

**Федеральное агентство по образованию
ГОУ ВПО "Уральский государственный технический университет – УПИ
имени первого Президента России Б.Н.Ельцина"
Кафедра "Электротехника и электротехнологические системы"**

Электротехника Асинхронный двигатель

Учебное пособие

Учебное электронное текстовое издание

В.С. Проскуряков, С.В. Соболев

Екатеринбург 2008

Оглавление

1. Конструкция асинхронного двигателя	3
2. Принцип действия асинхронного двигателя	13
3. Механическая характеристика асинхронного двигателя	21
4. Потери энергии и КПД асинхронного двигателя	25
5. Паспортные данные асинхронного двигателя	27
6. Пуск и регулирование частоты вращения асинхронного двигателя . . .	28

1. Конструкция асинхронного двигателя

Асинхронный двигатель потребляет электрическую энергию от трехфазного источника и преобразует ее в механическую энергию, вращая приводной механизм.

Общий вид и конструкция асинхронного двигателя общепромышленного применения показаны на рис. 1, 2. Устройство асинхронного двигателя схематично изображено на рис. 3.

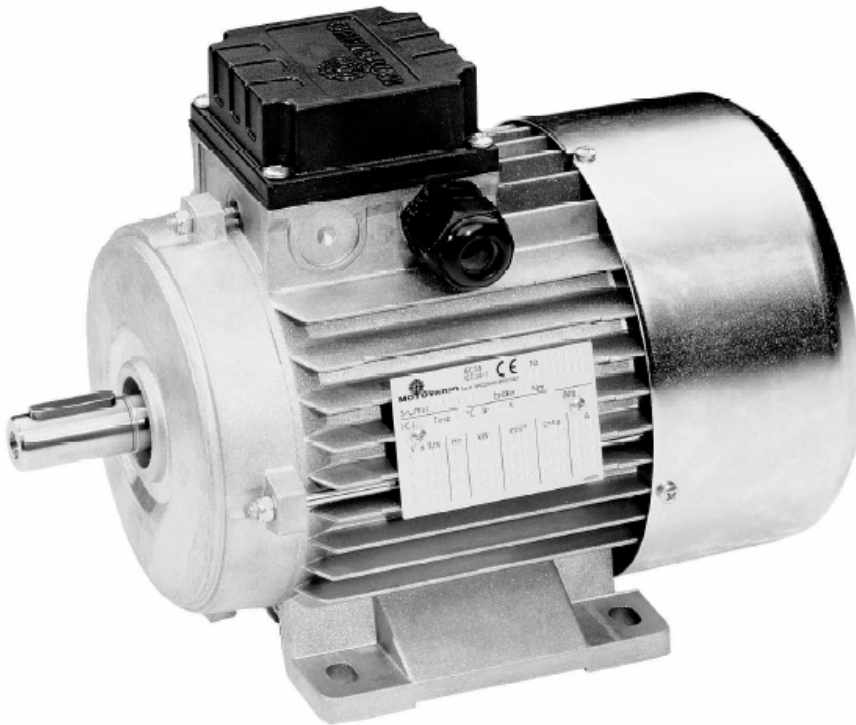


Рис. 1. Асинхронный двигатель АИР56А4У3

Статор состоит из станины 1, представляющий собой стальной полый цилиндр, являющийся механическим остовом машины. Внутри станины крепится стальной цилиндрический сердечник магнитопровода статора 2. На внутренней поверхности сердечника статора имеются продольные пазы. В пазах статора уложены проводники обмотки статора 3.

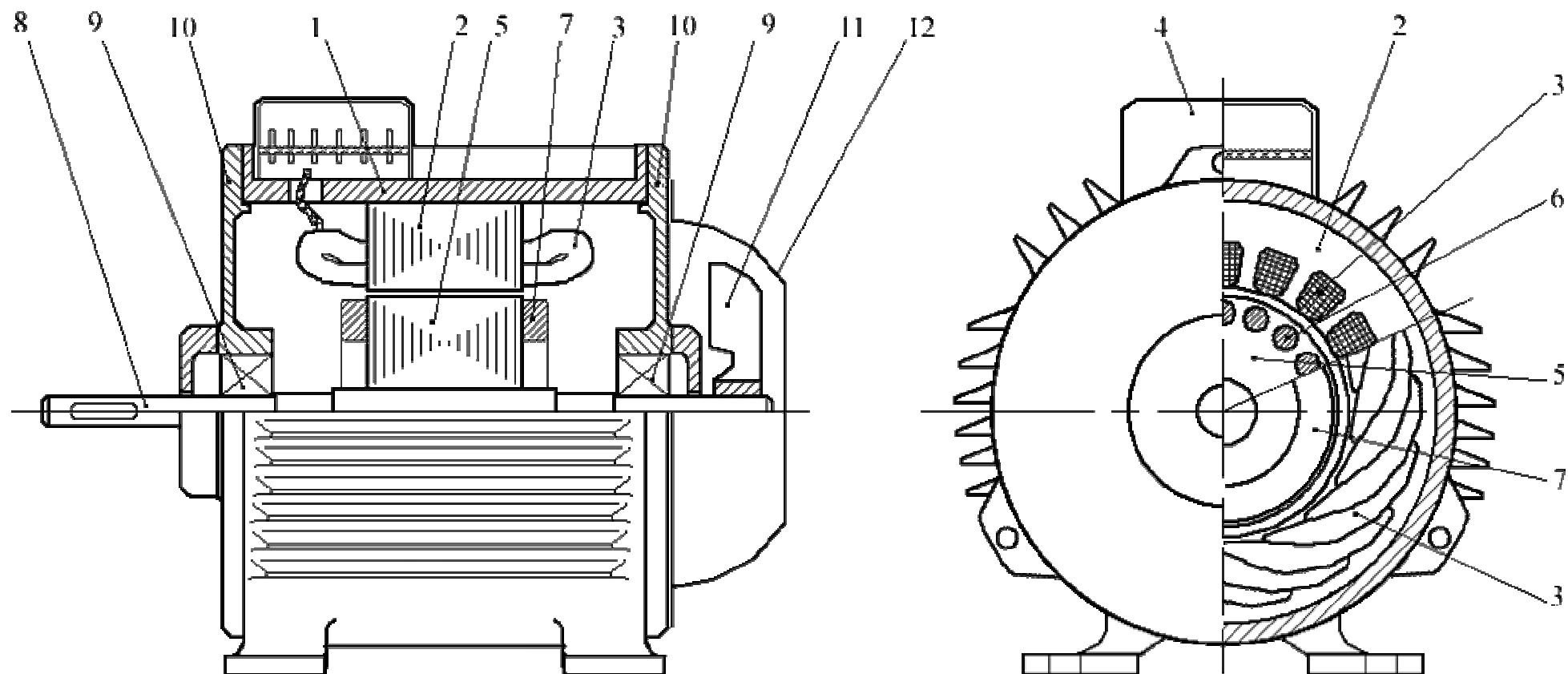


Рис. 2. Конструкция асинхронного двигателя.

1-станина; 2-сердечник статора; 3-обмотка статора; 4-клеммная коробка; 5-сердечник ротора; 6-стержни обмотки ротора; 7-короткозамыкающие кольца; 8-вал; 9-подшипник; 10-подшипниковый щит; 11-вентилятор; 12-крышка вентилятора.

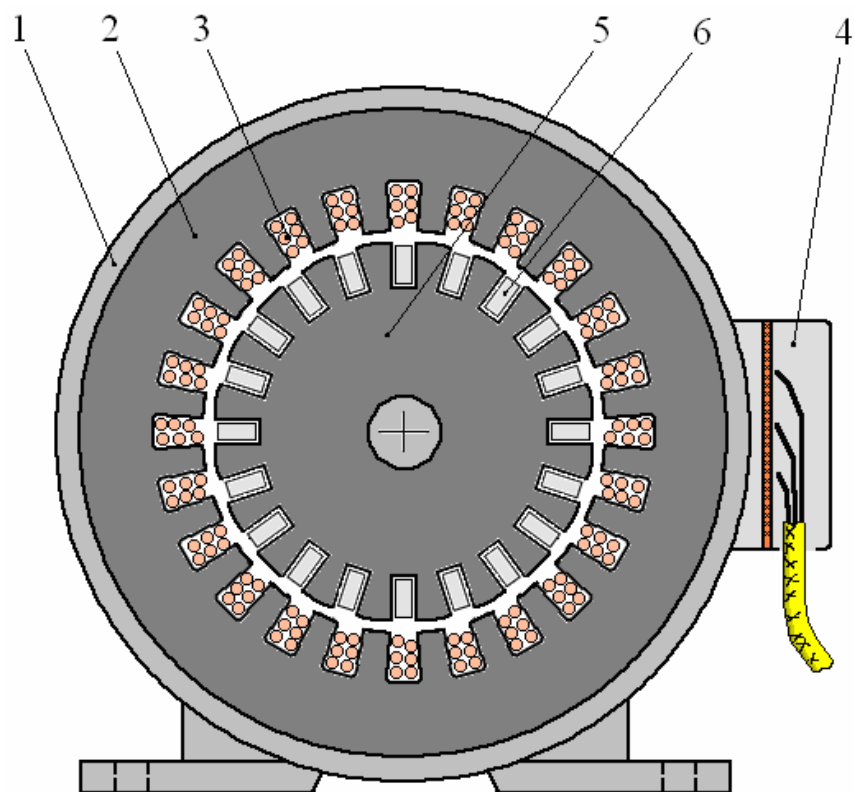


Рис. 3. Схема устройства асинхронного двигателя

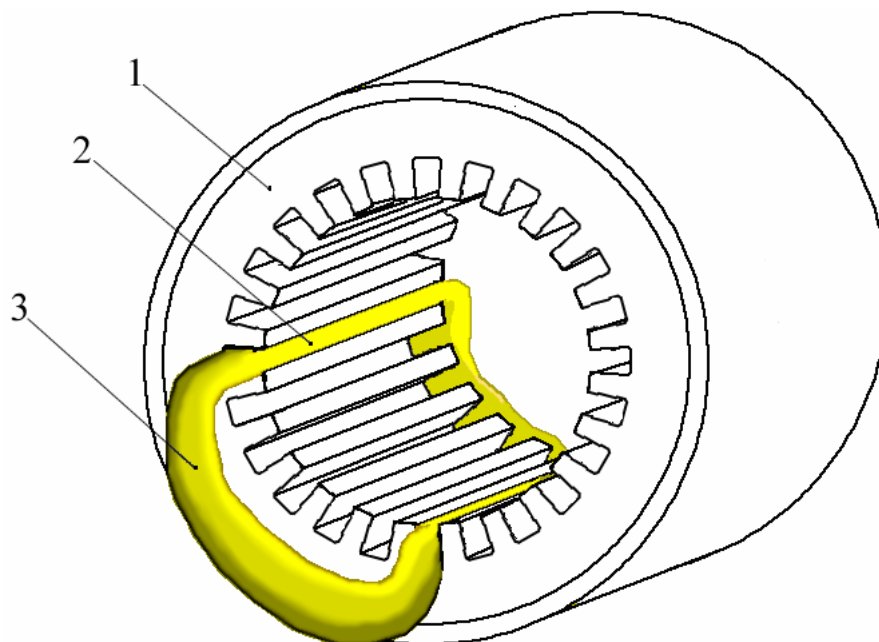


Рис. 4. Катушка обмотки статора. 1 – сердечник статора, 2 – пазовая часть катушки, 3 – лобовая часть катушки

Обмотка статора трехфазная, т.е. состоит из трех одинаковых частей (фаз). Каждая фаза состоит из нескольких катушек, содержащих определенное количество витков медного провода и определенным образом соединенных между собой.

На рис. 4 показана одна катушка обмотки статора, помещенная в пазы сердечника.

Фазы обмотки статора размещены в пазах сердечника статора таким образом, что смещены друг относительно друга по окружности на 120. Схема расположения фаз обмотки статора показана на рис. 5. Здесь каждая фаза упрощенно представлена одним витком, стороны которого расположены в пазах. Начала и концы фаз обозначены: н1 и к1 – начало и конец первой фазы, н2 и к2 – второй фазы, н3 и к3 – третьей фазы. Такая трехфазная обмотка называется симметричной.

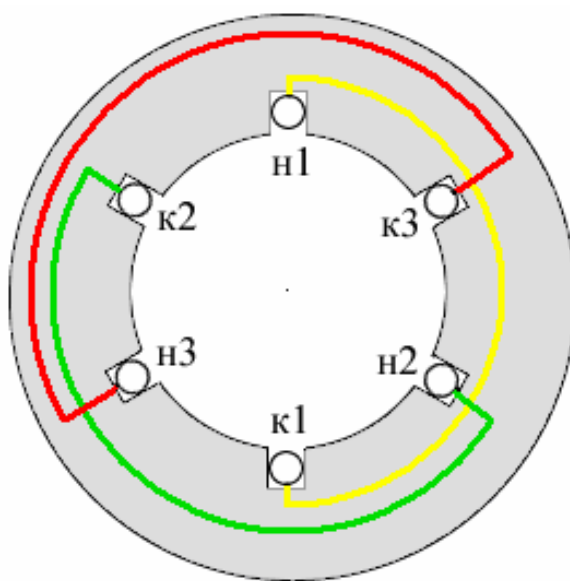


Рис. 5. Расположение фаз обмотки статора

Шесть электрических выводов трех фаз обмотки статора подведены к клеммной коробке 4 (рис. 3), расположенной на корпусе двигателя. Три фазы обмотки могут быть соединены между собой способом «звезда» либо «треугольник». Общий вид статора асинхронного двигателя с обмоткой показан на рис. 6.

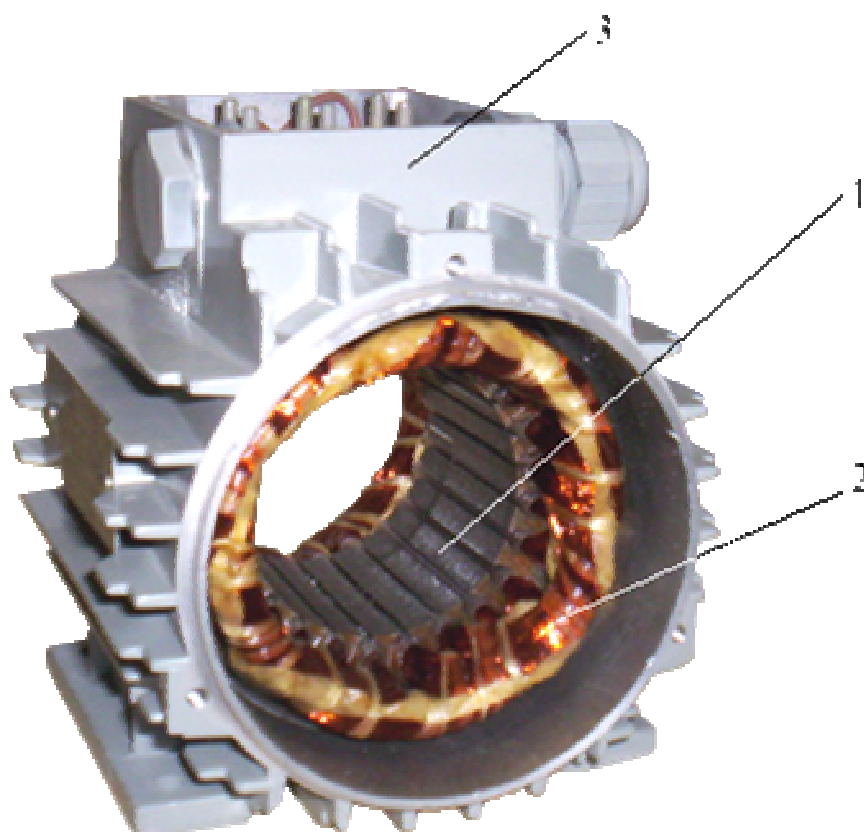


Рис. 6. Статор асинхронного двигателя АОЛ-012/4.

1 – сердечник статора с пазами; 2 – обмотка статора; 3 – клеммная коробка

Ротор асинхронного двигателя (вращающаяся часть) представляет из себя стальной цилиндрический сердечник 5 (рис. 3), являющийся частью магнитопровода. Ротор отделен от статора небольшим воздушным зазором. Наличие воздушного зазора обусловлено необходимостью свободного вращения ротора внутри статора. Магнитопровод ротора и магнитопровод статора образуют магнитную цепь асинхронного двигателя. Однако, как известно, воздушный зазор в магнитопроводе ухудшает свойства магнитной цепи, увеличивая ее магнитное сопротивление. Поэтому его величина должна быть как можно меньше. Практически величина воздушного зазора может быть от 0,2 мм до 1,5 мм в зависимости от мощности и габаритов двигателя. Магнитопроводы статора и ротора шихтованные из листов электротехнической стали. Форма листов статора и ротора показана на рис. 7.

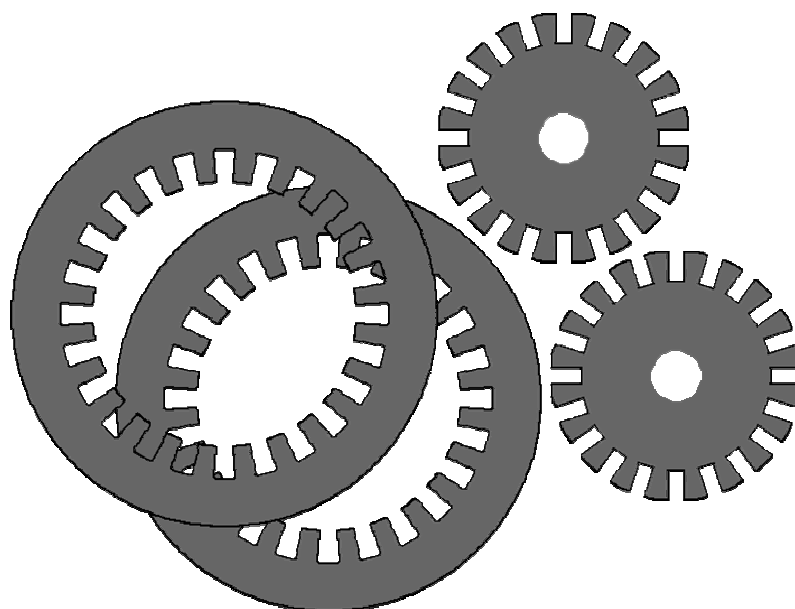


Рис. 7. Листы магнитопровода статора и ротора асинхронного двигателя

На наружной поверхности сердечника ротора имеются продольные пазы. В этих пазах размещена обмотка 6 (рис. 3) ротора асинхронного двигателя. Обмотка ротора может быть двух типов: «фазная обмотка» либо «короткозамкнутая обмотка».

Фазная обмотка ротора подобна обмотке статора, т.е. состоит из трех одинаковых частей (фаз). Каждая фаза фазной обмотки ротора состоит из нескольких катушек, содержащих определенное количество витков медного провода и определенным образом соединенных между собой. Катушки трех фаз размещены в пазах сердечника ротора таким образом, что смещены друг относительно друга по окружности на 120. Три фазы фазной обмотки ротора соединены способом «звезда». При этом концы фаз соединены между собой и закреплены на роторе, а начала трех фаз соединяются с внешней электрической цепью. Для соединения начал фаз обмотки вращающегося ротора с неподвижной электрической цепью служат контактные кольца и электрические щетки (рис. 8). Три медных контактных кольца 2 расположены на валу ротора и изолированы друг от друга. К каждому из колец присоединен один из проводов начала фазы обмотки ротора. К поверхности контактных колец прижимаются неподвижные электрические щетки 3.

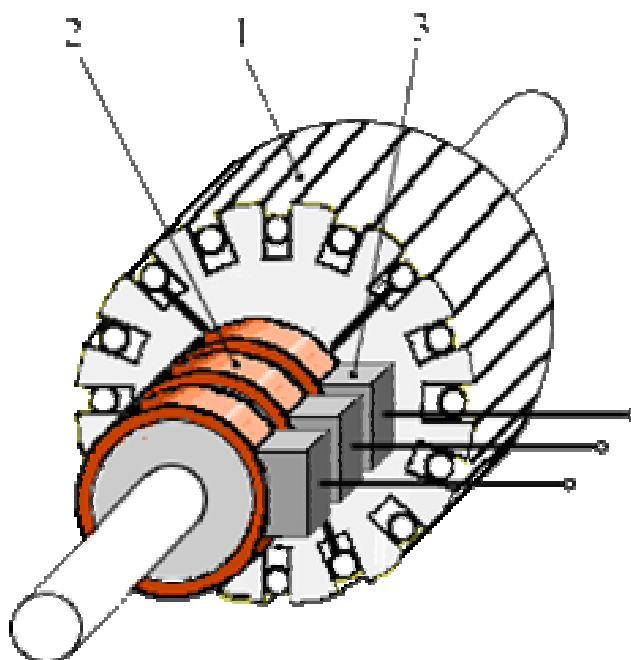


Рис. 8. Щеточный узел фазного ротора. 1 – фазная обмотка ротора, 2 – контактные кольца, 3 – электрические щетки.

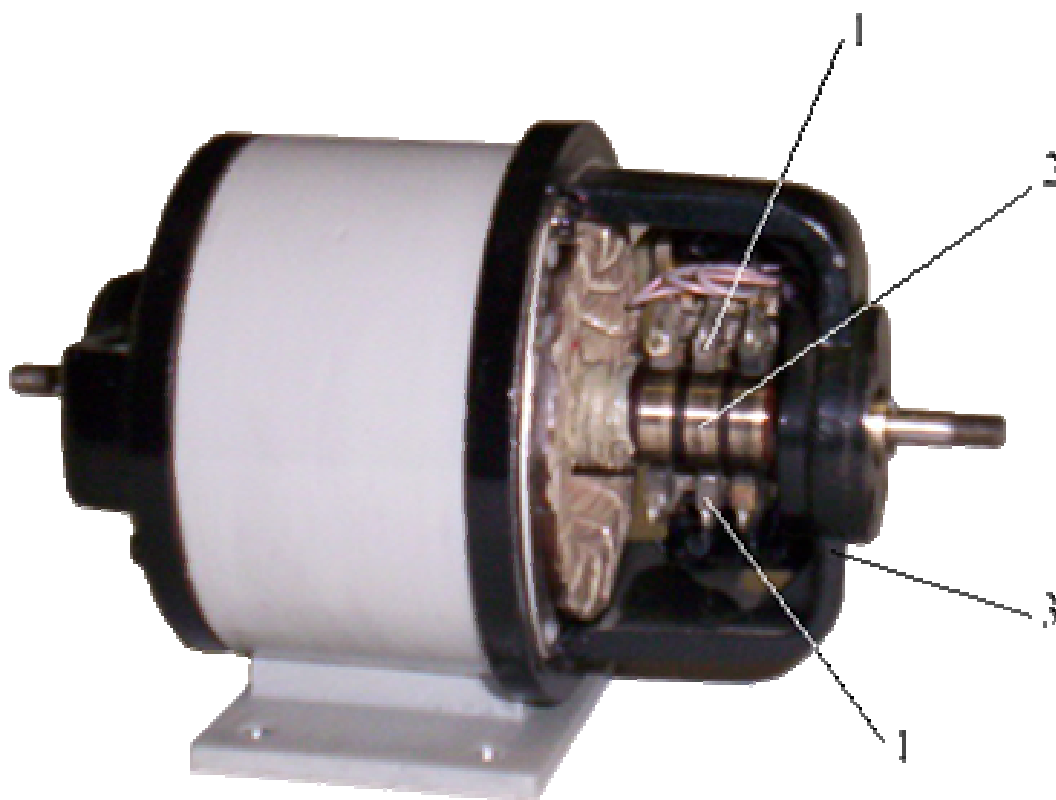


Рис. 9. Асинхронный двигатель с фазным ротором ЭД101
1 – щетки; 2 – контактные кольца; 3 – подшипниковый щит

При работе машины контактные кольца, вращаясь вместе с ротором, скользят по неподвижным щеткам. Таким образом обеспечивается скользящий электрический контакт вращающейся обмотки ротора с неподвижной электрической цепью. Общий вид асинхронного двигателя с фазным ротором показан на рис. 9.

Короткозамкнутая обмотка ротора (рис. 10) существенно отличается от фазной обмотки. Она содержит в каждом пазу сердечника ротора один проводник, сечение которого повторяет (заполняет) сечение паза. Такой проводник называют стержень обмотки ротора. Все стержни замкнуты между собой двумя короткозамыкающими кольцами, расположенными на торцах ротора. Стержни с кольцами образуют электрические контуры, по которым может замыкаться электрический ток. Иногда такую конструкцию обмотки ротора называют «беличья клетка».

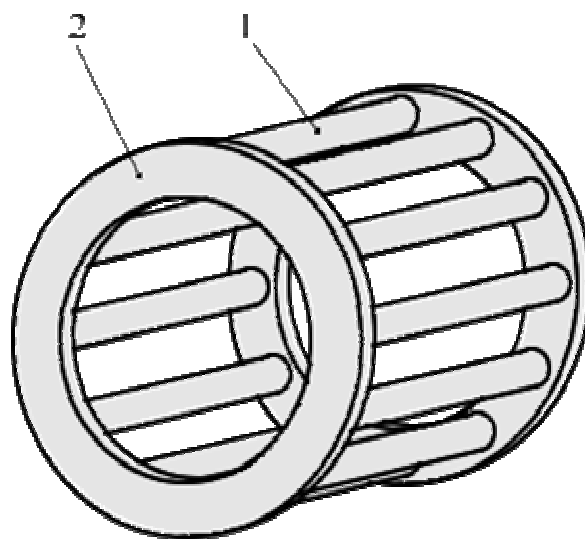


Рис. 10. Короткозамкнутая обмотка ротора. 1 – стержни обмотки, 2 – короткозамыкающие кольца

Короткозамкнутая обмотка ротора обладает рядом преимуществ, которые определяются простотой ее конструкции, технологичностью при изготовлении, надежностью при эксплуатации. Поэтому асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором находит наиболее широкое применение. Хотя в некоторых случаях особенности фазной обмотки ротора имеют определяющее значение

при выборе типа двигателя.

На рис. 11 показан общий вид ротора асинхронного двигателя с короткозамкнутой обмоткой. На рис. 12 короткозамкнутая алюминиевая обмотка отлита вместе с вентиляционными лопатками.

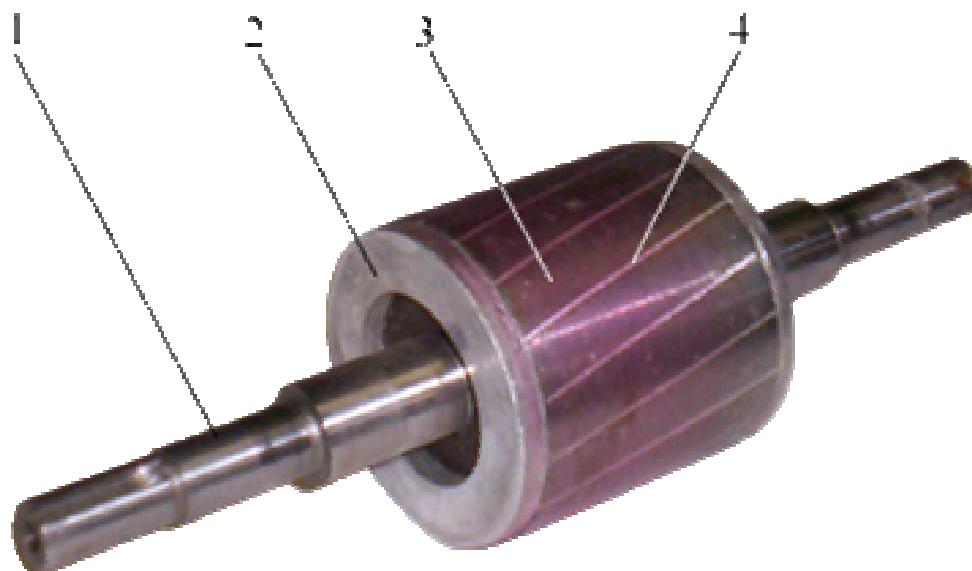


Рис. 11. Короткозамкнутый ротор асинхронного двигателя малой мощности
1 – вал; 2 – короткозамыкающее кольцо; 3 – шихтованный сердечник ротора;
4 – стержень обмотки ротора в скошенном полузакрытом пазу

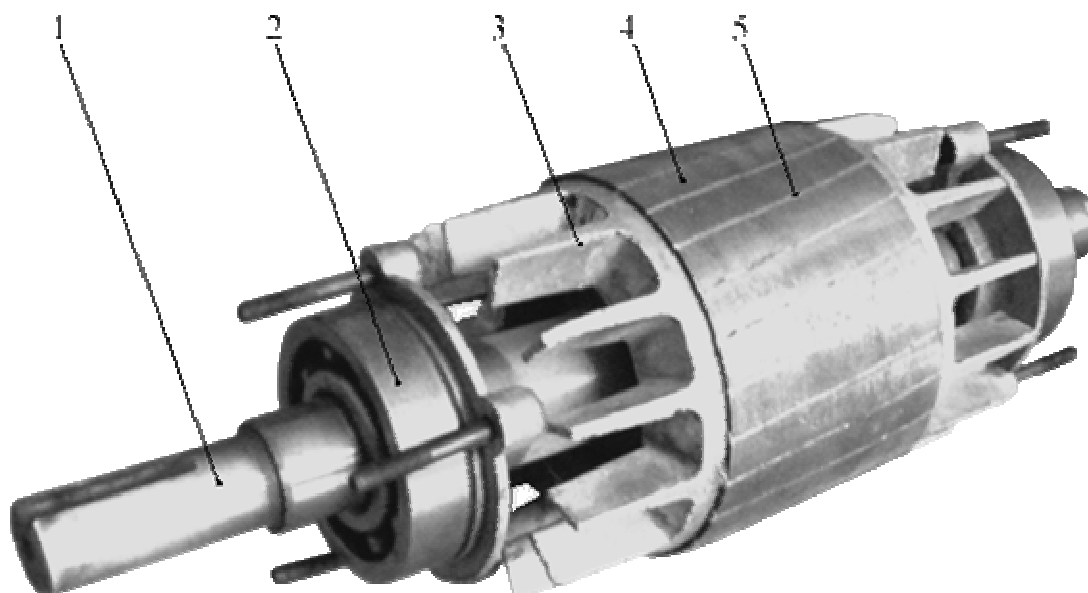


Рис. 12. Короткозамкнутый ротор асинхронного двигателя
1 – вал; 2 – подшипник; 3 – короткозамыкающее кольцо с вентиляционными лопатками; 4 – шихтованный сердечник ротора; 5 - стержень обмотки ротора в скошенном полузакрытом пазу

Условное обозначение асинхронного двигателя в схемах электрических цепей показано на рис. 13. При развернутом обозначении способ соединения фаз обмотки статора показывается на схеме, при упрощенном обозначении – указывается условным знаком.

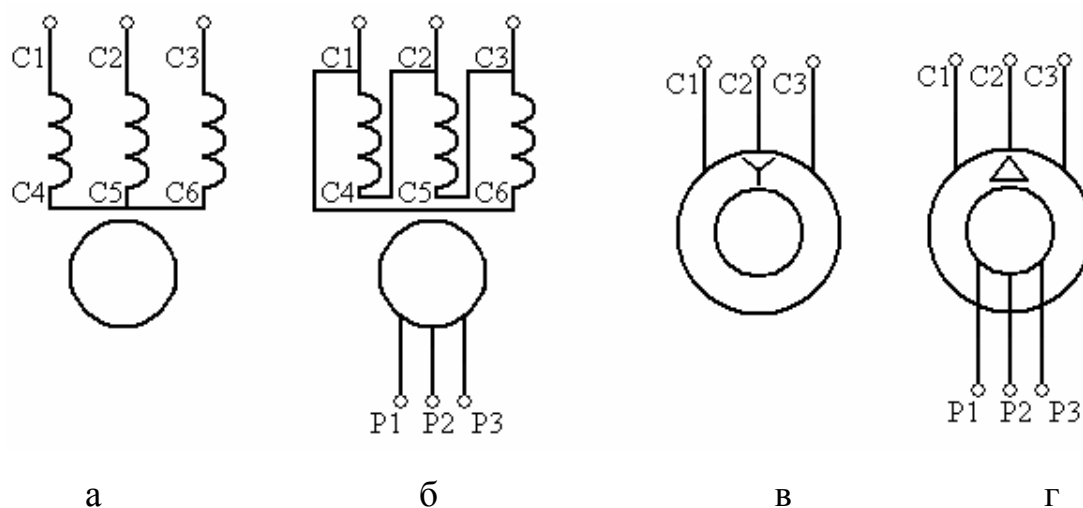


Рис. 13. Условные обозначения асинхронного двигателя в схемах электрических цепей: а,б – развернутое; в,г – упрощенное

На рис. 13 обозначения а и в соответствуют асинхронному двигателю с короткозамкнутым ротором и соединением фаз обмотки статора «звезда». Обозначения б и г соответствуют асинхронному двигателю с фазным ротором и соединением фаз обмотки статора «треугольник».

Выводы начал и концов фаз обмотки статора выполняются на клеммной панели, расположенной на корпусе асинхронного двигателя. При этом они располагаются в определенном порядке для удобства соединения фаз «звездой» и «треугольником». Расположение выводов фаз и их обозначение показано на рис. 14.

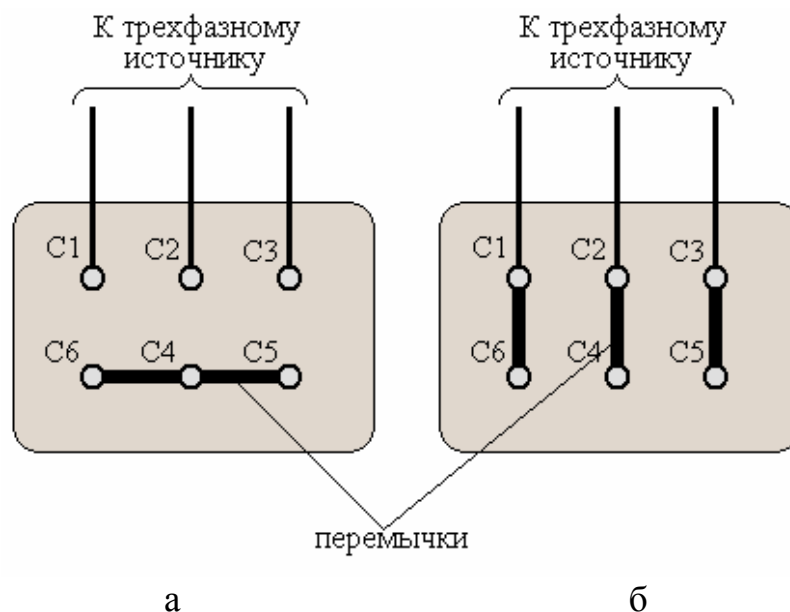


Рис. 14. Клеммная панель асинхронного двигателя

Символами C1, C2, C3 обозначаются начала трех фаз обмотки статора, C4, C5, C6 – концы фаз. На рис. а три фазы соединены «звездой», б – «треугольником».

2. Принцип действия асинхронного двигателя

Рассмотрение принципа действия асинхронного двигателя можно разделить на два этапа: первый этап – создание обмоткой статора вращающегося магнитного поля, второй этап – взаимодействие вращающегося магнитного поля с обмоткой ротора.

Магнитное поле асинхронного двигателя

Симметричная трехфазная обмотка статора подключена к трехфазному источнику. При этом фазные токи симметричны, т.е. одинаковы по величине и отличаются по фазе на $\frac{1}{3}$ часть периода. Временная диаграмма фазных токов показана на рис. 15.

Обмотка статора с симметричным трехфазным током создает магнитное поле, распределенное в магнитной цепи асинхронного двигателя. Для анализа характера магнитного поля рассмотрим распределение его силовых линий в

разные моменты времени, обозначенные на рис. t_1, t_2, t_3, t_4 через равные промежутки $\Delta t = T/3$.

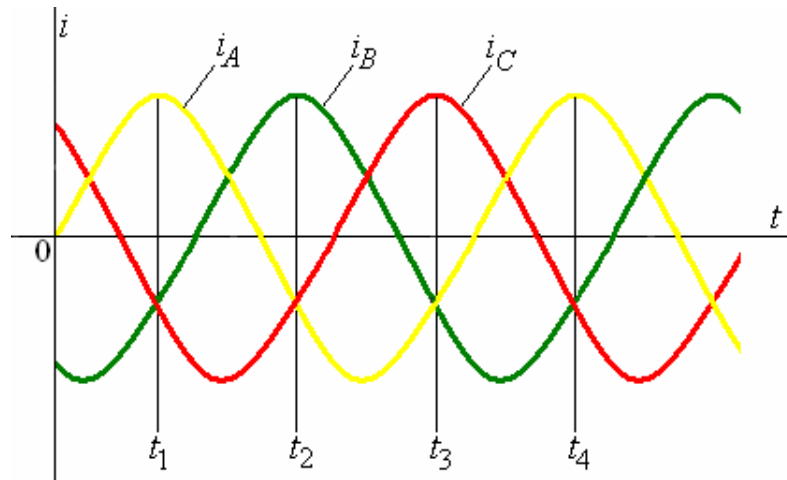


Рис. 15. Временная диаграмма фазных токов обмотки статора

Распределение силовых линий магнитного поля определяется направлением токов в проводниках обмотки статора, расположенных в его пазах. Для построения силовых линий магнитного поля удобно воспользоваться схематичным изображением магнитной цепи, подобно рис. 5 (рис. 16). Здесь каждая фаза трехфазной обмотки представлена одним витком, стороны которого находятся в диаметрально расположенных пазах. Три фазы смещены относительно друг друга по окружности на 120° . Проводники, соответствующие началам фаз, обозначены символами A, B, C , концы фаз – X, Y, Z . На рис. 16 показаны силовые линии магнитного поля для трех моментов времени.

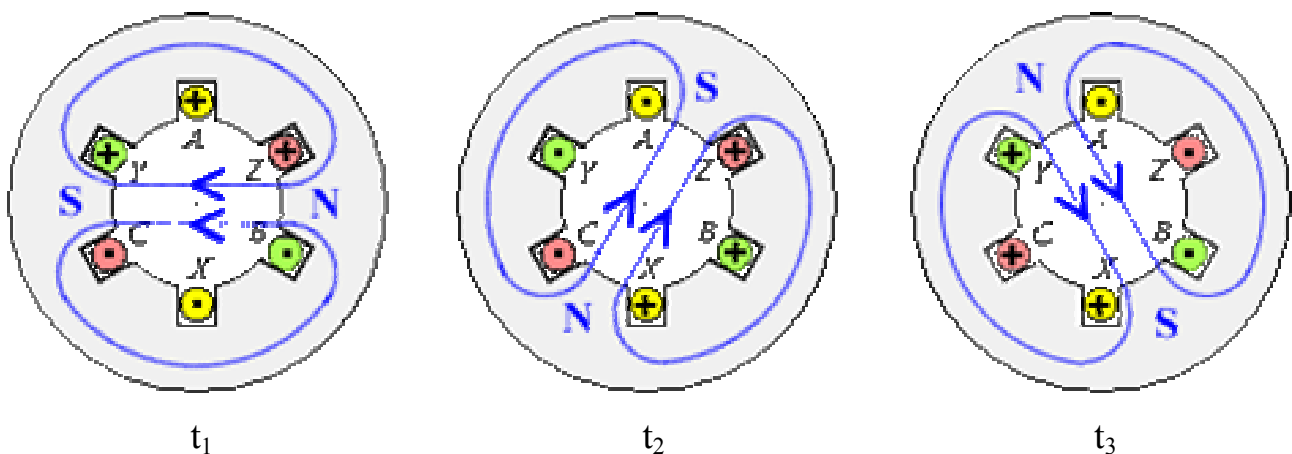


Рис. 16. Силовые линии магнитного поля асинхронного двигателя в разные моменты времени

Направления токов в проводниках определяются их значениями в соответствии с временной диаграммой на рис. 15. В частности, в момент времени t_1 ток фазы A положителен ($i_A > 0$). На рис. 16 положительному значению тока соответствует направление за плоскость рисунка, которое обозначено в начале фазы A знаком «+». В конце этой фазы X ток отрицателен, т.е. имеет обратное направление, которое обозначено знаком «•». Аналогично обозначены токи двух других фаз, которые в соответствии с временной диаграммой в этот момент времени имеют отрицательные значения ($i_B < 0$, $i_C < 0$). Как видно на рис. 16, в момент времени t_1 токи симметричной трехфазной обмотки распределились так, что образуют две группы соседних проводников с одинаковым направлением токов. Силовые линии охватывают две группы проводников с одинаковым направлением токов, образуя внутри машины двухполюсное магнитное поле. Направление силовых линий определяется направлением токов в проводниках по правилу буравчика и указано на рисунке.

Поскольку ток трехфазной обмотки переменный, очевидно магнитное поле, создаваемое этим током также изменяется. В частности, в момент времени t_2 фазные токи в соответствии с временной диаграммой: $i_A < 0$, $i_B > 0$, $i_C < 0$. При этом распределение токов в проводниках обмотки статора и силовые линии магнитного поля имеют вид как на рис. 16 для момента времени t_2 . Аналогично построена картина магнитного поля для момента времени t_3 , когда $i_A < 0$, $i_B < 0$, $i_C > 0$.

Как видно на рис. 16, при питании обмотки статора трехфазным током создается двухполюсное магнитное поле. С изменением фазных токов это магнитное поле поворачивается в пространстве. При этом через равные промежутки времени ($\Delta t = T/3$) магнитное поле поворачивается в пространстве на равный угол ($1/3$ часть окружности). В момент времени t_4 распределение токов в обмотке и магнитное поле повторяет момент t_1 ,

Таким образом, *симметричная трехфазная обмотка статора асинхронного двигателя, потребляющая от трехфазного источника симметричные фазные токи, создает равномерно вращающееся в пространстве магнитное поле.*

Направление вращения магнитного поля определяется последовательностью чередования фазных токов. При смене чередования фазных токов трехфазной обмотки направление вращения магнитного поля также меняется на противоположное. Практически это осуществляется переключением фаз обмотки статора с прямого чередования на обратное.

Частота вращения магнитного поля n_0 зависит от частоты тока источника f . Как было показано, за один период изменения тока во времени магнитное поле поворачивается на один оборот. С увеличением частоты тока магнитное поле поворачивается на один оборот за меньшее время. Это означает, что частота вращения магнитного поля пропорциональна частоте тока в обмотке ($n_0 \sim f$).

Рис. 16 иллюстрирует создание магнитного поля простейшей трехфазной обмоткой, в которой каждая фаза образована одной катушкой со сторонами, находящимися в диаметрально противоположных пазах. Как видно, такая обмотка создает двухполюсное магнитное поле. Конструкция обмотки может содержать большее количество катушек, иначе расположенных в пазах сердечника статора. Например, на рис. 17 показано схематичное изображение трехфазной обмотки асинхронного двигателя, где каждая фаза содержит по две катушки.

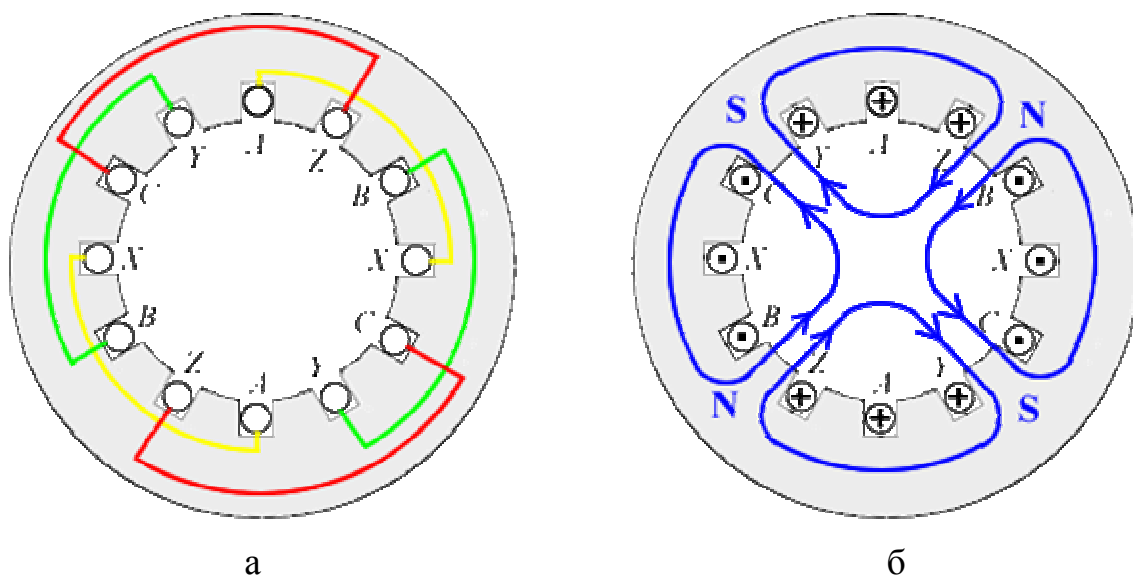


Рис. 17. Четырехполюсная обмотка асинхронного двигателя

Начала этих катушек находятся в диаметрально расположенных пазах, а

ширина катушки равна $\frac{1}{4}$ части окружности. Распределение токов и магнитных силовых линий в момент времени t_1 показано на рис. 17б. Как видно, такая обмотка создает четырехполюсное магнитное поле. При этом за один период изменения тока во времени магнитное поле поворачивается лишь на $\frac{1}{2}$ окружности, т.е. частота вращения магнитного поля в 2 раза меньше. Конструкция обмотки статора может быть еще более сложной и содержать в каждой фазе еще большее количество катушек. При этом число полюсов создаваемого магнитного поля еще больше, а частота вращения – меньше. Частота вращения магнитного поля обратно-пропорциональна количеству полюсов. Количество полюсов создаваемого магнитного поля характеризуют параметром, называемым число пар полюсов (p).

Таким образом, частота вращения магнитного поля асинхронного двигателя определяется двумя параметрами: частотой тока в обмотке статора f и числом пар полюсов p :

$$n_0 = \frac{60f}{p}, [\text{об/мин}]. \quad (1)$$

Например, в табл. 1 приведены значения частоты вращения магнитного поля при разном числе пар полюсов обмотки при стандартной частоте тока $f=50\text{Гц}$.

Табл. 1

p	1	2	3	4	5
n_0 , об/мин	3000	1500	1000	750	600

Взаимодействие вращающегося магнитного поля с обмоткой ротора

Электромагнитный вращающий момент асинхронного двигателя создается при взаимодействии вращающегося магнитного поля с обмоткой ротора. Рис. 18 иллюстрирует процессы, происходящие при этом взаимодействии.

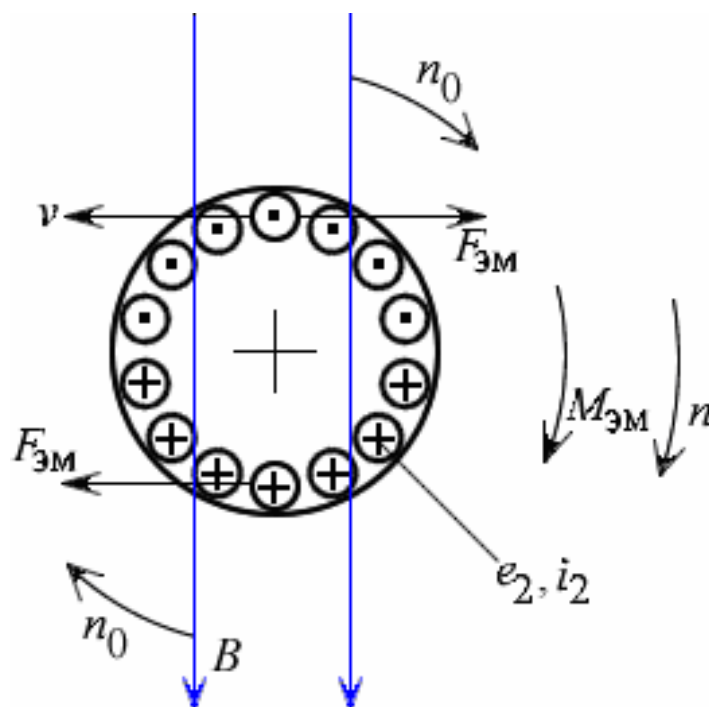


Рис. 18. Взаимодействие вращающегося магнитного поля с обмоткой ротора

Здесь показаны стержни короткозамкнутой обмотки ротора. Вращающееся магнитное поле, связанное с ротором, представлено его силовыми линиями с индукцией B , направленными сверху вниз. Направление вращения магнитного поля – по часовой стрелке с частотой вращения n_0 . При вращении магнитного поля его силовые линии пересекают проводники обмотки ротора. При этом проявляется индукционное действие магнитного поля. Согласно закона электромагнитной индукции в проводнике, движущемся в магнитном поле (относительно магнитного поля), индуцируется ЭДС e . Величина этой ЭДС определяется интенсивностью магнитного поля (индукцией B) и скоростью движения проводника относительно магнитного поля v :

$$e_2 = Bvl, \quad (2)$$

где l – длина проводников обмотки ротора.

Направление ЭДС e_2 в проводнике определяется по правилу правой руки. При этом необходимо иметь в виду, что вектор скорости определяется направлением движения проводника относительно магнитного поля. Например, на рис. 18 магнитное поле вращается по часовой стрелке. При этом относительно верхних проводников силовые линии движутся вправо. Это эквивалентно направлению движения проводника относительно магнитного поля влево, т.е. вектор скорости относительного движения проводника следует направить влево. С учетом этого направление ЭДС индукции в верхних проводниках обмотки ротора – из-за плоскости рисунка, а в нижних проводниках – за плоскость рисунка. Эти направления обозначены условными знаками «+» и «•». В короткозамкнутой обмотке ротора все стержни включены в замкнутую электрическую цепь посредством короткозамыкающих колец. В каждом стержне под действием ЭДС e_2 возникает ток ротора (вторичный ток) i_2 того же направления, что и ЭДС. Величина этого тока определяется величиной ЭДС e_2 и полным сопротивлением обмотки ротора Z_2 :

$$i_2 = \frac{e_2}{Z_2}. \quad (3)$$

При возникновении тока в обмотке ротора проявляется силовое действие магнитного поля, т.е. на проводники с током, находящиеся в магнитном поле, действует электромагнитная сила $F_{эм}$. Величина этой силы определяется интенсивностью магнитного поля (индукцией B) и величиной тока i_2 :

$$F_{эм} = Bi_2l. \quad (4)$$

Направление действия электромагнитной силы определяется в соответствии с правилом левой руки. При направлениях силовых линий и токов в обмотке ротора, показанных на рис. 18, направление электромагнитной силы, действующей на верхние проводники, - вправо, а на нижние – влево. Силы, действующие на все проводники обмотки ротора, складываясь, создают электромагнитный вращающий момент $M_{эм}$, направленный по часовой стрелке.

$$M_{\text{эм}} = F_{\text{эм}} \frac{D_2}{2} N_2, \quad (5)$$

где D_2 – диаметр ротора;

N_2 – число проводников обмотки ротора.

По действием этого вращающего момента ротор вращается с частотой вращения n в том же направлении, что и магнитное поле. При этом двигатель, вращая приводной механизм, совершает механическую работу. Для осуществления реверса (изменения направления вращения) необходимо поменять направление вращения магнитного поля. Для этого достаточно переключить обмотку статора так, чтобы изменить последовательность чередования фаз на противоположную.

Таким образом, асинхронный двигатель, обмотка статора которого подключена к трехфазному источнику электроэнергии, создает электромагнитный вращающий момент и совершает механическую работу. Т.е. асинхронный двигатель преобразует электрическую энергию в механическую.

Необходимым условием создания электромагнитного момента является неравенство частоты вращения ротора n и магнитного поля n_0 . Если ротор вращается с такой же частотой вращения, как и магнитное поле ($n=n_0$), то проводники обмотки ротора относительно магнитного поля неподвижны, т.е. скорость относительного движения $v=0$. Тогда в соответствии с (2), (3) ЭДС e_2 в обмотке ротора равна нулю, и тока в обмотке нет ($i_2=0$). В соответствии с (4) электромагнитная сила не создается ($F_{\text{эм}}=0$) и электромагнитный вращающий момент равен нулю. Т.е. механическая энергия не создается. Такой режим работы асинхронного двигателя называется холостой ход. Частота вращения ротора, равная частоте вращения магнитного поля, называется синхронной.

При частоте вращения ротора, меньшей синхронной ($n < n_0$), относительная скорость $v \neq 0$ и в соответствии с (2), (3), (4) создается электромагнитный вращающий момент, не равный нулю, который определяет механическую мощность двигателя.

Таким образом, для создания вращающего электромагнитного момента

ротор и магнитное поле должны вращаться асинхронно. В связи с этим двигатель носит название асинхронный. Разница между величинами частоты вращения ротора и магнитного поля характеризуется параметром, называемым скольжением (s). Скольжение определяется соотношением:

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0}. \quad (6)$$

В режиме холостой ход, когда частота вращения ротора максимальна и равна синхронной, скольжение $s=0$. При неподвижном роторе, когда его частота вращения равна нулю ($n=0$) скольжение $s=1$. Таким образом, во всем возможном диапазоне частоты вращения (от нуля до синхронной) скольжение меняется от $s=1$ до $s=0$. Поэтому скольжение удобно использовать для характеристики режима работы асинхронного двигателя.

3. Механическая характеристика асинхронного двигателя

Механической характеристикой называется зависимость частоты вращения двигателя от вращающего момента на валу. Она позволяет анализировать поведение двигателя при изменении его механической нагрузки. Общий вид механической характеристики можно определить графически, анализируя зависимости каждого из параметров, определяющих электромагнитный вращающий момент.

На рис. 19 показаны зависимости этих параметров от частоты вращения.

Индукция магнитного поля, создаваемого обмоткой статора, B_1 определяется величиной напряжения источника U_1 и частотой тока f . При неизменном напряжении и частоте тока источника индукция магнитного поля статора также неизменна, поэтому на графике зависимости от частоты вращения $B_1(n)$ изображается прямой горизонтальной линией.

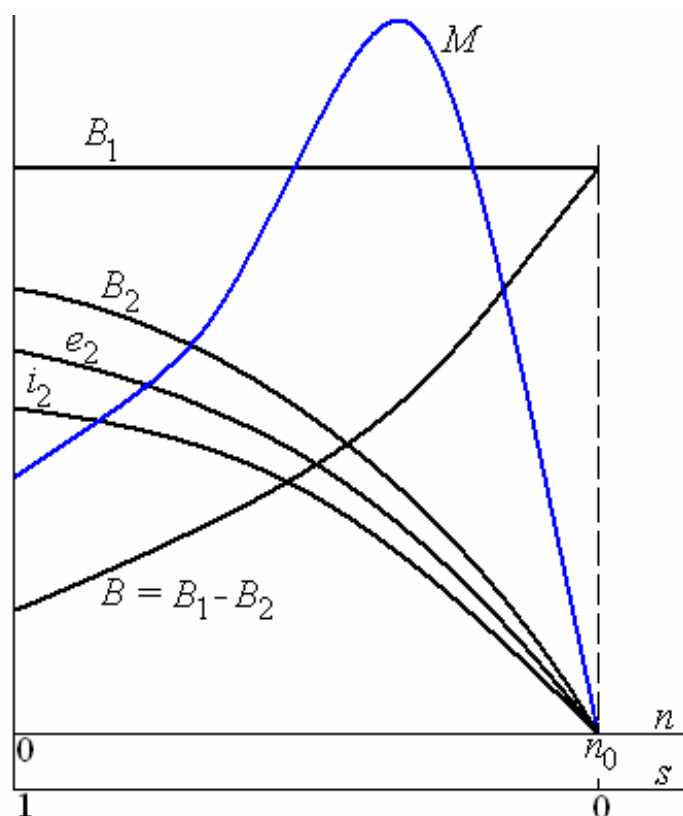


Рис. 19. Зависимость вращающего момента асинхронного двигателя от частоты вращения

ЭДС e_2 , индуцируемая в обмотке ротора, в соответствии с (2) при неизменной индукции магнитного поля пропорциональна скорости v относительного движения ротора и магнитного поля. Эта скорость определяется разностью частоты вращения ротора и магнитного поля, т.е. скольжением s (ось s на рис. 19) :

$$v = \pi D_2 (n_0 - n) = \pi D_2 n_0 s. \quad (7)$$

При изменении частоты вращения ротора от $n=0$ до синхронной ($n=n_0$) скольжение меняется от 1 до 0. Это означает, что относительная скорость v и, следовательно ЭДС e_2 меняется от максимального значения до нуля. Такому изменению соответствует кривая e_2 на рис. 19. Изменение ЭДС e_2 вызывает изменение тока i_2 в обмотке ротора, который в соответствии с (3) можно принять пропорциональным величине ЭДС e_2 . Кривая i_2 на рис. 19 подобна кривой e_2 .

Электромагнитный момент создается при взаимодействии обмотки ротора с магнитным полем. Однако, результирующее магнитное поле с индукцией B формируется совместным действием обеих обмоток: обмотки статора и обмот-

ки ротора, т.е. результирующее магнитное поле с индукцией B можно представить состоящим из двух составляющих: первичного магнитного поля статора с индукцией B_1 и вторичного магнитного поля ротора с индукцией B_2 . При этом обмотка ротора, согласно явлению электромагнитной индукции и правилу Ленца, своим магнитным потоком препятствует первичному магнитному потоку. Такое взаимодействие называют размагничивающей реакцией ротора. Таким образом, индукция результирующего магнитного поля определяется соотношением:

$$B = B_1 - B_2. \quad (8)$$

Индукция B_2 вторичного магнитного поля, создаваемого током ротора, пропорциональна величине этого тока. На рис. 19 кривая B_2 подобна кривой i_2 , а кривая индукции B определяется разностью кривых B_1 и B_2 . Как видно, с уменьшением частоты вращения ротора от синхронной ($n=n_0$) до нуля индукция B результирующего магнитного поля уменьшается. Электромагнитные силы и, значит, электромагнитный момент, создаваемый двигателем, определяется в соответствии с (4) произведением индукции результирующего магнитного поля B и тока ротора i_2 . На рис. 19 произведение кривых i_2 и B дает график механической характеристики $M(n)$. При частоте вращения, равной синхронной ($n=n_0$), ток в роторе отсутствует и электромагнитный момент равен нулю. С уменьшением частоты вращения электромагнитный момент увеличивается за счет увеличения тока ротора. При дальнейшем уменьшении частоты вращения электромагнитный момент уменьшается за счет уменьшения индукции магнитного поля (реакции ротора).

Следует отметить, что приведенный анализ не учитывает некоторых особенностей явлений, происходящих в асинхронном двигателе, в частности фазовых соотношений всех синусоидальных величин, изменение частоты тока в роторе и других. Тем не менее зависимость вращающего момента асинхронного двигателя от частоты вращения имеет вид кривой M на рис. 19.

Для анализа работы асинхронного двигателя в системе электропривода удобно изображать механическую характеристику как зависимость частоты

вращения от вращающего момента $n=f(M)$. Это позволяет определять изменение частоты вращения при изменении момента нагрузки на валу и формировать алгоритмы регулирования частоты вращения. Механическая характеристика $n=f(M)$ показана на рис. 20.

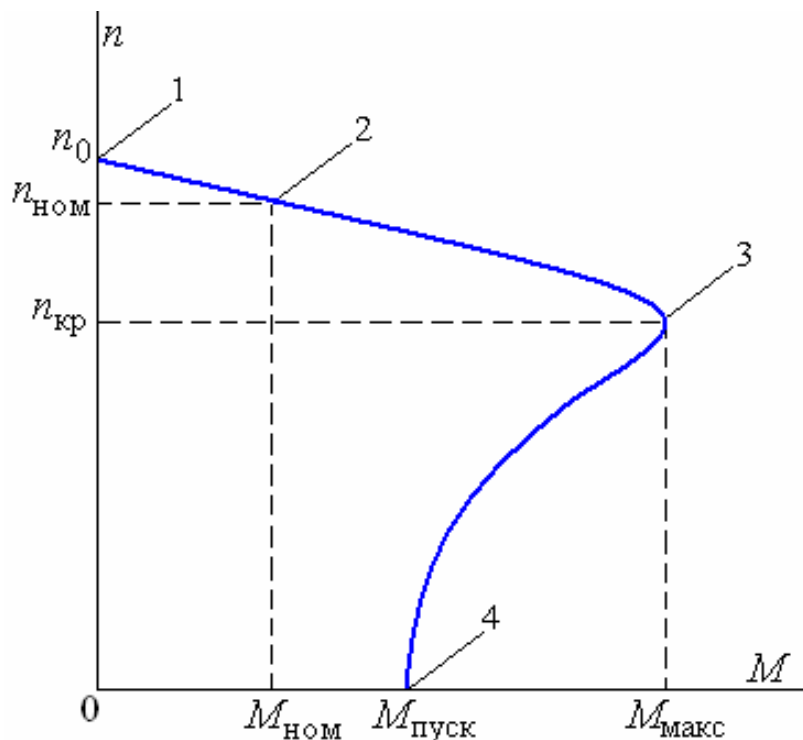


Рис. 20. Механическая характеристика асинхронного двигателя

Точка 1 механической характеристики соответствует режиму холостой ход асинхронного двигателя, когда частота вращения равна синхронной, а скольжение $s=0$. При этом вращающий момент $M=0$. Точка 4 соответствует пусковому режиму, когда частота вращения $n=0$, а скольжение $s=1$. В этом режиме двигатель создает пусковой момент $M_{\text{пуск}}$. Точка номинального режима работы находится на рабочей ветви механической характеристики 1-3 (точка 2). В этом режиме двигатель развивает номинальный момент $M_{\text{ном}}$ и вращается с номинальной частотой вращения $n_{\text{ном}}$. При этом скольжение равно номинальному $s_{\text{ном}}$. Как видно, номинальная частота вращения близка к синхронной. Точка 3 соответствует критическому режиму, когда двигатель развивает максимальный момент $M_{\text{макс}}$. При превышении момента нагрузки над максимальным двигатель останавливается.

Для аналитического описания удобно использовать упрощенное аналитическое выражение зависимости момента от скольжения:

$$M = \frac{2M_{\text{макс}}}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}}, \quad (9)$$

где $s_{\text{кр}}$ – критическое скольжение.

Это выражение позволяет получить достаточно точный результат в рабочей части механической характеристики.

4. Потери энергии и коэффициент полезного действия асинхронного двигателя.

Преобразование энергии в асинхронном двигателе сопровождается потерями энергии. В АД можно выделить четыре источника потерь.

Во-первых, обмотка статора обладает определенным электрическим сопротивлением. Ток в этой обмотке создает электрические потери, пропорциональные квадрату тока и сопротивлению:

$$\Delta p_{\text{эл}} = 3I_{1\text{ф}}^2 R_1. \quad (10)$$

где $I_{1\text{ф}}$ - фазный ток обмотки статора;

R_1 - сопротивление фазы обмотки статора.

Во-вторых, в магнитной цепи асинхронного двигателя создается переменное магнитное поле. При этом, как известно из теории магнитных цепей, возникают магнитные потери в магнитопроводе ($\Delta p_{\text{маг}}$), которые складываются из потерь на гистерезис и вихревые токи в сердечнике. Для уменьшения этих потерь магнитопровод якоря выполняется шихтованным из листов электротехнической стали. Магнитные потери составляют от 1 до 3 %.

В-третьих, в обмотке ротора возникают электрические потери, определяемые сопротивлением обмотки ротора и током в ней:

$$\Delta p_{\varepsilon 2} = 3I_2^2 R_2. \quad (11)$$

В-четвертых, при вращении ротора возникают потери от трения в подшипниках, трения вращающихся частей о воздух (вентиляционные потери), которые объединяются в механические потери ($\Delta p_{\text{мех}}$) и составляют от 1 до 2%.

Полезная мощность образуется из потребляемой за вычетом всех потерь. Энергетический баланс асинхронного двигателя иллюстрируется диаграммой на рис. 21.

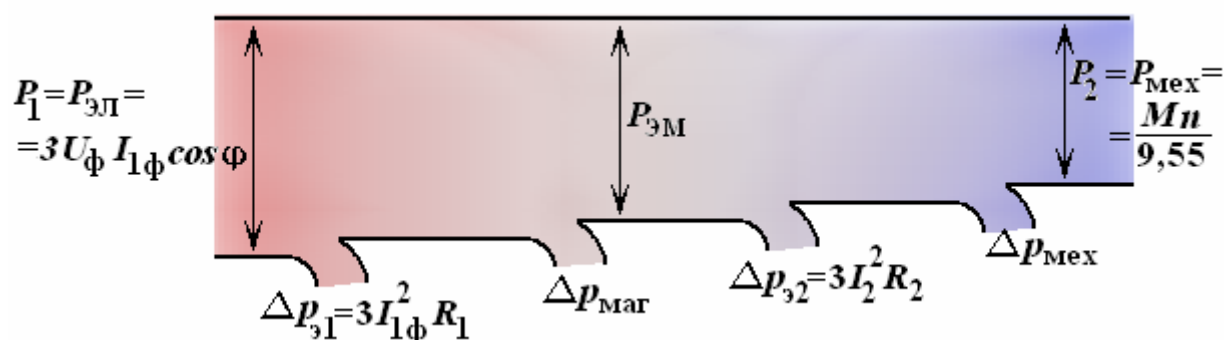


Рис. 21. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

Асинхронный двигатель потребляет от трехфазного источника электрическую энергию мощностью P_1 . Часть энергии тратится на электрические потери в обмотке статора, магнитные потери, электрические потери в обмотке ротора и механические потери. Оставшаяся энергия, преобразованная в механическую (P_2), передается рабочему механизму, который вращается двигателем с частотой вращения n :

$$P_2 = P_1 - (\Delta p_{\varepsilon 1} + \Delta p_{\text{маг}} + \Delta p_{\varepsilon 2} + \Delta p_{\text{мех}}). \quad (12)$$

Полезная мощность двигателя определяется вращающим моментом M на его валу и частотой вращения n :

$$P_2 = P_{\text{мех}} = \frac{Mn}{9,55}, [\text{Вт}]. \quad (13)$$

Коэффициент полезного действия двигателя определяется соотношением полезной и потребляемой мощностей:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma \Delta p}. \quad (14)$$

К.п.д. асинхронного двигателя зависит от мощности. При номинальной мощности машины 100кВт номинальный к.п.д. 85÷90%, а при номинальной мощности 100Вт – 60-65%.

Следует иметь в виду, что номинальной мощностью двигателя считается полезная, т.е. механическая мощность, отдаваемая потребителю:

$$P_{ном} = P_{2ном} = \frac{M_{ном} n_{ном}}{9,55}. \quad (15)$$

5. Паспортные данные асинхронного двигателя

Паспортные данные асинхронного двигателя определяют его номинальный режим работы, позволяют рассчитывать характеристики, анализировать режимы его работы.

В табл. 2 приведен перечень параметров асинхронного двигателя, составляющих его паспортные данные.

Табл. 2

Паспортные данные асинхронного двигателя

№	Наименование	Обозначение
1	Номинальная мощность	$P_{ном}$, кВт
2	Номинальное напряжение (Υ / Δ)	$U_{ном}$, В
3	Номинальная частота тока	f , Гц
4	Номинальная частота вращения	$n_{ном}$, об/мин
7	Номинальный КПД	$\eta_{ном}$, %
5	Номинальный коэффициент мощности	$\cos\varphi_{ном}$, д.е.
6	Кратность максимального момента	$M_{макс}/M_{ном}$
7	Кратность пускового момента	$M_{пуск}/M_{ном}$

Номинальная мощность двигателя $P_{\text{ном}}$ - механическая мощность на валу, определяемая номинальными моментом и частотой вращения:

$$P_{\text{ном}} = \frac{M_{\text{ном}} n_{\text{ном}}}{9,55}. \quad (16)$$

Номинальная частота f и номинальное напряжение (Y / Δ) $U_{\text{ном}}$ – частота и напряжение трехфазного источника электроэнергии, к которому подключается асинхронный двигатель при разном способе соединения фаз обмотки статора. Например, $U_{\text{ном}} = 380/220 \text{ В}$ означает, что при соединении фаз обмотки способом «звезда» двигатель подключается к трехфазному источнику напряжением 380В, а при соединении «треугольником» - 220В.

Номинальная частота вращения $n_{\text{ном}}$ – частота вращения ротора в номинальном режиме работы при номинальном моменте нагрузки на валу.

Номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi_{\text{ном}}$ – коэффициент мощности двигателя в цепи синусоидального тока в номинальном режиме работы.

Кратность максимального момента $M_{\text{макс}}/M_{\text{ном}}$ – отношение максимального момента к номинальному, определяет перегрузочную способность двигателя.

кратность пускового момента $M_{\text{пуск}}/M_{\text{ном}}$ – отношение пускового момента к номинальному, определяет пусковые свойства двигателя.

Паспортные данные двигателя определяются при его проектировании и разработке, уточняются при контрольных испытаниях и указываются в техническом паспорте двигателя. Для типовых асинхронных двигателей серийного производства паспортные данные указываются в каталогах оборудования.

6. Пуск и регулирование частоты вращения асинхронного двигателя

Пуск асинхронного двигателя

Для пуска асинхронного двигателя его обмотка статора подключается к трехфазному источнику с помощью коммутирующей аппаратуры. В момент подключения двигатель потребляет значительный пусковой ток. Пусковой ток

асинхронного двигателя может превышать номинальный в несколько раз ($I_{\text{пуск}} = (4 \div 6)I_{\text{ном}}$). Такие резкие изменения тока отрицательно сказываются на работе электрической сети и других электроприемников, подключенных к этой сети. При мощности двигателя, не превышающей 30% мощности сети, такое влияние допустимо, и пуск асинхронного двигателя осуществляется непосредственным подключением его обмотки к сети. Такое включение носит название «прямой пуск».

Для ограничения пускового тока мощных двигателей в цепь обмотки статора на время пуска вводят дополнительные элементы: резисторы, реакторы, автотрансформаторы. Однако, такой способ приводит к снижению пускового момента, что ограничивает его применение.

Обеспечение хороших пусковых свойств предусматривается конструкцией двигателя. В частности, существенное значение имеет форма паза ротора, в который укладывается короткозамкнутая обмотка. На рис. 22 показаны примеры таких пазов. Такая особенность конструкции обмотки ротора ограничивает пусковой ток ($I_{\text{пуск}} = (3,5 \div 5,0)I_{\text{ном}}$) и обеспечивает большой пусковой момент ($M_{\text{пуск}} = (2 \div 3)M_{\text{ном}}$).

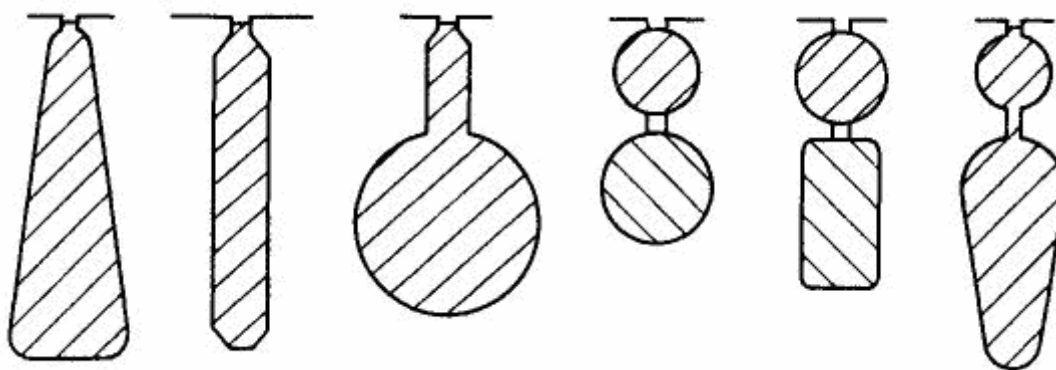


Рис. 22. Формы пазов ротора с короткозамкнутой обмоткой

Регулирование частоты вращения

Частота вращения ротора асинхронного двигателя определяется частотой вращения магнитного поля (синхронной частотой вращения). При этом их ве-

личины различаются незначительно (номинальное скольжение $s_{\text{ном}}=0,01\div0,1$). Синхронная частота вращения в соответствии с (1) определяется числом пар полюсов обмотки статора и частотой тока в обмотке:

$$n_0 = \frac{60f}{p}. \quad (17)$$

Таким образом, для регулирования частоты вращения асинхронного двигателя можно менять число полюсов обмотки, либо частоту тока в ней.

Изменение числа полюсов (*полюсное регулирование*) возможно лишь в специальных многоскоростных асинхронных двигателях, у которых конструкция обмотки статора предусматривает возможность ее переключения и изменения числа полюсов вращающегося магнитного поля. Например, при переключении обмотки с числа пар полюсов $p=1$ на $p=2$ синхронная частота вращения уменьшается в 2 раза. Механическая характеристика изменяется, как показано на рис. 23.

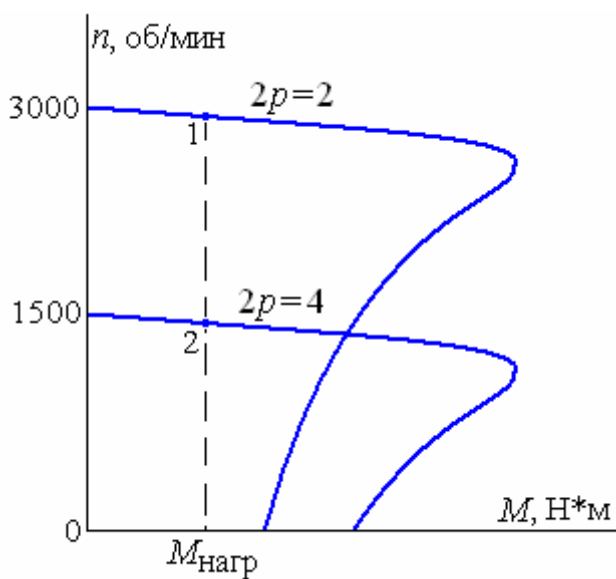


Рис. 23. Механические характеристики асинхронного двигателя при полюсном регулировании

При неизменном моменте нагрузки $M_{\text{нагр}}$ рабочая точка смещается из 1 в 2, т.е. частота вращения уменьшается приблизительно в 2 раза. Такой способ регулирования многоскоростных асинхронных двигателей позволяет изменять

частоту вращения ступенчато, при этом количество ступеней ограничено (2-3).

Изменение частоты тока позволяет регулировать частоту вращения плавно и в более широком диапазоне. Такой способ называется «*частотным регулированием*». Для частотного регулирования двигатель подключается к полупроводниковому преобразователю частоты ПЧ (рис. 24), который позволяет изменять частоту тока по заданному алгоритму, либо по сигналу системы управления СУ.

Пропорционально частоте тока меняется синхронная частота вращения магнитного поля. При этом механическая характеристика двигателя меняется, как показано на рис. 25, а рабочая точка и частота вращения ротора плавно смещаются в направлении изменения частоты тока. Плавное изменение частоты вращения и более широкий диапазон изменения определяют преимущества частотного регулирования асинхронного двигателя.

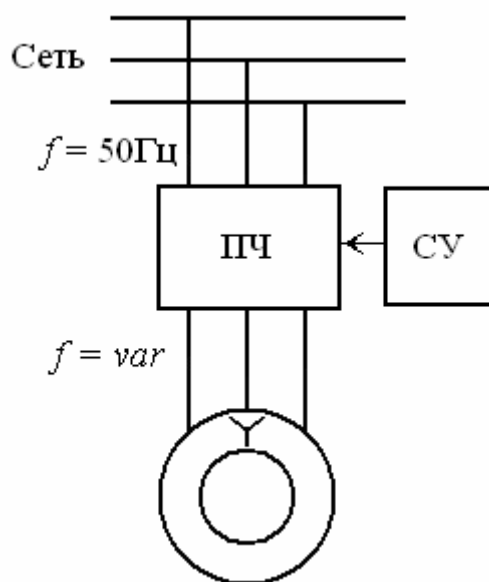


Рис. 24. Схема включения асинхронного двигателя с частотным регулированием

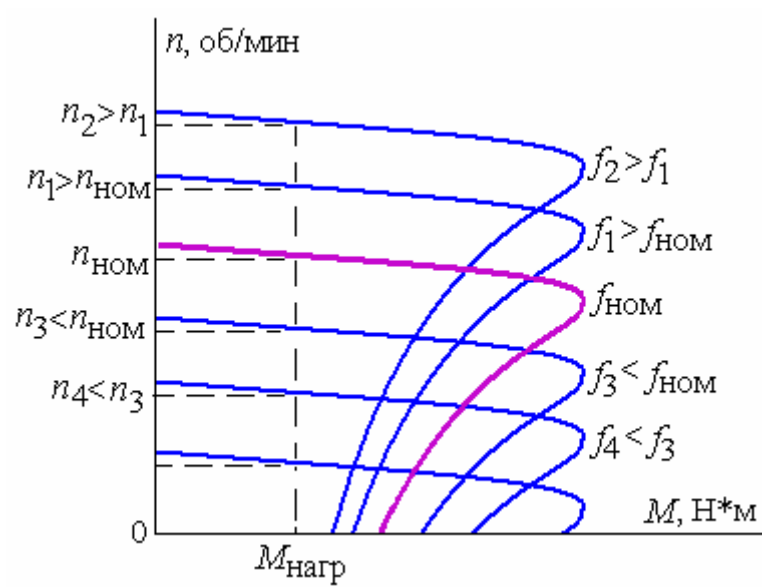


Рис. 25. Механические характеристики асинхронного двигателя при частотном регулировании

Учебное электронное текстовое издание

Проскуряков Валерий Степанович
Соболев Сергей Владимирович

Электротехника

Асинхронный двигатель

Учебное пособие

Рекомендовано РИС ГОУ ВПО УГТУ-УПИ

Электронный формат – PDF
Формат 60х90 1/8 Объем 1,9 уч.-изд. л.

Издательство ГОУ-ВПО УГТУ-УПИ
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19
e-mail: vpros@mail.ru

Информационный портал
ГОУ ВПО УГТУ-УПИ
<http://www.ustu.ru>