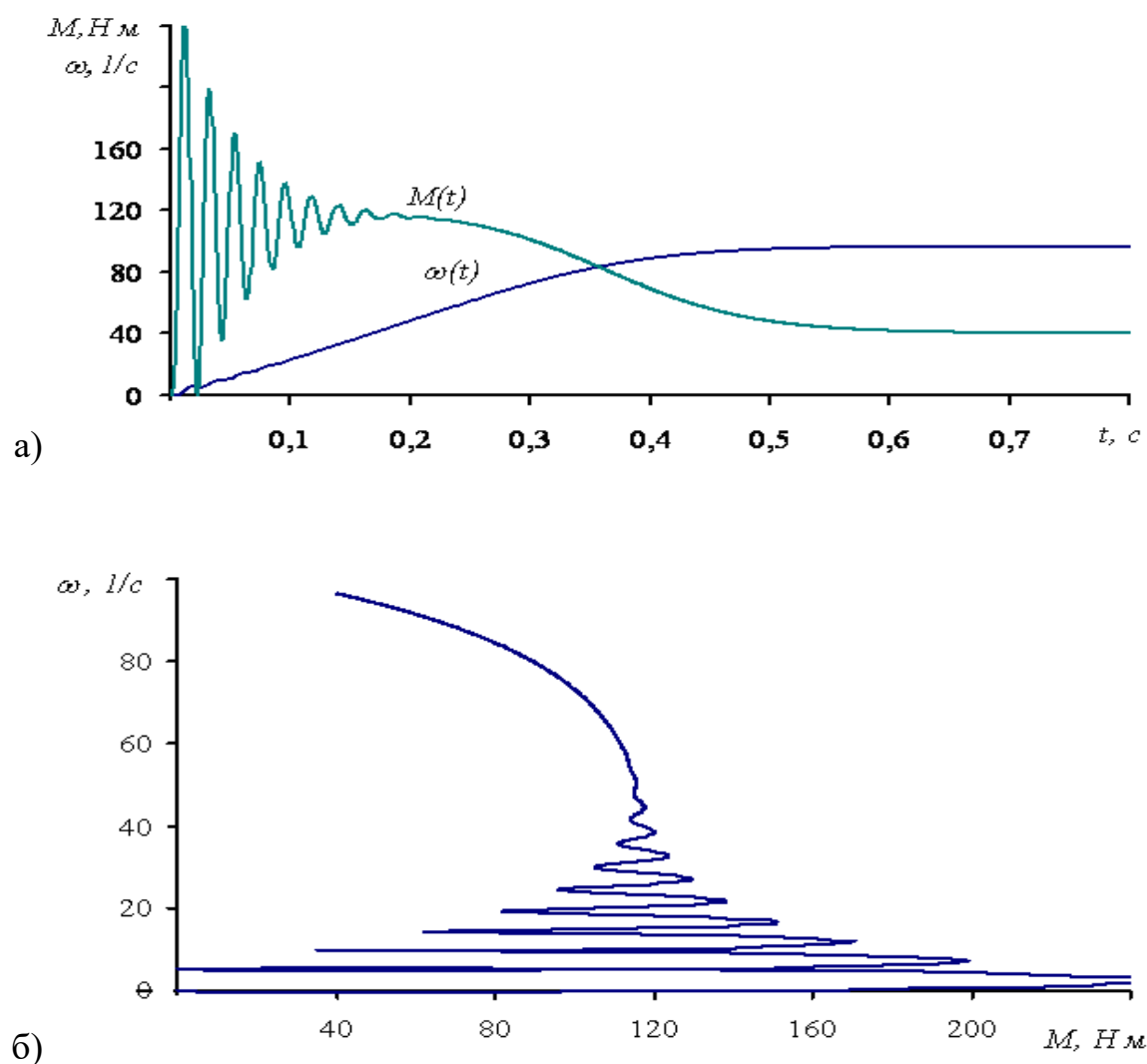


Рис. 1.52. Графики зависимостей: а - $\omega(t)$ и $M(t)$; б $M(\omega, t)$ при пуске АД

Поскольку обобщенные вектора в ортогональной системе координат X, Y являются постоянными величинами и не изменяются по гармоническому закону, можно сделать вывод, что модель асинхронного двигателя в ортогональной системе координат (рис.4.7) дает менее полную информацию о динамических процессах, чем модель в естественной трехфазной си-

стеме координат (рис.4.5). Вместе с тем зависимость выходных переменных двигателя (момента и скорости) от времени рассчитываются в этих моделях практически с одинаковой точностью, определяемой используемыми вычислительными процедурами.

Аналитические исследования динамических свойств асинхронного двигателя были выполнены в ряде работ. В [18] показано, что характеристический многочлен, описывающий динамические свойства двигателя, даже при ряде сделанных допущений, имеет 4 порядок, поэтому в [18] предложено рассматривать двигатель при допущении о постоянстве потока сцепления обмотки статора двигателя, рассматривать характеристическое уравнение 2 порядка, легко поддающегося анализу.

Характеристическое уравнение в этом случае имеет вид:

$$T_{\sigma}^2 p^2 + 2T_{\sigma} p + 1 + \left(\frac{s}{s_{\kappa}}\right)^2 + 2qs = 0. \quad (1.144)$$

Корни уравнения определяются:

$$p_{12} = -\alpha \pm j\Omega = -\frac{1}{T_{\sigma}} \pm \frac{j\sqrt{\left(\frac{s}{s_{\kappa}}\right)^2 + 2qs}}{T_{\sigma}}. \quad (1.145)$$

По данным [22] электромагнитная постоянная асинхронных двигателей составляет: $T_{\sigma}=0,006-0,06$ с, она тем больше, чем мощнее двигатель.

Частота свободных колебаний электромагнитного момента составляет

$$\Omega = \frac{\sqrt{\frac{s}{s_K} + 2\alpha s}}{T_{\vartheta}}. \quad (1.146)$$

Например, при $s = 1$ получим $s_K = 0,2$, $\alpha = 0,1$, $T_{\vartheta} = 0,06$, получаем $\Omega = 400 \text{ с}^{-1}$ [18].

Электромеханическая постоянная АД определяется

$$T_m = \frac{J}{|\beta|}, \quad (1.147)$$

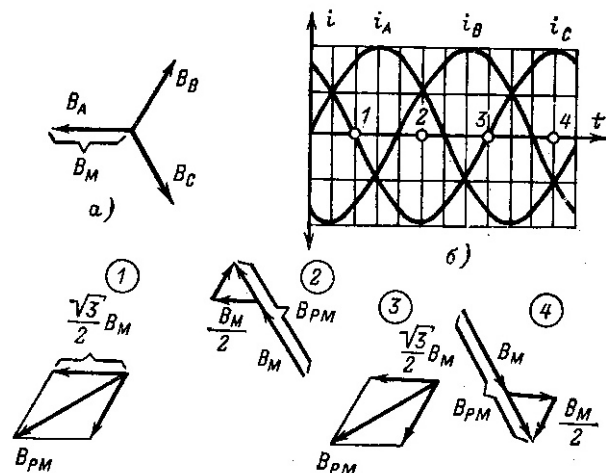
где β - жесткость статической механической характеристики ($\beta = -\frac{\Delta M}{\Delta \omega}$).

Анализ характеристического уравнения (1.144) и структурной схемы (рис. 1.51) показывает, что асинхронный двигатель представляет собой нелинейное динамическое колебательное звено, отображаемое структурной схемой со сложной топографией, содержащей перекрестные связи.

1.27. Контрольные вопросы к главе 1

1. Приведите классификацию асинхронных машин по конструктивному исполнению, режимам работы, областям применения.

2. В какой из векторных диаграмм, поясняющих образование вращающегося магнитного поля, построенных для моментов времени, отмеченных на рис. точками 1-4, допущена ошибка? Условные положительные направления амплитуд векторов магнитных индукций, создаваемых током каждой фазы, изображены на рис. Магнитная система двигателя не насыщена.



3. Как связаны между собой углы в электрических и геометрических градусах?

4. Фазы трехфазной статорной обмотки должны быть сдвинуты в про-

странстве относительно друг друга на α геометрических градусов.

$$1) \alpha = \frac{30}{p} \quad 2) \alpha = \frac{60}{p} \quad 3) \alpha = \frac{90}{p} \quad 4) \alpha = \frac{120}{p} \quad 5) \alpha = \frac{180}{p}$$

5. Выберите правильную формулу для частоты вращения магнитного потока статора в об/мин:

$$1) n_1 = \frac{60 \cdot p}{f} \quad 2) n_1 = \frac{60 \cdot f}{p} \quad 3) n_1 = \frac{p}{60 \cdot f}$$
$$4) n_1 = 60 \cdot f \cdot p \quad 5) n_1 = \frac{f \cdot p}{60}$$

6. В соответствии с каким правилом (законом) наводится эдс в обмотке ротора при вращающемся круговом поле статорной обмотки? Как это правило (закон) формулируется?

7. По какому правилу определяется направление действия эдс в проводнике обмотки ротора? Как это правило формулируется?

8. По какому правилу определяется направление силы Ампера, действующей на проводники обмотки ротора? Как это правило формулируется?

9. Почему асинхронная машина в двигательном режиме не может работать при условии $n_2 = n_1$?

10. Выберите правильную формулу для скольжения s :

$$1) s = \frac{n_2 - n_1}{n_2} \quad 2) s = \frac{n_2 - n_1}{n_1} \quad 3) s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad 4) s = \frac{n_1 - n_2}{n_2}.$$

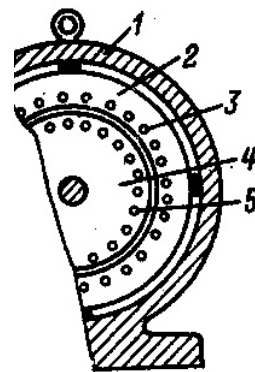
11. Номинальная частота работы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, питающегося от промышленной сети переменного тока, $n_2 = 950$ об/мин. Определить число пар полюсов p статорной обмотки

данного двигателя и величину номинального скольжения s_H . Укажите правильный ответ.

1) $p = 1, s_H = 0,68$. 2) $p = 1, s_H = 0,05$. 3) $p = 2, s_H = 0,37$. 4) $p = 2, s_H = 0,05$. 5) $p = 3, s_H = 0,05$.

12. Какая из частей двигателя не может быть изготовлена из указанных материалов? Ответ поясните.

1. Корпус 1- сталь, чугун, алюминий.
2. Сердечник статора 2- электротехническая сталь, чугун, алюминий.
3. Обмотка статора 3- медь.
4. Сердечник ротора 4 - электротехническая сталь.
5. Обмотка ротора 5- медь, алюминий, латунь.



13. Роторная обмотка короткозамкнутого ротора общепромышленного асинхронного двигателя может быть изготовлена из:

1) Стали. 2) Бронзы. 3) Алюминиевого сплава. 4) Нихрома. 5) Константана.

14. Что нужно сделать, чтобы изменить направление вращения трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором?

- 1) Изменить схему соединения статорной обмотки.
- 2) Изменить схему соединения роторной обмотки.
- 3) Поменять местами два линейных провода двигателя на клеммах трехфазной сети.
- 4) Изменить схемы соединения статорной и роторной обмоток.
- 5) Сдвинуть по кругу все три фазных провода A, B и C трехфазной сети на клеммах асинхронного двигателя.

15. Фазы ротора трехфазного асинхронного двигателя включают:

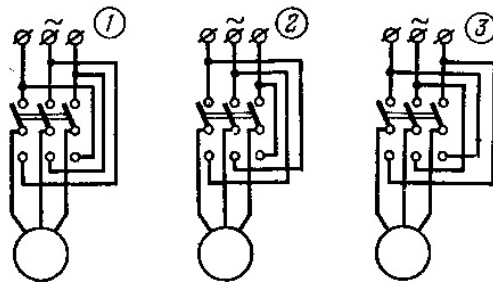
- 1) Параллельно. 2) Последовательно.
- 3) Параллельно и последовательно. 4) Звездой.

16. Как изменятся ток холостого хода I_0 и номинальным $\cos\varphi_H$ двигателя, если увеличить воздушный зазор между ротором и статором? Указать правильный ответ.

1. I_0 не изменится. 2. I_0 уменьшится. 3. $\cos\varphi_H$ не изменится.
4. $\cos\varphi_H$ уменьшится.

17. К чему приведет включение асинхронного двигателя, на табличке которого указано Y/Δ : 380/220, на напряжение 380 В при соединении обмотки статора в Δ ? Ответ поясните.

18. Какая из схем не позволяет включить двигатель для прямого и обратного направления вращения ротора?



19. С какой скоростью вращается магнитное поле с 2-мя парами полюсов в машине, подключённой к сети с частотой 500 Гц? Укажите правильный ответ.

- 1) 10000 об/мин; 2) 15000 об/мин; 3) 30000 об/мин.

20. Как изменится скорость вращения магнитного поля, если обмотку переключить с двух пар на одну пару полюсов? Укажите правильный ответ.

- 1) Уменьшится вдвое; 2) Увеличится вчетверо; 3) Уменьшится вчетверо; 4) Увеличится вдвое.

21. Как изменить направление вращения магнитного поля? Укажите правильный ответ.

- 1) Изменить порядок чередования фаз питающей сети;
2) Отключить часть обмоток;
3) Изменить частоту питающей сети.

22. Каким будет магнитное поле, если фазовый сдвиг между токами в трёхфазной обмотке будет отличаться от 120 градусов? Укажите правильный ответ.

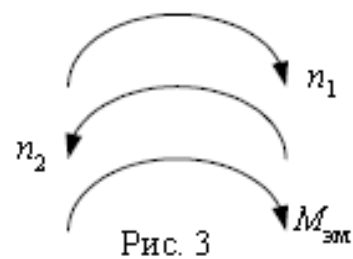
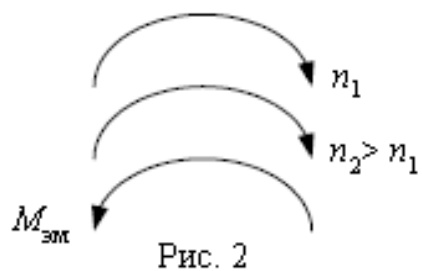
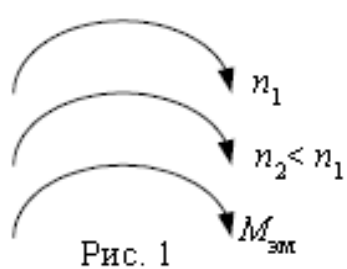
- 1) Круговым; 2) Пульсирующим; 3) Эллиптическим.

23. Сумма мощности потерь асинхронного двигателя ΣP составляет 50% от его полезной мощности P_2 . Определить КПД асинхронного двигателя η .

- 1) $\eta=67\%$. 2) $\eta=50\%$. 3) $\eta=33\%$. 4) $\eta=75\%$. 5) $\eta=25\%$.

24. Какой рисунок соответствует работе асинхронной машины в двигатель-

ном режиме?



25. Выберите правильную формулу для угловой частоты вращения магнитного потока статора в рад/с:

1) $\omega_1 = \frac{2\pi \cdot P}{f}$

2) $\omega_1 = \frac{f}{2\pi \cdot P}$

3) $\omega_1 = 2\pi \cdot f \cdot P$

4) $\omega_1 = \frac{f \cdot P}{2\pi}$

5) $\omega_1 = \frac{2\pi \cdot f}{P}$