

3 АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Асинхронные машины являются самыми распространенными электрическими машинами и в основном они используются как двигатели, реже — как генераторы. Более 80 % всех электродвигателей, выпускаемых промышленностью, являются именно асинхронными. Столь широкое распространение данных двигателей объясняется их хорошими эксплуатационными свойствами, простотой устройства и обслуживания, надежностью в работе и невысокой стоимостью.

Асинхронные машины — это бесколлекторные машины переменного тока, у которых отношение частоты вращения ротора к частоте тока в цепи, подключенной к машине, зависит от нагрузок (ГОСТ 27471-87, СТ СЭВ 169-86).

3.1 УСТРОЙСТВО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Основными частями любого асинхронного двигателя является неподвижная часть, называемая статором, и вращающаяся часть, называемая ротором. Статор и ротор разделены воздушным зазором, размер которого колеблется от 0,1 (двигатели малой мощности) до 1,5 мм (двигатели большей мощности).

В зависимости от конструкции ротора асинхронные двигатели делят на два типа: двигатели с короткозамкнутым ротором (рис. 3.1) и двигатели с фазным ротором (рис. 3.2) статоры этих двигателей имеют одинаковую конструкцию.

Статор асинхронного двигателя (рис. 3.1 и 3.2) состоит из корпуса 3 (станины), сердечника 2, обмотки и крышек с подшипниковыми узлами 1.

Корпус статора (станина), как правило, имеет цилиндрическую форму и изготавливается из стали, чугуна или алюминия. В корпусе статора располагается ферромагнитный сердечник с находящейся в его пазах обмоткой статора. Обмотка статора асинхронного двигателя предназначена для получения вращающегося магнитного поля. С торцевых сторон к станине крепятся крышки. Сердечник статора для уменьшения потерь на вихревые токи набирают из штампованных листов электротехнической стали толщиной 0,35—0,5 мм. Листы штампуют в виде колец (рис. 3.3), на внутренней стороне которых имеются углубления — пазы - для размещения в них обмотки статора; листы перед сборкой в пакет изолируют, покрывая слоем лака.

Пазы в сердечнике статора выполняются полуоткрытыми или полузакрытыми (рис. 3.4); в машинах средней и малой мощности пазы выполняются полузакрытыми. Каждый паз покрывают изоляцией 1, а затем заполняют проводниками обмотки 2. В пазах статора обмотку закрепляют с помощью пластмассовых или деревянных клиньев 3.

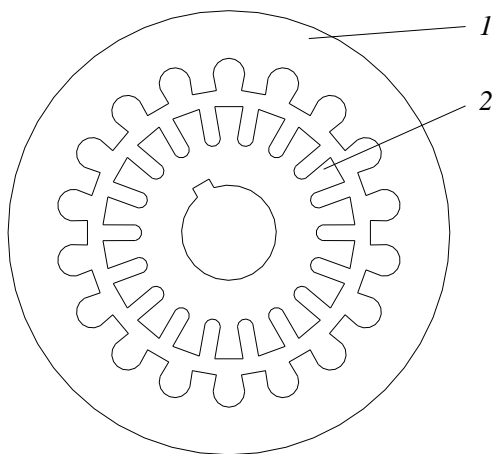


Рис. 3.3 Листы статора (1) и ротора (2)

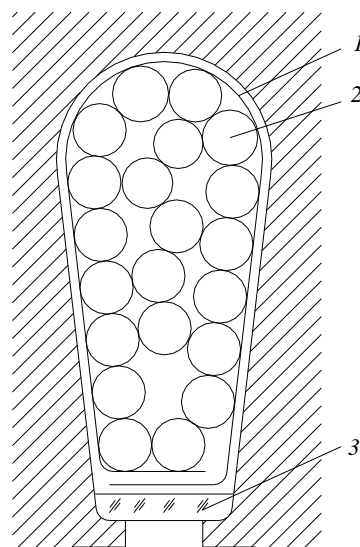


Рис.3.4 Полузакрытый паз статора с обмоткой

В трехфазных двигателях фазные обмотки сдвинут в пространстве относительно друг друга на 120° . Все концы фазных обмоток статора выводят на зажимы коробки выводов (рис. 3.5, а), обозначая начало фаз — $C1$, $C2$, $C3$; а концы — соответственно $C4$, $C5$, $C6$. Трехфазную обмотку статора можно соединять в звезду или в треугольник в зависимости от напряжения питающей сети. Например, если в паспорте двигателя указаны напряжения 220/380 В, то при напряжении сети 380 В обмотку статора соединяют в звезду (рис. 3.5, б); если же в сети напряжение 220 В, то обмотку статора соединяют в треугольник (рис. 3.5, в). В обоих случаях на однофазную обмотку статора приходится напряжение 220 В.

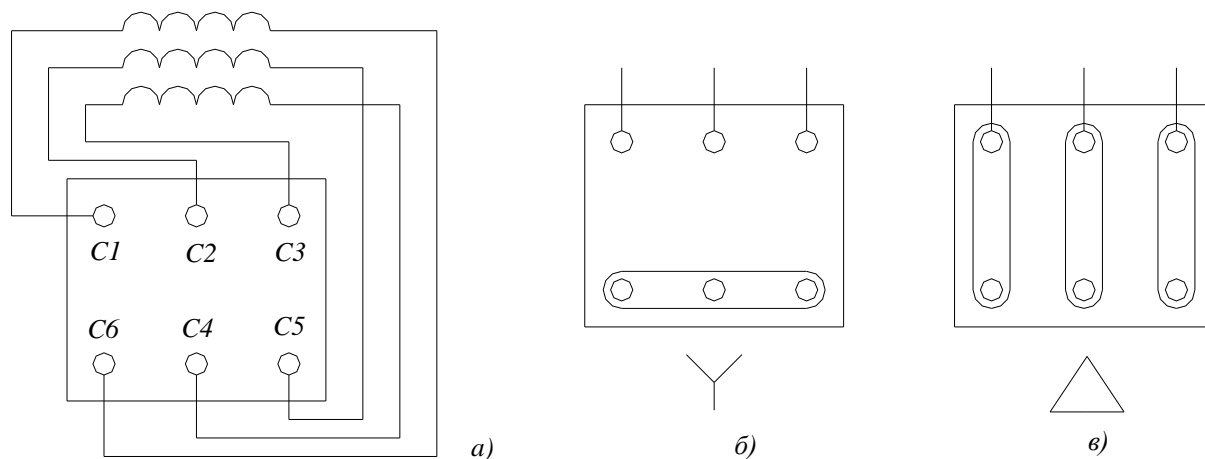


Рис. 3.5 Щиток зажимов асинхронного двигателя

Ротор асинхронного двигателя состоит из вала, сердечника и обмотки. Сердечник ротора имеет форму цилиндра, его собирают из штампованных листов электротехнической стали. Листы сердечника специально не изолируют, так как в большинстве случаев вполне достаточной изоляцией оказывается пленка окалина, имеющаяся на поверхности листов. В продольных пазах сердечника ротора размещается обмотка ротора.

Как известно, в зависимости от типа обмотки ротора асинхронные двигатели делятся на двигатели с короткозамкнутым и фазным ротором; в последних обмотка ротора присоединена к контактным кольцам.

Короткозамкнутые роторы чаще всего применяют в двигателях малой и средней мощности (рис. 3.6). В пазах сердечников 1 таких роторов располагают медные или алюминиевые стержни 2, которые замыкаются на торцах ротора кольцами 3. Таким образом, обмотка короткозамкнутого ротора имеет вид беличьей клетки (рис. 3.6). Чаще всего короткозамкнутая обмотка получается путем заливки сердечника ротора расплавленным алюминием под давлением. При этом одновременно со стержнями отливают замыкающие (торцевые) кольца с крыльчаткой вентилятора, тем самым способствуя улучшению охлаждения машины.

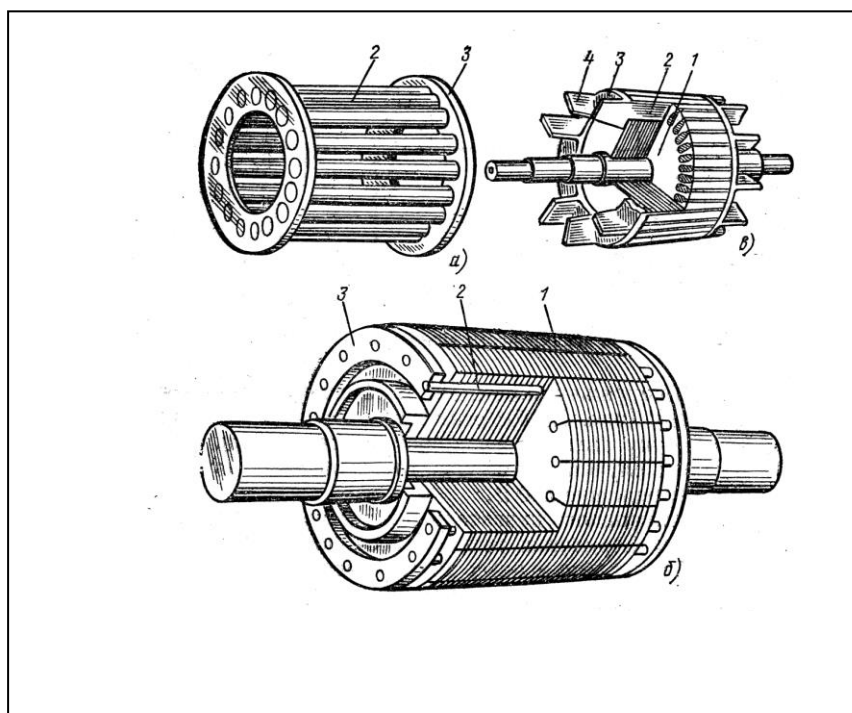


Рис. 3.6 Конструкция короткозамкнутого ротора типа:

а – беличья клетка; б – ротор с медной стержневой обмоткой; в – ротор с алюминиевой литой обмоткой; 1 – сердечник ротора; 2 – стержни; 3 – замыкающие кольца; 4 – лопасти вентилятора

Фазные роторы применяют в асинхронных двигателях большой мощности, в преобразователях и в некоторых специальных машинах малой мощности для получения большого пускового момента и широкого диапазона регулирования частоты вращения. Отличие фазных роторов от короткозамкнутых состоит в устройстве обмотки и наличии контактных колец.

Обмотку фазного ротора 5 (см. рис. 3.1) выполняют аналогично обмотке статора двигателя, т.е. изолированные проводники, собранные в секции, размещаются в пазах сердечника ротора 8; секции трехфазной обмотки обычно соединяют звездой. Концы фазных обмоток ротора присоединяют к изолированным друг от друга и от вала двигателя контактными кольцам 6, по которым при вращении ротора скользят укрепленные в щеткодержателях

щетки. С помощью контактных колец и щеток обмотки ротора соединяются с пусковыми или регулировочными реостатами.

В асинхронных двигателях различного вида крышки (щиты) 1, являющиеся опорой для подшипников, крепят болтами к корпусу 3 (станине); их выполняют литыми или сварными, из того же материала, что и корпус машины. В крупных машинах используются шариковые или роликовые подшипники (подшипники качения), а подшипники скольжения (бронзовые или бронзографитовые) применяются в тех случаях, когда требуется бесшумная работа двигателя. На корпусе машины устанавливается коробка выводов 7 с шестью выводами обмотки статора, а на двигателе с фазным ротором — и с выводами обмотки ротора.

Кроме того, на корпусе закрепляется пластина с таблицей, в которой указаны: тип двигателя, завод-изготовитель, полезная мощность, напряжение питания, значение потребляемого тока, коэффициент мощности $\cos\varphi$, частота вращения и КПД. Принципиальные схемы асинхронных двигателей с короткозамкнутым и фазным ротором приводятся на рис. 3.7, а и б ($R_{доб}$ — пусковые или регулировочные реостаты).

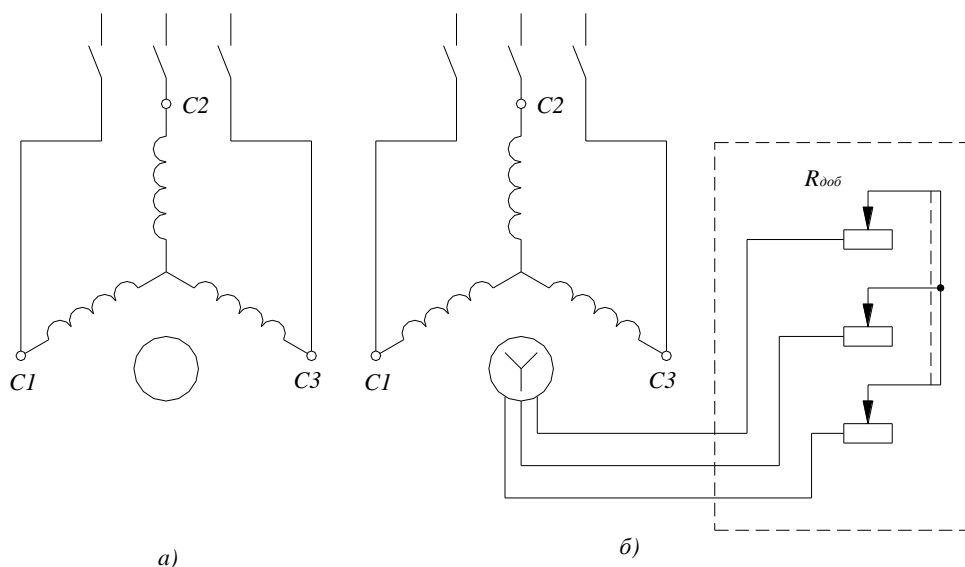


Рис. 3.7 Принципиальные схемы включения асинхронных двигателей: а — с короткозамкнутым ротором; б — с фазным ротором

3.2 ПРИНЦИП ОБРАЗОВАНИЯ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Принцип образования вращающегося магнитного поля рассмотрим на примере простейшей трехфазной двухполюсной обмотки, каждая фаза которой состоит из одной секции, фазные обмотки соединены звездой. При включении в сеть трехфазного тока в фазных обмотках появятся токи, сдвинутые по фазе (по времени) относительно друг друга на электрический угол 120° (рис. 3.8). Проведем ряд построений вектора МДС трехфазной обмотки F_m , соответствующих различным моментам времени t_0, t_1, t_2, t_3 , отмеченным на графике рис. 3.8.

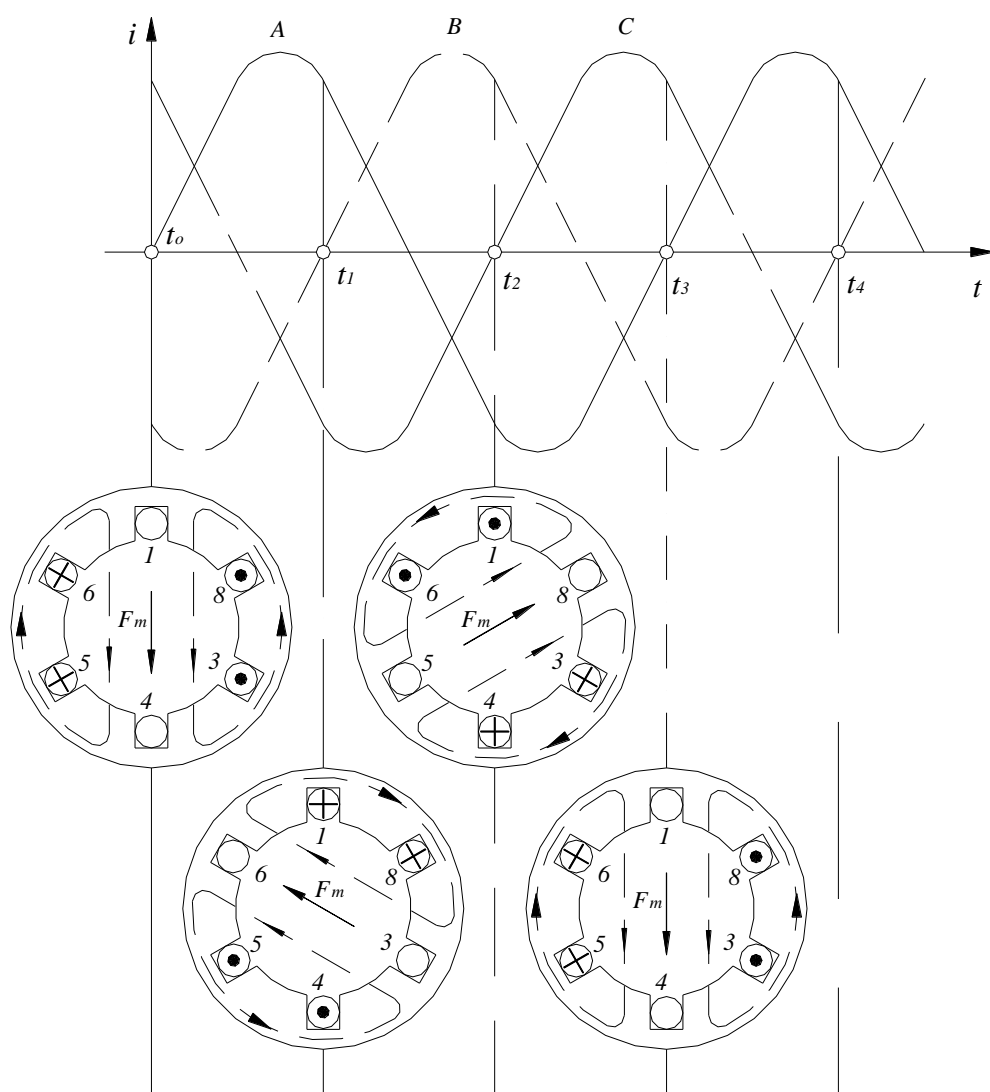


Рис. 3.8 Получение вращающегося магнитного поля:
1-4 – обмотка фазы А; 3-6 – обмотка фазы В; 5-2 – обмотка фазы С (первая цифра
начало обмотки)

В момент времени t_0 ток в фазе А равен 0, в фазе В ток имеет отрицательное, а в фазе С — положительное направления. Эти направления тока отмечаем на рис. 3.8 в сечениях обмоток статора для данного момента времени. При этом следует помнить, что за положительное направление тока в фазной обмотке принимается направление тока от начала обмотки к ее концу и обозначается \times , а следовательно, отрицательное направление тока в обмотке соответствует направлению тока от конца к началу и обозначается \bullet . Затем в соответствии с указанными на рис. 3.8 направлениями токов определяем (по правилу буравчика) направление вектора МДС трехфазной обмотки статора (вектор F_m направлен вниз).

В момент времени t_1 , т.е. через $(1/3) T$, ток в фазе В равен нулю, в фазе А имеет положительное, а в фазе С — отрицательное направление. Сделав построения, аналогичные моменту времени t_0 , заметим, что вектор МДС обмотки

статора F_m по сравнению с его положением в момент времени t_0 повернулся на 120° в направлении движения часовой стрелки.

Проведя аналогичные построения вектора МДС обмотки статора для момента t_2 и t_3 , видим, что каждый раз при переходе от одного момента времени к другому вектор F_m поворачивается на 120° , а за один период изменения токов в обмотках (с t_0 до t_3) делает полный оборот (360°) и будет, таким образом, вращающимся. *Вращающаяся МДС создает вращающееся магнитное поле, эквивалентное полю магнита N—S с индукцией B_0 .* Это поле вращается с синхронной частотой n_1 , которая пропорциональна частоте переменного тока f_c и обратно пропорциональна числу пар полюсов обмотки статора p , т. е.

$$n_1 = \frac{60 f_c}{p}. \quad (3.1)$$

Зависимость n_1 от p и f_c представлена в таблице 3.1.

Таблица 3.1

$f_c = 50 \text{ Гц}$	p	1	2	3	4	5	6
	$n_1, \text{об/мин}$	3000	1500	1000	750	600	500
$p = 1$	$f_c, \text{Гц}$	50	100	200	400	500	1000
	$n_1, \text{об/мин}$	3000	6000	12000	24000	30000	60000

Круговое вращающееся магнитное поле характеризуется тем, что пространственный вектор магнитной индукции этого поля B_0 вращается равномерно ($n_1 = \text{const}$) и своим концом описывает окружность. Круговое вращающееся магнитное поле позволяет получить наибольшее значение электромагнитного момента и поэтому является наиболее желательным видом магнитного поля для асинхронного двигателя.

При необходимости изменить направление вращения магнитного поля статора нужно поменять порядок следования токов в фазных обмотках статора, для чего переключают фазы на зажимах двигателя.

3.3 ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Вращающееся магнитное поле статора пересекает проводники обмотки ротора и наводит в них ЭДС. Направление ЭДС определяется по правилу правой руки. В асинхронном двигателе движется магнитное поле, а проводники ротора пересекают магнитные силовые линии соответственно в направлении, противоположном этому движению поля; если поле вращается по часовой стрелке, значит проводники ротора пересекают магнитные силовые линии поля статора в направлении против часовой стрелки. Все сказанное необходимо учитывать при определении направления ЭДС в обмотке ротора.

Под действием ЭДС в замкнутой обмотке ротора возникают токи, сонаправленные с ЭДС. Эти токи взаимодействуют с полем статора, в результате чего создается электромагнитная сила $F_{эм}$, направление которой определяется по правилу левой руки.

Совокупность всех электромагнитных сил $F_{эм}$ создает электромагнитный момент M , который приводит ротор во вращение с частотой n , причем следует заметить, что направление n совпадает с направлением частоты вращения поля n_1 . Таким образом, электрическая энергия, поступающая из сети в обмотку статора, преобразуется в механическую энергию вращения ротора.

Частота вращения ротора n всегда меньше синхронной частоты вращения n_1 , т.е. ротор асинхронного двигателя всегда отстает от поля статора. Вращаться с частотой n_1 (синхронно с магнитным полем статора) ротор асинхронного двигателя не может, поскольку при вращении ротора и магнитного поля с одинаковой частотой ($n=n_1$) магнитное поле статора не будет пересекать проводники ротора, а следовательно, не может возникнуть ЭДС и электромагнитный момент, вращающий ротор. Таким образом, ротор асинхронного двигателя принципиально не может вращаться синхронно с полем статора. Разность частот вращения магнитного поля статора и ротора характеризуется *скольжением*:

$$s = (n_1 - n)/n_1. \quad (3.2)$$

Иногда скольжение выражают в процентах:

$$s_{\%} = (n_1 - n)100/n_1. \quad (3.3)$$

В общем случае скольжение асинхронного двигателя может изменяться в диапазоне от нуля (режим холостого хода) до единицы (режим короткого замыкания — режим пуска). Номинальной нагрузке соответствуют номинальные значения скольжения $s_{ном}$ и частоты вращения ротора n . У асинхронных двигателей номинальное скольжение $s_{ном}$ составляет от 1 до 8 %, причем большие значения соответствуют двигателям большой мощности.

Обмотка ротора асинхронного двигателя электрически не связана с обмоткой статора. Энергия, поступающая из сети в обмотку статора, передается ротору посредством магнитного поля. В этом отношении асинхронный двигатель подобен трансформатору, в котором обмотка статора является первичной, а обмотка ротора — вторичной. Разница между асинхронным двигателем и трансформатором состоит в том, что ЭДС в обмотках трансформатора наводится переменным, изменяющимся во времени магнитным потоком, а в обмотке ротора асинхронного двигателя ЭДС создается вращающимся магнитным полем, с потоком, постоянным по значению, но изменяющим свое направление в пространстве. Однако эффект в том и другом случае одинаков — изменяется потокосцепление между обмотками:

$$\Psi = w\Phi \quad (3.4)$$

3.4. ПОТЕРИ И КПД АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Преобразование энергии в асинхронном двигателе, как и в других электрических машинах, связано с потерями энергии. Эти потери делят на механические $P_{мех}$, магнитные P_m и электрические $P_{э}$.

Из сети в обмотку статора поступает мощность P_1 . Часть этой мощности расходуется на покрытие магнитных потерь в сердечнике статора P_{m1} , а также электрических потерь в обмотке статора, обусловленных нагревом обмотки последние с учетом, что m_1 — числа фаз в обмотке статора равны

$$P_{\varepsilon 1} = m_1 I_1^2 r_1 \quad (3.5)$$

Оставшаяся часть мощности передается ротору посредством электромагнитного поля, и поэтому ее называют электромагнитной мощностью. Таким образом,

$$P_{\varepsilon m} = P_1 - (P_{m1} + P_{\varepsilon 1}) \quad (3.6)$$

Часть электромагнитной мощности затрачивается на покрытие электрических потерь в обмотке ротора:

$$P_{\varepsilon 2} = m_2 I_2^2 r_2 \quad (3.7)$$

где m_2 — число фаз в обмотке ротора.

Оставшаяся часть электромагнитной мощности преобразуется в механическую мощность двигателя, называемую полной механической мощностью P_2 . Таким образом,

$$P_2 = P_{\varepsilon m} - P_{\varepsilon 2} \quad (3.8)$$

После ряда преобразований получим

$$P_{\varepsilon 2} = s P_{\varepsilon m} \quad (3.9)$$

т. е. *мощность электрических потерь в роторе пропорциональна скольжению*. Поэтому работа асинхронного двигателя более экономична при малых скольжениях.

Следует отметить, что в роторе двигателя возникают также магнитные потери, которые настолько малы, что ими можно пренебречь из-за небольшой частоты тока ротора.

Механическая мощность на валу двигателя P'_2 меньше полной механической мощности P_2 за счет механических потерь $P_{мех}$ и добавочных потерь $P_{доб}$, т. е.

$$P'_2 = P_2 - (P_{мех} + P_{доб}) \quad (3.10)$$

Механические потери в асинхронном двигателе обусловлены трением в подшипниках аэродинамическим сопротивлением воздуха. Добавочные потери вызваны наличием в двигателе полей рассеяния и пульсацией поля в зубцах ротора и статора.

Согласно ГОСТ 183-74 добавочные потери в номинальном режиме принимают равными 0,5 % подводимой к двигателю мощности. Таким образом, полезная мощность асинхронного двигателя

$$P'_2 = P_1 - \sum P \quad (3.11)$$

где $\sum P$ — сумма потерь в асинхронном двигателе,

$$\sum P = P_{m1} + P_{\varepsilon 1} + P_{\varepsilon 2} + P_{мех} + P_{доб}. \quad (3.12)$$

На рис. 3.9 представлена энергетическая диаграмма асинхронного двигателя, КПД которого

$$\eta = \frac{P_2'}{P_1} = 1 - \frac{\sum P}{P_1} \quad (3.13)$$

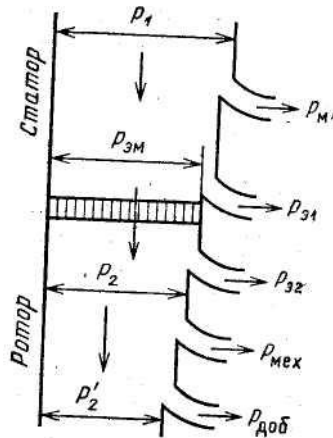


Рис. 3.9 Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

Благодаря отсутствию коллектора КПД асинхронных двигателей выше, чем у двигателей постоянного тока, и при мощности более 1 кВт $\eta=80-95\%$ (верхний предел соответствует двигателям большой мощности).

3.5 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОМЕНТ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ. МЕХАНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Электромагнитный вращающий момент M асинхронного двигателя, возникающий при взаимодействии тока в обмотке ротора с вращающимся магнитным полем статора пропорционален электромагнитной мощности:

$$M = \frac{P_{эм}}{\omega_1} \quad (3.14)$$

где $\omega_1 = 2\pi n_1/60$ — угловая частота вращения магнитного поля.

Так как синхронная частота $n_1 = 60f_c/p$, то

$$\omega_1 = \frac{2\pi f_c}{p} \quad (3.15)$$

Подставив в (3.14) выражение $P_{эм}$ из (3.9), а $P_{э2}$ из (3.7), получим

$$M = \frac{P_{э2}}{\omega_1 s} = \frac{m_1 I_2^2 r_2}{\omega_1 s} \quad (3.16)$$

Таким образом, мощность электрических потерь в обмотке ротора пропорциональна электромагнитному моменту асинхронного двигателя.

Подставляя в (3.16) выражение ω_1 (3.15), а также выражение тока ротора

$$I_2 = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r_2'/s)^2 + (x_1 + x_2')^2}} \quad (3.17)$$

в котором r_1 и x_1 — активное и индуктивное сопротивления фазной обмотки статора, а r_2 и x_2 — активное и индуктивное сопротивления фазной обмотки ротора, приведенные к обмотке статора, получим следующее выражение электромагнитного момента, Н-м:

$$M = \frac{m_1 p U_1^2 r_2'}{2\pi f_c s [(r_1 + r_2'/s)^2 + (x_1 + x_2')^2]} \quad (3.18)$$

Так как параметры r_1 , x_1 , r_2' и x_2' асинхронного двигателя при работе с различными частотами вращения n (скольжениями s) остаются практически постоянными, то при постоянной частоте тока статора f_c значение электромагнитного момента M зависит лишь от напряжения сети U_1 и скольжения s .

Как видно из (3.18), значение вращающего момента пропорционально квадрату напряжения сети U_1^2 , и об этом необходимо помнить при работе с асинхронными двигателями, ибо снижение напряжения U_1 хотя бы на 20 % номинального ведет к уменьшению момента на 36 %.

При постоянном напряжении U_1 электромагнитный момент M зависит только от скольжения s , которое однозначно связано с частотой вращения ротора n .

Таким образом, при $U_1 = \text{const}$ выражение (3.18) является уравнением механической характеристики асинхронного двигателя $M=f(s)$, которая приведена на рисунке 3.10. Исходя из (3.2) частота вращения ротора

$$n = n_1(1 - s) \quad (3.19)$$

откуда видно, что при постоянной частоте вращения магнитного поля n_1 увеличение скольжения s соответствует уменьшению частоты вращения ротора n , что неизбежно связано с увеличением нагружающего (тормозящего) момента двигателя.

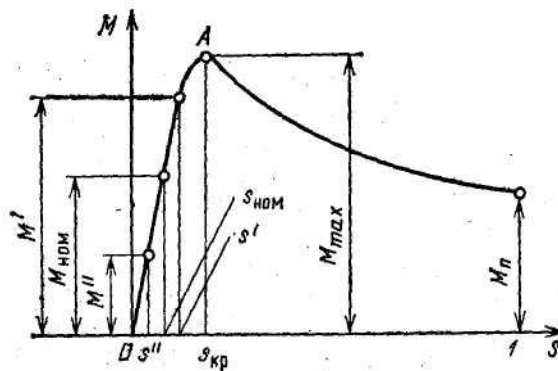


Рис.3.10 Механическая характеристика асинхронного двигателя

Проанализируем работу двигателя на каждом из участков механической характеристики (рис. 3.10). Допустим, что двигатель работает на участке OA в номинальном режиме ($M_{ном}, S_{ном}$).

Если нагружающий (тормозящий) момент увеличится это вызовет соответствующее увеличение скольжения до значения s' . Это, как видно из характеристики, приведет к увеличению электромагнитного момента до значения M' , после чего режим работы двигателя вновь станет установившимся при новых значениях скольжения и электромагнитного момента.

Уменьшение нагружающего (тормозящего) момента вызовет уменьшение скольжения до значения s'' . Как видно из той же характеристики, это приведет к уменьшению электромагнитного момента до значения M'' , и двигатель вновь будет устойчиво работать при других значениях скольжения s . Таким образом, на участке OA характеристики, где s изменяется от 0 до $s_{кр}$, двигатель работает устойчиво, так как на этом участке изменение нагрузки двигателя (скольжения s) сопровождается соответствующим изменением электромагнитного момента.

Работа асинхронного двигателя становится неустойчивой при скольжениях $s \geq s_{кр}$. На этом участке характеристики даже небольшое увеличение нагружающего момента (скольжения s) вызывает уменьшение электромагнитного (вращающего) момента (рис. 3.10). Это приведет к уменьшению частоты вращения и, дальнейшему увеличению скольжения s , к новому уменьшению M и т. д. Уменьшение M продолжается до тех пор, пока скольжение не достигнет значения $s=1$, т.е. двигатель остановится ($n=0$).

Таким образом, при M_{max} и $S_{кр}$ наступает предел устойчивой работы двигателя, и условиями устойчивой работы асинхронного двигателя, таким образом, являются: $s < S_{кр}$, $M_{ном} < M_{max}$. При выполнении этих условий двигатель будет работать устойчиво не только, при номинальной нагрузке, но будет способен выдерживать некоторые перегрузки, что необходимо для надежной работы двигателя в электроприводе.

Следует отметить, что работа двигателя в рекомендуемом диапазоне скольжений (при $s < S_{кр}$), т.е. на рабочем участке механической характеристики, является наиболее экономичной, поскольку она соответствует малым значениям скольжения s , а следовательно, и меньшим значениям электрических потерь в обмотке ротора, так как в соответствии с (3.9) $P_{s2} = sP_{эм}$.

Важнейшими параметрами механической характеристики асинхронного двигателя (рис. 3.10) являются: $S_{кр}$ — критическое скольжение, M_{max} — максимальный электромагнитный (вращающий) момент и $M_{п}$ — пусковой электромагнитный момент; этот момент соответствует $s=1$.

Продифференцировав выражение электромагнитного момента (3.18) по скольжению s и приравняв производную нулю, найдем скольжение соответствующее максимальному моменту, т. е. критическое скольжение

$$s_{кр} = \pm c_1 r_2' / \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2} \quad (3.20)$$

или, пренебрегая r_1 которое обычно не превышает 10—12 % $(x_1 + x_2)$, получим упрощенное выражение для критического скольжения:

$$s_{кр} \approx \pm r_2' / (x_1 + x_2') \quad (3.21)$$

Подставив $s_{кр}$ (3.20) в выражение электромагнитного момента (3.18), получим выражение максимального электромагнитного момента асинхронного двигателя, Н-м:

$$M_{\max} = \frac{m_1 p U_1^2}{4\pi f_c \left[r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2} \right]} \quad (3.22)$$

Можно пренебречь активными сопротивлениями статора и получить упрощенную формулу Клосса.

$$M = \frac{2M_{кр}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}} \quad (3.23)$$

Как указывалось выше, асинхронный двигатель обладает способностью к перегрузкам. Это качество двигателя определяется кратностью максимального момента, которая является отношением максимального момента M_{\max} к номинальному $M_{ном}$. Для современных двигателей

$$M_{\max}/M_{ном} = 1,7-2,5.$$

Из анализа выражения (3.22) следует, что значение максимального момента M_{\max} не зависит от активного сопротивления ротора. В то же время значение критического скольжения $s_{кр}$ (3.21), при котором момент достигает максимального значения, прямо пропорционально активному сопротивлению цепи ротора r_2' . Это значит, что с увеличением r_2' механическая характеристик двигателя смещается в сторону больших скольжений (рисунок 3.11). При этом по мере увеличения r_2' будет увеличиваться и пусковой момент. В момент пуска двигателя $n = 0$ и $s = 1$.

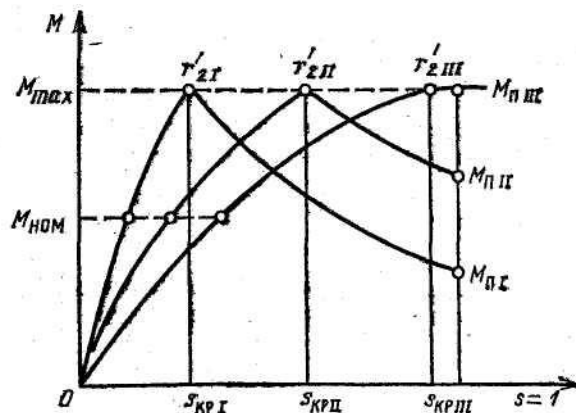


Рисунок 3.11 Влияние активного сопротивления цепи ротора на механическую характеристику асинхронного двигателя

Начальный пусковой момент M_n характеризует пусковые свойства асинхронного двигателя. Чем больше пусковой момент и меньше пусковой ток, тем лучше пусковые свойства двигателя. У современных трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором кратность

пускового момента $M_n/M_{ном}=1,2-2,5$, а кратность пускового тока $I_n/I_{ном}=3-8$. Двигатели малой мощности имеют меньшую кратность пускового тока: $I_n/I_{ном}=3-5$.

3.6 РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРЕХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Рабочие характеристики асинхронного двигателя определяют эксплуатационные качества двигателя и представляют собой зависимости частоты вращения ротора n , коэффициента мощности $\cos\varphi$, КПД, полезного момента на валу $M_{вал}$ и тока I_1 от полезной мощности на валу P'_2 при $U_1 = const$; $f_c = const$. На рисунке 3.12 представлены рабочие характеристики асинхронного двигателя. Рассмотрим некоторые из них.

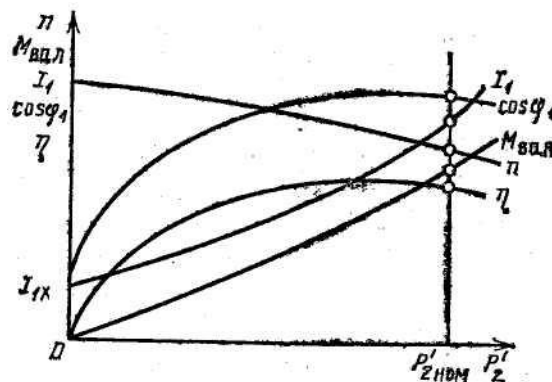


Рисунок 3.12 Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Зависимость $n=f(P_2)$ представляет собой кривую, слабо наклоненную к оси абсцисс. Это объясняется тем, что при нагрузках от 0 до $P'_{2ном}$ диапазон изменения скольжения и соответствующее изменение n не превышает 8 %. Работа двигателя при небольшом скольжении весьма экономична.

Полезная мощность двигателя:

$$P'_2 = M_{вал} \omega = \frac{\pi}{30} M_{вал} n, \quad (3.24)$$

где $\omega = 2\pi n / 60$ - угловая скорость ротора; $M_{вал}$ - полезный момент на валу двигателя, Н·м.

Зависимость $M_{вал}=f(P'_2)$ исходя из (3.24) определяется выражением:

$$M_{вал} = 60 P'_2 / 2\pi n, \quad (3.25)$$

в соответствии с которым $M_{вал}=f(P'_2)$ криволинейна, так как с ростом нагрузки P'_2 частота вращения n несколько уменьшается.

Зависимость тока $I_1=f(P'_2)$ представляет собой характеристику, близкую к прямой. Это свидетельствует о том, что с возрастанием нагрузки ток I_1 увеличивается практически пропорционально полезной мощности. Как видно характеристики $I_1=f(P'_2)$, в режиме холостого хода (при $P'_2=0$) двигатель потребляет из сети ток холостого хода $I_{1х}$, значение которого у асинхронных двигателей больше, чем у трансформаторов, что объясняется наличием механических потерь и воздушного зазора на пути магнитного потока двига-

теля. Ток холостого хода I_{Ix} в асинхронных двигателях может достигать 20—30 % номинального тока, а в некоторых специальных двигателях малой мощности он может достигать и больших значений.

Зависимость $\cos\varphi=f(P'_2)$ показывает, что при малых нагрузках $\cos\varphi$ имеет низкие значения (0,2—0,3); однако с увеличением нагрузки $\cos\varphi$ увеличивается, достигая максимума (0,75—0,85) при нагрузке, близкой к номинальной.

При перегрузках, соответствующих небольшим значениям n (большому скольжению), $\cos\varphi$ уменьшается, что объясняется увеличением индуктивного сопротивления ротора (x_2s) за счет увеличения скольжения.

В целях повышения коэффициента мощности асинхронных двигателей желательно, чтобы двигатель работал всегда или по крайней мере значительную часть времени с номинальной нагрузкой, что можно обеспечить лишь при правильном выборе его. Если же двигатель значительную часть времени работает недогруженным, то для повышения $\cos\varphi$ целесообразно уменьшить подводимое к двигателю напряжение U_1 . В двигателях, работающих при соединении обмотки статора треугольником, это можно сделать, переключив обмотки статора с треугольника на звезду, что вызовет уменьшения фазного напряжения в $\sqrt{3}$ раз. При этом магнитный поток статора, а следовательно, и магнитный поток ротора уменьшатся примерно в $\sqrt{3}$ раз. Кроме того, несколько увеличивается активная составляющая тока статора; все это способствует повышению $\cos\varphi$.

Рабочие характеристики двигателей малой мощности можно снять методом непосредственной нагрузки с помощью какого-либо тормоза, позволяющего измерить создаваемый им нагрузочный момент.

3.7 ПУСК, РЕВЕРСИРОВАНИЕ И ТОРМОЖЕНИЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Пусковые свойства асинхронного двигателя оцениваются его пусковыми характеристиками:

- а) значением пускового тока I_n или его кратностью $I_n/I_{ном}$;
- б) значением пускового момента M_n или его кратностью $M_n/M_{ном}$;
- в) продолжительностью и плавностью пуска двигателя в ход;
- г) сложностью пусковой операции;
- д) экономичностью пусковой операции (стоимостью и надежностью пусковой аппаратуры), а также потерями энергии в ней.

Значение пускового тока

$$I_n = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r_2') + (x_1 + x_2')^2}} \quad (3.26)$$

Из анализа (3.26) и рисунка 3.11 следует, что улучшить пусковые свойства двигателя можно увеличением активного сопротивления цепи ротора r_2' , так как в этом случае уменьшается пусковой ток и увеличивается пусковой момент. Уменьшение напряжения U_1 влияет благоприятно на I_n (уменьшая его значение), однако пусковой момент M_n при этом также уменьшается.

Возможность применения того или иного способа улучшения пусковых характеристик определяется видом двигателя, условиями его эксплуатации и требованиями к нему.

Пуск двигателя с фазным ротором. Для приводов большой мощности, требующих значительных пусковых моментов при сравнительно небольших токах, обычно применяют асинхронные двигатели с фазным ротором. На время пуска этого двигателя в цепь его ротора с помощью контактных колец и щеток вводят сопротивления $R_{доб}$ (рисунок 3.7,б), тем самым смещая механическую характеристику $M = f(s)$ в сторону больших скольжений. Это способствует увеличению пускового момента и одновременно ведет к уменьшению пускового тока I_n . По мере разгона ротора двигателя сопротивление $R_{доб}$ постепенно выводится, а при достижении ротором номинальной частоты вращения обмотка ротора замыкается накоротко ($R_{доб} = 0$).

Максимальный пусковой момент может быть достигнут при таком значении $R_{доб}$, которое позволило бы сместить максимум кривой $M = f(s)$ до значения, соответствующего $s=1$. Добавочное сопротивление, отвечающее этому условию, $R_{доб} \approx x_1 / (1 + x_2' - r_2')$.

Недостатки пуска этих двигателей: сложность, продолжительность и неэкономичность пусковой операции (расход энергии на нагрев пускового реостата).

Пуск двигателя с короткозамкнутым ротором. Он осуществляется как при полном напряжении сети (прямой пуск), так и при пониженном напряжении сети.

Прямой пуск применяется для двигателей малой и средней мощности. Двигатели этого типа обычно проектируют так, чтобы при непосредственном подключении обмотки статора к сети, возникающие пусковые токи не создавали бы чрезмерных электродинамических усилий и превышения температуры, опасных для механической и термической прочности двигателя.

Пуск при пониженном напряжении применяется для двигателей большой мощности, а также для двигателей средней мощности, если питающая сеть имеет небольшую мощность. Понижение напряжения может осуществляться следующими способами:

а) путем переключения обмотки статора с нормальной схемы «треугольник» на пусковую схему «звезда». В этом случае фазовое напряжение, подаваемое на обмотку статора, уменьшается в $\sqrt{3}$ раз, что обуславливает уменьшение фазовых токов в $\sqrt{3}$ раз, а линейных токов — в 3 раза. По окончании процесса пуска и разгона двигателя до номинальной скорости обмотку статора переключают обратно на нормальную схему «треугольник»;

б) путем включения на время пуска в цепь обмотки статора реакторов, в результате чего к выводам обмотки статора подводится пониженное напряжение. После разгона двигателя на обмотку статора подается полное напряжение сети;

в) автотрансформаторный пуск осуществляется подключением двигателя к сети через понижающий автотрансформатор. Автотрансформатор

может иметь несколько ступеней, которые в процессе пуска двигателя переключаются соответствующей аппаратурой.

Недостатком всех указанных способов является значительное уменьшение пускового и максимального моментов, которые пропорциональны квадрату приложенного напряжения. Поэтому их рекомендуется применять при пуске двигателя без нагрузки.

Реверсирование асинхронного двигателя (изменение направления вращения его ротора) производится изменением направления вращения магнитного поля, которое осуществляется переключением каких-либо двух питающих проводов из трех, присоединенных к обмотке статора.

Торможение асинхронного двигателя осуществляется следующими способами:

1. Генераторное торможение — режим, при котором под действием внешней силы частота вращения ротора n становится больше синхронной частоты n_1 . В этом режиме скольжение становится отрицательным и изменяется в пределах: $0 \leq s \leq -\infty$.

2. Электромагнитное торможение — режим, при котором под действием внешней силы ротор вращается в направлении, противоположном направлению вращения магнитного поля. В этом случае скольжение изменяется в пределах: $1 \leq s \leq +\infty$. Режим электромагнитного торможения можно осуществить, выполнив реверсирование двигателя. При этом режиме значительно возрастает ток в обмотке ротора, и для его ограничения в цепь обмотки ротора необходимо включать реостат, что возможно только в двигателе с фазным ротором.

3. Динамическое торможение — режим, при котором обмотка статора двигателя подключается к источнику постоянного тока (автономному или выпрямителю, работающему от сети переменного тока).

4. Торможение при помощи электромагнитных муфт или тормозов с электромагнитным управлением.

3.8. РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Частота вращения ротора асинхронного двигателя

$$n = n_1(1 - s) = \frac{60f_c}{p}(1 - s). \quad (3.27)$$

Из (3.27) ясно, что частоту вращения асинхронного двигателя можно регулировать изменением какой-либо из трех величин: а) скольжения s ; б) частоты тока в статоре f_c и в) числа пар полюсов магнитного потока статора p . Рассмотрим каждый из этих способов в отдельности.

Регулирование частоты вращения изменением скольжения возможно двумя способами: изменением значения подводимого к обмотке статора симметричного напряжения U_1 и изменением активного сопротивления цепи ротора.

Регулирование частоты вращения изменением напряжения U_1 . Возможность этого способа регулирования подтверждается графиками $M=f(s)$, построенными для различных значений U_1 (рис.3.13). При неизменной нагрузке на валу двигателя увеличение напряжения вызывает рост частоты вращения. Однако диапазон регулирования частоты вращения получается небольшой, что объясняется узкой зоной устойчивой работы двигателя, ограниченной критическим скольжением $S_{кр}$. Кроме того, значительное увеличение (относительно номинального значения) вызывает чрезмерный перегрев двигателя, а значительное уменьшение U_1 снижает перегрузочную способность двигателя $M_{max}/M_{ном}$. Подводимое к двигателю напряжение изменяют регулировочным автотрансформатором или реакторами, включаемыми в разрыв цепи статора.

Регулирование частоты вращения изменением активной сопротивле- ния в цепи ротора. Этот способ регулирования возможен только в асинхрон- ных двигателях с фазным ротором, у которых концы обмотки ротора через контактные кольца и щетки выведены наружу, что дает возможность вклю- чить последовательно с обмоткой ротора регулировочный реостат $R_{доб}$ и с его помощью изменять активное сопротивление цепи ротора.

Механические характеристики асинхронного двигав построенные для разных значений активного сопротивление ротора, показывают, что с уве- личением активного сопротивления цепи ротора возрастает скольжение, а ча- стота вращения n при $M = const$ уменьшается.

Достоинства данного способа регулирования: плавное регулирова- ния в широком диапазоне частот вращения и улучшение пусковых свойств двигателя.

Существенный недостаток — большие электрические потери в цепи ро- тора.

Регулирование частоты вращения изменением частоты тока питаю- щей сети (частотное регулирование). Этот способ регулирования основан на изменении синхронной частоты вращения n_1 , которая пропорциональна частоте тока в обмотке статора (3.1). Для осуществления такого регули- рования необходим источник питания с регулируемой частотой тока f . В ка- честве источника применяются электромагнитные и полупроводниковые пре- образователи частоты. Однако необходимо иметь в виду, что одновременно с изменением частоты питающего напряжения f в соответствии с (3.22) будет меняться максимальный электромагнитный момент двигателя. Поэтому для сохранения перегрузочной способности, коэффициента мощности и КПД двигателя на требуемом уровне необходимо одновременно с изменением ча- стоты f изменять и напряжение сети U_1 . Если регулирование частоты враще- ния двигателя производится при условии постоянства нагрузочного момента, то подводимое напряжение необходимо изменять пропорционально измене- нию частоты тока:

$$U_1' = U_1 f' / f \quad (3.28)$$

Частотное регулирование позволяет плавно изменять частоту вращения двигателей в широком диапазоне (до 12:1).

Источники питания с регулируемой частотой тока несколько удорожают установку, и поэтому частотное регулирование до недавнего времени применялось редко. Однако в последние годы благодаря развитию полупроводниковой техники созданы устройства частотного управления, технико-экономические показатели которых позволяют широко применять их для регулирования частоты вращения асинхронных двигателей, особенно в пожаро- и взрывоопасных средах, где коллекторные двигатели нельзя применять из-за наличия щеточного контакта.

Регулирование частоты вращения изменением числа полюсов обмотки статора. Этот способ регулирования дает лишь *ступенчатое изменение частоты вращения* и применяется только в двигателях с короткозамкнутым ротором (многоскоростные асинхронные двигатели). Изменение числа полюсов обмотки статора производится двумя способами. Первый способ: в пазы статора укладывают две обмотки с разным числом пар полюсов, например одна обмотка с $p = 1$, а другая с $p = 2$. Эти обмотки электрически не связаны между собой, и, включая в сеть разные обмотки, можно получить частоту вращения, соответственно равную 3000 и 1500 об/мин (при $f=50$ Гц). Второй способ: в пазах статора размещается одна обмотка, схема которой позволяет путем переключений изменять число пар полюсов. Соединяя секции обмотки статора последовательно или параллельно, можно изменять число пар полюсов p магнитного потока, а следовательно, и частоту вращения. Комбинация этих способов дает возможность получить двигатели с большим числом ступеней регулировки.

Следует сказать, что из описанных способов изменения числа пар полюсов чаще применяется второй способ, поскольку применение двух обмоток статора (первый способ) увеличивает массу и габаритные размеры двигателя, а также приводит к неполному использованию обмоток двигателя на любой частоте.