Лекция – 8

1 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.

1.1 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.1.31) и ротора. Для

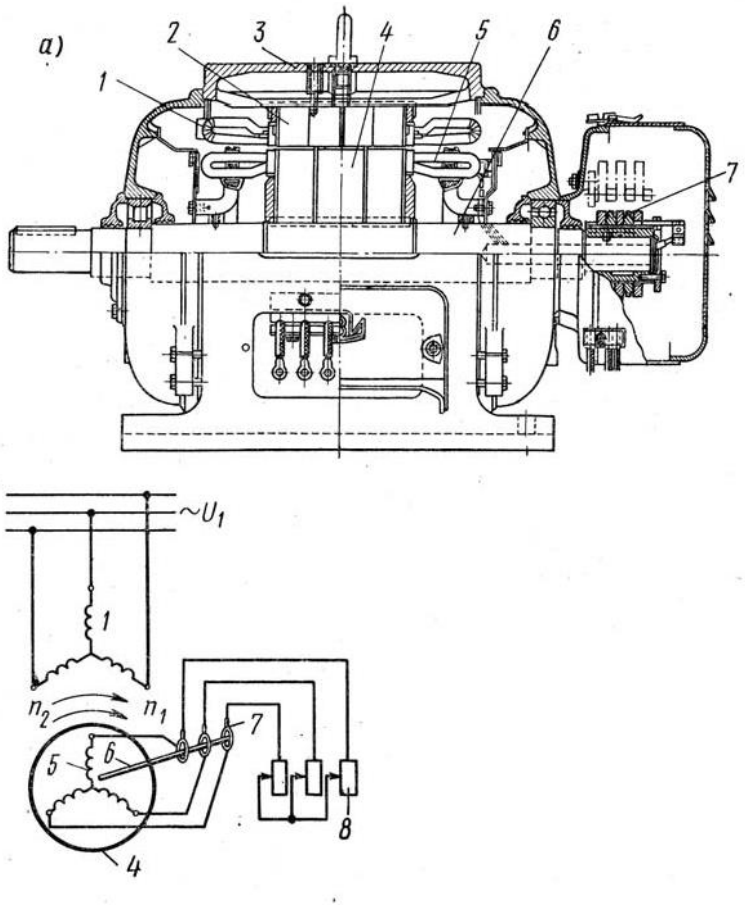


Рис. 1.31. Устройство асинхронного электродвигателя с фазным ротором и схема его включения:

1 – обмотка статора; *2* – сердечник статора; *3* – корпус; *4* – сердечник ротора; *5* – обмотка ротора; *6* – вал; *7* – кольца; *8* – пусковой реостат

всех видов АД обмотки статора непосредственно присоединяются к внешней электрической сети (двух- или трехфазной). 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 контактных кольцах, и выполняется в виде так называемой «б*еличьей клетки*» (см. рис. 1.32).

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. 1.33).

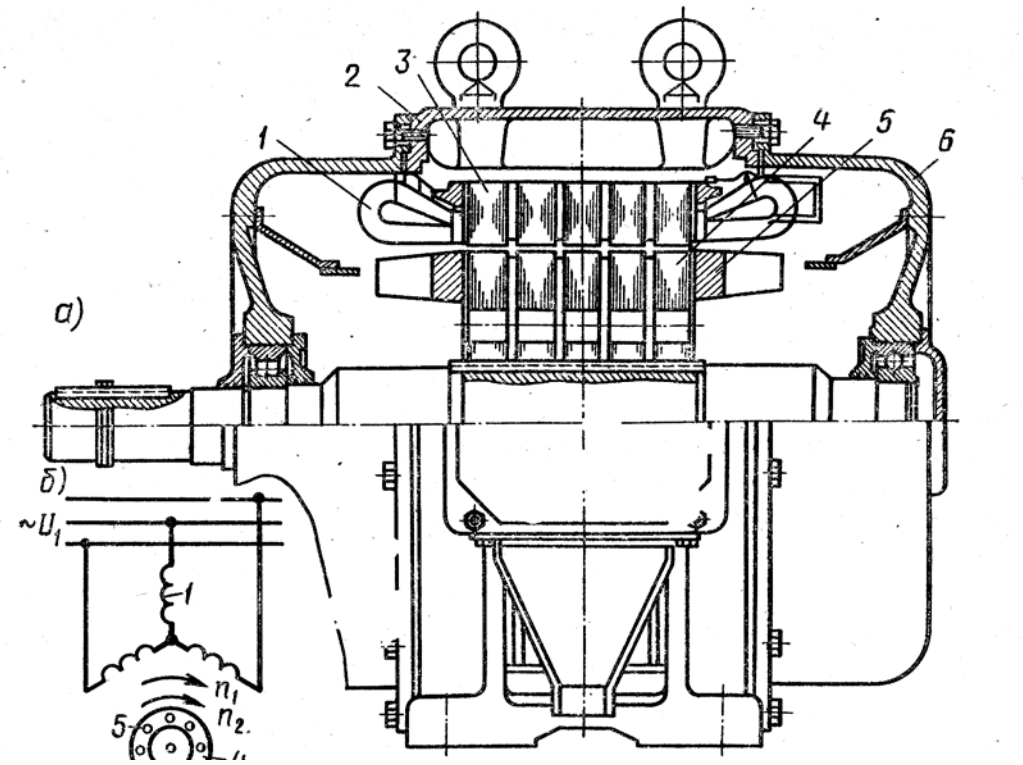


Рис. 1.32. Схема асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором:

1 – обмотка статора; *2* – корпус; *3* – сердечник статора; *4* – сердечник ротора; *5* – обмотка ротора («беличье колесо»); *6* – подшипниковый щит

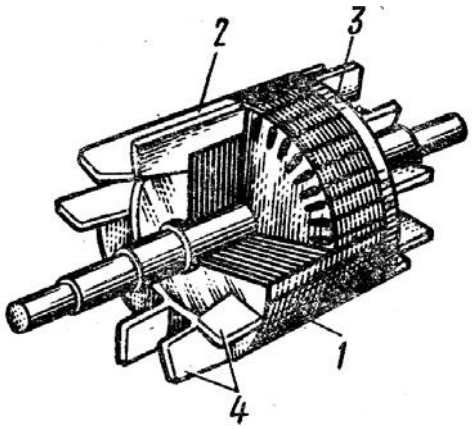


Рис. 1.33. Конструкция короткозамкнутого ротора:

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.

1.2 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:

$$n_2 = f_2 = f_1 = n_1 \quad (\text{об} / \text{с}).$$

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 $M_п > 0$. Если этот момент больше статического момента *на валу*, создаваемого полезной нагрузкой двигателя $M_п > M_в$, 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*:

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

или $n = (1 - S) n_1$.

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* Ф *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 $n = (1 - S) n_1$, 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*

$$n_{2c} = n + n_{2p} = n + Sn_1 = (1-S)n_1 + Sn_1 = n_1.$$

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 ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И РЕЖИМЫ ИХ РАБОТЫ

1.3.1 Характеристики АД

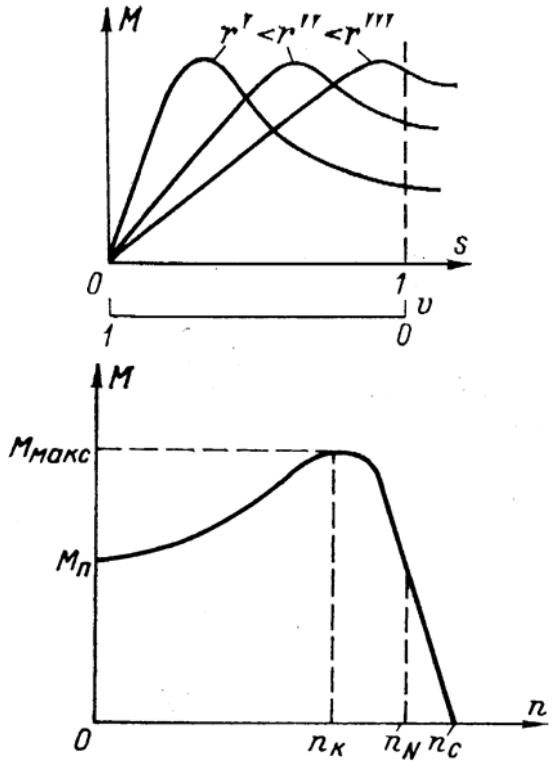


Рис. 1.34. Механическая характеристика трехфазного асинхронного двигателя

Рис. 1.35. Механические характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором при различном активном сопротивлении в цепи обмоток ротора

Основная характеристика асинхронно-го двигателя – это его механическая харак-теристика (МХ) – зависимость механическо-го момента на его валу от угловой скорости вращения ротора (частоты вращения n) (см. рис. 1.34). При этом напряжение и частота питающей обмотки статора постоянны. На МХ имеются характерные точки: пусковой момент $M_{\text{п}}$, скорость холостого хода (син-хронная скорость $n_{\text{с}}$), номинальная скорость вращения $n_{\text{н}}$, максимальный момент, разви-ваемый асинхронным двигателем.

Для двигателя с фазным ротором мож-но построить механические характеристики, которые зависят от сопротивлений в цепи обмоток ротора (см. рис. 1.35).

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

В качестве примера рассмотрим сле-дующие обозначения, которые могут быть приведены на шильдике:

Таблица 1

Обозначение на шильдике	Расшифровка
Mot.*X*	Трехфазный двигатель с высотой *X* мм (от середины вала до поверхности крепления)
*X*1/*X*2 A	Номинальный ток при соединении звездой *X1* A Номинальный ток при соединении треугольником *X2* A
N rpm	Номинальная скорость вращения ротора двигателя *N* об/мин
Y/Δ380/220 V.	Линейное напряжение при соединении звездой для 380 В и для соединения треугольником для 220 В
cosφ0,75	Значение коэффициента мощности двигателя 0,75
P kW	Номинальная мощность на валу двигателя *P* кВт
Is.Kl. B:	Допускаемая температура обмоток двигателя при продолжительном режиме работы. Существуют следующие изоляционные классы: *E* = 120 °C *B* = 130 °C (Стандарт) *F* = 155 °C *H* = 180 °C
IP 54:	Степень защищенности двигателя IP 54 = пыле- и брызгостойкая обшивка
50 Hz	Частота сети 50 Гц
VDE 0530/84	Сертификат соответствия VDE

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

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

Полная мощность определяется следующей формулой:

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

$\sqrt{3}$

Активная мощность рассчитывается так:

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

1.3.2 Режимы работы АД

Существует три основных режима работы двигателя: продолжительный ре-жим, повторно-кратковременный режим и кратковременный.

В течениие продолжительного режима *S*1 время работы двигателя с номи-нальной мощностью настолько велико, что устанавливается температурный ба-ланс между корпусом двигателя и окружающей средой (при постоянной темпера-туре окружающей среды). Этот режим является обычным для стандартных двига-телей, постоянно нагруженных своим номинальным моментом.

Во время кратковременного режима *S*2 время работы с номинальной мощ-ностью так мало́, что температурный баланс не может быть достигнут. В течение длительных пауз двигатель полностью охлаждается.

Во время повторно-кратковременного режима *S*3 паузы так малы, что дви-гатель не успевает охладиться до комнатной температуры (но среднее значение температуры остается постоянным).

Существует также перемежающийся режим с периодической нагрузкой *S*6, когда двигатель не может охладиться в течение интервалов холостого хода до окружающей температуры.

1.3.3 ПУСК АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Для нормального пуска АД должны быть выполнены следующие основные требования :

а) пусковой момент *должен превышать тормозящий момент* $M_в$, создавае-мый механической нагрузкой: $M_п > M_в$;

б) величина пускового тока не должна

ть чрезмерно большой; в) схема пуска должна быть максимально простой.

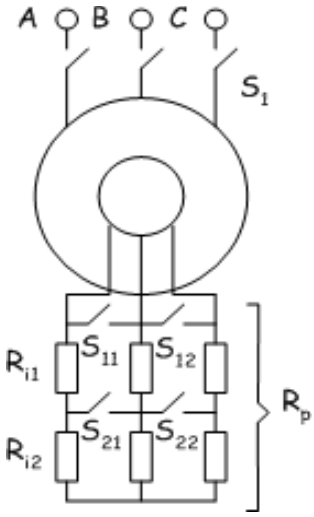


Рис. 1.36. Пуск АД с фазным ротором

Основные способы пуска АД:

- *прямой пуск* (подключение обмоток статора к сетевому напряжению);
- пуск *при пониженном напряжении на статорных обмотках* (*для сни-жения 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 $M_п$, а также что при пуске – ток $I_п$ в 5 – 7 раз больше номинального тока $I_н$.

Второй способ желательно применять при пуске *на холостом ходу* или при малом моменте нагрузки $M_в$. 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 $r_д''$ 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.

1.3.4 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 2 «*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 $X_{LП} << X_{LP}$, полное сопротивление $Z_П$ много меньше Z_P, а его активная составляющая много больше индуктивной. При этом бóльшая часть тока якоря АД будет протекать по наруж-

ной (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 рабо-чую клетку, поскольку $R_p << R_n$.

Глубокопазный двигатель – его принцип действия основан также *на вытеснении тока при пуске*. Стержни «беличьей клетки» занимают объем пазов боль-шой глубины, и наружные слои стержней играют роль наружной клетки (пуско-вой обмотки) в предыдущей конструкции, а внутренние, глубинные – роль внут-ренней (рабочей) обмотки. Так же, как и в варианте с двойной «беличьей клет-кой», при разных скоростях ротора n изменяется *соотношение между активной и реактивной составляющими* полного комплексного сопротивления обмотки, за счет чего ее сопротивление при пуске различно.

1.3.5 РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ АД

Регулирование скорости вращения асинхронных двигателей имеет 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.

1.3.5 Частотное регулирование

Данный способ известен давно и в настоящее время является основным. Как правило, он используется для управления асинхронных двигателей с коротко-замкнутым ротором. Для его осуществления требуется источник электрического тока *переменной частоты*, в качестве которого могут быть использованы, напри-мер, *преобразователи частоты или синхронный генератор* переменного тока с



Рис. 1.37. Общий вид частотного преобразователя Hyundai N700E 004HF 0,4 кВт, 380 В

переменной скоростью вращения. В настоящее время существует множество видов частотных преобразователей для регулирования скорости вращения ротора асинхронного электродвигателя. На рисунке 1.37 внешний вид современного частотного преобразователя.

Как правило, современные частотные преобразователи имеют множество функций, основные из которых следующие: автоматическая настройка, установка вольточастотных 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 двигате-ля, 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.

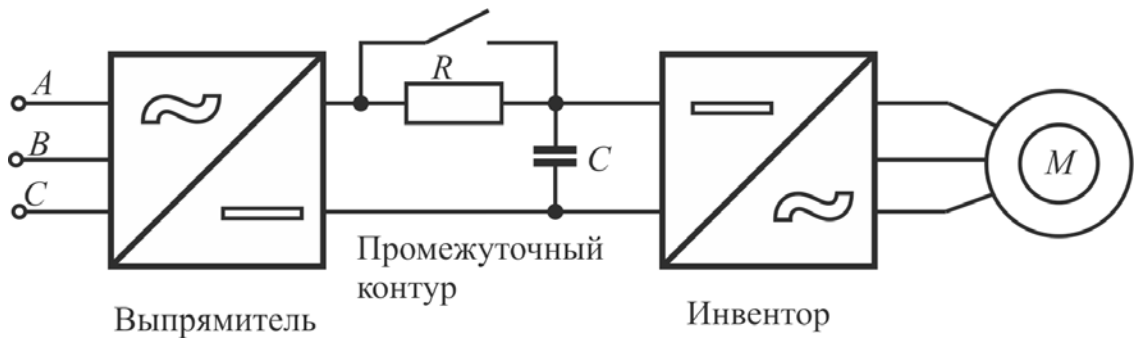


Рис. 1.38. Блок-схема силовой части частотного преобразователя

Выпрямитель преобразует переменное напряжение сети в постоянное напряже-ние. Далее оно сглаживается в промежуточном контуре конденсаторным фильт-ром. 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 конденса-тора 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 рабо-чее напряжение в течение определенного периода времени. Это отображается за-рядным светодиодом. Для преобразования постоянного тока в переменный на вы-ходе устанавливается инвертор. Для этого используются транзисторы, которые работают в переключающем режиме. В конце прошлого века наиболее часто при-менялись 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 управле-ния электрическими приводами). Эти транзисторы обеспечивают частоты пере-ключения до 16 кГц и очень низкий уровень шума.

Как видно из рис. 1.39, ток через обмотку двигателя может протекать только тогда, когда, по меньшей мере, один из верхних (T1,T3 и T5) и один из нижних

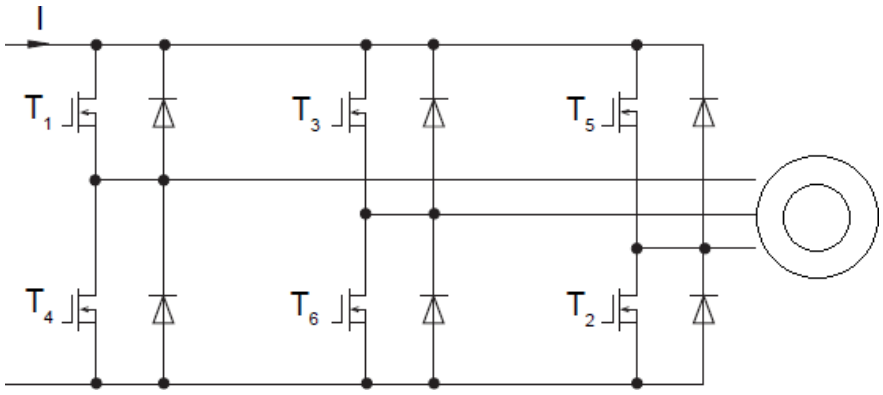


Рис. 1.39. Принципиальная схема инвертора

транзисторов (T4, T6 and T2) включены. Одновременно включены три транзистора. Диаграмма их включения показана на рис. 1.40. Как видно из диаграммы инвертор восстанавливает в обмотках статора двигателя сдвиг по фазе между токами, равный 120°, соответствующий симметричной трехфазной сети.

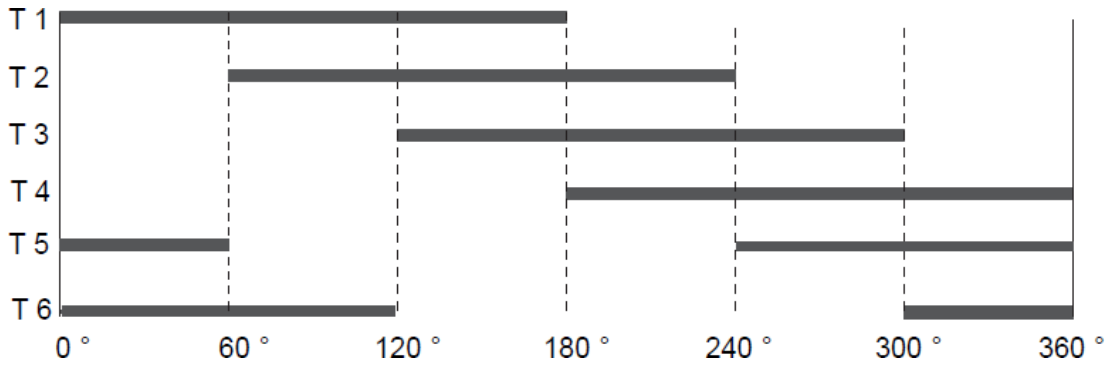


Рис. 1.40. Диаграмма открывания транзисторов инвертора

Из-за индуктивности двигателя ток не может резко упасть до нуля, когда транзистор выключается. По этой причине в схему включаются антипараллель-ные диоды, которые коммутируют (пропускают) токи в момент выключения транзистора, таким образом, защищая его (см. рис. 39). Частота тока в обмотках статора зависит от длительности цикла срабатывания выходных ключей инвертора (рис. 1.40). 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. 1.41).

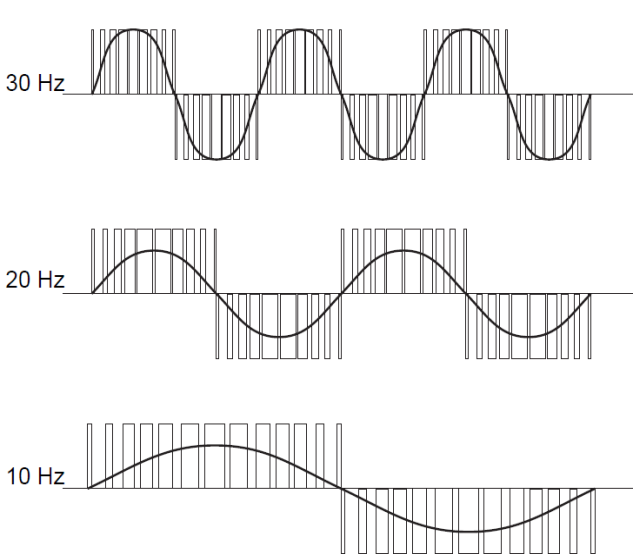


Рис. 1.41. Преобразование импульсного управляющего сигнала в синусоидальный выходной ток инвертора

Развиваемый АД M_{max} пропорционален $(U_1/f_1)^2$, поэтому для под-

держания неизменной так называемой *перегрузочной способности* двигателя, т.е. отношения M_{max} / $M_в$, 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 $M_в$ *не зависит от скорости вращения* n, или *по другим законам*, определяемым зависимостью $M_в = f(n)$.

1.3.6 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. 1.42 приведена схема переключения обмоток асинхронного двигателя, позволяющая реализовать число пар полюсов $p1$ или $p2$).

Недостаток такого способа регулирования скорости – большие габариты двигателя, стоимость, сложность коммутационных устройств, увеличенная масса.

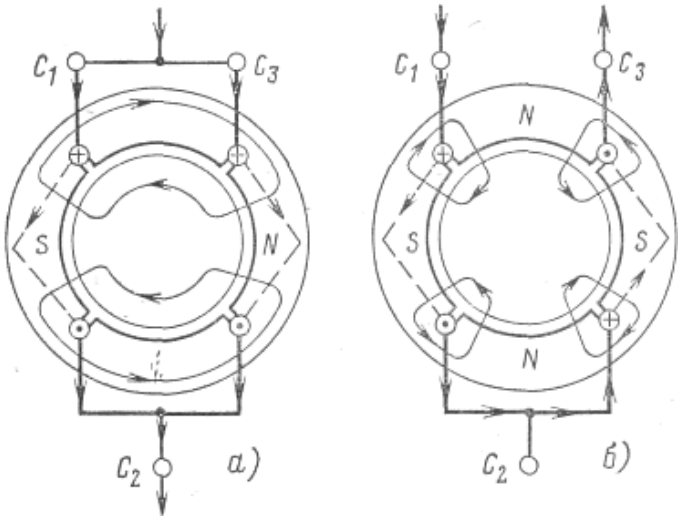


Рис. 1.42. Статор асинхронного двигателя:

а – с одной парой полюсов; *б* – с двумя парами полюсов

1.3.7 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.

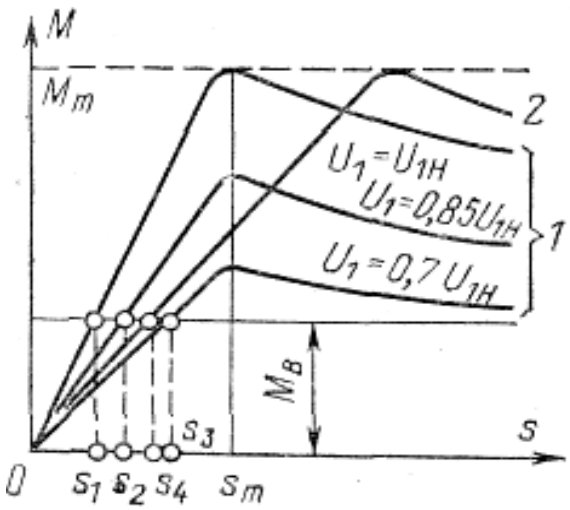


Рис. 1.43. Механические характеристики при регулировании частоты вращения ротора:

1.3.7.1.1 – при различных напряжениях U_1;

1.3.7.1.2 – 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 $R_р$ механическая характеристика становится более *мягкой*, и скольжение S при неизменном моменте нагрузки на валу $M_в$ 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 $M_в$;

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.

1.3.8 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 роботы 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 одно-временным уменьшением их стоимости;

- возможно эксплуатирование во взрывоопасной зоне;
- высокий коэффициент мощность/масса для асинхронного двигателя;
- низкая стоимость асинхронных двигателей.

8