

1.3 АСИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

Асинхронные электродвигатели (АД) широко применяют в различных сферах промышленности, в том числе и в мехатронных системах. Существуют разные модификации: однофазные, двухфазные и трехфазные, с короткозамкнутым и фазным роторами.

1.3.1 УСТРОЙСТВО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Асинхронный электродвигатель состоит из неподвижной части (статора) и подвижной (ротора). Для увеличения сопротивления и снижения силы вихревых токов сердечники статора и ротора набираются из стальных пластин. На внутренней поверхности цилиндрического статора и на внешней поверхности цилиндра ротора (для АД с фазным ротором) имеются пазы, в которые уложены проводники обмоток соответственно статора (рис.1) и ротора. Для всех видов АД обмотки статора непосредственно присоединяются к внешней электрической сети (двух- или трехфазной).

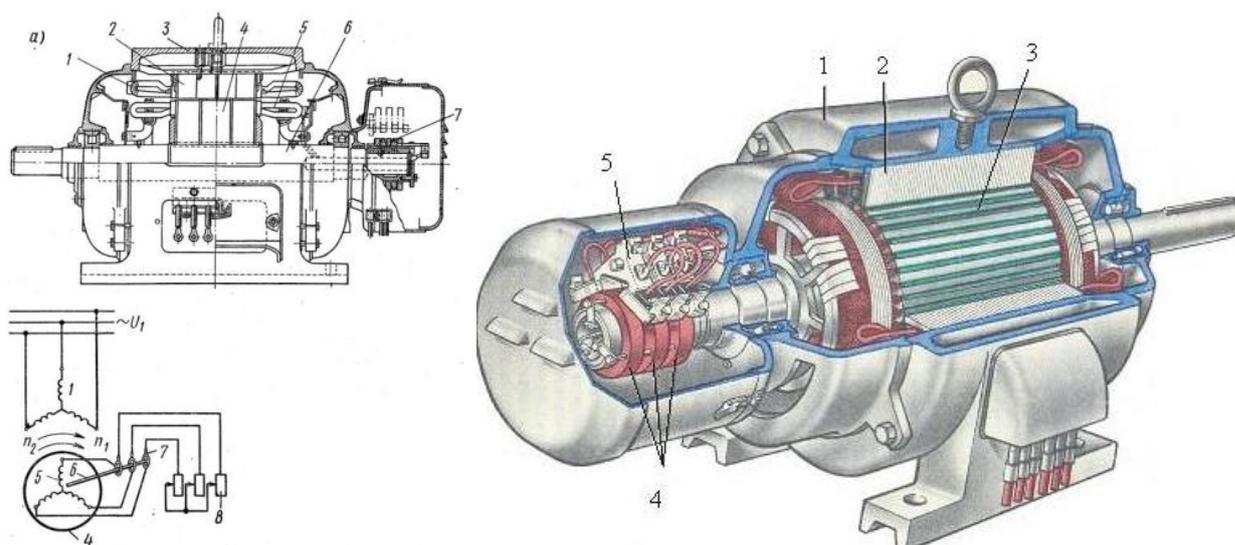


Рисунок 1 – Асинхронный электродвигатель с фазным ротором: а – устройство: 1 – обмотка статора; 2 – сердечник статора; 3 – корпус; 4 – сердечник ротора; 5 – обмотка ротора; 6 – вал; 7 – кольца; 8 – пусковой реостат; б – схема включения; в – общий вид: 1 – станина, 2 – обмотка статора, 3 – ротор, 4 – контактные кольца, 5 – щетки

Для двигателей с фазным ротором обмотки последнего подключаются к контактным кольцам коллектора и далее при помощи скользящих по ним щеток выводится наружу. Для АД с короткозамкнутым ротором его обмотка не имеет связи с внешними электрическими цепями, т.е. не нуждается в кон-

тактных кольцах, и выполняется в виде так называемой «беличьей клетки» (см. рис. 2). В каждом пазу ротора находится стержень, изготовленный из меди или алюминия. Стержни замыкаются между собой с торцевых сторон ротора кольцами из такого же материала. Такое устройство называется асинхронной машиной (АМ) с короткозамкнутым ротором. В асинхронных двигателях малой и средней мощности стержни и торцевые кольца вместе с лопастями вентилятора воздушного охлаждения выполняются путем заливки углублений на поверхности ротора расплавленным алюминием. (см. рис. 3).

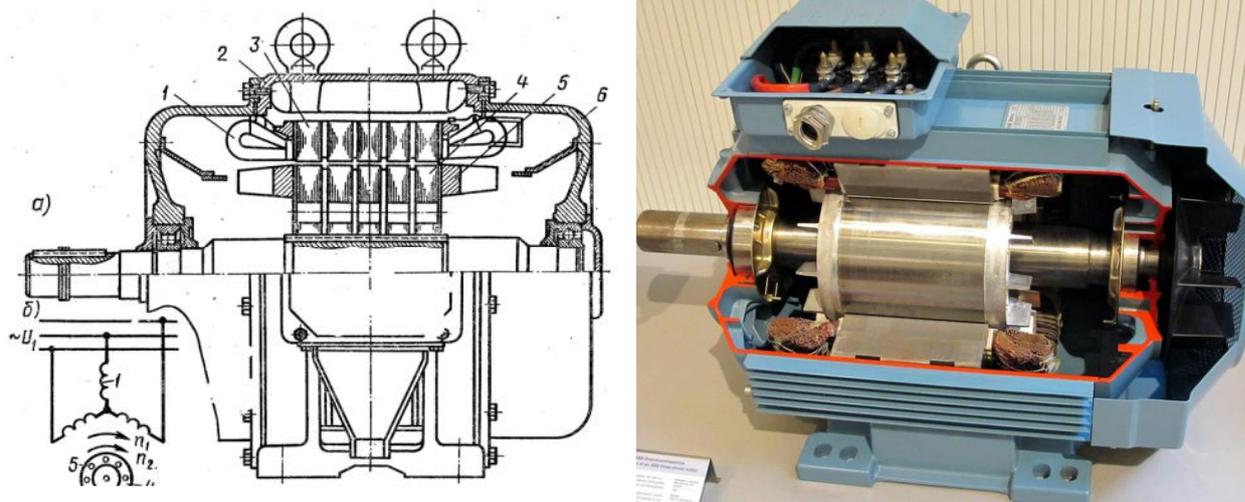


Рисунок 2 – Схема асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором:
 1 – обмотка статора; 2 – корпус; 3 – сердечник статора;
 4 – сердечник ротора; 5 – обмотка ротора («беличье колесо»);
 6 – подшипниковый щит

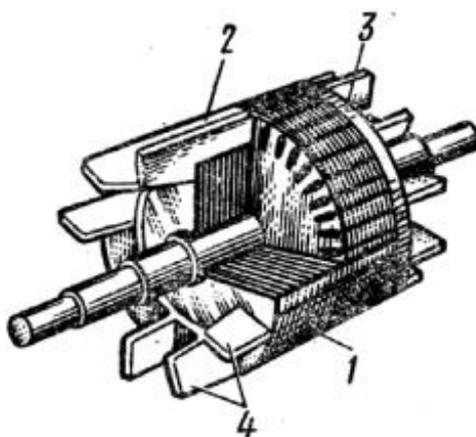


Рисунок 3 – Конструкция короткозамкнутого ротора: 1 – сердечник;
 2 – стержни; 3 – короткозамкнутое кольцо; 4 – лопасти
 вентилятора

Для снижения высокочастотных наводок, возникающих при работе двигателя, пазы ротора и(или) статора выполняют со скосом.

1.3.2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ

Магнитный поток Φ_1 , возникающий за счет тока i_1 с частотой f_1 в обмотке статора, при вращении со скоростью n_1 пересекает проводники витков обмотки ротора (или стержни короткозамкнутого ротора) и индуцирует в них электродвижущую силу. В обмотках (стержнях) возникают токи i_2 , частота которых при неподвижном роторе совпадает с частотой f_1 . В трехфазной обмотке ротора ток i_2 также трехфазный, с той же частотой. Этот ток создает свое вращающееся магнитное поле с потоком Φ_2 , направление и скорость вращения n_2 которого при неподвижном роторе такие же, как и в статоре:

$$n_2 = f_2 = f_1 = n_1 \text{ (об / с)} = (c^{-1}).$$

В результате взаимодействия магнитных потоков Φ_2 ротора с потоком статора Φ_1 возникают механические силы, создающие вращающий момент M . При пуске, когда скорость вращения ротора $n = 0$, возникает пусковой момент $M_{II} > 0$. Если этот момент больше статического момента на валу, создаваемого полезной нагрузкой двигателя $M_{II} > M_B$, ротор придет во вращение в направлении вращающегося поля с некоторой скоростью $n < n_1$, т.е. будет вращаться с отставанием относительно магнитного поля статора.

Отношение разности скорости вращения поля и ротора к скорости вращения поля статора называется скольжением:

$$S = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (S_{\%} = 100 \cdot S = \frac{n_1 - n}{n_1} 100, \%)$$

При пуске асинхронного двигателя скольжение будет максимальным и равным единице (при $n_2 = 0$). При синхронном вращении (скорости вращения поля статора и ротора одинаковы, т.е. $n_1 = n$) скольжение будет минимальным ($S = 0$). При $n = n_1$ магнитное поле статора относительно ротора становится неподвижным, ЭДС в обмотках не индуцируются и токи в них не возникают. Вращающий момент становится равным нулю. Поэтому нулевого скольжения асинхронный двигатель достичь не может, и в нормальном режиме работы справедливы соотношения: $0 < n < n_1$, а $1 > S > 0$. При совпадении направления вращения ротора и поля статора частота пересечения полем Φ проводников ротора пропорциональна скольжению, т.е. разности скоростей поля n_1 и ротора n . Поэтому частота тока i_2 в обмотках ротора

$$f_2 = n_1 - n.$$

Подставляя в это соотношение $n = n_1 (1 - S)$, получим

$$f_2 = n_1 - (1 - S) n_1 = S n_1 = S f_1$$

При $f_2 < f_1$ скорость вращения поля ротора относительно самого ротора:

$$n_{2P} = S n_1,$$

а скорость вращения поля ротора относительно статора:

$$n_{2C} = n + n_{2P} = n + S n_1 = (1 - S) n_1 + S n_1 = n_1.$$

Если скорость вращения ротора асинхронного двигателя превышает скорость вращения поля статора, а направления совпадают, то момент M , действующий на ротор асинхронного двигателя, будет тормозящим, и режим работы двигателя переходит в режим генератора. При этом он отдает энергию в сеть (при $n > n_1$ скольжение $S < 0$).

1.3.3. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ И РЕЖИМЫ ИХ РАБОТЫ

1.3.3.1. ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Основная характеристика асинхронного двигателя – это его *механическая характеристика (МХ)* – зависимость механического момента на его валу от угловой скорости вращения ротора (частоты вращения n) (см. рис. 4).

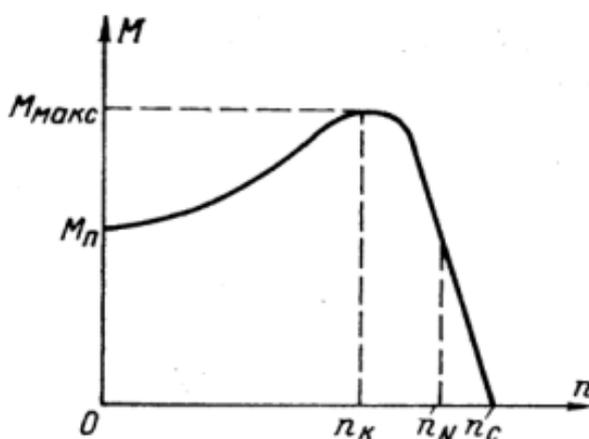


Рисунок 4 – Механическая характеристика трехфазного асинхронного двигателя

При этом напряжение и частота питающей обмотки статора постоянны. На МХ имеются характерные точки: пусковой момент $M_{п}$, скорость холостого хода (синхронная скорость n_c), номинальная скорость вращения n_n , максимальный момент, развиваемый асинхронным двигателем. Для двигателя с фазным ротором можно построить механические характеристики, которые зависят от сопротивлений в цепи обмоток ротора (см. рис. 5).

Основные характеристики двигателя, изготовленного в соответствии с международными стандартами IEC 34-1/9, IEC 85, DIN 57530/VDE 0530-1291, находятся на шильдике (металлической пластинке, прикрепленной к корпусу двигателя).

В качестве примера рассмотрим следующие обозначения, которые могут быть приведены на шильдике:

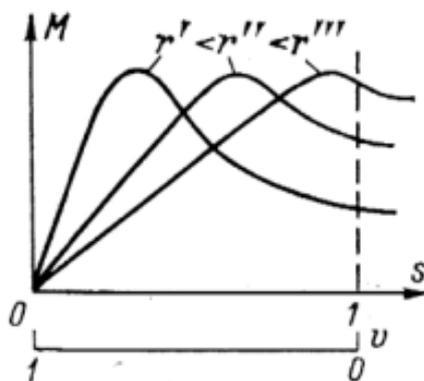


Рисунок 5 – Механические характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором при различном активном сопротивлении в цепи обмоток ротора

Таблица Основные характеристики, указываемые в паспорте электродвигателя

№	Обозначение на шильдике (паспорте) электродвигателя	Расшифровка
1	Mot.X	Трехфазный электродвигатель с высотой X , мм (от середины вала до поверхности)
2	$X1/X2, A$	Номинальный ток при соединении звездой $X1, A$. Номинальный ток при соединении треугольником $X2, A$.
3	$N \text{ rpm}$	Номинальная скорость вращения ротора электродвигателя N , об/мин
4	$Y/\Delta 380/220 \text{ V}$	Линейное напряжение при соединении звездой для 380 V и для соединения треугольником для 220 V
5	$\cos\varphi 75$	Значение коэффициента мощности электродвигателя $0,75$
6	$P \text{ kW}$	Номинальная мощность на валу электродвигателя, $P \text{ кВт}$
7	$I_s.Kl. \text{ B:}$	Допускаемая температура обмоток электродвигателя при продолжительном режиме работы. Существуют следующие классы: $E = 120^\circ C$ $B = 130^\circ C$ (стандарт) $F = 155^\circ C$ $H = 180^\circ C$
8	IP54	Степень защищенности электродвигателя IP54 = пыле- брызгостойкая обшивка
9	50 Hz	Частота сети 50 Гц
10	VDE 0530/84	Сертификат соответствия VDE

Номинальный момент двигателя может быть легко вычислен с использованием информации на шильдике:

$$M = \frac{P(kW)}{n(rpm)} \cdot 9550 = \frac{0,37 \cdot 9550}{1410} = 2,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Полная мощность определяется следующей формулой:

$$S = \sqrt{3} I_1 U_1 = \sqrt{3} \cdot 380 \text{ В} \cdot 1,1 \text{ А} = 724 \text{ В} \cdot \text{А}$$

Активная мощность рассчитывается так:

$$P = S \cos\phi = 724 \text{ Вт} \cdot 0,75 = 543,0 \text{ Вт}$$

1.3.3.2. РЕЖИМЫ РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Существует три основных режима работы двигателя:

- продолжительный режим – *S1*;
- кратковременный – *S2*;
- повторно-кратковременный режим – *S3*.

В течение продолжительного режима *S1* время работы двигателя с номинальной мощностью настолько велико, что устанавливается температурный баланс между корпусом двигателя и окружающей средой (при постоянной температуре окружающей среды). Этот режим является обычным для стандартных двигателей, постоянно нагруженных своим номинальным моментом.

Во время кратковременного режима *S2* время работы с номинальной мощностью так мало, что температурный баланс не может быть достигнут. В течение длительных пауз двигатель полностью охлаждается.

Во время повторно-кратковременного режима *S3* паузы так малы, что двигатель не успевает охладиться до комнатной температуры (но среднее значение температуры остается постоянным).

Существует также перемежающийся режим с периодической нагрузкой *Sб*, когда двигатель не может охладиться в течение интервалов холостого хода до окружающей температуры.

1.3.4. ПУСК АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Для нормального пуска АД должны быть выполнены следующие основные требования:

а) пусковой момент должен превышать тормозящий момент M_b , создаваемый механической нагрузкой: $M_n > M_b$;

б) величина пускового тока не должна быть чрезмерно большой; в) схема пуска должна быть максимально простой (рис. 6). Основные способы пуска АД:

- прямой пуск (подключение обмоток статора к сетевому напряжению);

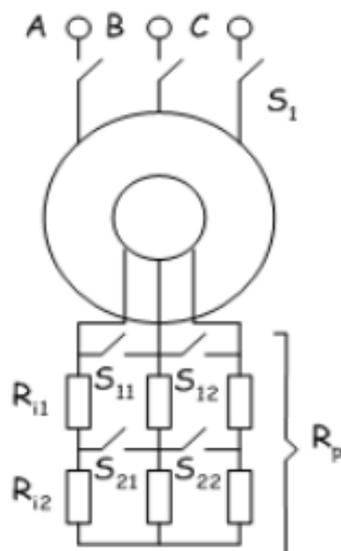


Рисунок 6 – Пуск асинхронного электродвигателя с фазным ротором

- пуск при пониженном напряжении на статорных обмотках (для снижения пускового тока);

- пуск при помощи пускового реостата в цепи АД с фазным ротором.

Первый способ применяется обычно при пуске асинхронного двигателя малой мощности с короткозамкнутым ротором. Статорные обмотки выдерживают пусковой ток при номинальном напряжении. Недостатком этого способа является малая величина пускового момента M_{II} , а также что при пуске – ток I_{II} в 5 ... 7 раз больше номинального тока I_H . Второй способ желательно применять при пуске на холостом ходу или при малом моменте нагрузки M_B .

При этом способе применяются различные схемы:

- реакторный пуск (включение при пуске в цепь обмоток статора реактивных сопротивлений для уменьшения питающего напряжения на обмотках статора);

- включение на период пуска активных сопротивлений в цепь статора (с той же целью);

- автотрансформаторный пуск (питание обмоток статора от регулируемого трехфазного автотрансформатора);

- переключением после разгона ротора обмоток статора со «звезды» на «треугольник».

Третий способ используется при пуске АД с фазным ротором. При некотором значении добавочного сопротивления r_d''' в цепи ротора можно производить пуск при максимально возможном вращающем моменте, а по мере разгона, постепенно уменьшать это сопротивление до нуля. Несмотря на все преимущества этого способа, он требует более сложной конструкции ротора.

Именно поэтому двигатель с фазным ротором обладает более высокой стоимостью. Такой способ используется при тяжелых условиях пуска.

1.3.5. АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ С ПОВЫШЕННЫМ ПУСКОВЫМ МОМЕНТОМ

Для повышения пускового момента АД применяются две конструктивные разновидности КЗ-роторов:

- а) двойная «беличья клетка»;
- б) АД с ротором, имеющим глубокие пазы.

Первая разновидность имеет две «беличьи клетки» на роторе: наружную и внутреннюю. Наружная выполнена из более тонких стержней и обладает повышенным активным сопротивлением. Она выполняет роль пусковой обмотки.

Внутренняя – является рабочей, ее стержни имеют большее сечение и обладают меньшим сопротивлением. Индуктивное сопротивление $X_{LП}$ пусковой обмотки мало, так как она лежит практически на поверхности якоря, и потокосцепление ее с полем рассеяния мало. Напротив, индуктивная составляющая X_{LP} полного сопротивления рабочей обмотки велика, поскольку она расположена в толще ферромагнетика и пронизывается полным магнитным потоком.

При пуске частота тока в роторе f_2 , велика ($f_2 = f_1$), и $X_{LП} \ll X_{LP}$, полное сопротивление $Z_{П}$ много меньше Z_P , а его активная составляющая много больше индуктивной. При этом большая часть тока якоря АД будет протекать по наружной (пусковой) обмотке, и в этом токе активная составляющая много больше реактивной. А поскольку вращающий момент в АД создается именно активной составляющей тока ротора, пусковой момент достигает значительной величины.

По мере разгона ротора частота тока f_2 уменьшается, поэтому изменяется и распределение токов между клетками: реактивные сопротивления уменьшаются и становятся незначительными по сравнению с активными, ток переходит в рабочую клетку, поскольку $R_P \ll R_{П}$. Глубокопазный двигатель – его принцип действия основан также на вытеснении тока при пуске. Стержни «беличьей клетки» занимают объем пазов большой глубины, и наружные слои стержней играют роль наружной клетки (пусковой обмотки) в предыдущей конструкции, а внутренние, глубинные – роль внутренней (рабочей) обмотки.

Так же, как и в варианте с двойной «беличьей клеткой», при разных скоростях ротора n изменяется соотношение между активной и реактивной составляющими полного комплексного сопротивления обмотки, за счет чего ее сопротивление при пуске различно.

1.3.6. РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Регулирование скорости вращения асинхронных двигателей позволяет получить следующие преимущества:

- возможность управления при максимальной скорости;
- постоянное улучшение технологий регулирования скорости вращения с одновременным понижением цены;
- асинхронные машины нетребовательны к техобслуживанию;
- возможно эксплуатирование во взрывоопасной зоне;
- высокий коэффициент мощность/масса для асинхронного двигателя;
- низкая стоимость асинхронных двигателей.

Основные сферы применения преобразователей частоты следующие:

- роботы и транспортные системы;
- упаковочные машины;
- текстильные машины;
- насосы, вентиляторы, компрессоры;
- конвейер и транспортное оборудование;
- механические и деревообрабатывающие станки и механизмы;
- оборудование для белильной и бумажной промышленности.

Частота вращения ротора АД определяется формулой

$$n = n_1(1 - S) = f_1(1 - S)/p,$$

где p – число пар полюсов обмотки статора.

Анализ приведенной выше формулы позволяет выявить три основных метода регулирования скорости АД:

- изменение частоты f_1 ;
- изменение скольжения S ;
- изменение числа пар полюсов p .

1.3.6.1. ЧАСТОТНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ

Данный способ известен давно и в настоящее время является основным. Как правило, он используется для управления асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Для его осуществления требуется источник электрического тока переменной частоты, в качестве которого могут быть использованы, например, преобразователи частоты или синхронный генератор переменного тока с 100 переменной скоростью вращения. В настоящее время существует множество видов частотных преобразователей для регулирования скорости вращения ротора асинхронного электродвигателя. На ри-

сунке 7 внешний вид современного частотного преобразователя. Как правило, современные частотные преобразователи имеют множество функций, основные из которых следующие: автоматическая настройка, установка вольтчастотных характеристик, выбор кривой характеристик разгона/замедления, ограничение верхнего/нижнего пределов частоты, шестиуровневый многоскоростной режим, настройка стартовой частоты, настройка несущей частоты (0,5 ... 16 кГц), П-, ПИ- и ПИД-регулирование скорости вращения ротора двигателя, настройка электронной тепловой защиты, попытка повторного пуска, автоматический подъем момента, отображение архива аварийных отключений, блокировка программы, отображение преобразования частоты, защита от непреднамеренного пуска. На рисунке 1.38 показана блок-схема силовой части преобразователя (инвертора) с промежуточным звеном постоянного тока. Выпрямитель состоит из неуправляемой одно- или трехфазной мостовой схемы. Однофазный выпрямитель используется только для двигателей низких мощностей.



Рисунок 7 – Общий вид частотного преобразователя Hyundai N700E 004HF 0,4 кВт, 380 В

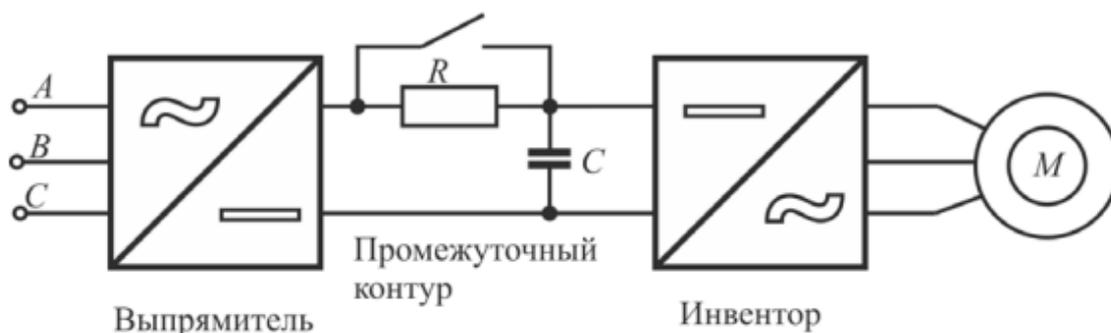


Рисунок 8 – Блок-схема силовой части частотного преобразователя

Выпрямитель преобразует переменное напряжение сети в постоянное напряжение. Далее оно сглаживается в промежуточном контуре конденсаторным фильтром. При заряде конденсатора может протекать очень большой кратковременный ток, что создает опасность вывода из строя входного предохранителя или диодов выпрямителя. Для предотвращения негативных последствий чрезмерно большой силы зарядного тока включается балластный резистор R . После заряда конденсатора резистор шунтируется контактным реле (или другим способом). Конденсатор имеет большую емкость, необходимую для сглаживания напряжения на выходе выпрямителя. После выключения инвертора из сети, конденсатор сохраняет рабочее напряжение в течение определенного периода времени. Это отображается зарядным светодиодом. Для преобразования постоянного тока в переменный на выходе устанавливается инвертор. Для этого используются транзисторы, которые работают в переключающем режиме. В конце прошлого века наиболее часто применялись биполярные транзисторы с малыми частотами переключения (до 2 кГц).

Сегодня используются полевые транзисторы с низкими потерями, а также IGBT транзисторы (от англ. Insulated-gate bipolar transistor) – трехэлектродные силовые электронные приборы, используемые, в основном, как мощные электронные ключи в импульсных источниках питания, инверторах, в системах управления электрическими приводами). Эти транзисторы обеспечивают частоты переключения до 16 кГц и очень низкий уровень шума. Как видно из рис. 9, ток через обмотку двигателя может протекать только тогда, когда, по меньшей мере, один из верхних ($T1, T3$ и $T5$) и один из нижних транзисторов ($T4, T6$ и $T2$) включены.

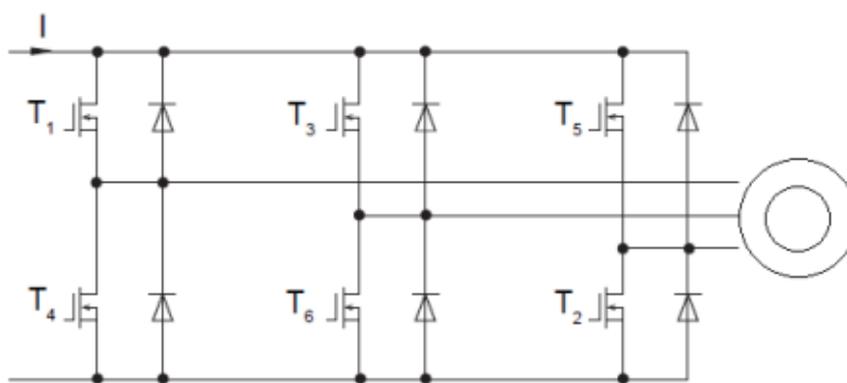


Рисунок 9 – Принципиальная схема инвертора

Одновременно включены три транзистора. Диаграмма их включения показана на рис. 10. Как видно из диаграммы инвертор восстанавливает в об-

мотках статора двигателя сдвиг по фазе между токами, равный 120° , соответствующий симметричной трехфазной сети.

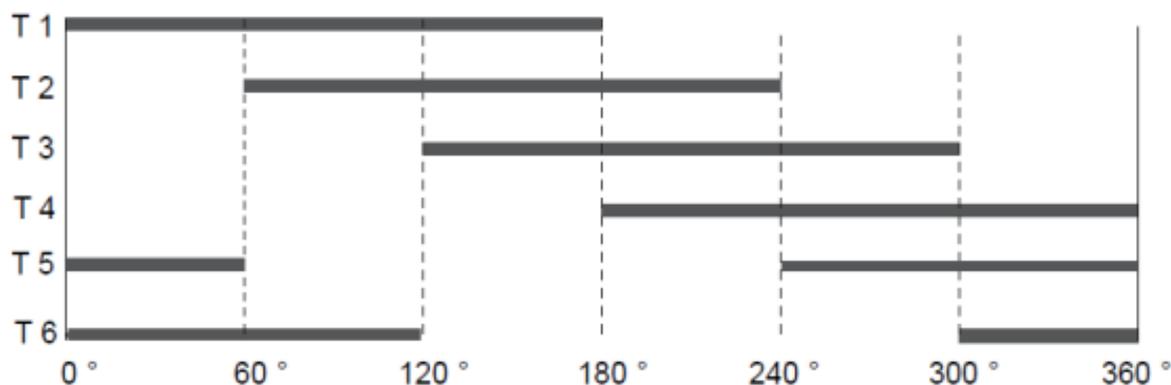


Рисунок 10 – Диаграмма открывания транзисторов инвертора

Из-за индуктивности двигателя ток не может резко упасть до нуля, когда транзистор выключается. По этой причине в схему включаются антипараллельные диоды, которые коммутируют (пропускают) токи в момент выключения транзистора, таким образом, защищая его (см. рис. 9). Частота тока в обмотках статора зависит от длительности цикла срабатывания выходных ключей инвертора (рис. 10). Амплитуда определяется величиной отношения времени включения ко времени выключения транзисторов. Это отношение при широтно-импульсной модуляции синусоидального сигнала делает возможным получить синусоидальную форму с минимальным числом гармоник (см. рис. 1.11).

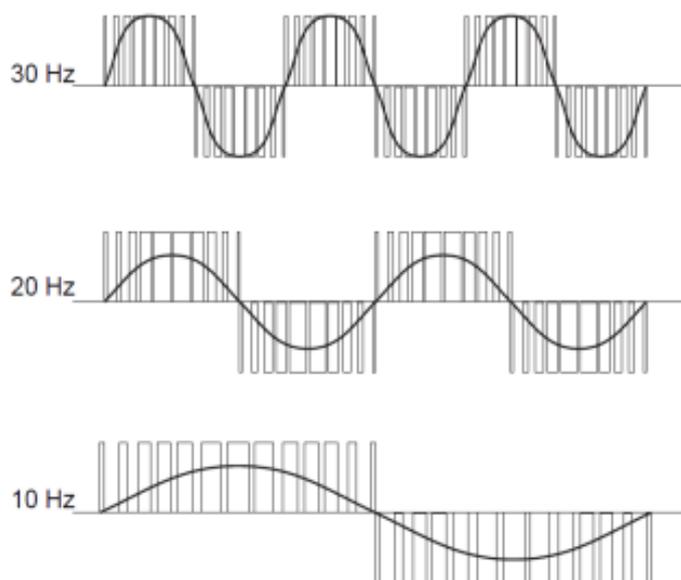


Рисунок. 11 – Преобразование импульсного управляющего сигнала в синусоидальный выходной ток инвертора

Развиваемый АД M_{max} пропорционален $(U_1/f_1)^2$, поэтому для поддержания неизменной так называемой перегрузочной способности двигателя, т.е. отношения M_{max} / M_B , необходимо при изменении частоты f_1 одновременно изменять и напряжение питания статора U_1 так, чтобы отношение $U_1/f_1 = const$, если момент нагрузки на валу M_B не зависит от скорости вращения n , или по другим законам, определяемым зависимостью $M_B = f(n)$.

1.3.6.2. ИЗМЕНЕНИЕ ЧИСЛА ПАР ПОЛЮСОВ

Такой метод регулирования дает возможность получить ступенчатое изменение частоты вращения. Асинхронные двигатели, реализующие такую возможность управления, называются многоскоростными. Существуют два способа регулирования скорости:

- в пазах статора двигателя укладываются несколько обмоток, имеющих разное число пар полюсов. При каждом значении скорости работает только одна из них;

- используется специальная обмотка, позволяющая получить разное число пар полюсов путем переключения схемы соединения. При любой скорости используются все обмотки статора (на рис. 12) приведена схема переключения обмоток асинхронного двигателя, позволяющая реализовать число пар полюсов p_1 или p_2). Недосток такого способа регулирования скорости – большие габариты двигателя, стоимость, сложность коммутационных устройств, увеличенная масса.

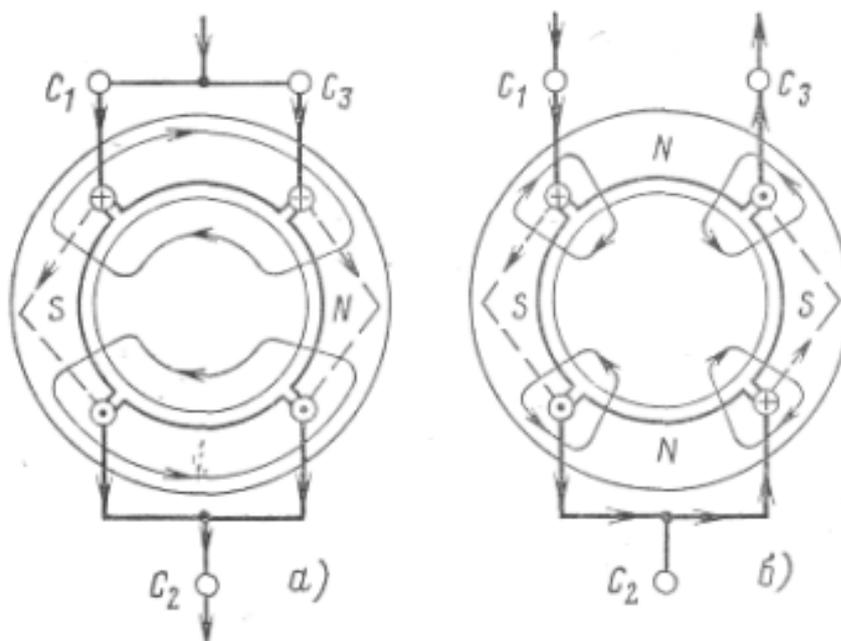


Рисунок 12 – Статор асинхронного двигателя: а – с одной парой полюсов; б – с двумя парами полюсов

1.3.6.3. РЕГУЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЕМ СКОЛЬЖЕНИЯ

Для АД с КЗ-ротором возможны два способа:

а) изменение величины питающего напряжения U_1 . Для получения более широкого диапазона регулирования активное сопротивление обмотки («клетки») ротора должно быть достаточно велико, т.е. механические характеристики должны быть «мягче». Очевидно, что данный способ может использоваться и для АД с фазным ротором. Для регулирования питающего напряжения U_1 используются автотрансформатор в первичной цепи или реостат. При таком способе регулирования снижается КПД, поэтому он применяется для регулирования маломощных АД;

б) импульсное регулирование скорости. Данный способ осуществляется путем периодического включения статорных обмоток в сеть и отключения их, либо периодического шунтирования резисторов, включенных последовательно в цепи питания статора. При этом двигатель время работает в переходном режиме разгон – торможение. Используется этот способ обычно для управления маломощными ИД.

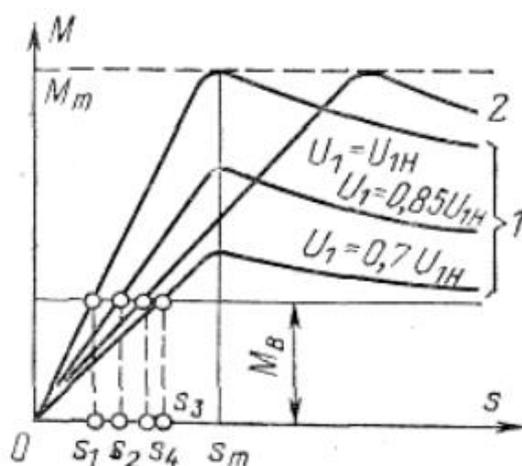


Рисунок 13 – Механические характеристики при регулировании частоты вращения ротора: 1 – при различных напряжениях U_1 ; 2 – при введении в цепь обмотки ротора дополнительного активного сопротивления

Для АД с фазным ротором имеется возможность включения регулирующих устройств во вторичную цепь машины – цепь ротора. Возможны два варианта:

а) включение реостата в цепь ротора. Схема – та же, что и при реостатном пуске АД с фазным ротором. При увеличении сопротивления регулировочного реостата R_p механическая характеристика становится более мягкой, и скольжение S при неизменном моменте нагрузки на валу M_B увеличивается (скорость n

уменьшается). К недостаткам такого способа регулирования скорости можно отнести наличие потерь в R , «мягкость» механической характеристики, зависимость диапазона регулирования скорости n от величины нагрузки M_B ;

б) введение добавочной ЭДС во вторичную цепь АД (цепь ротора). Этот способ используется достаточно редко в так называемых каскадных соединениях при больших мощностях электрических машин.

1.3.7. РЕЖИМЫ ТОРМОЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ И СПОСОБЫ ОСТАНОВА

Самый простой способ останова – отключение его от питающей сети (выбег электродвигателя). При этом время до полного останова определяется характеристиками двигателя и его нагрузки. Однако очень часто выбег недопустим. Особенно это касается мехатронных и робототехнических систем. Торможение в течение заданного интервала времени обеспечивает генераторный способ, заключающийся в том, что инвертор с необходимой скоростью уменьшает выходную частоту тока в статорных обмотках двигателя. Скорость вращения ротора превышает скорость вращения магнитного поля статора. Возникает генераторный режим работы двигателя и торможение ротора. В случае нагрузки с большим моментом инерции может потребоваться применение внешнего тормоза, подключение которого осуществляет специальная контролирующая схема.

Преимуществом генераторного торможения является возможность управления временем останова, высокий тормозной момент и обеспечение плавности торможения. Недостаток заключается в том, что энергия выделяется в преобразователе, и в случае быстрого останова или большого момента инерции нагрузки для избежания перегрева встроенного резистора контура постоянного тока преобразователя, необходимо использование внешнего сопротивления.

Существует торможение постоянным током (динамическое торможение). Для этого с обмотки статора двигателя снимают переменное напряжение, выпрямляют его и на одну или две фазы подают постоянное напряжение. При этом магнитное поле будет вызывать замедление, а затем и удержание ротора в неподвижном состоянии. Преимуществом динамического торможения является выделение электрической энергии в роторе двигателя, что делает ненужным использование тормозного сопротивления, и плавным останов. Но при этом время торможения становится величиной неопределенной. Эффективность торможения в этом случае по сравнению с генераторным методом составляет 30 ... 40%. При комбинированном способе торможения используется комбинация двух описанных способов, т.е. на переменную

составляющую выходного напряжения преобразователя накладывается постоянная составляющая. Этот способ торможения сочетает в себе преимущества обоих электрических способов торможения и позволяет эффективно тормозить электродвигатель за короткое время выделения тепла в преобразователе.

Асинхронные приводы в мехатронных системах становятся все более популярными с каждым днем. Это напрямую связано с развитием электронной и в первую очередь, полупроводниковой техники, применяемой для создания инверторов. Использование инверторов обеспечивает следующие возможности:

- возможность управления при максимальной скорости;
- асинхронные машины нетребовательны к техобслуживанию;
- постоянное улучшение технологии частотного преобразователя с одновременным уменьшением их стоимости;
- возможно эксплуатирование во взрывоопасной зоне;
- высокий коэффициент мощность/масса для асинхронного двигателя;
- низкая стоимость асинхронных двигателей.

1.3.8 КОЛЛЕКТОРНЫЕ ДВИГАТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Коллекторным называется двигатель, у которого хотя бы одна обмотка ротора соединена со щётками и коллектором. Коллектором называют часть двигателя, контактирующую со щётками. Этот узел обеспечивает передачу электроэнергии в рабочую часть агрегата.

Коллекторные электродвигатели бывают:

- постоянного тока;
- переменного тока;
- универсальные.

Характеристики и свойства коллекторных двигателей переменного тока аналогичны характеристикам двигателей постоянного тока. Благодаря хорошим механическим и регулировочным характеристикам маломощные двигатели находят широкое применение в промышленных и бытовых устройствах, где требуется получить высокие скорости вращения (до 30 000 *об/мин*) и возможность плавного регулирования скорости в большом диапазоне.

Типичными примерами таких устройств являются двигатели бытового электроинструмента (дрели, лобзики, шлифовальные машины). Коллекторные электродвигатели переменного тока конструктивно отличаются от машин постоянного тока (рис. 14).

Основное отличие заключается в выполнении магнитопровода статора из набора пластин и обусловлено тем, что магнитный поток индуктора является переменным.

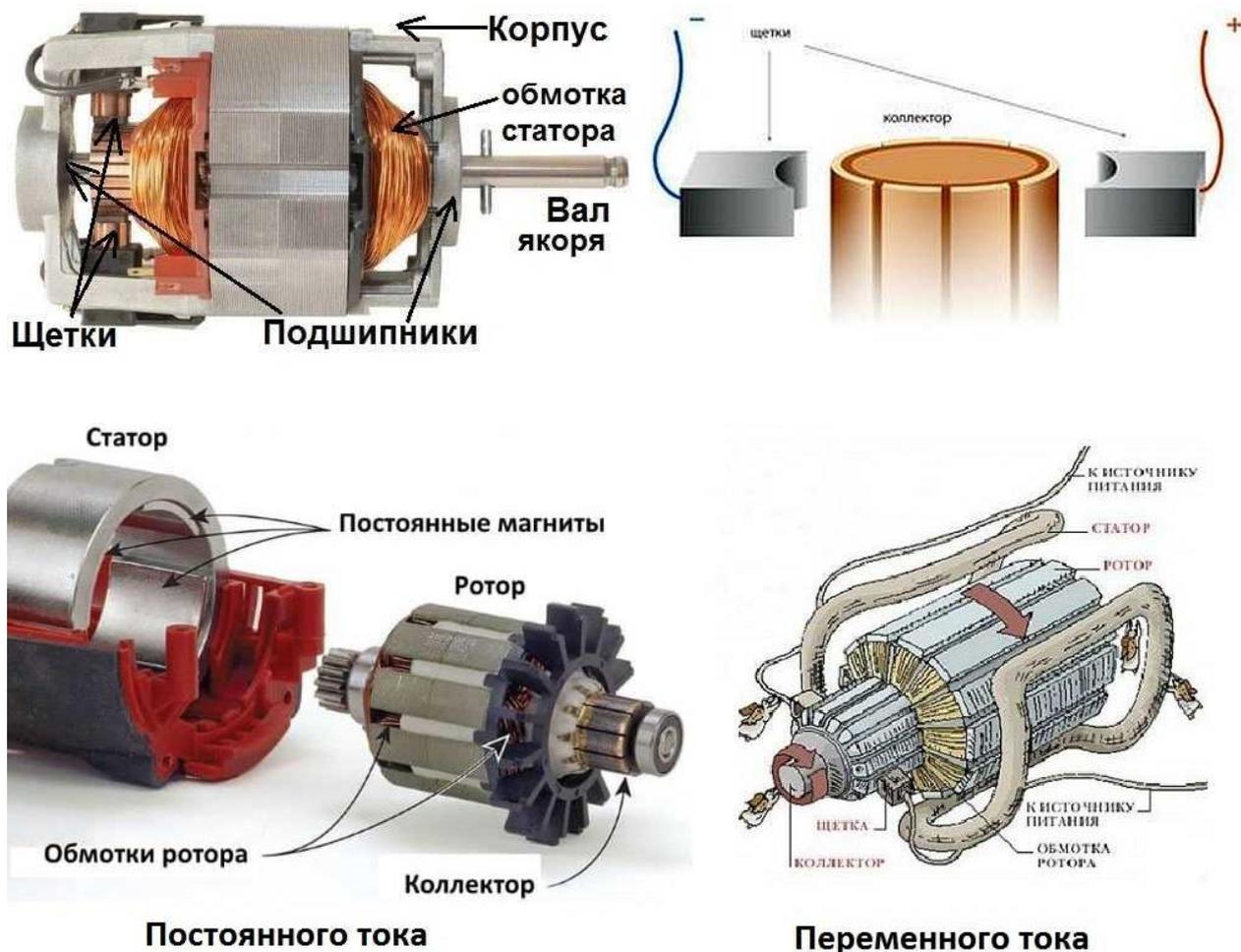


Рисунок 14 – Основные узлы коллекторных электродвигателей: а – постоянного тока; б – переменного тока

Основное отличие заключается в выполнении магнитопровода статора из набора пластин и обусловлено тем, что магнитный поток индуктора является переменным. Условия коммутации при работе на переменном токе хуже, чем на постоянном, поэтому самым ненадежным элементом конструкции таких электродвигателей является щеточный узел. Обычно он допускает многократную замену щеток.

Кроме коллекторных электродвигателей, рассчитанных только на переменное напряжение питания, выпускаются также универсальные коллекторные электродвигатели (рис. 15).

Это электродвигатели малой мощности последовательного возбуждения с секционированной обмоткой возбуждения, благодаря чему они могут работать как на постоянном, так и на переменном стандартных напряжениях примерно с одинаковыми свойствами и характеристиками.

Отличительной особенностью таких двигателей является секционирование обмотки возбуждения.



Рисунок 15 – Универсальный коллекторный электродвигатель, общий вид

Для получения одинаковых механических характеристик на токе разного рода секционированную обмотку возбуждения на постоянном токе включают полностью, а на переменном – частично. Двигатель присоединяют к сети постоянного тока при помощи зажимов с обозначениями «+» и «-», а к сети переменного тока – с обозначениями «~». В зависимости от конструкции двигателя обмотка возбуждения может быть соединена с якорем внутри машины или может иметь самостоятельные наружные зажимы, что удобнее для изменения направления вращения якоря путем перемены мест проводов, подходящих к его зажимам или к зажимам обмотки возбуждения.

Статор универсальных электродвигателей также собирают из тонких изолированных друг от друга листов электротехнической стали с выступающими полюсами. На них размещают по две секции обмотки возбуждения. Эти секции соединяют последовательно с якорем и располагают по обе стороны от его выводов, что снижает радиопомехи от искрообразования на коллекторе под щетками.

Якорь универсальных двигателей устроен так же, как и якорь машин постоянного тока. При работе электродвигателя от сети с номинальным напряжением и при номинальной нагрузке на валу скорость якоря при различном роде тока одинакова. Однако при перегрузке двигателя, присоединенного к сети переменного напряжения, скорость якоря уменьшается интенсивнее, чем при работе его от сети постоянного напряжения, т.е. механическая характеристика для переменного тока мягче. Поскольку универсальные

коллекторные электродвигатели имеют последовательное возбуждение, для них также, как и для обычных машин постоянного тока, характерно значительное увеличение частоты вращения при работе на холостом ходу. Скорость якоря может превысить номинальную в 4 раза и выше, а это недопустимо из-за значительных центробежных сил, которые могут разрушить якорь. По этой причине режим холостого хода допустим только для двигателей малой номинальной мощности с относительно большими механическими потерями, ограничивающими скорость якоря. Двигатели с незначительными механическими потерями всегда должны нести нагрузку не менее 25% номинальной. Номинальный КПД коллекторных электродвигателей зависит от их номинальной мощности, быстроходности и рода тока. Так, у двигателей номинальной мощностью до 100 Вт КПД достигает до 0,55, мощностью до 600 Вт – до 0,70 и выше. Работа на переменном токе всегда сопровождается снижением КПД, что вызвано большими магнитными и электрическими потерями. Номинальный коэффициент мощности этих двигателей составляет 0,70...0,90.

1.3.8.1 ОБЩЕЕ УСТРОЙСТВО КОЛЛЕКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Как и любой электродвигатель, коллекторный преобразует электрическую энергию в механическую. Он состоит из неподвижной части – статора и подвижной – ротора (якоря). В статоре располагаются обмотки возбуждения, ротор отвечает за передачу – вал. С одной стороны, на валу размещён коллекторный узел, с помощью которого на обмотки ротора передаётся электрическая энергия

Статор состоит из корпуса, который защищает узлы электродвигателя от повреждений. Сверху и снизу корпуса крепятся магнитные полюса. Они необходимы для поддержания магнитного потока между статором и ротором.

1.3.8.2 ЯКОРЬ КОЛЛЕКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Якорь (ротор) коллекторного двигателя состоит из вала, на который насаживается сборный магнитопровод (рис. 16). С одной стороны, на вал крепится коллекторный узел, с другой, лопасти вентилятора. Для обеспечения лёгкого вращения и для фиксации в корпусе на вал с двух сторон надеваются подшипники. Для нормальной работы электродвигателя, необходимо чтобы ротор был отлично сбалансирован. Потому к изготовлению этой части подходят более ответственно.

Сердечник ротора собирается из металлических пластин, отштампованных из магнитного металла. Толщина пластин 0,35 ... 0,50 мм, каждая из них залита слоем диэлектрического лака, для избавления от паразитных токов.

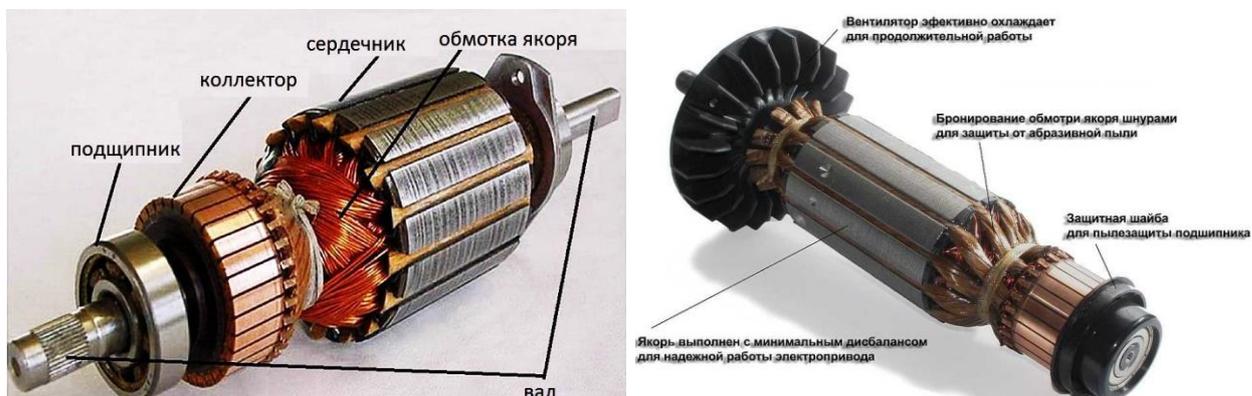


Рисунок 16 – Якорная обмотка универсального коллекторного электродвигателя

Пластины по внешнему краю имеют пазы, в которые затем укладываются витки медной проволоки. Эти пластины насаживаются на вал и закрепляются на нём, собирается пакет требуемого размера. Эта система является магнитопроводом.

В пазы магнитопровода укладываются витки медного обмоточного провода. Выходы обмоток выводятся на коллекторный узел, где и происходит их переключение.

Коллекторный узел стоит рассмотреть подробнее. Иначе понять, как вращается ротор, сложно. Коллектор имеет цилиндрическую форму и набран из медных пластин (иногда называют ламелями) (рис. 17), которые изолированы друг от друга слюдяными или текстолитовыми прокладками. Нет электрического контакта и с осью вала, к которому он крепится.

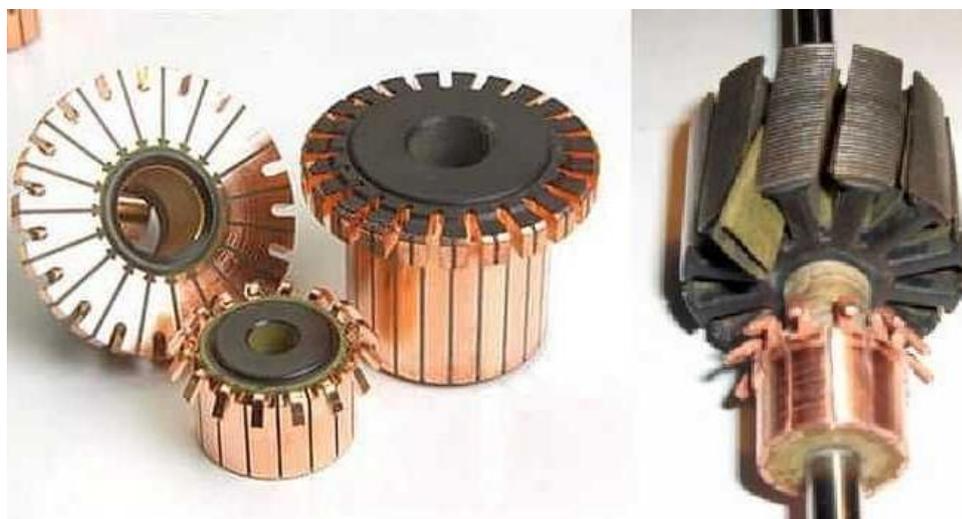


Рисунок 17 – Устройство коллектора

Коллектор имеет вид цилиндра, который набран из медных пластин. Пластины сделаны в виде секторов, разделены диэлектрическими прокладками.

Коллектор собран из медных секторов и без обмотки электрически друг с другом не связанных. К каждой пластине коллектора крепится вывод одной рамки обмотки ротора. К плоскости двух противоположных рамок коллектора прижимается две щетки. Они плотно прилегают к поверхности медной пластины коллектора, что даёт хороший контакт. На эти щётки подаётся потенциал, который и передаётся в тот виток обмотки ротора, который подключён к этим пластинам.

Так как ротор с некоторой скоростью вращается, одна пара пластин сменяется другой. Таким образом, напряжение передаётся на все обмотки ротора. При этом возникающие друг за другом поля поддерживают вращение ротора, «проталкивая» его в нужном направлении.

1.3.8.3 ПРИНЦИП РАБОТЫ УНИВЕРСАЛЬНОГО КОЛЛЕКТОРНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Принцип действия не отличается от других электродвигателей, ротор начинает вращаться в магнитном поле благодаря наведенным на нём токам.

Если в поле постоянного магнита ввести прямоугольную рамку, под действием возникающего в ней тока она начинает вращение. Направление вращения определяется по правилу буравчика. Для постоянного поля оно гласит так, если ввести правую руку в поле так, чтобы магнитные линии входили в ладонь, вытянутые пальцы укажут направление движения (рис. 18).

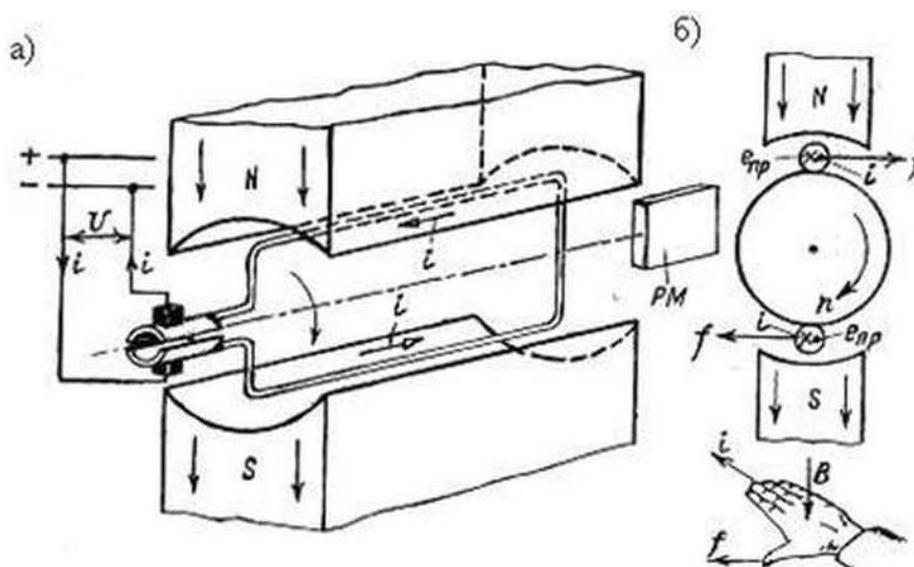


Рисунок 18 – Принцип работы коллекторного электродвигателя

Если посмотреть на устройство ротора, то видим, что каждая обмотка представляет собой такую рамку. Только состоит она не из одного провода, а из нескольких, но сути это не меняет. При помощи коллекторного узла, в какой-то момент времени, обмотка подключается к питанию, по ней протекает ток и вокруг проводника возникает магнитное поле. Оно взаимодействует с полем статора. В зависимости от типа, стоят там постоянные магниты или тоже протекает постоянный ток в обмотках, генерируя на полюсах собственное магнитное поле. Поля ротора и статора рассчитаны так, что при взаимодействии они «проталкивают» ротор в нужном направлении.

Чем больше напряжение подается на обмотки ротора, тем более мощное поле генерирует статор, тем сильнее их взаимодействие и быстрее крутится ротор, так как его толкают с большей силой. Если напряжение уменьшить, взаимодействие меньше, результирующая скорость вращения тоже. Все что нужно регулировать напряжение, а это может даже простой потенциометр (переменное сопротивление).

Достоинства и недостатки

Преимущества коллекторных электродвигателей:

- простота конструкции;
- высокая скорость до 10000 об/мин;
- большой крутящий момент даже на малых оборотах;
- невысокая стоимость;
- возможность регулировать скорость в широких пределах;
- невысокие пусковые токи и нагрузки.

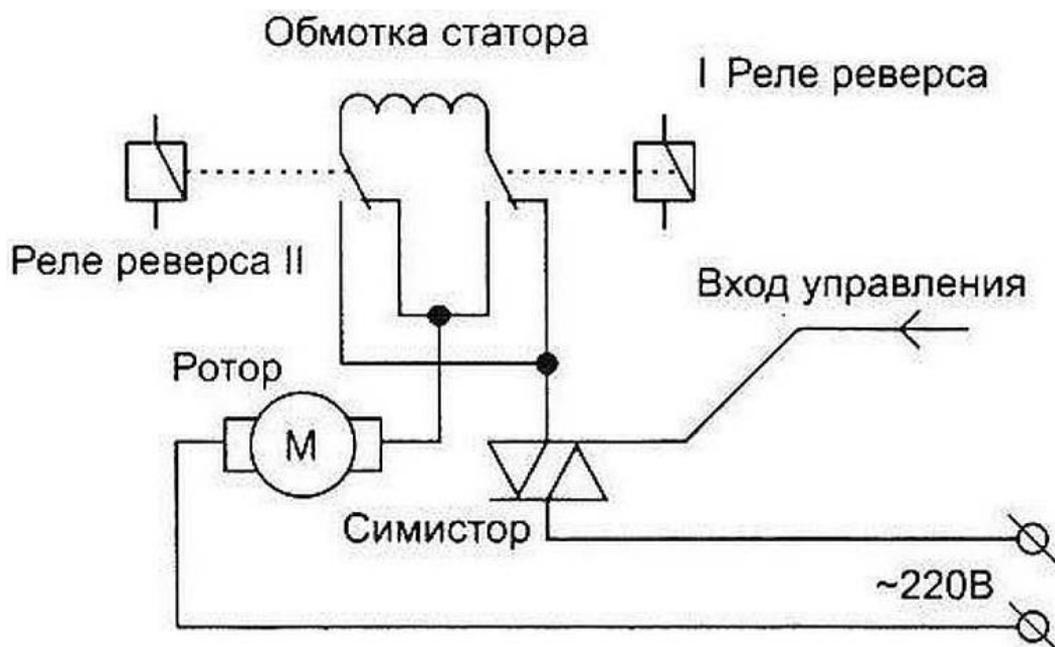


Рисунок 19 – Схема коллекторного двигателя

Неплохие качества, но есть и недостатки, причём они не менее серьёзные. Минусы коллекторных электродвигателей:

- высокий уровень шумов при работе. Особенно на высоких скоростях.

Щетки трутся о коллектор, дополнительно создавая шумы;

- искрение щёток, их износ;
- необходимость частого обслуживания коллекторного узла;
- нестабильность показателей при изменении нагрузки;
- высокая частота отказов из-за наличия коллектора и щёток, малый срок службы этого узла.

Коллекторный двигатель неплохой выбор, например для привода бытовой техники. Срок службы при правильной эксплуатации – 10 ... 15 лет.

С развитием полупроводников их производство и управление становится всё более дешёвым и простым (рис.19).

Контрольные вопросы

1. У асинхронных электродвигателей частота тока ротора ... тока статора.

- больше частоты;
- равна частоте;
- меньше частоты;
- не зависит от частоты.

2. У асинхронных электродвигателей ...

- магнитное поле и ротор вращаются с одинаковой частотой;
- ротор вращается быстрее магнитного поля;
- магнитное поле вращается быстрее ротора;
- магнитное поле синхронизируется с частотой тока питающей сети.

3. Асинхронный двигатель обладает ... механической характеристикой.

- мягкой;
- абсолютно мягкой;
- жесткой в пределах рабочей части;
- абсолютно жесткой.

4. Основным недостатком асинхронного электродвигателя является

- низкий КПД;
- мягкость механической характеристики;
- большие пусковые токи;
- незначительная мощность.

5. Чему равна синхронная скорость в оборотах в минуту для двигателя с тремя парами полюсов, включенного в сеть частотой 50 Гц?

- 1000 об/мин;
- 1500 об/мин;
- 3000 об/мин;
- 500 об/мин.

6. Отношение разности скорости вращения магнитного поля и ротора к скорости вращения магнитного поля статора называется

- коэффициентом мощности;
- КПД;
- жесткостью механической характеристики;
- скольжением.

7. Пусковой ток асинхронного электродвигателя ... номинального тока.

- в 2 раза больше;
- в 2 раза меньше;
- в 5 ... 7 раз больше;
- в 10...20 раз больше.

8. Выберите способы снижения пускового тока у асинхронного электродвигателя.

- включение при пуске в цепь обмоток статора реактивных сопротивлений для уменьшения питающего напряжения на обмотках статора;
- включение на период пуска активных сопротивлений в цепь статора;
- переключением после разгона ротора обмоток статора со «звезды» на «треугольник»;
- изменением частоты тока питающей сети.

9. Наружная обмотка ротора с двойной «беличьей клеткой» выполнена

- из более тонких стержней и обладает повышенным активным сопротивлением;
- из стержней имеющих большее сечение и обладают меньшим активным сопротивлением;
- из стержней одинакового сечения со стержнями внутренней обмотки;
- из стержней переменного сечения, для регулирования активного сопротивления при пуске.

10. Наружная обмотка ротора с двойной «беличьей клеткой» выполняет роль ... обмотки.

- пусковой;
- рабочей;

- демпфирующей;
- балластной.

11. Перечислите возможные способы регулирования частоты вращения ротора асинхронного электродвигателя

- изменение частоты f_1 тока;
- изменение скольжения S ;
- изменение числа пар полюсов p ;
- изменение активного сопротивления статора.

12. Укажите правильное соотношение между напряжением питания и частотой тока при частотном регулировании частоты вращения ротора асинхронного электродвигателя.

- $U_1 \cdot f_1 = const$;
- $U_1 / f_1 = const$;
- $\sqrt{U_1 / f_1} = const$;
- $\sqrt{U_1 \cdot f_1} = const$.

13. Перечислите основные преимущества асинхронных электродвигателей.

- малые пусковые токи;
- возможность регулирования частоты вращения;
- возможность эксплуатации во взрывоопасной среде;
- низкая стоимость эксплуатации.

14. Электродвигатель у которого хотя бы одна обмотка ротора соединена со щётками и коллектором, называется

- универсальным;
- шаговым;
- исполнительным;
- коллекторным.

15. Характеристики и свойства коллекторных двигателей переменного тока аналогичны характеристикам

- синхронных двигателей;
- двигателей постоянного тока;
- асинхронных электродвигателей;
- вентильных электродвигателей.

16. Универсальные коллекторные электродвигатели имеют ... возбуждение.

- параллельное;
- смешанное;
- последовательное;
- независимое.

17. Работа универсального коллекторного электродвигателя на переменном токе всегда сопровождается ... КПД.

- снижением;
- увеличением;
- сохранением прежнего значения;
- вначале увеличением, а затем снижением.

18. Номинальный коэффициент мощности коллекторного электродвигателя составляет

- 0,70...0,90;
- 0,50...0,70;
- 0,30...0,50;
- 0,10...0,30.

19. Перечислите основные недостатки универсальных коллекторных электродвигателей.

- высокий уровень шумов при работе;
- искрение щёток, их износ;
- большой крутящий момент;
- высокая стоимость.

20. Перечислите основные преимущества универсальных коллекторных электродвигателей.

- простота конструкции;
- высокая скорость до 10000 *об/мин*;
- большой крутящий момент даже на малых оборотах;
- возможность значительных перегрузок.