

УДК
621.313
М 31



А. Б. МАСАНДИЛОВ
В. В. МОСКАЛЕНКО

РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

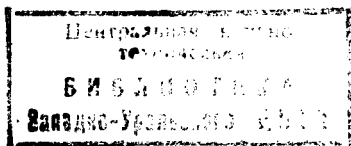


Л. Б. МАСАНДИЛОВ, В. В. МОСКАЛЕНКО

К
621.313
м31

229798

РЕГУЛИРОВАНИЕ
СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ
АСИНХРОННЫХ
ДВИГАТЕЛЕЙ



«ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА 1968

6П2.12

М 31

УДК ~~621.313.333.621.316.718(04)~~

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Большам Я. М., Долгов А. Н., Ежков В. В., Каминский Е. А.,
Мандрыкин С. А., Сиичугов Ф. И., Смирнов А. Д., Устинов П. И.

Масандилов Л. Б. и Москаленко В. В.

М 31 Регулирование скорости вращения асинхронных
двигателей. М., «Энергия», 1968.

72 с. с илл. (Б-ка электромонтера. Вып. 264).

Брошюра посвящена основным методам регулирования скорости вращения трехфазных асинхронных двигателей. Рассмотрены технико-экономические показатели каждого метода регулирования и возможные области применения.

Брошюра рассчитана на электромонтеров, обслуживающих промышленные электроприводы и желающих повысить свою квалификацию.

3-3-9

124-68

6П2.12

Масандилов Лев Борисович

Москаленко Владимир Валентинович

Регулирование скорости вращения асинхронных двигателей

Редактор *М. М. Синайский*

Технический редактор *Г. Г. Самсонова* Корректор *В. С. Антипова*

Сдано в набор 1/IV 1968 г.

Подписано к печати 7/VI 1968 г.

Т-08369

Формат 84×108¹/₃₂

Бумага типографская № 3

Усл. печ. л. 3,78

Уч.-изд. л. 3,82

Тираж 20 000 экз.

Цена 14 коп.

Зак. 1185

Издательство «Энергия». Москва, Ж-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР.
Шлюзовая наб., 10.

1. ВВЕДЕНИЕ

В промышленности и сельском хозяйстве имеется большое число производственных механизмов, у которых по тем или иным причинам необходимо регулировать скорость движения рабочего органа. К таким механизмам относятся металлообрабатывающие станки, насосы, вентиляторы, подъемные краны, лифты, прокатные станы и т. д.

Для приведения в движение различных производственных механизмов используются преимущественно электрические двигатели. Электродвигатель, его система управления и механическая часть (редуктор), передающая движение от двигателя к производственному механизму, образуют систему электрического привода. Структурная схема электропривода показана на рис. 1. В качестве электродвигателя может быть использован двигатель постоянного тока, асинхронный или синхронный. Система управления им содержит различные аппараты (выключатели, пускатели, контакторы, магнитные и электронные усилители, полупроводниковые устройства и т. д.), осуществляющие пуск, торможение, реверсирование, защиту и регулирование скорости двигателя.

Механическая часть привода служит для согласования скоростей движения двигателя и рабочего механизма, а также при необходимости для преобразования одного вида движения в другой, например вращательного в поступательное.

Принципиально для регулирования скорости движения рабочего органа механизма могут быть использованы различные способы, из которых наиболее важными являются следующие:

а) воздействие на механическую часть привода, например изменением ее передаточного отношения с помощью вариаторов, коробок скоростей и т. д., при посто-

янной скорости вращения двигателя $n_{\text{дв}}$. Под передаточным отношением понимается величина, равная

$$i = \frac{n_{\text{дв}}}{n_{\text{мех}}},$$

где $n_{\text{мех}}$ — скорость вращения входного вала механизма;

б) так называемое электрическое регулирование, под которым подразумевается изменение скорости вращения

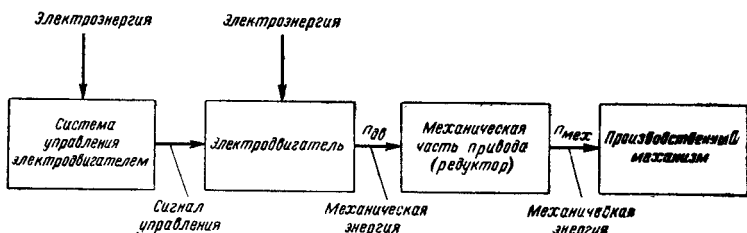


Рис. 1. Структурная схема системы электропривода.

двигателя с помощью системы управления при неизменном передаточном отношении редуктора.

В настоящее время наиболее прогрессивным и перспективным способом является электрическое регулирование скорости привода. Этот способ обладает рядом преимуществ, среди которых следует отметить легкость автоматизации производственных процессов, экономичность, плавность регулирования и т. д. Во многих случаях применение электрического способа регулирования позволяет существенным образом упростить или даже исключить кинематическую передачу от двигателя к входному валу производственного механизма, что упрощает конструкцию и уменьшает размеры электропривода.

Следует отметить, что в некоторых случаях (главным образом в электроприводах станков) целесообразно применять комбинированный способ, когда электрическое регулирование сочетается с механическим.

Основными типами электродвигателей, которые используются для привода производственных механизмов с регулируемой скоростью движения рабочего органа, являются двигатели постоянного тока и асинхронные с короткозамкнутым или фазным ротором. Наиболее просто изменение скорости вращения осуществляется

у двигателей постоянного тока, поэтому они находят широкое применение в регулируемых промышленных электроприводах. Однако наибольшее распространение в промышленности и сельском хозяйстве находят асинхронные двигатели. По сравнению с двигателями постоянного тока они проще в изготовлении и эксплуатации, надежнее, имеют относительно меньшие вес, размеры и стоимость. Вместе с тем возможности регулирования скорости вращения асинхронных двигателей в определенной степени ограничены, что до недавнего времени определяло малое их применение в регулируемых электроприводах.

В настоящее время в связи с успешным развитием элементов и систем автоматических устройств — магнитных усилителей, тиристоров, других полупроводниковых приборов и создаваемых на их основе более совершенных схем управления — становится возможным конструировать системы асинхронного электропривода с хорошими регулировочными качествами.

Предметом настоящей работы является краткое описание основных методов регулирования скорости асинхронного двигателя.

2. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Асинхронный двигатель (рис. 2) состоит из двух основных частей: неподвижной части — статора — и вращающейся — ротора. Статор собирается из листов электротехнической стали. В пазах его размещается обмотка. Статор помещен в корпусе (рис. 2, в). Ротор, собираемый также из листов электротехнической стали с пазами для размещения обмотки, укрепляется на стальном валу. Вал вращается в подшипниках, установленных в подшипниковых щитах (рис. 2, б).

Различают асинхронные двигатели с фазным (рис. 2, д) и короткозамкнутым (рис. 2, г) ротором. Первые имеют на роторе обмотку, аналогичную статорной. Концы обмотки ротора через контактные кольца выводятся наружу. Обмотка короткозамкнутого ротора выполнена в виде беличьей клетки.

При подключении к трехфазной сети переменного тока обмотки статора асинхронного двигателя соединяются в звезду (рис. 3, а) или в треугольник (рис. 3, б). Трех-

фазные токи, проходя по обмоткам, образуют вращающееся магнитное поле.

Рассмотрим предварительно магнитное поле, образованное переменным током, проходящим по одному вит-

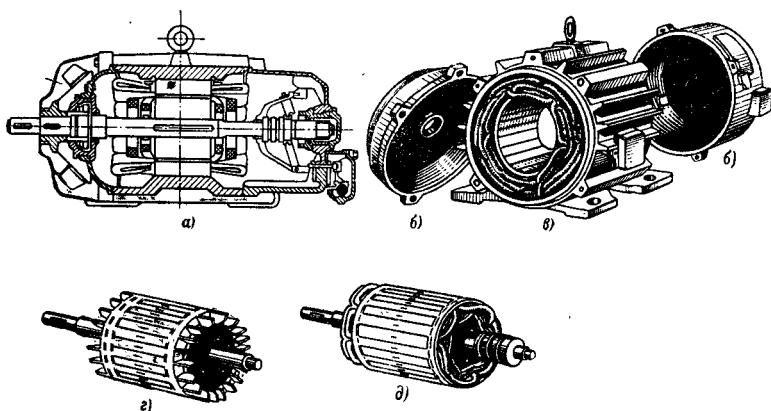


Рис. 2. Асинхронный двигатель.

а — разрез; б — подшипниковые щиты; в — статор; г — короткозамкнутый ротор; д — ротор с контактными кольцами.

ку, состоящему из двух проводников, как показано на рис. 4,а. На рис. 4,б изображена синусоида (кривая, показывающая изменение переменного тока во времени). Величина тока периодически изменяется: в течение по-

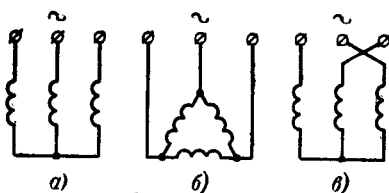


Рис. 3. Схемы подключения к сети обмоток статора асинхронного двигателя.

а — обмотки соединены в звезду; б — обмотки соединены в треугольник; в — соединение в звезду при реверсе двигателя.

лупериода $0 - t_1$ направление тока остается тем же, но меняется его величина от нулевого значения до максимального $I_{\text{макс}}$ при t' и затем вновь до нулевого при t_1 ; в течение последующего полупериода $t_1 - t_2$ величина тока изменяется аналогично предыдущему, но направление меняется на обратное.

Предположим, что направление тока i , указанное стрелкой на рис. 4,а, соответствует моменту времени t' на рис. 4,б. Ток, проходя по прямолинейному проводнику, образует магнитное поле, силовые линии которого показаны на рис. 4,б. при-

чем направление поля определяется по правилу буравчика. На рис. 4,б изображена картина распределения силовых линий магнитного поля в плоскости, перпендикулярной контуру с током. Крестиком обозначено направление тока, втекающего в плоскость чертежа, а точкой — направление тока, вытекающего из плоскости чертежа.

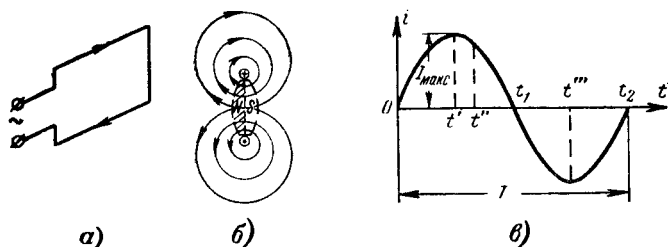


Рис. 4. Образование пульсирующего магнитного поля контуром с током.

a — контур с током; *б* — магнитное поле контура; *в* — изменение тока в контуре во времени.

На рис. 4,б пунктиром изображен постоянный магнит, который образует примерно такое же магнитное поле, как и контур с током, соответствующим моменту времени t' . В момент времени t'' (рис. 4,в) магнитное поле (рис. 4,б) имеет такое же направление, как и для момента t' , но уменьшается по величине.

В последующий полупериод $t_1 — t_2$ направление тока и созданного им магнитного поля изменится на обратное, при этом направление стрелок на рис. 4,а и б и расположение полюсов постоянного магнита следует изменить на противоположное.

Следовательно, направление и величина магнитного поля, образованного витком (рис. 4,а), периодически изменяются. Такое магнитное поле называется пульсирующим.

Рассмотрим далее магнитное поле, образованное обмотками статора, подключенными к трехфазной сети переменного тока.

На рис. 5,б представлена простейшая обмотка статора трехфазного асинхронного двигателя, в которой каждая фаза состоит из одного витка. Плоскости витков сдвинуты друг относительно друга на 120° , или на $1/3$ окружности. В фазах обмотки проходят переменные

токи. Следовательно, ток фазы образует пульсирующее магнитное поле. Значения токов в фазных обмотках в каждый момент времени разные, потому что переменные токи разных фаз сдвинуты по времени на треть

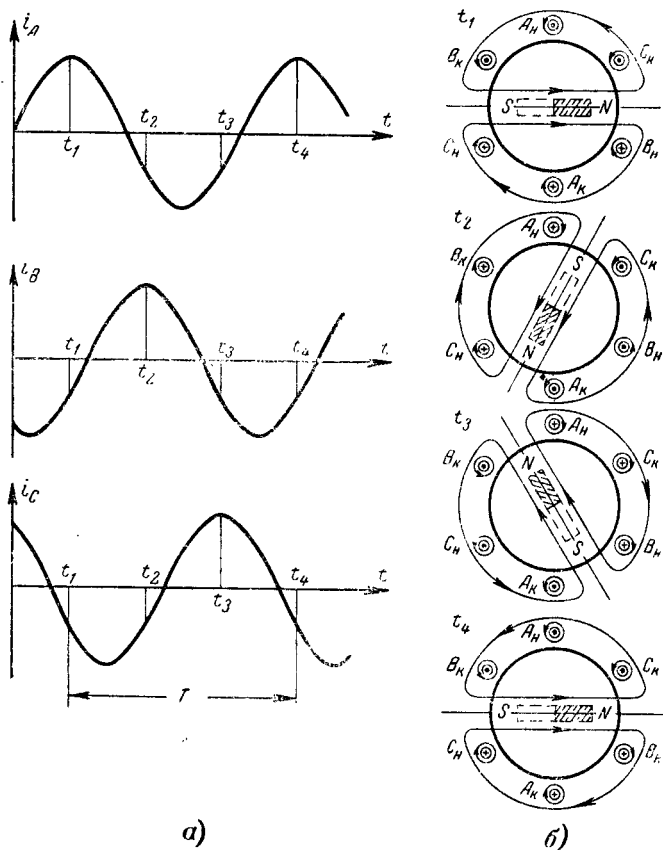


Рис. 5. Образование вращающегося магнитного поля трехфазным током.

а — изменение фазных токов во времени; б — магнитное поле в разные моменты времени.

часть периода, как показано на рис. 5,а. Это означает, что если период тока равен T , то вначале достигает максимального значения ток фазы A , через отрезок времени $T/3$ — ток фазы B , далее через $T/3$ — ток фазы C и т. д.

Токи считаются положительными, когда они в началах фаз (проводники A_n , B_n , C_n) вытекают из плоскости чертежа, что на рис. 5,б обозначено точками, а отрицательный ток втекает в плоскость чертежа и обозначается крестиком. В момент времени t_1 ток фазы A имеет наибольшее значение и положителен, а в фазах B и C токи отрицательны. Этому положению соответствует верхняя схема на рис. 5,б, из которой видно, что создаются две зоны токов противоположного направления. Применяя правило буравчика, можно прийти к заключению, что силовые линии магнитного поля, создаваемого токами всех фаз, распределены так же, как распределилось бы магнитное поле, созданное постоянным магнитом, изображенным на этом рисунке пунктиром.

В момент времени t_2 ток фазы B достигает наибольшего положительного значения, а в фазах A и C токи отрицательны. Этому положению соответствует вторая сверху схема. И в этом случае образуются две зоны токов противоположного направления. Эти зоны токов создают магнитное поле такое же, как на первой схеме, но повернутое на треть окружности по часовой стрелке.

На двух нижних схемах на рис. 5,б представлены картины распределения магнитного поля, создаваемого токами обмоток статора в моменты времени t_3 и t_4 . На последней — нижней схеме, соответствующей моменту времени t_4 , распределение магнитного поля такое же, как и в момент времени t_1 . Это значит, что за период частоты тока магнитное поле поворачивается на 360° . Такое магнитное поле называется вращающимся. Оно аналогично магнитному полю, создаваемому вращающимся по часовой стрелке постоянным магнитом, изображенным на рис. 5,б пунктиром.

Если поменять чередование двух фаз обмотки статора, т. е. если подключить к сети статорные обмотки по схеме на рис. 3,в, а не по схеме на рис. 3,а, то направление вращения магнитного поля изменится на противоположное. Поэтому и направление вращения двигателя изменится на обратное. Пересоединение двух фаз статора по схеме на рис. 3,в позволяет осуществить реверсирование двигателя.

Направление магнитного поля непрерывно изменяется. В момент времени, когда ток в фазе достигает наибольшего значения, направление результирующего магнитного поля совпадает с осью данной фазы. Так, когда

ток достигает максимального значения в фазе A в момент времени t_1 , результирующее магнитное поле совпадает с осью фазы A , в момент t_2 ток максимален в фазе B и магнитное поле совпадает с осью фазы B и т. д.

Допустим, что все проводники, изображенные на рис. 5, б, располагаются не на всей окружности статора, а на некоторой части ее, как показано на рис. 6, а. Однако и в этом случае направление результирующего маг-

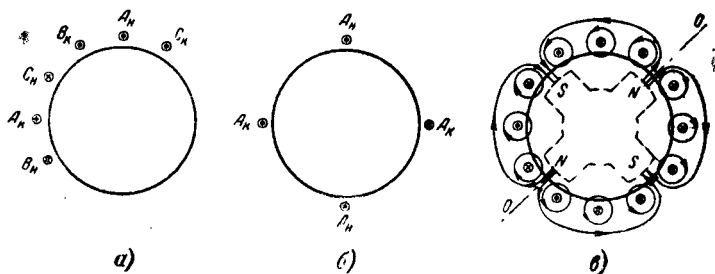


Рис. 6. К принципу образования многополюсного магнитного поля
 а — распределение фазных обмоток на части окружности статора; б — расположение проводников одной фазы четырехполюсного двигателя; в — магнитное поле четырехполюсного двигателя.

нитного поля совпадает с осью той фазы, в которой ток в данный момент достигает наибольшего значения. Поэтому за один период частоты тока магнитное поле повернется не на полный оборот, а на угол, соответствующий расположению проводников на рис. 6, а. Этот принцип используется для создания обмоток асинхронного двигателя с числом пар полюсов, большим двух.

На рис. 6, б представлена простейшая обмотка одной фазы статора четырехполюсного асинхронного двигателя, а на рис. 6, в изображена картина распределения магнитного поля, создаваемого в какой-то момент времени токами фазных обмоток статора этого двигателя. В каждый момент времени магнитное поле двигателя аналогично полю, создаваемому постоянным магнитом, изображенным на рис. 6, в пунктиром. Так как этот магнит имеет четыре полюса, то соответствующее магнитное поле называется четырехполюсным. Расположение проводников статора четырехполюсного асинхронного двигателя, изображенного на рис. 6, в, одинаково по обе стороны от прямой 00 . Каждая половина статора состоит из трех фаз, создающих магнитное поле. Поэтому за один пери-

од частоты сети магнитное поле перемещается на $1/2$ окружности. Следовательно, при увеличении числа пар полюсов скорость вращения магнитного поля уменьшается.

Между скоростью вращения магнитного поля, числом пар полюсов и частотой тока существует взаимосвязь

$$f = \frac{pn_0}{60}, \quad (1)$$

где f — частота тока, *гц*;

p — число пар полюсов;

n_0 — скорость вращения магнитного поля, *об/мин*.

Стандартная частота тока, применяемого для промышленных целей, в СССР равна 50 *гц*. Поэтому

$$n_0 = \frac{3000}{p}.$$

Ниже приведены скорости вращения магнитного поля при частоте 50 *гц* и разных величинах числа пар полюсов.

Число пар полюсов p	1	2	3	4	5	6	8	10
n_0 , <i>об/мин</i>	3 000	1 500	1 000	750	600	500	375	300

После описания вращающегося поля можно пояснить принцип действия трехфазных асинхронных двигателей.

Пусть неподвижный асинхронный двигатель подключается к сети переменного тока. Возникающее вращающееся магнитное поле, пересекая обмотки ротора, наводит в них электродвижущие силы (э. д. с.). Это явление объясняется известным положением, согласно которому в проводнике, движущемся относительно магнитного поля, возникает э. д. с. Под действием этой э. д. с. в обмотках ротора проходят токи, значения которых определяются величиной э. д. с. и сопротивлениями обмоток ротора.

Взаимодействие тока в проводниках ротора и вращающегося магнитного потока вызывает появление вращающего момента, приложенного к ротору. Если этот момент превышает момент сопротивления механизма, ротор начинает вращаться. Интересно выяснить, в какую сторону будет вращаться ротор — по направлению вращения поля или наоборот. Для ответа на этот вопрос надо вспомнить физический закон Ленца, согласно которому

при всяком изменении магнитного поля в проводниках возникают токи, препятствующие этому изменению. В асинхронном двигателе при возникновении вращающегося поля появятся токи в роторе, ослабляющие действие вращающегося поля. В соответствии с этим ротор должен вращаться по направлению поля, что приведет к уменьшению относительной скорости ротора и поля.

Для оценки величины относительной скорости вращения ротора двигателя и магнитного поля пользуются понятием «скольжение»,

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0}, \quad (2)$$

где n_0 — скорость вращения магнитного поля;

n — скорость вращения ротора.

Из выражения (2) следует соотношение

$$n = n_0(1 - s), \quad (3)$$

позволяющее по известному скольжению определить соответствующую скорость вращения.

Асинхронный двигатель использует вырабатываемую им механическую энергию для привода производственного механизма, например крана, станка, вентилятора и т. д. При работе механизма ему необходимо передать определенное количество энергии. Работа, совершенная в единицу времени, называется мощностью. Механическая мощность, как известно из курса физики, определяется произведением механического момента на скорость вращения по формуле

$$P = \frac{Mn}{9,55}, \quad (4)$$

где M — момент, $\text{н} \cdot \text{м}$ (ньютон $\times$ метр);

n — скорость вращения, об/мин ;

P — мощность, вт .

Таким образом, для обеспечения нормальной работы производственного механизма к его входному валу необходимо приложить вращающий момент M при заданной скорости вращения n , что и осуществляется приводным электродвигателем.

Зависимость вращающего момента от скорости вращения ротора называется механической характеристикой электрического двигателя. На рис. 7 изо-

бражена механическая характеристика асинхронного двигателя.

Кроме механической характеристики двигателя, рассматривают также механическую характеристику производственного механизма, которая представляет собой

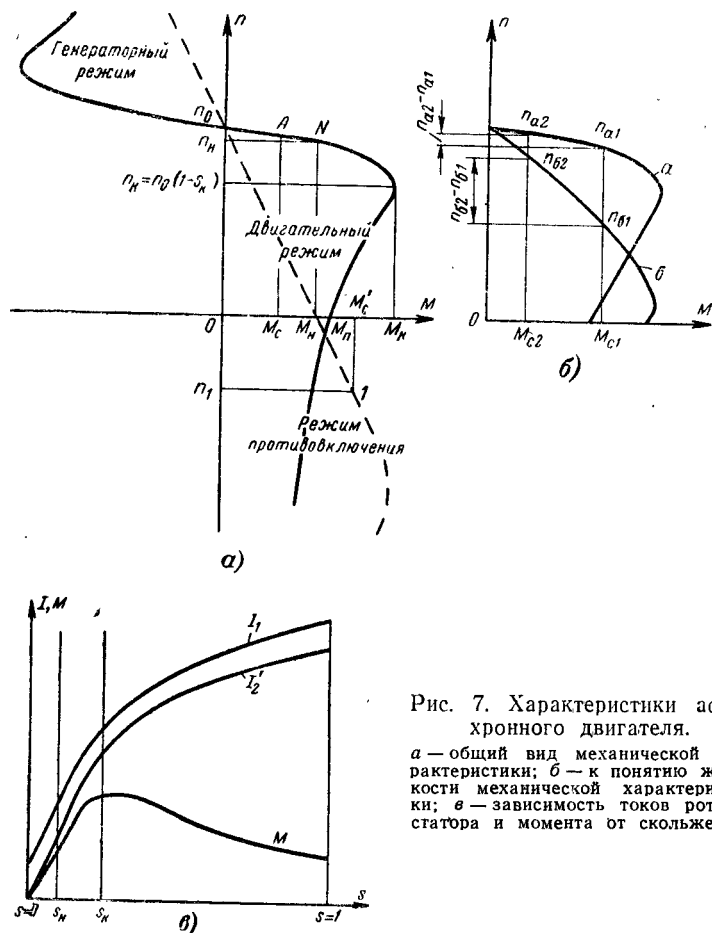


Рис. 7. Характеристики асинхронного двигателя.

а — общий вид механической характеристики; б — к понятию жесткости механической характеристики; в — зависимость токов ротора, статора и момента от скольжения.

зависимость между скоростью и моментом сопротивления или статическим моментом M_c механизма.

Остановимся подробнее на механической характеристике асинхронного двигателя. При подключении асинхронного двигателя к сети возникающее вращающееся поле взаимодействует с током ротора, определяя появ-

ление вращающего момента. Вращающий момент электрической машины часто называют электромагнитным моментом. Электромагнитный момент, развиваемый асинхронным двигателем, при скорости, равной нулю, называется пусковым и обозначается $M_{\text{п}}$ (рис. 7).

Если статический момент механизма $M_{\text{с}}$ больше пускового момента двигателя $M_{\text{п}}$, двигатель не сможет разогнаться. Если же пусковой момент двигателя больше статического, ротор двигателя будет ускоряться, а скорость двигателя увеличиваться. При изменении скорости ротора изменяется скорость пересечения проводников ротора магнитным полем двигателя. В результате этого изменяются токи в обмотках асинхронного двигателя, вызывая соответствующее изменение электромагнитного момента двигателя. Следовательно, разница между электромагнитным моментом двигателя и статическим моментом механизма с изменением скорости также изменяется. При определенной скорости вращения эти моменты оказываются одинаковыми, при этом скорость вращения системы двигатель — механизм устанавливается постоянной и соответствует точке A на рис. 7,а.

Из изложенного ясно, что установившаяся скорость вращения асинхронного двигателя зависит от нагрузки на его валу, т. е. от статического момента. При синхронной скорости вращения ротора n_0 момент, развиваемый асинхронным двигателем, равен нулю. Поэтому двигатель не может нести никакой нагрузки при синхронной скорости, а может быть нагружен только при «несинхронной» скорости, что, кстати говоря, и определило само название асинхронного двигателя.

Чем больше скольжение, т. е. чем выше относительная скорость пересечения магнитным полем проводника ротора, тем больше и величина э. д. с. ротора. При синхронной скорости проводники движутся с одинаковой скоростью с полем и не пересекаются им. Поэтому э. д. с. в роторе равна нулю, равен нулю и ток в роторе, а следовательно, отсутствует и вращающий момент.

На рис. 7,а буквой N обозначена точка механической характеристики, соответствующая номинальному режиму работы асинхронного двигателя. При этом двигатель, развивая номинальный момент, вращается с номинальной скоростью. По обмоткам проходит номинальный ток. Номинальный режим работы характеризуется тем, что двигатель в этом режиме может работать длительно.

Если к двигателю приложен статический момент, больший номинального, то длительная работа в таком режиме невозможна, так как в этом случае ток в обмотках больше номинального, что приведет к порче изоляции из-за повышенного нагрева обмоток и выходу двигателя из строя. Однако кратковременно двигатель может развивать момент, больший номинального, и это не приведет к выходу двигателя из строя.

Максимальный момент, развиваемый двигателем, называется критическим и обозначается M_k , как показано на рис. 7,а. Скорость двигателя, соответствующая этому моменту, равна:

$$n_k = n_0(1 - s_k),$$

где s_k — так называемое критическое скольжение.

Если статический момент больше критического, двигатель начнет тормозиться и остановится. Отношение критического момента к номинальному называется перегрузочной способностью асинхронного двигателя

$$\lambda = \frac{M_k}{M_n}.$$

Перегрузочная способность выражает свойства двигателя выдерживать кратковременные перегрузки по моменту нагрузки. Для большинства асинхронных двигателей $\lambda = 1,7 \div 2,2$. Специальные, например крановые, двигатели имеют перегрузочную способность до 3.

Асинхронный двигатель обычно работает на участке механической характеристики от синхронной скорости до скорости n_k , соответствующей критическому моменту. Этот участок характеристики часто называется поэтому рабочим.

На рис. 7,б изображены две механические характеристики асинхронных двигателей. Характеристика *а* отличается незначительным изменением скорости при изменении момента на рабочем участке характеристики. Такие характеристики называются жесткими. Характеристика *б* отличается значительным изменением скорости при изменении момента и называется мягкой. Если к валу двигателя приложен статический момент M_{c1} , то на характеристике *а* этому моменту соответствует скорость n_{a1} , а на характеристике *б* — скорость $n_{б1}$. При изменении статического момента до M_{c2} скорость двигателя изменится по характеристикам *а* и *б* до величин соответ-

венно n_{a2} и n_{62} . Изменение скорости по характеристике b ($n_{62}-n_{61}$) значительно больше, чем по характеристике a ($n_{a2}-n_{a1}$). Жесткая характеристика a обычно больше удовлетворяет требованиям производственного механизма по сравнению с характеристикой b , так как при работе на характеристике a скорость двигателя, а значит и производительность рабочего механизма, изменяется незначительно с изменением нагрузки.

Момент асинхронного двигателя пропорционален произведению магнитного потока и активной составляющей тока ротора.

Если пренебречь падением напряжения в обмотках статора, которое в пределах рабочей части механической характеристики незначительно, магнитный поток двигателя можно считать прямо пропорциональным приложенному к статору напряжению.

Ток ротора зависит от наведенной в нем э. д. с. и сопротивления его цепи, т. е. от величины магнитного потока и от скольжения.

Таким образом, при неизменных значениях сопротивлений в цепи ротора ток и момент двигателя определяются только двумя величинами — напряжением статора и скольжением.

Обозначим активное и индуктивное сопротивления роторной цепи как

- r_1 — активное сопротивление обмотки статора;
- r'_2 — активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к числу витков обмотки статора;
- x_1 — индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора;
- x'_2 — индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведенное к числу витков обмотки статора.

Величины активных и индуктивных сопротивлений рассеяния обмоток асинхронной машины зависят от конструкции машины, от сечения проводников, от числа витков обмоток и т. д.

Зависимость тока ротора, обозначаемого I'_2 , от фазного напряжения U_ϕ и скольжения s имеет следующий вид:

$$I'_2 = \frac{U_\phi}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r'_2}{s}\right)^2 + (x_1 + x'_2)^2}}. \quad (5)$$

На рис. 7,в эта зависимость показана графически. В рабочей части механической характеристики от $s=0$ и почти до $s=s_k$ ток ротора прямо пропорционален скольжению. Это объясняется тем, что при небольших скольжениях активная составляющая сопротивления роторной цепи [левая часть подкоренного выражения в формуле (5)] преобладает над его индуктивной составляющей и ток ротора почти прямо пропорционален э. д. с. в нем, которая в свою очередь пропорциональна скольжению.

Ток статора асинхронной машины I_1 определяется двумя составляющими. Первая из них — это величина, прямо пропорциональная току ротора; причем так же как в трансформаторе коэффициентом пропорциональности является отношение чисел витков обмоток ротора и статора. Вторая составляющая — это так называемый ток холостого хода, определяемый током намагничивания и небольшой величиной потерь в машине при холостом ходе. В зависимости от обмоточных данных двигателя ток статора может быть больше или меньше тока ротора. На рис. 7,в показано соотношение токов ротора и статора при коэффициенте трансформации, равном единице.

Зависимость момента асинхронного двигателя от напряжения, скольжения и сопротивлений обмоток имеет вид:

$$M = \frac{28,6}{n_0} U^2 \frac{\frac{r'_2}{s}}{\left(r_1 + \frac{r'_2}{s}\right)^2 + (x_1 + x'_2)^2}. \quad (6)$$

Эта зависимость также изображена на рис. 7,в, на котором видно, что в пределах большей части рабочей зоны механической характеристики момент двигателя прямо пропорционален скольжению. Такая линейная зависимость между током ротора, моментом и скольжением в рабочей части характеристики двигателя очень облегчает приближенные расчеты.

Из формул (5) и (6) следует, что при неизменном скольжении ток ротора двигателя пропорционален напряжению, приложенному к статору, а момент двигателя пропорционален квадрату этого напряжения. Так как величина критического скольжения не зависит от напряжения, критический момент двигателя пропорционален квадрату напряжения.

Иначе влияет изменение напряжения на работу двигателя, нагруженного неизменным статическим моментом, что имеет место для большинства промышленных электроприводов. Рассмотрим это на примере снижения напряжения по сравнению с номинальным. Для того чтобы при сниженном напряжении момент в формуле сохранил свою величину при неизменных значениях сопротивлений, скольжение должно увеличиться пропорционально квадрату напряжения. Математическим выражением этого будет:

$$\frac{s_1}{s_n} = \left(\frac{U_n}{U_1} \right)^2, \quad (7)$$

где s_n — скольжение при номинальном напряжении U_n ;
 s_1 — скольжение при напряжении U_1 .

Если в формулу (5) подставить новое значение напряжения U_1 и соответствующее ему скольжение s_1 , получим, что в рабочей части характеристик, пока ток ротора пропорционален скольжению, он увеличится пропорционально изменению напряжения, или

$$\frac{I'_{2-1}}{I'_{2-n}} = \frac{U_n}{U_1}.$$

Ток статора с уменьшением напряжения при неизменном моменте тоже увеличится, но в меньшей степени, так как ток холостого хода при снижении напряжения уменьшается, что особенно сказывается при небольшой нагрузке двигателя.

При номинальном напряжении и частоте питающей сети, а также при отсутствии добавочных сопротивлений в обмотках асинхронный двигатель характеризуется определенной механической характеристикой, называемой естественной. При регулировании скорости изменением различных параметров соответствующая механическая характеристика будет отличаться от естественной и называется искусственной.

Асинхронный двигатель обладает одной естественной и множеством искусственных (или регулировочных) характеристик, причем последние получаются при регулировании скорости двигателя.

Конкретные виды регулирования скорости будут рассмотрены в дальнейшем, а сейчас выясним, какие показатели следует учитывать при оценке способа регулирования скорости. Прежде всего рассмотрим один из важ-

нейших вопросов о потерях в асинхронной машине при регулировании скорости ее вращения.

Электрический ток, проходя по проводнику, нагревает его. Количество тепла, выделяемое при этом, пропорционально величине активного сопротивления и квадрату тока. Такие потери называются электрическими. В асинхронной машине различают электрические потери в статоре $\Delta P_{эл1}$, в роторе $\Delta P_{эл2}$, а также магнитные потери, называемые потерями в стали. Из-за наличия трения в подшипниках и потерь на вентиляцию имеют место механические потери. В асинхронных машинах возникают еще и некоторые другие потери, которые оказывают на работу машины меньшее влияние, чем названные выше.

Электрические потери, как указывалось выше, определяются квадратом тока, проходящего по обмоткам. Они в сильной степени определяются нагрузкой асинхронного двигателя. Все другие виды потерь, кроме электрических, изменяются с нагрузкой менее значительно. Поэтому рассмотрим, как изменяются электрические потери асинхронного двигателя при регулировании скорости вращения. Электрические потери в статоре асинхронного двигателя примерно пропорциональны электрическим потерям в роторе, которые мы кратко рассмотрим.

В теории электрических машин известно следующее соотношение:

$$\frac{M(n_0 - n)}{9,55} = 3I_2^2 R_2, \quad (8)$$

где I_2 — ток, проходящий в обмотке ротора;

R_2 — сопротивление цепи обмотки ротора.

Учитывая выражение (2) для скольжения, предыдущее соотношение запишем в виде

$$\frac{Mn_0 s}{9,55} = 3I_2^2 R_2. \quad (8a)$$

Левая часть этого выражения пропорциональна скольжению и потому называется «потерями скольжения». Следовательно, потери скольжения равны электрическим потерям в роторе.

При работе асинхронной машины со статора на ротор с помощью вращающегося магнитного поля передается электромагнитная мощность

$$P_{эм} = \frac{Mn_0}{9,55},$$

определяемая электромагнитным моментом и скоростью вращения магнитного поля. Асинхронный двигатель, приводя в движение производственный механизм, передает ему механическую мощность, которая согласно выражению (4), равна:

$$P = \frac{Mn}{9,55}.$$

Разность этих мощностей равна электрическим потерям в обмотке ротора:

$$\Delta P_{\text{эл2}} = \frac{sM(n_0 - n)}{9,55} = \frac{Mn_0 s}{9,55}. \quad (86)$$

Электрические потери непосредственно в обмотке ротора выделяются в виде тепла внутри машины и потому определяют ее нагрев. Электрические потери в дополнительных активных сопротивлениях роторной цепи выделяются вне машины и не определяют ее нагрев, но также тратятся бесполезно.

Очевидно, чем больше электрические потери в цепи ротора, тем меньше коэффициент полезного действия двигателя, тем менее экономична его работа. Учитывая, что потери в статоре примерно пропорциональны потерям в роторе, еще более понятно стремление уменьшить электрические потери в роторе.

Очевидно также, что тот способ регулирования скорости вращения двигателя является экономичным, при котором электрические потери в роторе относительно невелики.

Из изложенного выше и из анализа выражения (86) следует, что электрические потери пропорциональны разности скоростей магнитного поля и ротора двигателя, или, что то же самое, пропорциональны скольжению. По экономичности работы способы регулирования скорости вращения асинхронных двигателей могут быть разделены на две большие группы:

а) Неэкономичные способы регулирования, при которых скорость вращения ротора может значительно отличаться от синхронной скорости, что вызывает наличие больших потерь в обмотке ротора. К таким способам регулирования относятся регулирование введением дополнительных сопротивлений в цепь ротора, с помощью магнитных усилителей и тиристоров, включенных в цепь обмотки статора и т. д.

б) Экономичные способы регулирования, при которых скорость вращения ротора близка к синхронной скорости, что определяет относительно небольшие по величине потери в цепи ротора. К таким способам регулирования относятся частотное регулирование скорости и изменение числа пар полюсов обмотки статора.

К экономичным способам регулирования относится также регулирование с помощью каскадных схем включения асинхронных двигателей. Принципы конкретных способов регулирования, их достоинства и недостатки будут более подробно рассмотрены ниже.

Кроме двигательного режима асинхронная машина может работать в генераторном режиме, режимах противовключения и динамического торможения. В генераторном режиме асинхронная машина работает при скорости ротора двигателя, превышающей синхронную. В этом режиме происходит преобразование механической энергии, поступающей с вала, в электрическую энергию, отдаваемую за вычетом потерь в сеть переменного тока. Режим противовключения имеет место при отрицательных скоростях вращения двигателя, т. е. в этом случае ротор вращается в сторону, противоположную направлению вращения магнитного поля. Такой режим имеет место, например, при спуске тяжелого груза подъемным механизмом. Двигатель включен при этом для движения в направлении подъема, но так как в роторную цепь его включено большое сопротивление, нужный для уравнивания груза ток и момент двигатель развивает лишь при вращении в направлении спуска, т. е. при скольжении, большем единицы. При таком режиме двигатель потребляет электрическую энергию из сети и механическую за счет изменения потенциальной энергии при спуске груза. И та и другая части энергии выделяются в цепи ротора, главным образом в добавочных сопротивлениях. Механическая характеристика, соответствующая спуску при торможении противовключением, показана на рис. 7,а пунктиром.

На рис. 7,а показано, что одна и та же механическая характеристика может соответствовать на разных участках различным режимам работы асинхронного двигателя: в первом квадранте эта характеристика соответствует двигательному режиму работы, во втором — от синхронной скорости и выше — генераторному режиму, в четвертом — противовключению.

На рис. 8,а представлена схема включения двигателя при динамическом торможении. Обмотки статора при этом подключаются к сети постоянного тока. На рис. 8,б изображена механическая характеристика асинхронной машины при динамическом торможении. Режим динамического торможения используется для быстрого торможения, а также для регулирования скорости спуска тяжелого груза подъемным механизмом. Характеристика при этом расположена в четвертом квадранте.

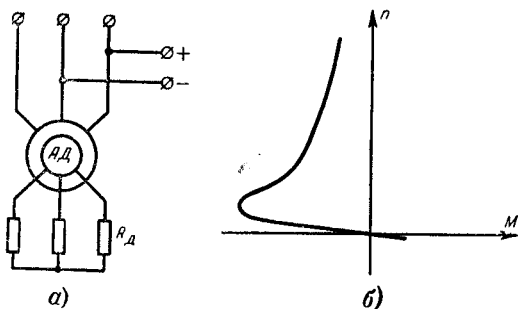


Рис. 8. Схема соединения (а) и механическая характеристика (б) асинхронного двигателя при динамическом торможении.

Регулирование скорости вращения электродвигателей может характеризоваться рядом показателей, которые определяют соответствие того или иного способа изменения скорости заданным условиям технологического процесса, особенностям работы производственного механизма и т. д. Основными техническими показателями регулирования являются следующие:

1) Предел изменения скорости вращения (диапазон регулирования D), под которым понимается отношение максимальной скорости вращения $n_{\text{макс}}$ к минимальной $n_{\text{мин}}$:

$$D = \frac{n_{\text{макс}}}{n_{\text{мин}}}. \quad (9)$$

Диапазон регулирования скорости, требуемый по условиям работы механизма, оказывает существенное влияние на выбор способа регулирования. При этом необходимо учитывать изменение жесткости механических характеристик при регулировании скорости.

2) Плавность регулирования характеризуется скачком скорости при переходе с одной характеристики двигателя на другую.

Плавность регулирования скорости зависит от выбранного метода регулирования и должна соответствовать заданным условиям работы механизма. В качестве примера неплавного, ступенчатого регулирования скорости можно привести метод управления асинхронным двигателем с помощью изменения числа пар полюсов машины. К способам, обеспечивающим плавное регулирование, относятся частотное управление двигателями, регулирование напряжением на его зажимах и некоторые другие.

3) Экономичность регулирования характеризуется капитальными затратами, связанными с созданием системы электропривода, и потерями электрической энергии, которые имеют место при регулировании скорости. При создании конкретного регулируемого электропривода стремятся получить наименьшие капитальные затраты и наименьшие потери энергии при регулировании.

Экономически выгодным является такой регулируемый электропривод, который удовлетворяет всем техническим требованиям производственного механизма и относительно быстро окупается.

Для некоторых механизмов, работающих в повторно-кратковременном режиме (краны, лифты и др.), большую часть рабочего цикла двигатель работает на естественной характеристике и только относительно небольшое время работает на регулировочной характеристике, обычно на пониженной скорости. В этом случае потери электроэнергии на регулировочной характеристике сравнительно невелики, так как невелико время работы на ней. Поэтому здесь можно применять простые и дешевые способы регулирования, даже если они являются неэкономичными.

4) Направление возможного изменения скорости двигателя. При регулировании скорости вращения двигателя, как упоминалось выше, различают его естественную и регулировочные, искусственные, характеристики, получаемые при воздействии на двигатель со стороны системы регулирования. Одни методы регулирования позволяют получать искусственные характеристики, располагающиеся только ниже естественной

(регулирование напряжением на зажимах статора, добавочными сопротивлениями в цепи ротора и т. д.), другие — как ниже, так и выше (частотное управление, некоторые каскадные схемы).

5) Допустимая нагрузка двигателя при его работе на регулировочных характеристиках.

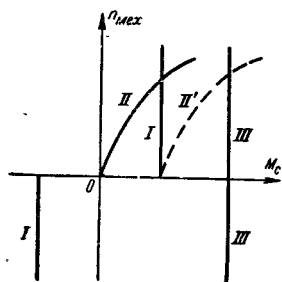


Рис. 9. Механические характеристики производственных механизмов.

Нормальным режимом работы двигателя при различных скоростях вращения считается такой, при котором его нагрев не будет превосходить заданного нормативного нагрева, что обеспечивает нормальную эксплуатацию электрической машины в течение определенного времени (обычно 15—20 лет). Перегрев двигателя резко сокращает срок его службы из-за быстрой порчи изоляции обмоток, а недоиспользование двигателя по нагреву ухудшает его энергетические показатели (к. п. д., $\cos \phi$).

Нагрев двигателя определяется главным образом величиной тока, проходящего по обмоткам статора и ротора и вызывающего в них потери энергии, превращающиеся в тепло. Электрическая машина рассчитывается так, что нормативный ее нагрев будет при прохождении по ее обмоткам номинальных величин токов. Таким образом, при работе двигателя на регулировочных характеристиках он может нести только такую нагрузку, при которой токи в его статорной и роторной цепях не превосходят номинальных значений. Эта нагрузка получила название допустимой нагрузки двигателя при его работе на искусственных характеристиках. Для ее определения необходимо знание закономерностей изменения момента сопротивления механизма при регулировании его скорости вращения, т. е. его механической характеристики. Несмотря на большое многообразие производственных машин и механизмов, они могут быть разделены по виду механических характеристик на три группы. Качественный их вид показан на рис. 9. Характеристику типа I имеют механизмы, сопротивление движению в которых оказывают в основном силы трения. Момент сопротивления от действия этих сил всегда направлен навстречу

движению, поэтому при изменении направления движения он также меняет свой знак, как это и показано на рисунке. Характеристика типа *II*, которую иногда называют «вентиляторной», свойственна таким механизмам, как центробежные насосы, компрессоры, вентиляторы, воздуходувки и т. д., у которых по мере роста скорости вращения резко возрастает сопротивление движению. Степень увеличения момента сопротивления M_c определяется конкретным типом механизма, чаще всего она пропорциональна квадрату скорости.

Характеристику *III* имеют различного рода подъемные механизмы, у которых момент сопротивления на входном валу обусловлен действием сил притяжения земли. Сила тяжести поднимаемого груза будет всегда действовать по направлению к центру земли, поэтому момент сопротивления имеет постоянный знак вне зависимости от направления вращения вала двигателя.

Как правило, механические характеристики конкретных производственных машин имеют более сложный вид, чем показанные на рис. 9. Это вызвано тем положением, что на практике момент сопротивления при движении обусловлен различными сочетаниями упомянутых выше сил сопротивления. Для примера на рис. 9 показана характеристика *II'*, построенная для «вентиляторной» нагрузки с учетом действия в механизме сил трения.

Знание механических характеристик производственного механизма позволяет также определять установившуюся скорость вращения электродвигателя при его работе с данным механизмом, а также условия нормального пуска двигателя.

3. РЕОСТАТНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ

Одним из наиболее простых способов регулирования скорости вращения асинхронных двигателей является реостатное регулирование, т. е. регулирование введением дополнительных активных сопротивлений в цепи обмоток двигателя.

Принципиально реостатное регулирование может быть осуществлено введением активного сопротивления в статорные (рис. 10,а) или в роторные (рис. 10,б) цепи. Однако практически для целей регулирования скорости преимущественно применяются дополнительные сопротивления роторной цепи по схеме на рис. 10,б. Это свя-

зано с тем, что схеме на рис. 10, а свойственны следующие существенные недостатки.

На рис. 11 представлены механические характеристики асинхронного двигателя, построенные для различных значений дополнительных активных сопротивлений статорной цепи. Из них видно, что с увеличением сопротивления критический момент двигателя уменьшается. Это определяется тем, что с увеличением дополнительного сопротивления падение напряжения на нем увеличивается, что приводит к уменьшению напряжения на за-

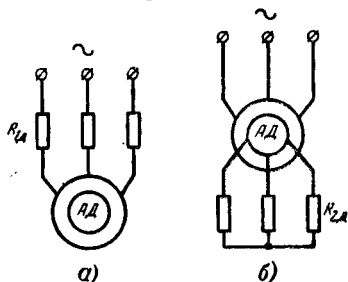


Рис. 10. Включение дополнительных активных сопротивлений в цепь статора (а) и ротора (б) асинхронного двигателя.

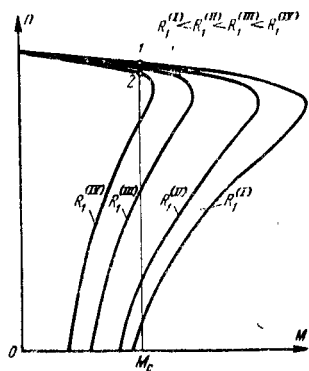


Рис. 11. Механические характеристики при различных дополнительных активных сопротивлениях в статорной цепи.

жимах двигателя и, в конечном счете, к уменьшению момента. Заметим, что уменьшение критического момента нежелательно, так как оно ведет к уменьшению перегрузочной способности двигателя.

Так как устойчивая работа двигателя возможна только в пределах критического момента, снижаемого введением в статорную цепь сопротивлений, диапазон регулирования при таком способе невелик. Так, например, введение дополнительного сопротивления R_1^V , снижающего критический момент приблизительно вдвое, снижает скорость вращения двигателя от соответствующей точки 1 (рис. 11) до точки 2, т. е. незначительно.

Наконец, при понижении напряжения на статоре повышаются роторный и статорный токи, как это следует из формулы (7).

Рассмотренные причины — уменьшение критического момента и малый диапазон регулирования скорости —

определяют тот факт, что реостатное регулирование скорости введением активного сопротивления в статорную цепь не получило широкого практического распространения.

Следует отметить, что схема, приведенная на рис. 10,а, имеет относительно широкое применение для ограничения пускового момента асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Она применяется, например, в приводах металлорежущих станков, когда для предотвращения ударов в механических передачах требуется уменьшение начального момента двигателя.

Для регулирования скорости асинхронного двигателя широкое применение находит введение дополнительного активного сопротивления в роторную цепь. Этот способ регулирования может быть применен для асинхронных двигателей с контактными кольцами, к щеткам которых подсоединяются зажимы от внешних дополнительных активных сопротивлений.

Введение дополнительных активных сопротивлений в роторную цепь позволяет простым способом регулировать скорость двигателя в относительно широких пределах. Допустим, что асинхронный двигатель вращается со скоростью n_1 и преодолевает при этом статический момент M_c . Введем дополнительное сопротивление в роторную цепь. При этом ток роторной цепи уменьшится, так как увеличилось ее сопротивление. Уменьшение роторного тока приведет к уменьшению электромагнитного момента, который станет меньше статического, в результате чего скорость двигателя начнет уменьшаться. Уменьшению скорости соответствует увеличение скольжения s двигателя, а значит и увеличение э. д. с. ротора, которая равна $E_{2к}s$, где $E_{2к}$ — э. д. с. ротора при неподвижном двигателе. При увеличении э. д. с. начнет увеличиваться ток ротора и электромагнитный момент двигателя. Когда последний вновь станет равным статическому моменту, изменение скорости прекратится, и двигатель вновь будет работать в установившемся режиме со скоростью n_2 , которая меньше n_1 .

Существенно отметить, что при введении дополнительного активного сопротивления в роторную цепь скорость двигателя изменяется в относительно широких пределах, а критический момент двигателя при регулировании остается постоянным. Следовательно, перегрузочная способность двигателя при этом не уменьшается.

Рассмотрим указанные положения несколько подробнее. Располагая параметрами n_0 , r_1 , x_1 , x'_2 асинхронного двигателя, можно на основании формулы (6) построить зависимость момента двигателя M от отношения s/r'_2 . Эта зависимость имеет вид кривой, представленной на рис. 12, и верна при любом сопротивлении ротора r'_2 .

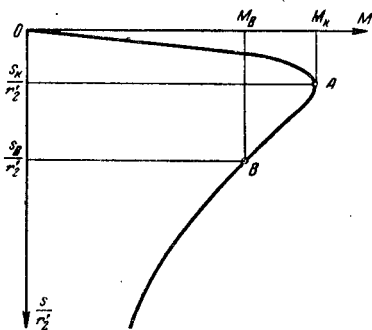


Рис. 12. Зависимость момента асинхронного двигателя от отношения s/r'_2 .

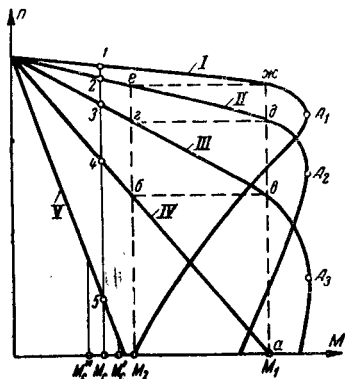


Рис. 13. Механические характеристики при различных дополнительных сопротивлениях в роторной цепи.

Следовательно, величина критического момента не зависит от сопротивления ротора. График кривой на рис. 12 может быть использован для построения механических характеристик асинхронного двигателя при разных сопротивлениях ротора. Для этого достаточно масштаб по оси ординат изменить в r'_2 раз. Полученную таким образом кривую зависимости момента двигателя от скольжения легко перестроить в механическую характеристику, учитывая, что скорость двигателя связана со скольжением выражением

$$n = n_0(1 - s).$$

Если график на рис. 12 перестроить для величины сопротивления обмотки ротора, получим естественную механическую характеристику (кривая I на рис. 13).

Возьмем на графике рис. 12 точку A, которая соответствует критическому моменту асинхронного двигателя. Абсцисса точки A равна критическому моменту M_K , а ордината — отношению критического скольжения к со-

противлению ротора s_K/r'_2 . Умножив величину s_K/r'_2 на сопротивление обмотки ротора r'_{206M} , получим критическое скольжение, соответствующее естественной механической характеристике. Точке A на рис. 12 будет соответствовать точка A_1 кривой I на рис. 13. Умножив далее s_K/r'_2 на величину сопротивления, большую сопротивления обмотки ротора $(r'_{206M} + R'_{2д})$, получим критическое скольжение реостатной характеристики, которое больше критического скольжения естественной характеристики. Точке A на рис. 12 соответствует для сопротивления $r'_{206M} + R'_{2д}$ точка A_2 на рис. 13. Точка A_2 располагается ниже точки A_1 и лежит на механической характеристике II , которая соответствует сопротивлению ротора $r'_{206M} + R'_{2д}$. При дальнейшем увеличении сопротивления роторной цепи соответствующее критическое скольжение еще больше увеличится. В этом случае точке A на рис. 12 будет соответствовать точка A_3 на рис. 13.

Итак, при введении в роторную цепь асинхронного двигателя дополнительного активного сопротивления величина критического скольжения увеличивается, а механические характеристики деформируются, изменяются. Кривая I на рис. 13 обозначает естественную характеристику; при увеличении сопротивления роторной цепи получим реостатные характеристики соответственно II , III , IV , V . Заметим, что на характеристиках IV и V асинхронный двигатель развивает критический момент при отрицательных скоростях, т. е. в режиме противовключения, что на рис. 13 не показано.

Допустим, что асинхронный двигатель приводит в движение механизм, который характеризуется статическим моментом M_c , не зависящим от скорости, как показано на рис. 13. На естественной характеристике двигатель будет работать в точке 1, при введении дополнительного сопротивления в роторную цепь двигатель начинает работать в точке 2, при дальнейшем увеличении сопротивления в точке 3 и т. д. Как видно из рис. 13, при введении дополнительного сопротивления в роторную цепь скорость двигателя уменьшается. При таком регулировании скорость двигателя изменяется в относительно широких пределах — от скорости, соответствующей точке 1, до скорости, соответствующей точке 5, как показано на рис. 13.

Следует подчеркнуть, что характеристики I , II , III , IV и V дают разные качественные показатели регулиро-

вания скорости двигателя. Характеристика V является наиболее мягкой, а характеристика I наиболее жесткой. Работа двигателя в точке 5 характеристики V является нестабильной, поскольку уже при незначительном уменьшении статического момента, например от M_c до M''_c скорость двигателя возрастает почти в 2 раза, а при увеличении от M_c до M'_c скорость уменьшается почти до нуля.

Если двигатель работает в точке 1 на характеристике I , то его работа будет намного стабильней, так как при изменении момента скорость двигателя изменяется незначительно.

Обычно механические характеристики вида V не используются для нормального режима работы. Они используются для кратковременного снижения скорости привода (электрические подъемные краны), для получения пониженной ревизионной скорости (шахтные подъемные установки), для выбора люфтов в передачах кинематической цепи и слабину канатов перед пуском электропривода (электрические подъемные краны) и т. д.

Если имеется хотя бы одна механическая характеристика асинхронного двигателя при известном активном сопротивлении роторной цепи, легко можно построить механические характеристики при любом другом сопротивлении ротора. Для доказательства этого положения рассмотрим произвольную точку B на рис. 12. Ордината точки B равна s_B/r'_2 . Следовательно, когда двигатель развивает момент M_B , при любых сопротивлениях ротора $r_2^{(1)}$ и $r_2^{(2)}$ соблюдается равенство

$$\frac{s_B^{(1)}}{r_2^{(1)}} = \frac{s_B^{(2)}}{r_2^{(2)}} \quad \text{или} \quad \frac{s_B^{(1)}}{s_B^{(2)}} = \frac{r_2^{(1)}}{r_2^{(2)}}. \quad (10)$$

Следовательно, при одинаковом значении момента двигателя отношение скольжений пропорционально отношению соответствующих активных сопротивлений. Это положение и используется для построения механических характеристик при разных сопротивлениях ротора.

Запишем соотношение (10) в виде

$$s^{(2)} = s^{(1)} \frac{r_2^{(2)}}{r_2^{(1)}}. \quad (11)$$

Допустим, что нам известно сопротивление обмотки ротора r'_{206M} и соответствующая механическая характеристика представлена кривой 1 на рис. 13. Необходимо построить характеристику, соответствующую сопротивлению роторной цепи R'_2 . Выражение (11) в этом случае имеет вид:

$$s^{(2)} = s^{(1)} \frac{R'_2}{r'_{206M}}. \quad (12)$$

Зная скольжение для точки 1 на рис. 13, находим по выражению (12) скольжение точки 2, соответствующее тому же моменту двигателя, что и для точки 1. Аналогично можно по точке Ж найти точку Д, по точке А₁ найти точку А₂ и т. д.

Регулировочные сопротивления, включаемые в роторную цепь асинхронного двигателя, используются и для пуска электропривода. В этом случае внешние сопротивления роторной цепи называют иногда пускорегулирующими.

На рис. 14 представлена схема включения асинхронного двигателя, позволяющая осуществить пуск, реверсирование и регулирование скорости вращения. Управление производится реверсивным магнитным контроллером, т. е. контакты контроллера коммутируют цепи катушек контакторов, а силовые контакты контакторов, в свою очередь, коммутируют статорные и роторные цепи асинхронного двигателя.

С помощью реверсивных контакторов В и Н производится выбор направления вращения и реверсирование

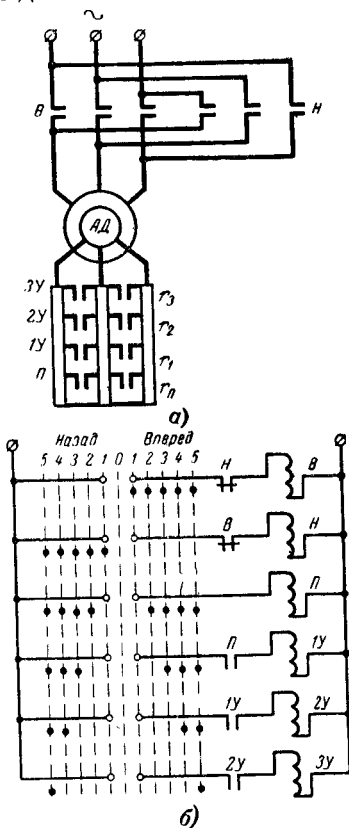


Рис. 14. Магнитный контроллер.
а — силовая схема; б — схема управления.

двигателя. Силовые контакты контакторов $П$, $1У$, $2У$ и $3У$ осуществляют переключения ступеней сопротивлений в роторной цепи. Контакт $П$ служит для осуществления процесса противовключения и коммутирует рассчитанное для этого режима сопротивление роторной цепи двигателя.

Схема работает следующим образом. Переведем рукоятку командоконтроллера во второе положение «вперед». В этом случае замкнется контактор $В$, подключающий статор двигателя к сети переменного тока для условного направления движения «вперед». Замкнется также контактор $П$, шунтирующий соответствующее сопротивление роторной цепи. Двигатель при этом будет работать на механической характеристике IV , соответствующей введенным в роторную цепь сопротивлениям r_1 , r_2 и r_3 . Под действием электромагнитного момента двигателя скорость его начнет увеличиваться.

При разгоне скорость и момент двигателя изменяются. Это изменение соответствует характеристике IV (рис. 13), пока сопротивление ротора не меняется. Поэтому можно считать, что каждому моменту времени соответствует определенная точка характеристики IV . В начале разгона состояние двигателя соответствует точке a , т. е. скорость равна нулю, а момент двигателя M_1 . Дальше эта точка перемещается вверх по характеристике IV .

Когда будет достигнута точка b , переведем рукоятку командоконтроллера в третье положение. При этом замкнется контактор $1У$, силовые контакты которого зашунтируют сопротивление r_1 роторной цепи. Выведенному сопротивлению r_1 соответствует механическая характеристика III . При выведении сопротивления r_1 ток ротора резко изменится (увеличится, так как сопротивление ротора уменьшится), что приведет к изменению момента. Точка, характеризующая состояние двигателя, переместится из b на характеристике IV в $в$ на характеристике III . Далее разгон двигателя осуществляется по характеристике III до точки $г$. В этот момент рукоятку командоконтроллера следует перевести в четвертое положение, что приведет к замыканию контактора $2У$, силовые контакты которого зашунтируют сопротивление r_2 роторной цепи.

Точка, характеризующая состояние двигателя, переместится из $г$ на характеристике III в $д$ на характеристи-

ке II, по которой производится дальнейший разгон двигателя до точки e , после чего рукоятку командоконтроллера следует перевести в пятое положение, что приведет к срабатыванию контактора ЗУ и к закорачиванию сопротивления r_3 . При этом дополнительное сопротивление роторной цепи станет равно нулю и двигатель будет работать на естественной характеристике.

Точка, характеризующая состояние двигателя, перемещается от $ж$ на характеристике I до точки I; когда момент двигателя станет равным статическому, скорость перестанет изменяться и наступит установившийся режим.

Таким образом, при разгоне двигателя его момент изменяется от значения M_1 до M_2 . Двигатель в процессе разгона работает на разных механических характеристиках, соответствующих различным сопротивлениям роторной цепи.

Если рукоятку командоконтроллера остановить в каком-то промежуточном положении, то двигатель будет работать в установившемся режиме на промежуточных механических характеристиках, в точке 2, 3 или 4.

Схема на рис. 14 позволяет производить реостатный пуск и регулирование скорости вращения асинхронного двигателя. Эта схема представляет собой упрощенный вариант (без защитных и некоторых других вспомогательных цепей) магнитного контроллера, управляющего механизмом передвижения тележки или моста электрического мостового крана.

Для более полной оценки реостатного регулирования скорости вращения асинхронных двигателей рассмотрим основные показатели такого регулирования.

Диапазон регулирования скорости при реостатном регулировании небольшой — порядка 2—2,5:1. Он ограничивается нестабильностью работы двигателя при больших значениях сопротивления ротора.

Плавность регулирования при реостатном регулировании обычно небольшая. Чаще всего для регулирования применяют металлические реостаты, с помощью которых осуществляется ступенчатое регулирование. Иногда для реостатного регулирования применяются жидкостные реостаты, которые принципиально позволяют получить плавное регулирование.

Экономичность реостатного способа регулирования определяется как и обычно, стоимостью используемых

средств регулирования и расходами при эксплуатации. Затраты, связанные с созданием данной системы электропривода, относительно невелики. Для регулирования чаще всего применяются относительно простые и дешевые металлические ящики сопротивлений. Однако при эксплуатации этой системы затраты велики, поскольку при реостатном регулировании потери энергии значительны. Электрические потери в роторной цепи, называемые «потерями скольжения», равны согласно выражению (86):

$$\Delta P_{\text{элз}} = \frac{Mn_0 s}{9,55}.$$

Чем больше величина скольжения s , тем больше потери в роторе. Реостатное регулирование скорости вращения асинхронных двигателей неэкономично.

При реостатном регулировании возможно осуществлять изменение скорости двигателя только вниз от основной скорости.

4. РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ИЗМЕНЕНИЕМ НАПРЯЖЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ МАГНИТНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ И ТИРИСТОРОВ

Регулирование скорости вращения асинхронных электродвигателей за счет изменения величины напряжения, подводимого к зажимам статора, является одним из наиболее простых методов регулирования. Этот способ позволяет с помощью несложных и надежных схем управления осуществлять плавное регулирование скорости вращения электродвигателя, изменение ее направления (реверс двигателя), а также легкую автоматизацию работы электропривода. В схемах управления электроприводом используются надежные бесконтактные устройства — магнитные усилители и управляемые полупроводниковые диоды (тиристоры), которые в широком ассортименте выпускаются отечественной электропромышленностью. Это позволяет применять такие системы электропривода на различные мощности — до нескольких сотен киловатт. В то же время этот метод регулирования отличается невысокими экономическими показателями, так как процесс регулирования скорости вращения двигателя сопровождается значительными потерями энергии в его роторной цепи.

Принципиальная схема электропривода с использованием короткозамкнутого асинхронного двигателя представлена на рис. 15,а. Между сетью переменного тока, напряжением U_c и статором двигателя включен преобразователь напряжения, выходное напряжение которого регулируется с помощью небольшого тока управления I_y .

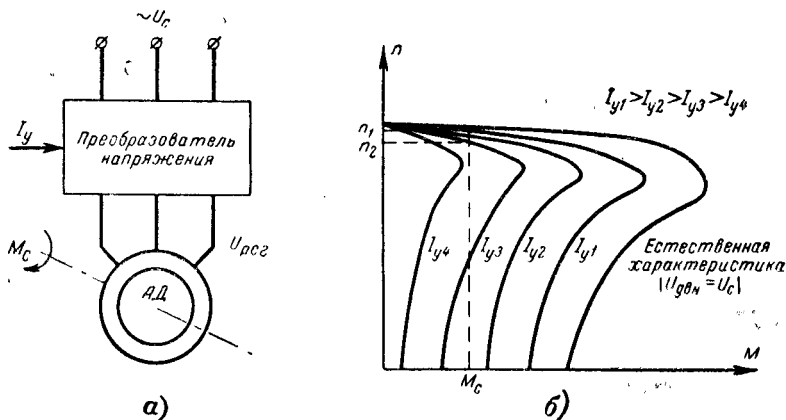
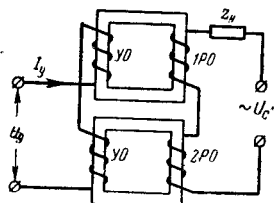


Рис. 15. Блок-схема (а) и механические характеристики (б) при регулировании напряжением.

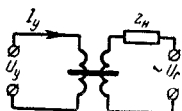
Изменяя величину этого тока, можно регулировать напряжение на статоре двигателя U_{psc} в пределах от величины сетевого напряжения U_c и практически до нуля. Механические характеристики, которые будет иметь двигатель при различных значениях тока управления I_y , показаны на рис. 15,б. Если двигатель приводит в движение механизм с постоянным моментом сопротивления M_c , то его скорость вращения при изменении тока управления от I_{y1} до I_{y3} изменяется от n_1 до n_2 .

В преобразователях напряжения этой системы электропривода обычно используются магнитные усилители или управляемые диоды — тиристоры. При этом принципы построения схем привода, общие показатели процесса регулирования скорости, вид механических характеристик одинаковы в том и другом случае. Исторически же сложилось так, что магнитные усилители как элементы автоматики стали известны гораздо раньше, чем тиристоры, в связи с чем большинство действующих промышленных приводов этого типа выполнено с использованием именно магнитных усилителей.

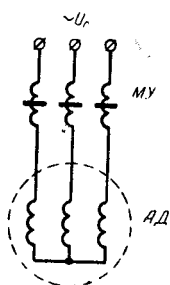
Остановимся кратко на работе этого электромагнитного устройства как основного элемента преобразователя напряжения асинхронного регулируемого электропривода.



а)



б)



в)

Рис. 16. Магнитный усилитель.

а — схема соединения обмоток; б — условное обозначение; в — схема соединения с асинхронным двигателем.

Схема простейшего однофазного магнитного усилителя показана на рис. 16,а, где 1РО, 2РО и УО — соответственно рабочие и управляющая обмотки магнитного усилителя, намотанные на сердечники из магнитного материала, z_n — сопротивление нагрузки, включаемое на напряжение сети U_c последовательно с рабочими обмотками 1РО и 2РО. Принцип действия магнитного усилителя основан на том явлении, что индуктивное сопротивление его рабочих обмоток может регулироваться с помощью небольшого по величине тока управления I_y , подаваемого в обмотку управления УО. Если этот ток равен нулю, то сопротивление рабочих обмоток оказывается весьма большим, при этом практически все напряжение сети ложится на эти обмотки и напряжение на нагрузке близко к нулю. По мере увеличения тока управления I_y или, как обычно говорят, при подмагничивании магнитного усилителя сопротивление его обмоток 1РО и 2РО падает, соответственно уменьшается падение напряжения на них и раст

стет напряжение на нагрузке и при некотором токе управления почти все напряжение сети оказывается приложенным к нагрузке. Условное обозначение схемы магнитного усилителя показано на рис. 16,б. Для регулирования напряжения на статоре трехфазного электродвигателя собирается схема, силовая часть которой показана на рис. 16,в, где нагрузкой магнитного усилителя МУ является статорная обмотка асинхронного короткоза-

мкнутаго двигателя АД. Такая схема собирается или с помощью трех однофазных магнитных усилителей (рис. 16,а), или с использованием одного трехфазного усилителя. При регулировании тока управления двигатель будет иметь механические характеристики, показанные выше на рис. 15,б.

Отметим основные качественные показатели получаемых характеристик. Из рис. 15,б видно, что по мере уменьшения тока управления резко снижается критический момент и уменьшается жесткость механических характеристик двигателя. Кроме того, диапазон регулирования скорости двигателя $D = n_1/n_2$ весьма мал. В силу этих причин регулирование скорости короткозамкнутых асинхронных электродвигателей в такой схеме (рис. 16,б) не нашло практического применения. Большой диапазон можно получить, если в качестве приводного электродвигателя использовать двигатель с контактными кольцами и включить в его роторную цепь добавочное активное сопротивление $R_{доб}$.

Следует отметить, что включение дополнительного сопротивления R_d в цепь ротора двигателя помимо целей регулирования скорости имеет также и другое важное назначение: при его наличии часть потерь скольжения в виде тепла выделяется в этом сопротивлении, т. е. вне машины, чем облегчается ее тепловой режим.

Схема с дополнительными сопротивлениями в роторной цепи двигателя с контактными кольцами показана на рис. 17,а, а его механические характеристики на рис. 17,б. Однако и в этой схеме с уменьшением тока управления I_y снижается критический момент двигателя и падает жесткость его механических характеристик. Из-за этого при возможных колебаниях момента сопротивления механизма M_c скорость его движения будет резко изменяться, что в большинстве случаев бывает недопустимо. Действительно, пусть, например, момент сопротивления на валу двигателя равен M_{c1} (рис. 17,б). Если ток управления магнитного усилителя равен $I_{уз}$, то рабочая точка электропривода находится в положении 1. Предположим, что по каким-то причинам увеличился момент нагрузки на валу двигателя до значения M_{c2} . Двигатель начнет замедляться и в конечном итоге остановится, так как его критический момент меньше момента сопротивления на его валу. В то же время по условиям производственного процесса допустимо уменьшение ско-

рости только до значения n_3 . Очевидно, что для выполнения этого требования ток управления магнитного усилителя должен быть увеличен до значения I_{y2} , при этом момент двигателя увеличится и рабочая точка электропривода переместится в положение 2. Двигатель будет вращаться со скоростью n_3 , преодолевая новый момент сопротивления M_{c2} . При уменьшении момента сопротив-

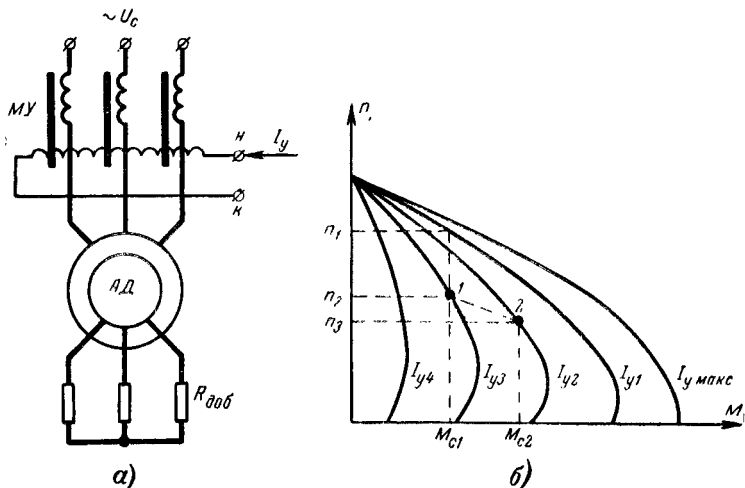


Рис. 17. Схема соединения (а) и механические характеристики (б) системы магнитный усилитель — асинхронный двигатель с контактными кольцами.

ления на валу двигателя ток управления магнитного усилителя должен быть уменьшен с тем, чтобы предотвратить чрезмерное возрастание скорости вращения двигателя. Тем самым для получения хороших характеристик асинхронного электродвигателя, управляемого с помощью магнитных усилителей в цепи статора, необходимо регулировать их ток управления в зависимости от колебаний нагрузочного момента. Это может быть достигнуто, например, в том случае, когда за работой электропривода наблюдает оператор, который при недопустимых колебаниях скорости производственного механизма может вручную регулировать ток управления магнитного усилителя, поддерживая эту скорость на требуемом уровне. Но наиболее просто и с лучшими результатами эти функции выполняют системы автоматического регулирования скорости, которые без участия человека обеспечи-

вают поддержание скорости вращения электродвигателя на заданном уровне. Достигается это за счет введения в цепь управления дополнительных электрических сигналов, которые реагируют на колебания нагрузочного момента двигателя и соответствующим образом воздействуют на ток управления магнитного усилителя. Рассмотрим для примера принцип действия распространен-

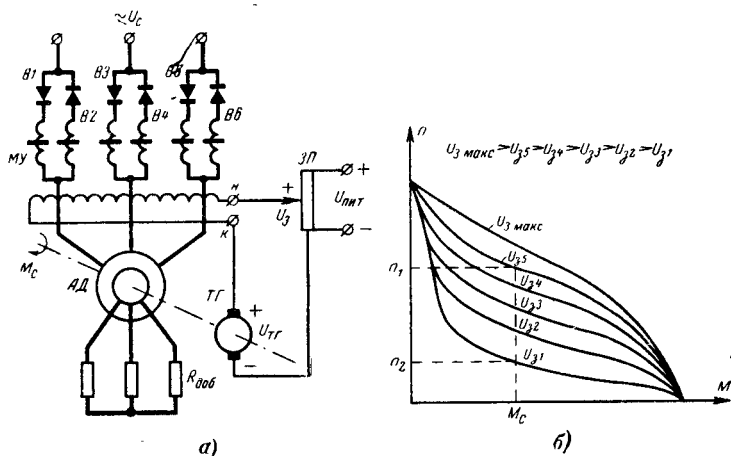


Рис. 18. Схема соединения (а) и механические характеристики (б) системы магнитный усилитель — асинхронный двигатель с обратной связью по скорости.

ной системы автоматического регулирования скорости вращения асинхронного электродвигателя с контактными кольцами, в которой используется сигнал, пропорциональный скорости вращения двигателя или, как говорят, обратная связь по скорости двигателя. Принципиальная электрическая схема показана на рис. 18, а. На валу асинхронного двигателя находится небольшая электрическая машина ТГ (тахогенератор), у которой напряжение на зажимах якоря $U_{ТГ}$ пропорционально скорости двигателя $U_{ТГ} \equiv n_{\text{дв}}$. Это напряжение сравнивается с задающим напряжением U_3 , снимаемым с потенциометра ЗП, причем эти напряжения включены навстречу друг другу. Ток в обмотке управления I_y поэтому определяется разностью этих напряжений и равен:

$$I_y = \frac{U_3 - U_{ТГ}}{r_y}, \quad (13)$$

где U_z — задающее напряжение, снимаемое с потенциометра ЗП;

$U_{\text{ТГ}}$ — напряжение тахогенератора;

r_y — общее сопротивление цепи управления.

Рассмотрим работу этой схемы управления при увеличении нагрузки на валу электродвигателя. Пусть при скорости вращения двигателя n_2 (рис. 17,б) таким образом были подобраны задающий сигнал U_z , сигнал обратной связи $U_{\text{ТГ}}$ и общее сопротивление цепи r_y , что ток управления, определяемый по выражению (13), равен $I_{\text{уз}}$. Тогда при моменте сопротивления M_{c1} электропривод будет работать в точке 1. При увеличении момента нагрузки на валу двигателя до величины M_{c2} скорость двигателя начнет снижаться, соответственно начнет уменьшаться напряжение тахогенератора $U_{\text{ТГ}}$. Уменьшение этого напряжения в соответствии с выражением (13) вызовет увеличение тока управления I_y , рост напряжения на зажимах электродвигателя, увеличение его момента и тем самым прекращение уменьшения скорости. Путем соответствующего подбора тахогенератора и общего сопротивления цепи управления r_y можно получить механические характеристики электропривода с нужной жесткостью, например вида 1—2 (рис. 17,б).

Изменяя с помощью потенциометра ЗП величину задающего напряжения U_z , можно получить ряд механических характеристик электропривода, которые показаны на рис. 18,б. Как видно из рисунка, полученные характеристики имеют удовлетворительную жесткость и перепружочную способность и позволяют обеспечить широкий диапазон регулирования скорости вращения двигателя. В системах автоматического регулирования скорости применяются и другие виды сигналов обратных связей: по току статора двигателя, напряжению на его зажимах, по току или напряжению ротора (для двигателей с контактными кольцами) и некоторые другие. Выбор типов обратных связей и их числа определяется заданными требованиями к жесткости механических характеристик двигателя и диапазону регулирования скорости.

Заметим, что в схеме на рис. 18,а в качестве магнитного усилителя использован так называемый магнитный усилитель с самоподмагничиванием, который в настоящее время является основным типом магнитных усилителей, применяемых в системах автоматизированного

электропривода. Схема его включения отличается той особенностью, что последовательно с его рабочими обмотками включаются выпрямители $B1-B6$ (рис. 18,а). Сконструированные по такой схеме магнитные усилители обладают высоким коэффициентом усиления, лучшим быстродействием и рядом других преимуществ по сравнению с магнитными усилителями без обратных связей, которые были рассмотрены ранее.

Помимо регулирования скорости вращения асинхронных электродвигателей при использовании магнитных усилителей в цепи статора может быть осуществлено изменение направления вращения электродвигателя — его реверс.

Одна из возможных схем реверса асинхронного электродвигателя, иногда называемая шестидроссельной схемой управления, приведена на рис. 19, где показана ее

силовая часть, образованная двумя трехфазными магнитными усилителями $1МУ$ и $2МУ$. При подмагничивании усилителя $1МУ$ на двигатель будет подаваться питающее напряжение с последовательностью фаз ABC и он будет вращаться, например, по часовой стрелке. Если теперь подмагнитить усилитель $2МУ$ и размагнитить $1МУ$, то на двигатель будет подана другая последовательность фаз ACB , магнитное поле двигателя изменяет направление вращения. В этой схеме, а также в других возможных реверсивных схемах могут применяться упомянутые выше обратные связи, которые используются для получения требуемых механических характеристик электропривода.

В последние годы в схемах автоматического регулирования скорости электропривода широкое применение находят новые полупроводниковые приборы — управляемые диоды или, как их обычно называют, тиристоры. Рассмотрим вначале работу тиристора T при регулировании напряжения на какой-либо нагрузке Z_H в однофазной схеме включения, показанной на рис. 20,а. Как обычный неуправляемый диод тиристор может проводить

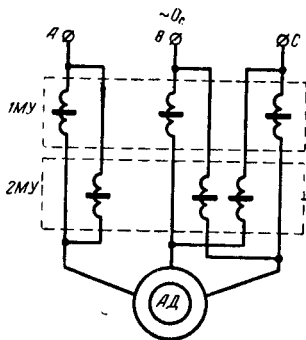


Рис. 19. Реверсивная шестидроссельная схема управления асинхронным двигателем.

ток лишь в том случае, когда потенциал на его аноде 1 выше, чем на катоде 2. Однако в отличие от работы неуправляемого диода, для прохождения тока через тиристор также необходимо, чтобы на его управляющий электрод 3 был подан небольшой ток управления

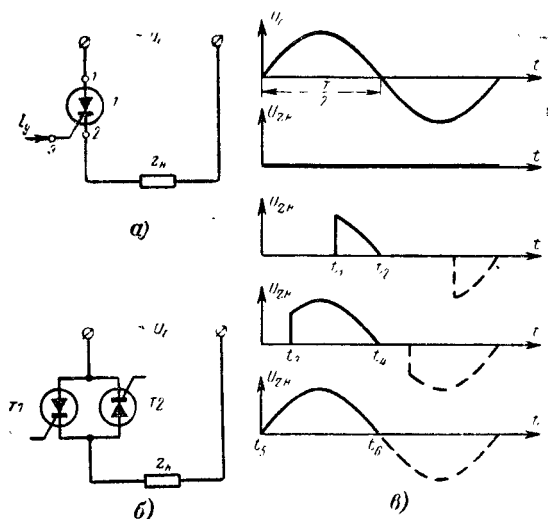


Рис. 20. Однополупериодная (а) и двухполупериодная (б) схемы включения тиристоров и временные диаграммы напряжений (в).

ния I_y . Таким образом, работу тиристора можно представить как действие некоторого ключа, который замыкает цепь нагрузки при подаче на электрод 3 управляющего сигнала I_y и наличии более высокого потенциала на аноде по сравнению с потенциалом катода. Закрывается тиристор в том случае, когда потенциал катода 2 становится выше потенциала анода 1, т. е. когда питающее напряжение прикладывается в непроводящем направлении.

Обратимся теперь непосредственно к схеме на рис. 20,а. Питающее напряжение сети U_c изменяется по времени по синусоидальному закону, как это показано на рис. 20,в. При нулевом токе управления в течение всего периода питающего напряжения U_c тиристор будет «закрит» и напряжение на нагрузке равно нулю. Если теперь в момент времени t_1 подать на электрод 3 ток управления, то тиристор «откроется» и к нагрузке Z_n

будет приложено напряжение, представляющее собой часть синусоиды питающего напряжения U_c (сплошные линии на рис. 20,в). В момент времени t_2 тиристор закроется, так как полярность напряжения на аноде и катоде будет соответствовать непроводящему направлению. Рисунок 20,в иллюстрирует также работу схемы при подаче управляющего сигнала в момент времени t_3 и в тот момент времени t_5 , когда потенциал анода 1 становится более положительным по сравнению с потенциалом катода 2. Как видно из рис. 20,в напряжение на нагрузке в этой схеме может регулироваться только в течение одного полупериода $T/2$ питающего напряжения, в силу чего схема на рис. 20,а получила название однополупериодной. Для осуществления регулирования в оба полупериода собирается так называемая встречно-параллельная схема соединения тиристорov, показанная на рис. 20,б. В этой схеме тиристоры $T1$ и $T2$ работают поочередно в оба полупериода питающего напряжения, когда полярность напряжения на их анодах и катодах соответствует проводящему направлению. Работа этой схемы может быть иллюстрирована кривыми рис. 20,в, изображенными сплошными и пунктирными линиями.

Для регулирования напряжения на зажимах трехфазного асинхронного двигателя собираются схемы, аналогичные приведенным на рис. 17,а, 18,а, 19,а, только в фазы двигателя вместо рабочих (силовых) обмоток магнитных усилителей включается пара тиристорov, собранных по схеме на рис. 20,б. Примеры выполнения силовой части нереверсивной и реверсивной схем электропривода показаны на рис. 21. При использовании описанных выше обратных связей тиристорный асинхронный электропривод обладает характеристиками, показанными на рис. 18,б. Таким образом, вне зависимости от типа используемых в преобразователе напряжений (рис. 15,а) приборов — магнитных усилителей или тиристорov — принципы построения системы электропривода, его механические характеристики, экономические показатели работы остаются принципиально одними и теми же.

Основными достоинствами рассматриваемой системы электропривода, как уже отмечалось выше, являются ее простота, надежность, удобство в эксплуатации и дешевизна по сравнению с другими системами электропривода. Эти достоинства данной системы привода определя-

ются тем, что магнитные усилители и тиристоры являются бесконтактными элементами автоматики, которые в сочетании с асинхронным электродвигателем образуют систему электропривода, способную хорошо работать в тяжелых производственных условиях (агрессивная среда, запыленность помещения и т. д.). Легкость авто-

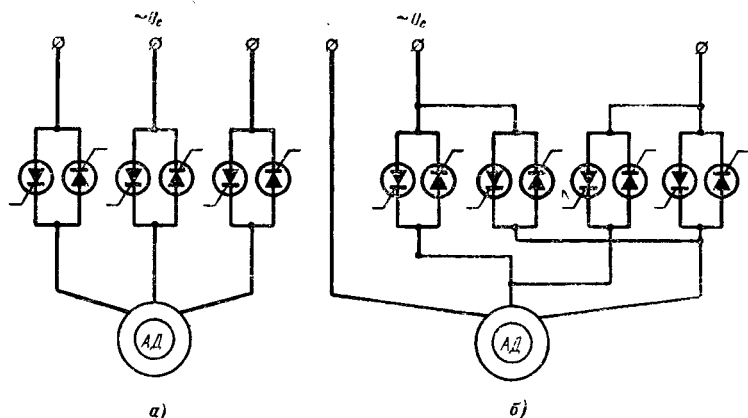


Рис. 21. Нереверсивная (а) и реверсивная (б) схемы управления асинхронного двигателя с помощью тиристоров.

матизации электропривода в общей технологической схеме производства, удобство управления, возможность бесконтактного реверса электродвигателя также являются достоинствами рассматриваемого метода. При использовании различных обратных связей (замкнутых систем автоматического регулирования) можно получить достаточно широкий диапазон регулирования скорости двигателя при достаточной жесткости его механических характеристик.

Вместе с этим данный метод имеет один существенный недостаток, который заключается в весьма невысокой экономичности процесса регулирования скорости, особенно при большом диапазоне ее изменения. Например, при диапазоне регулирования $D=2$ и постоянстве момента нагрузки на валу электродвигателя M_c значение к. п. д. электропривода составляет примерно 50%, при диапазоне $D=5$ значение к. п. д. уже равно 20% и при дальнейшем увеличении диапазона к. п. д. продолжает снижаться. Такое низкое значение к. п. д. асинхронного электропривода при регулировании его ско-

рости данным методом определяется, как уже говорилось выше, большими потерями энергии скольжения, которые выделяются в роторной цепи двигателя в виде тепла. Хотя большая часть роторных потерь выделяется вне двигателя — в дополнительных сопротивлениях, при значительном снижении скорости вращения возрастают потери в самом двигателе, так как при снижении напряжения при неизменном моменте увеличиваются токи ротора и статора, как это было пояснено ранее. Если двигатель работает длительно при значительно пониженной скорости и при этом не уменьшается момент нагрузки, он нагреется выше допустимого предела. В такой системе регулирования электродвигатель должен быть выбран на мощность, превосходящую мощность нагрузки на валу электродвигателя. Это завышение мощности двигателя тем больше, чем выше диапазон регулирования скорости и в значительной степени зависит также от вида нагрузки на его валу. При наиболее благоприятном для электродвигателя характере нагрузки — вентиляторном моменте сопротивления и большом диапазоне регулирования скорости — это завышение составляет 30—70%, при других видах нагрузки требуется еще большее завышение мощности двигателя. Проведенное сравнение данной системы электроприводов с другими возможными системами позволило определить границы целесообразного ее применения при различных видах нагрузки и диапазонах регулирования в длительном режиме работы. При постоянстве мощности нагрузки P_c на валу электропривода его использование целесообразно до мощностей порядка 4—5 кВт при диапазоне регулирования $D=3÷4$. При постоянстве момента сопротивления M_c возможно использование электропривода на мощности до 15—20 кВт при большом диапазоне регулирования, а в отдельных случаях — до 100 кВт. При вентиляторном моменте сопротивления электропривод может быть с успехом использован до мощностей порядка 100 кВт и выше. Показатели работы данной системы электропривода значительно улучшаются, если она используется для привода механизмов, работающих в повторно-кратковременных режимах.

Подводя итоги, сделаем краткие выводы.

Диапазон регулирования скорости вращения электродвигателя в этой системе обычно невысок, что в основном определяется невысокой экономичностью процесса

регулирования при больших диапазонах. Экономичность электропривода возрастает при кратковременной работе электродвигателя на низких скоростях вращения.

Жесткие механические характеристики могут быть получены при использовании различных видов обратных связей, т. е. в замкнутой системе автоматического регулирования.

Плавность регулирования скорости вращения асинхронного двигателя в этой системе весьма высокая.

Регулирование скорости двигателя может производиться только вниз от естественной (основной) характеристики.

Регулирование скорости вращения асинхронного электродвигателя изменениями напряжения на зажимах его статора осуществляется с помощью простых по структуре схем автоматического регулирования. В этих схемах используются серийно выпускаемые бесконтактные устройства и приборы, которые обеспечивают надежную работу системы электропривода в тяжелых условиях окружающей среды.

5. ЧАСТОТНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ

Наиболее экономичным методом регулирования скорости вращения асинхронных двигателей, позволяющим получить в то же время и хорошие механические характеристики электропривода, является так называемый частотный метод управления. Сущность его заключается в том, что для изменения скорости двигателя изменяется частота питающего напряжения, в связи с чем изменяется скорость вращения магнитного поля двигателя в соответствии с выражением (1).

Осуществить этот метод регулирования можно в том случае, если двигатель подключен к источнику питания, преобразующего энергию стандартной частоты 50 гц в энергию переменной, управляемой частоты. Как правило, для обеспечения энергетически выгодных режимов работы двигателя и получения качественных регулировочных характеристик одновременно с изменением частоты питания двигателя по определенному закону меняется и величина подводимого к двигателю напряжения.

Упрощенная схема частотного регулируемого электропривода показана на рис. 22. На вход преобразователя частоты и напряжения подается стандартное напряжение сети U_c (220 в, 380 в и т. д.) частоты $f_c = 50$ гц,

с его выхода получается переменное напряжение $U_{\text{рег}}$ регулируемой частоты $f_{\text{рег}}$, величины которых находятся между собой в определенном соотношении, определяемом видом нагрузки M_c . Регулирование выходной частоты и напряжения преобразователя осуществляется с помощью управляющего сигнала, изменение которого определяет в конечном итоге изменение скорости вращения асинхронного двигателя.

На рис. 22 в качестве приводного регулируемого двигателя показан короткозамкнутый асинхронный электродвигатель, который обычно и применяется в этой системе привода. Различные типы преобразователей частоты, которые нашли применение в области частотного регулирования электропривода, могут быть разделены на две группы, отличающиеся друг от друга по используемым техническим средствам и устройствам.

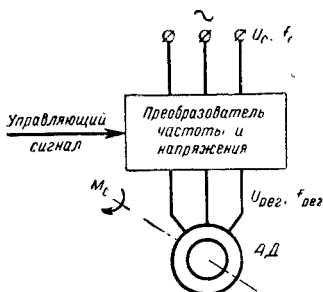


Рис. 22. Блок-схема частотного асинхронного электропривода.

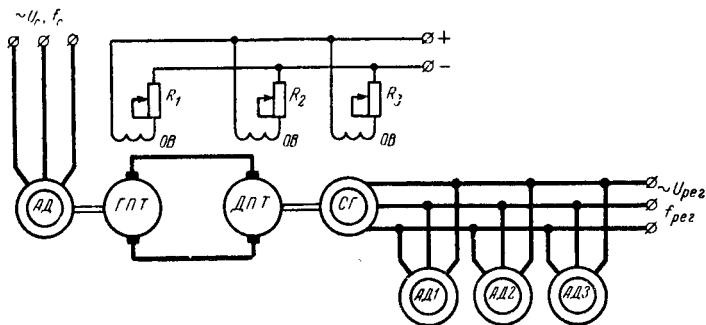


Рис. 23. Электромашинный преобразователь частоты.

Первую группу, которая исторически начала развиваться раньше, составляют так называемые машинные или вращающиеся преобразователи, в которых для получения переменной частоты используются обычные или специальные электрические машины. На рис. 23 в качестве примера приведена схема преобразователя частоты с синхронным генератором переменной частоты. Преоб-

разователь состоит из двух частей: агрегата постоянной скорости, включающего асинхронный двигатель АД (вместо него может быть использован и синхронный двигатель) и приводимый им генератор постоянного тока ГПТ, и агрегата переменной скорости вращения, состоящего из регулируемого двигателя постоянного тока ДПТ, приводящего во вращение синхронный генератор переменной частоты СГ. Двигатель АД питается от сети с частотой $f_c = 50$ гц, на зажимах генератора СГ частота может регулироваться. При изменении с помощью сопротивления R_1 тока возбуждения генератора ГПТ изменяется величина напряжения, подводимого к якору двигателя ДПТ, и тем самым скорость его вращения. При этом меняется и частота напряжения на зажимах генератора СГ (определяемая по выражению $f_{сг} = pn_{сг}/60$, где $n_{сг}$ — скорость вращения ротора генератора СГ; p — число пар полюсов генератора) и тем самым частота питания приводных асинхронных двигателей АД1, АД2 и АД3, подключенных к генератору СГ. Величина напряжения на зажимах асинхронных двигателей регулируется с помощью сопротивления R_3 , включенного в цепь возбуждения генератора СГ.

Применение этого преобразователя частоты позволяет плавно регулировать скорость вращения асинхронных двигателей АД1, АД2, АД3 в широком диапазоне, однако процессу регулирования частоты в этой системе присущи и существенные недостатки. Как видно, для создания преобразователя необходимо использование четырех электрических машин, рассчитанных на полную мощность потребителей (группы асинхронных двигателей), что определяет промоздкость установки и ее дороговизну, особенно при больших мощностях напрузки. Двойное преобразование энергии — энергии переменного тока частоты $f_c = 50$ гц в энергию постоянного тока и далее опять в энергию переменного тока регулируемой частоты — сопровождается выделением потерь энергии во всей цепи преобразования, что определяет невысокий коэффициент полезного действия системы. Например, если к. п. д. каждой из четырех машин системы рис. 23 составляет 0,9, то общий к. п. д. преобразователя будет равен 0,66, т. е. оказывается, что треть потребляемой из сети мощности идет только на потери в агрегате. Использование коллекторных машин постоянного тока требует непрерывного надзора и ухода, их работа сопровождается

ся шумом. И, наконец, процессу изменения частоты в этой системе свойственна инерционность регулирования, так как регулирование частоты связано с изменением скорости вращения агрегата ДПТ—СГ, обладающего значительной механической инерцией. Тем не менее машинный преобразователь частоты, построенный по схеме рис. 23, использовался для осуществления индивидуального привода рабочих ролягангов прокатного стана, а также для некоторых других производственных механизмов.

Известны также и другие схемы вращающихся преобразователей частоты, использующих как обычные, так и некоторые специальные электрические машины. Наибольшие перспективы развития среди них, помимо рассмотренной выше системы, имеют асинхронный преобразователь частоты, преобразователи частоты с использованием коллекторного генератора переменной частоты (системы М. П. Костенко) и одноякорных преобразователей, но всем этим системам в той или иной степени присущи недостатки, отмеченные для описанной схемы: громоздкость установки, большие капитальные затраты на ее создание, инерционность процесса регулирования скорости. Поэтому большое развитие, особенно в последнее время, получила вторая группа преобразователей частоты — так называемые статические преобразователи. Название они получили вследствие того положения, что система построена на статических элементах и устройствах — таких, как ионные и полупроводниковые приборы, конденсаторы, магнитные усилители и т. д. Развитие этого направления в создании преобразователей частоты особенно ускорилося в связи с появлением новых мощных полупроводниковых приборов, и, в частности, тиристоров, принцип действия которых кратко описан в предыдущем разделе. Большое внимание, которое уделяется специалистами вопросу создания регулируемых статических преобразователей частоты, определяется теми высокими технико-экономическими показателями, которые приобретает регулируемый частотный электропривод в случае их использования. Повышается к. п. д. системы регулирования (он достигает 0,85—0,9) и ее быстродействие, устраняется шум при работе, упрощается обслуживание.

Вместе с тем необходимо отметить значительную сложность схем статических преобразователей частоты,

использующих большое число электромагнитных и полупроводниковых приборов. Это приводит к удорожанию системы управления, усложнению ее наладки. Наличие в системе большого числа элементов и устройств в принципе уменьшает надежность ее работы, которая в этом случае ниже, чем, например, в системе электропривода магнитный усилитель — двигатель. Большая сложность схем статических преобразователей частоты, а также их многообразие, не позволяют привести примеры их построения и дать описание их работы. Более подробно устройство и принцип действия таких преобразователей освещены в [Л. 3].

Можно указать на некоторые случаи, когда использование частотного регулирования приводит к получению большого технико-экономического эффекта или же когда эта система регулирования оказывается практически единственно возможной. Выше уже говорилось об индивидуальном электроприводе рабочего роляганга прокатного стана, при котором каждый валок приводится во вращение отдельным асинхронным электродвигателем. Все двигатели роляганга при этом получают питание от одного преобразователя частоты. Аналогичные системы существуют для индивидуального привода веретен в текстильной промышленности, центрифуг в сахарной промышленности и т. д. Во всех этих случаях при наличии большого числа согласованно работающих электроприводов введение индивидуального электропривода вместо громоздких механических передач от одного двигателя сильно упростило кинематику производственных механизмов, повысило надежность и экономичность их работы, улучшило качество технологического процесса.

Практически единственно возможным оказывается частотный электропривод для привода высокоскоростных электрошпинделей металло- и деревообрабатывающих станков, электроверетен, специальных экспериментальных установок (вентиляторы высокоскоростных аэродинамических труб, различных испытательных стендов) и т. д. Скорости вращения таких электроприводов достигают 150 000 об/мин и более. Получение таких больших скоростей с помощью двигателей постоянного тока технически неосуществимо и возможно только при использовании специальных короткозамкнутых асинхронных двигателей при питании их током повышенной частоты (до 2 500 гц при скорости вращения 150 000 об/мин).

Частотное управление нашло применение в транспорте для регулирования скорости вращения тяговых электродвигателей. Последние работают в весьма тяжелых условиях влажности, запыленности, постоянной смены температур. При этом асинхронные короткозамкнутые двигатели оказываются наиболее пригодными вследствие своей простоты и надежности.

Обратимся теперь к рассмотрению свойств частотного электропривода и его механических характеристик. Выше уже говорилось о том, что для достижения хороших показателей при регулировании скорости вращения асинхронных электродвигателей в этой системе необходимо одновременно с изменением частоты в определенном соотношении менять и величину подводимого к электродвигателю напряжения в зависимости от вида нагрузки на его валу. Это соотношение между частотой, напряжением и моментом нагрузки M_c записывается в виде

$$\frac{U}{U_n} = \frac{f}{f_n} \sqrt{\frac{M}{M_n}}, \quad (14)$$

где U_n , f_n , M_n — напряжение, частота и момент двигателя, соответствующие номинальному режиму его работы (естественной характеристике);

U , f , M — напряжение, частота и момент двигателя при его работе на любой регулировочной характеристике.

Если взять наиболее часто встречающийся случай постоянства статического момента нагрузки $M_c = M_n = \text{пост}$ при регулировании скорости, то выражение (14) запишется в виде

$$\frac{U}{U_n} = \frac{f}{f_n}$$

или

$$\frac{U}{f} = \frac{U_n}{f_n} = \text{пост.} \quad (15)$$

Выражение (15) означает, что если частота питания двигателя изменится в m раз, то и напряжение также должно быть изменено в m раз. При другой зависимости нагрузочного момента от скорости вращения соответственно может быть получено свое соотношение между частотой и напряжением на выходе преобразователя частоты. Для «вентиляторного» характера нагрузки выра-

жение (14) преобразовывается к виду

$$\frac{U}{U_n} = \frac{f^2}{f_n^2}$$

или

$$\frac{U}{f^2} = \text{пост.} \quad (16)$$

В этом случае при изменении частоты в m раз напряжение должно быть изменено уже в m^2 раз, т. е. более резко по сравнению с предыдущим видом нагрузки.

Выполнение соотношений (15) и (16) при частотном управлении приводит к обеспечению постоянства перегрузочной способности двигателя, неизменного значения коэффициента мощности двигателя $\cos \varphi$ и жесткости его механических характеристик. Необходимо, однако, при этом отметить, что эти соотношения были получены для некоторого идеализированного двигателя, у которого сопротивление статора предполагалось равным нулю, $r_1 = 0$. Поэтому на практике они оказываются пригодными лишь в тех случаях, когда скорость вращения двигателя регулируется в небольших пределах ($D < 2:1$). При значительных изменениях скорости вращения двигателя, вызванных соответствующим изменением частоты питающего напряжения, выполнение соотношений (15) и (16) уже не обеспечивает постоянства перегрузочной способности и коэффициента мощности двигателя $\cos \varphi$. Для примера на рис. 24,а показано семейство механических характеристик частотного асинхронного привода при выполнении соотношения $U/f = \text{пост.}$ Рассмотрение этих характеристик показывает, что при малых частотах питающего напряжения произошло уменьшение перегрузочной способности электродвигателя и некоторое снижение жесткости его механических характеристик. Причина этого явления заключается в уменьшении величины магнитного потока двигателя вследствие влияния активного сопротивления статора, особенно заметного при низких частотах питания. Чтобы компенсировать в какой-то степени это влияние, следует с уменьшением частоты напряжение снижать в несколько меньшей степени, чем это определяется соотношением (15). Таким образом, приведенные выражения (15) и (16) позволяют лишь приближенно обеспечить хорошие показатели частотного управления. К тому же регулирование частоты и напря-

жения по этим закономерностям не обеспечивает работу привода с минимально возможными потерями энергии, т. е. максимального к. п. д. системы. Все это привело к тому, что зависимость между регулируемой частотой

$$f_1 > f_0 > f_2 > f_3$$

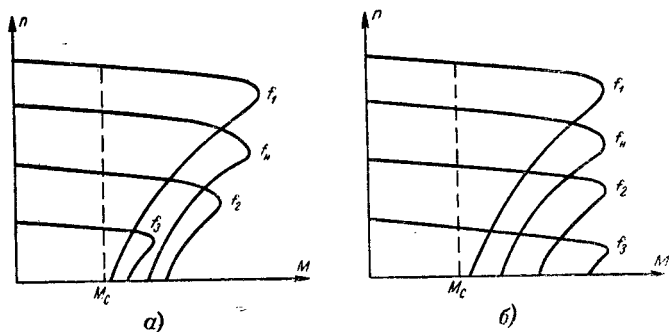


Рис. 24. Механические характеристики асинхронного двигателя при разных частотах.

и напряжением в современных частотных электроприводах имеет более сложный характер.

При осуществлении частотного управления с учетом влияния активного сопротивления статора по более сложным закономерностям, чем (15) и (16), могут быть получены характеристики привода, показанные на рис. 24,б. Как видно, жесткость регулировочных характеристик и перегрузочная способность двигателя остаются практически неизменными.

Частотное регулирование является весьма экономичным, так как регулирование скорости двигателя в этой системе не сопровождается выделением больших потерь скольжения в роторной цепи, ухудшающих к. п. д. электропривода и приводящих к необходимости завышения мощности двигателя.

Регулирование скорости в этой системе может осуществляться плавно, в широком диапазоне, в обе стороны от естественной характеристики, т. е. двигатель может вращаться со скоростью, большей номинальной. При этом регулировочные характеристики имеют необходимую жесткость, а двигатель сохраняет высокую перегрузочную способность.

Во многих случаях хорошие показатели регулирования могут быть достигнуты в разомкнутой системе. При

повышенных требованиях в электроприводе необходимо использование тех или иных обратных связей, т. е. применение замкнутой системы регулирования.

6. РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ИЗМЕНЕНИЕМ ЧИСЛА ПАР ПОЛЮСОВ

Среди производственных механизмов, требующих изменения скорости движения рабочего органа, имеются такие, у которых это изменение может происходить неплавно, ступенчато. К таким механизмам можно отнести большинство грузовых и пассажирских лифтов, где для достижения требуемой точности остановки кабины производится предварительное снижение скорости ее движения. Для механизмов подач многих металлорежущих станков регулирование скорости часто осуществляется путем ступенчатого изменения скорости вращения приводного электродвигателя. В этих случаях, а также и в некоторых других, в качестве приводных двигателей широко используются многоскоростные асинхронные электродвигатели, у которых регулирование скорости вращения производится путем изменения числа пар полюсов статорной обмотки. При этом изменяется и скорость вращения магнитного поля n_0 , создаваемого обмоткой статора, а тем самым и скорость вращения ротора двигателя.

Число пар полюсов асинхронного двигателя может быть равным 1, 2, 3, 4, 5 и т. д., тем самым и синхронные скорости его вращения принимают значения при частоте сети $f_c = 50$ гц 3 000, 1 500, 1 000, 750, 600 об/мин и т. д. Поэтому изменение числа пар полюсов электродвигателя может привести только к ступенчатому регулированию скорости его вращения. Двигатели, допускающие регулирование их скорости вращения этим способом, называются многоскоростными.

Изменение числа полюсов достигается, когда на статоре двигателя располагаются две (или больше) несвязанные друг с другом обмотки, имеющие разное число пар полюсов p_1 и p_2 . При подключении к сети одной обмотки, например с p_1 парами полюсов, двигатель имеет синхронную скорость вращения

$$n_1 = \frac{60f}{p_1}.$$

Вторая обмотка при этом обесточена. Для получения другой скорости вращения отключается первая обмотка и подключается на сеть вторая обмотка с p_2 парами по-

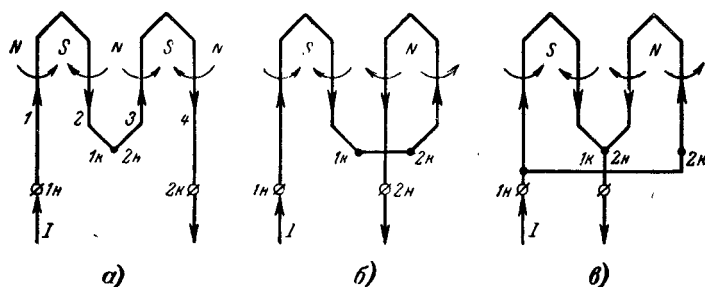


Рис. 25. Изменение числа пар полюсов обмотки статора.

люсов, при этом синхронная скорость вращения двигателя станет равной

$$n_2 = \frac{60f}{p_2}.$$

Наряду с такими электродвигателями, получившими название многообмоточных, широкое распространение получил другой тип многоскоростных асинхронных двигателей, у которых изменение числа пар полюсов вращающегося магнитного поля достигается за счет изменения схемы соединения статорной обмотки двигателя. Для этого каждая фаза статора разделена на несколько одинаковых частей (чаще всего на две части) и имеет от них соответствующее число выводов.

В качестве примера на рис. 25 показана схема одной фазы статорной обмотки, которая состоит из двух одинаковых частей $1н—1к$, $2н—2к$ (полуобмоток), имеющих каждая по два проводника. Если полуобмотки соединены так, как это показано на рис. 25,а, и к обмотке статора подведен ток I , имеющий в данный момент времени направление, показанное стрелками, то образуется магнитное поле с четырьмя полюсами ($p=2$). Оставив направление тока тем же, изменим несколько схему соединения обмотки, подключив конец первой полуобмотки $1к$ к концу второй $2к$ (рис. 25,б).

Как видно из рисунка, в этом случае статорная обмотка образует магнитное поле с числом пар полюсов, вдвое меньшим по сравнению с полем на рис. 25,а.

Уменьшение вдвое числа пар полюсов достигается и в схеме рис. 25,б, где полуобмотки соединены параллельно ($1н$ с $2к$ и $1к$ с $2н$). В том и другом случае (рис. 25,б и в) уменьшение числа пар полюсов, а тем самым увеличение скорости вращения двигателя, достигается изменением направления тока на противоположное в одной из

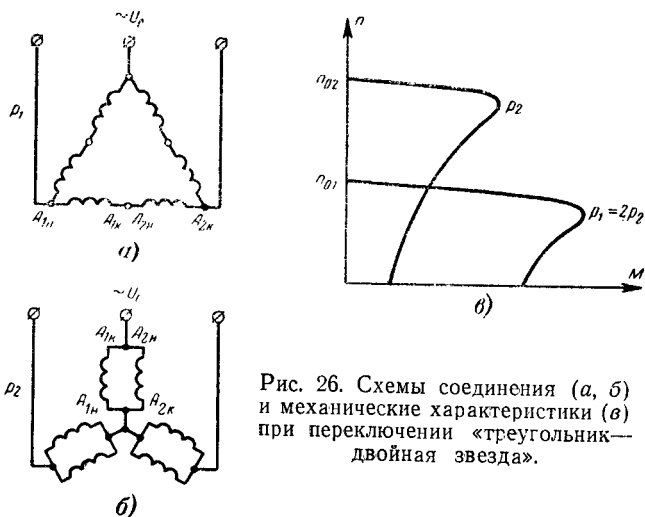


Рис. 26. Схемы соединения (а, б) и механические характеристики (в) при переключении «треугольник—двойная звезда».

полуобмоток (в данном случае во второй $2н—2к$). При этом диапазон изменения скорости вращения магнитного поля составит $D=2:1$.

Наиболее часто на практике встречаются две схемы переключения статорной обмотки многоскоростных асинхронных двигателей: 1) с треугольника на двойную звезду; 2) со звезды на двойную звезду.

Рассмотрим схемы соединения обмоток статора и механические характеристики двигателей для этих случаев.

1) **Треугольник — двойная звезда.** Для получения большего числа пар полюсов p_1 полуобмотки каждой фазы статора включены в треугольник «согласно», т. е. так, как это показано на рис. 26,а. На рис. 26,а, б $A_{1н}$ и $A_{2н}$ — начала соответственно первой и второй полуобмоток фазы А, $A_{1к}$, $A_{2к}$ — их концы; обозначения для зажимов полуобмоток фаз В и С, схемы включения которых аналогичны схемам фазы А, опущены. Соединение полуобмоток по схеме на рис. 25,б, как отмечалось выше, вызовет уменьшение вдвое числа пар полюсов двигате-

ля. Схема на рис. 26,б получила название двойной звезды. Механические характеристики двигателя изображены на рис. 26,в.

Принципиальная контактная схема управления, позволяющая осуществлять необходимые переключения полуобмоток, показана на рис. 27. При замкнутом контакторе *НС* (низкая скорость) обмотки двигателя соединены

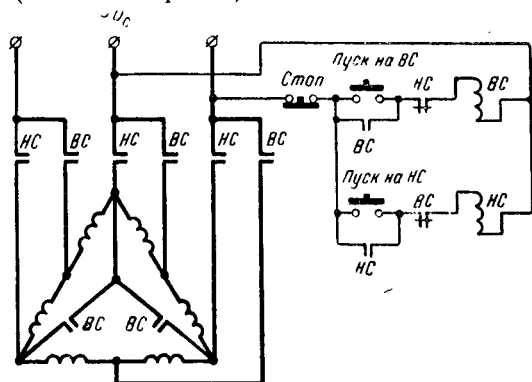


Рис. 27. Схема управления асинхронного двигателя при переключении «треугольник — двойная звезда».

в треугольник, при замыкании контактора *ВС* обмотки пересоединяются в двойную звезду и двигатель увеличивает скорость вращения вдвое.

2) **Звезда — двойная звезда.** В этой схеме переключения меньшей скорости вращения двигателя соответствует рис. 28,а. Полуобмотки фаз статора соединены здесь также последовательно «согласно» и образуют при подключении двигателя к сети систему p_1 пар полюсов вращающегося магнитного поля, которой соответствует синхронная скорость вращения $n_1 = 60f/p_1$. Переключение на двойную звезду осуществляется по схеме на рис. 26,б, при этом число пар полюсов станет $p_2 = \frac{1}{2} p_1$. Получаемые

механические характеристики такого двухскоростного двигателя изображены на рис. 28,б. В отличие от рассмотренной выше схемы переключения треугольник — двойная звезда, где целесообразно регулирование скорости двигателя при сохранении постоянной мощности нагрузки на его валу, в этой схеме изменение скорости

может осуществляться при постоянном моменте нагрузки M_c .

Контакторная схема управления двигателем для получения различных скоростей вращения двигателя может быть выполнена аналогично схеме на рис. 27.

Рассмотренные схемы соединений полуобмоток фаз статора многоскоростных асинхронных электродвигателей не исчерпывают всех возможных вариантов, а явля-

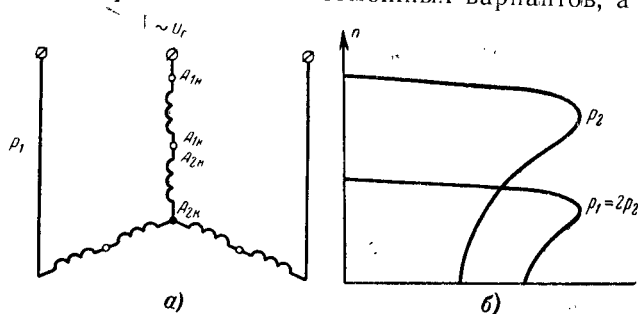


Рис. 28. Соединение обмоток на низшей скорости (а) и механические характеристики (б) асинхронного двигателя при переключении «звезда — двойная звезда».

ются лишь примерами схем, часто применяемых на практике.

Помимо рассмотренных выше двухскоростных электродвигателей применяются также трех- и четырехскоростные двигатели. Первые из них, помимо переключаемой обмотки статора, выполняемой аналогично рассмотренной выше, имеют также и одну непереключаемую обмотку. Четырехскоростные двигатели имеют две переключаемые обмотки с различным числом пар полюсов p_1 , p_2 , p_3 и p_4 , позволяющие получить четыре синхронные скорости вращения — например, 3 000/1 500/1 000/500 или 1 500/1 000/750/500 об/мин и т. д.

У всех многоскоростных двигателей, независимо от схемы статорной обмотки и числа скоростей, ротор выполняется короткозамкнутым.

Недостатками такого способа регулирования скорости являются невозможность плавного ее изменения и сравнительно небольшой диапазон, не превышающий 8:1.

Вместе с тем данный метод регулирования скорости имеет и ряд положительных показателей, что определяет

достаточно широкое его применение в регулируемом электроприводе. К ним в первую очередь следует отнести экономичность регулирования. Как и при частотном методе регулирование скорости асинхронных электродвигателей изменением числа пар полюсов не сопровождается выделением в роторной цепи потерь энергии скольжения, вызывающих излишний нагрев двигателя и ухудшающих его к. п. д.

Как видно из рис. 26,в и 28,б, механические характеристики многоскоростных асинхронных электродвигателей отличаются хорошей жесткостью и достаточной перегрузочной способностью.

7. КАСКАДНЫЕ СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В предыдущих разделах было показано, что при реостатном методе регулирования скорости вращения асинхронных двигателей и при регулировании изменением напряжения с увеличением скольжения потери в роторной цепи существенно возрастают. При увеличении мощности асинхронного привода до нескольких сотен и тысяч киловатт потери скольжения становятся весьма большими по абсолютной величине.

В связи с этим появляется стремление использовать потери скольжения для совершения полезной работы. Оказывается, что в ряде случаев это может быть осуществлено. Первые схемы, позволяющие полезно использовать потери скольжения, создавались путем специального соединения асинхронного двигателя с другими электрическими машинами. Поэтому эти схемы получили название каскадных. В настоящее время существуют схемы, использующие энергию скольжения асинхронного двигателя без добавочных вращающихся электрических машин, а с помощью электронно-ионных и полупроводниковых приборов и трансформаторов. Однако эти схемы также называются каскадными.

В общем случае каскадными называют такие схемы включения асинхронного двигателя, которые позволяют полезно использовать энергию скольжения путем отдачи ее в сеть, либо превращением ее в механическую энергию, передаваемую на вал главного двигателя.

Рассмотрим вначале работу схем, представленных на рис. 29. Допустим, что по активному сопротивлению r и

индуктивному x должен проходить определенный ток. Это можно достигнуть по крайней мере двумя способами. Самый простой из них состоит в том, что последовательно с r и x включается добавочное активное сопротивление R (рис. 29,а), величина которого рассчитывается исходя из условия получения нужного значения тока при заданном напряжении U источника питания переменного тока. Ток, проходя по сопротивлению R , направляет его. Потери энергии на сопротивлении R тем боль-

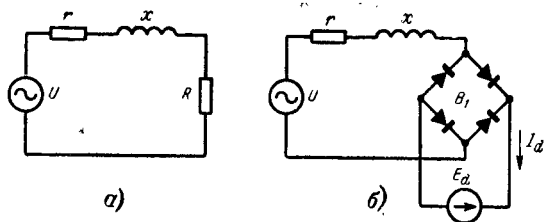


Рис. 29. К принципу работы каскадных схем включения асинхронных двигателей.

ше, чем больше величины тока и сопротивления R . Очевидно, что рассмотренный способ получения необходимого тока в сопротивлениях r и x является неэкономичным.

На рис. 29,б приведена схема, позволяющая более экономично получить ток определенной величины в сопротивлениях r и x при заданном напряжении U . Последовательно с сопротивлениями r и x включен выпрямительный мостик B_1 , нагрузкой которого служит источник постоянного тока с величиной э. д. с., равной E_d . Выпрямитель B_1 включен таким образом, что выпрямленный ток I_d направлен встречно по отношению к внешней э. д. с. E_d . При таком соединении источник э. д. с. потребляет электрическую энергию, т. е. выпрямительная схема является генератором, а источник э. д. с. — потребителем электрической энергии. Практически в качестве источника э. д. с. может быть выбрана электрическая машина постоянного тока, которая работает в двигательном режиме, потребляя электрическую энергию от выпрямителя и преобразуя ее в механическую, которая может быть полезно использована.

Отметим, что обе схемы, приведенные на рис. 29, позволяют изменять величину тока, проходящего через сопротивления r и x . В схеме на рис. 29,а для этого необ-

ходимо изменить величину сопротивления R , а в схеме на рис. 29,б — величину э. д. с. E_d .

Схема на рис. 29,б позволяет, во-первых, экономичным путем получить заданную величину тока, проходящего по сопротивлениям r и x , и, во-вторых, регулировать величину этого тока изменением э. д. с. E_d .

На рис. 30 приведены две типичные схемы современных каскадов. В роторную цепь асинхронного двигателя включается трехфазный выпрямительный мост B_1 , собранный из полупроводниковых вентилей. Поэтому такие каскадные схемы получили название вентильных. Выпрямленное с помощью B_1 напряжение роторной цепи, определяемое э. д. с. ротора, подается на якорь машины постоянного тока $МП$.

Следует отметить, что роторные цепи асинхронных двигателей на рис. 30 очень напоминают схему на рис. 29,б. Между этими схемами может быть установлено определенное соответствие: э. д. с. ротора асинхронного двигателя соответствует источник напряжения в схеме на рис. 29,б, активные и индуктивные сопротивления рассеяния обмоток двигателя соответствуют активному сопротивлению r и индуктивному x в схеме на рис. 29,б. Отличие между схемами состоит только в том, что на рис. 29 схема однофазная, а на рис. 30 — трехфазная.

В схеме на рис. 30,а валы асинхронного двигателя и машины постоянного тока механически соединены между собой. Эта схема называется электромеханическим вентильно-машинным каскадом, поскольку АД и МП соединены между собой как электрическим путем (ротор АД — якорь МП), так и механически (валы АД и МП).

В схеме на рис. 30,б вал машины постоянного тока МП механически соединен с валом синхронного генератора СГ. Эта схема называется электрическим вентильно-машинным каскадом, поскольку АД и МП соединены только электрическим путем. При нормальной работе каскадных схем на рис. 30 контакты $2K$ замкнуты, а контакты $1K$ разомкнуты. Назначение контактов $1K$ будет пояснено далее.

Принцип действия электромеханического вентильно-машинного каскада схемы на рис. 30,а состоит в следующем. При работе асинхронного двигателя э. д. с. его роторной цепи выпрямляется с помощью выпрямителей B_1 и подается на зажимы якоря машины постоянного тока. По якорной цепи проходит ток, который, взаимо-

действуя с магнитным потоком обмотки возбуждения, определяет появление электромагнитного момента машины постоянного тока. Поскольку валы АД и МП соединены между собой, очевидно, что электромагнитные моменты обеих электрических машин действуют на общий вал и совместно преодолевают статический момент производственного механизма, приводимого в движение дан-

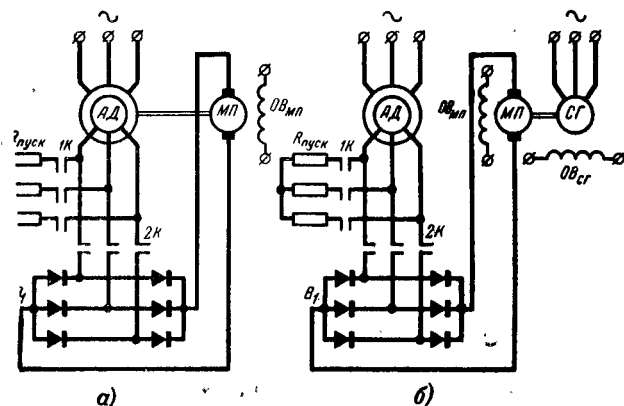


Рис. 30. Схемы электромеханического (а) и электрического (б) асинхронных вентильно-машинных каскадов.

ным электроприводом. Почти вся энергия скольжения, за исключением потерь непосредственно в обмотках ротора АД и якоря МП, используется для преобразования двигателем постоянного тока МП в механическую энергию, передаваемую на вал асинхронного двигателя. Изменяя ток в обмотке возбуждения машины постоянного тока, можно регулировать скорость вращения каскада.

Увеличение тока возбуждения МП при данной скорости ее вращения приведет к увеличению э. д. с. Возрастание э. д. с. МП в свою очередь приведет к уменьшению тока ротора асинхронного двигателя. (Это следует из рассмотрения рис. 29,а и б. Уменьшение тока при данном напряжении питания U на схеме на рис. 29,а является следствием увеличения сопротивления R , а в схеме на рис. 29,б — увеличения э. д. с. E_d .) Вследствие уменьшения тока ротора асинхронного двигателя уменьшится его вращающий момент, что определяет уменьшение скорости двигателя при данном статическом моменте. Уменьшению скорости двигателя соответствует увеличение

скольжения, что приводит к увеличению э. д. с. ротора, которая равна $E_{2k} s$. Возрастание э. д. с. ротора приведет к увеличению тока ротора, а значит и момента двигателя, который при этом вновь достигнет величины статического момента, вследствие чего скорость двигателя перестанет изменяться. Двигатель опять будет работать в установившемся режиме, но уже при более низком значении скорости.

Следовательно, при увеличении тока возбуждения МП скорость вращения АД уменьшается. При номинальном токе возбуждения МП двигатель работает с наименьшей скоростью. При отсутствии тока в обмотке возбуждения МП скорость двигателя наибольшая. В этом случае она близка к скорости вращения, развиваемой двигателем при работе на естественной механической характеристике.

Рассмотренной каскадной схеме соответствуют механические характеристики (рис. 31,а) для асинхронного электропривода, собранного по каскадной схеме, приведенной на рис. 30,а. Из кривых на рис. 31,а видно, что с увеличением тока возбуждения МП при данной величине момента скорость вращения каскада уменьшается.

Рассмотрение механических характеристик, приведенных на рис. 31,а, показывает, что максимальное значение момента двигателя возрастает при увеличении тока возбуждения МП. Скорость, при которой момент достигает максимального значения, уменьшается. Электроприводы, которые имеют механические характеристики, аналогичные приведенным на рис. 31,а, называют приводами с постоянной мощностью. При этом максимальная механическая мощность каскада, определяемая произведением

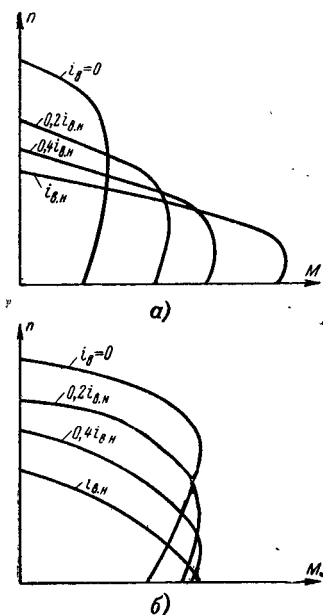


Рис. 31. Механические характеристики электромеханического (а) и электрического (б) каскадов.

максимального момента на соответствующую этому моменту скорость, при разных токах возбуждения *МП* примерно одинакова.

Согласно сказанному асинхронный электропривод по схеме на рис. 30,а называют каскадом с постоянной мощностью. Общий момент рассматриваемого каскада создается как асинхронной машиной, так и машиной постоянного тока. При увеличении тока возбуждения *МП* возрастает его момент, что приводит к увеличению общего момента каскада. Этим и объясняется возрастание максимального момента каскада при увеличении тока возбуждения *МП*.

Пуск каскада по схеме на рис. 30,а производится следующим образом. Вначале контакты *1К* замкнуты, а *2К* разомкнуты. Двигатель *АД* разгоняется до номинальной скорости при наличии дополнительных активных сопротивлений $R_{\text{пуск}}$ в роторной цепи. По достижении двигателем скорости, близкой к номинальной, замыкаются контакты *2К* и подается ток в обмотку возбуждения *МП*, после чего размыкаются контакты *1К*. Изменением величины тока возбуждения *МП* добиваются необходимой скорости вращения каскада.

Работа каскадного электропривода по схеме на рис. 30,б аналогична схеме на рис. 30,а, но есть и некоторые различия. Принцип действия этой схемы заключается в следующем. Э. д. с. роторной цепи асинхронного двигателя выпрямляется с помощью выпрямителей *В₁* и подается на якорь машины постоянного тока. Последняя работает в режиме двигателя, преобразуя поступающую со стороны роторной цепи *АД* электрическую энергию скольжения в механическую. Эта механическая энергия преобразуется синхронным генератором *СГ* в электрическую, которая отдается в сеть переменного тока со стороны статора *СГ*.

Таким образом, в данном случае энергия скольжения, за исключением потерь непосредственно в обмотках ротора *АД*, якорей *МП* и *СГ*, возвращается в сеть переменного тока, увеличивая мощность последней.

Момент каскадного электропривода, собранного по схеме на рис. 30,б, равен моменту только асинхронного двигателя *АД*. Поэтому максимальный момент, развиваемый *АД* в данной схеме включения, не зависит от тока возбуждения *МП*. На рис. 31,б приведены механические характеристики электропривода, собранного по

схеме на рис. 30,б. Рассмотрение графиков кривых на рис. 31,б показывают, что с увеличением тока возбуждения *МП* скорость *АД* уменьшается, максимальный момент остается постоянным, а соответствующая этому моменту скорость уменьшается.

Электропривод, собранный по схеме на рис. 30,б, называют каскадом с постоянным моментом.

Регулирование скорости вращения асинхронного двигателя в каскадной схеме на рис. 30,б осуществляется изменением тока возбуждения *МП*. При номинальном токе возбуждения *МП* асинхронный двигатель работает при наименьшей скорости. При отсутствии тока в обмотке возбуждения *МП* скорость вращения *АД* близка к скорости, определяемой естественной механической характеристикой.

Пуск каскада в схеме на рис. 30,б производится следующим образом. Вначале запускается агрегат *МП—СГ* с помощью синхронной машины, которая при этом работает двигателем. Затем замыкаются контакты *1К*, подключая пусковое сопротивление $R_{\text{пуск}}$ к роторной цепи *АД*. Происходит реостатный пуск асинхронного двигателя. По достижении двигателем *АД* скорости, близкой к номинальной, замыкаются контакты *2К*, а затем размыкаются *1К*. Изменением тока возбуждения *МП* доводят скорость вращения *АД* до требуемого значения.

В настоящее время в связи с широким развитием и распространением силовой электронно-ионной и полупроводниковой аппаратуры, в частности тиристоров, повсеместно наблюдается тенденция заменить электромашинные вращающиеся преобразователи энергии на статические преобразователи. В частности, электромашинный агрегат *МП—СГ* на рис. 30,б представляет собой преобразователь энергии постоянного тока, поступающего от выпрямителя *В₁*, в энергию переменного тока, отдаваемую в сеть. Такой машинный агрегат *МП—СГ* может быть заменен на статический преобразователь энергии, состоящий из трансформатора *Тр* и инвертора *И*, как показано на рис. 32. Принципы действия схем, приведенных на рис. 32 и 30,б, аналогичны друг другу.

Инвертор представляет собой преобразователь энергии постоянного тока в энергию переменного тока. Электродвижущую силу инвертора можно регулировать специальной схемой управления, аналогично тому, как регулируется величина э. д. с. машины постоянного тока

МП. Поэтому механические характеристики асинхронного каскада по схеме на рис. 32 аналогичны вентильно-машинному электрическому каскаду по схеме на рис. 30,б и подобны приведенным на рис. 31,б.

В схеме на рис. 32 в роторную цепь асинхронного двигателя включены полупроводниковые неуправляемые

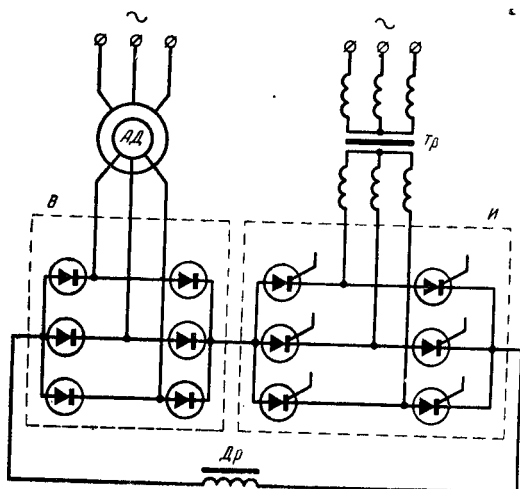


Рис. 32. Схема асинхронного вентильного каскада.

вентили выпрямителя B и управляемые вентили инвертора $И$, а также дроссель $Др$ (катушка индуктивности), который служит для сглаживания пульсаций выпрямленного тока. Асинхронный электропривод по схеме на рис. 32 получил название асинхронного вентильного каскада.

Существует еще довольно много схем асинхронных вентильных каскадов, аналогичных представленным на рис. 31. Эти схемы несколько отличаются по своей сложности, техническим возможностям регулирования скорости, энергетическим показателям и т. д. Однако принцип действия и назначение этих схем аналогичны схеме на рис. 32 — использование энергии скольжения для совершения полезной работы и возможность плавного ре-

гулирования скорости вращения асинхронного двигателя.

Диапазон регулирования при каскадном регулировании скорости небольшой — порядка 2:1. При необходимости получения более высокого диапазона регулирования значительно возрастают размеры аппаратов, включаемых в роторную цепь асинхронного двигателя: *МП*, *Тр*, инвертор. В машинных вентильных каскадах при диапазоне регулирования 2:1 габаритная мощность машины постоянного тока *МП* равна габаритной мощности асинхронного двигателя *АД*.

Плавность регулирования скорости с помощью каскадных схем достаточно высокая. Плавное регулирование осуществляется плавным изменением э. д. с. преобразователя, что в вентильно-машинных каскадах обеспечивается регулированием тока обмотки возбуждения *МП*, а в вентильных каскадах — специальной системой автоматического регулирования, содержащей полупроводниковые приборы малой мощности, магнитные усилители и т. д.

При каскадном регулировании скорости вращения коэффициент мощности привода относительно невелик, что вызывает необходимость применения компенсирующих устройств, например конденсаторов. Следует отметить также, что в каскадных схемах включения перегрузочная способность, т. е. критический момент, асинхронного двигателя снижается на 15—17% по сравнению с каталожными данными.

В целом каскадный способ регулирования является одним из наиболее экономичных способов регулирования скорости вращения асинхронных двигателей.

Каскадная установка позволяет регулировать скорость вращения двигателя не только вниз от синхронной, но и выше ее, при этом получается выигрыш в габаритах преобразовательных устройств — трансформатора и вентильного преобразователя. Такие каскадные установки называют установками с двухзонным регулированием скорости. Однако каскады с двухзонным регулированием скорости дороже и гораздо сложнее установок, собранных по схеме на рис. 32.

Каскадные установки применяются для асинхронных электроприводов мощностью от 100 кВт до нескольких тысяч киловатт. Они используются для привода компрессоров, вентиляторов, насосов средней и большой мощности, шахтных подъемных машин и т. д.

8. НЕКОТОРЫЕ СПЕЦИАЛЬНЫЕ СПОСОБЫ И ВОПРОСЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Описанные выше способы регулирования скорости вращения асинхронных двигателей являются основными. Кроме них существует еще довольно много других способов регулирования, которые обычно сложнее рассмотренных ранее и часто являются их развитием.

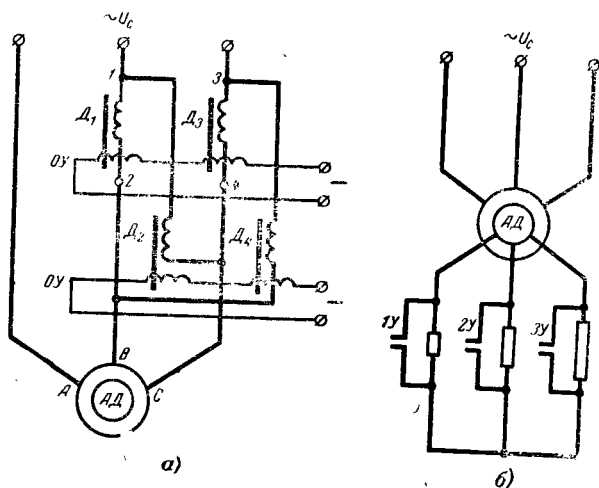


Рис. 33. Несимметричное включение статорных (а) и роторных (б) обмоток асинхронного двигателя.

Широкое распространение в практике асинхронного электропривода имеют так называемые несимметричные схемы включения асинхронного двигателя. Несимметричными эти схемы называются потому, что в фазные обмотки статора или ротора включаются разные по величине дополнительные активные или индуктивные сопротивления. На рис. 33,а изображена так называемая четырехдроссельная реверсивная схема управления асинхронным двигателем. Если подать номинальный ток в обмотки управления (подмагнитить дроссели) D_1 и D_3 , то индуктивное сопротивление рабочих обмоток этих дросселей резко уменьшится и станет близким к нулю, а к зажимам двигателя будет приложено напряжение сети. При этом схема включения двигателя совпадает с изображенной на рис. 3,а. Если ток обмоток управления

дресселей насыщения D_1 и D_3 сделать меньшим номинального, то сопротивление их рабочих обмоток несколько возрастет, в результате чего в фазные обмотки статора будут включены разные сопротивления: добавочное сопротивление фазы A равно нулю, а в других фазах добавочное сопротивление будет определяться током подмагничивания D_1 и D_3 . Поэтому токи в фазах двигателя будут разными по величине, а определяемое ими магнитное поле будет сложнее описанного ранее вращающегося поля. Следствием этого является то, что механическая характеристика асинхронного двигателя при несимметричном включении его обмоток будет отличаться от изображенной на рис. 7,а. При изменении тока обмоток управления D_1 и D_3 будут меняться величины сопротивлений рабочих обмоток этих дросселей, что в конечном счете приведет к изменению механических характеристик двигателя. Таким образом, производится регулирование скорости вращения асинхронного двигателя в несимметричной схеме его включения.

Если ток обмоток управления D_1 и D_3 сделать равным нулю, то сопротивление их рабочих обмоток станет очень большим, а проходящий по ним ток пренебрежимо малым. При этом можно считать, что между точками 1 и 2, 3 и 4 появился как бы обрыв проводов. Двигатель при этом не будет развивать момент. Если теперь увеличить ток обмотки управления другой пары дросселей насыщения — D_2 и D_4 — до номинального значения, то сопротивление их рабочих обмоток станет весьма малым. Схема включения асинхронного двигателя в этом случае будет похожей на изображенную на рис. 3,в. Следовательно, направление вращения асинхронного двигателя при подмагничивании дросселей насыщения D_2 и D_4 будет противоположным тому, которое имело место при подмагничивании D_1 и D_3 . Итак, схема включения двигателя на рис. 33,а позволяет регулировать скорость и реверсировать асинхронный электропривод.

Основной недостаток несимметричных схем включения состоит в том, что в двигателе выделяются повышенные потери по сравнению с симметричными схемами включения при одинаковой в обоих случаях нагрузке и скорости вращения двигателя.

Основное достоинство несимметричных схем включения — меньшие габариты системы электропривода при регулировании скорости его вращения.

Несимметричные схемы включения асинхронного двигателя чаще всего осуществляются с использованием силовых магнитных усилителей или тиристоров, которые управляют асинхронным двигателем мощностью до 20—30 кВт.

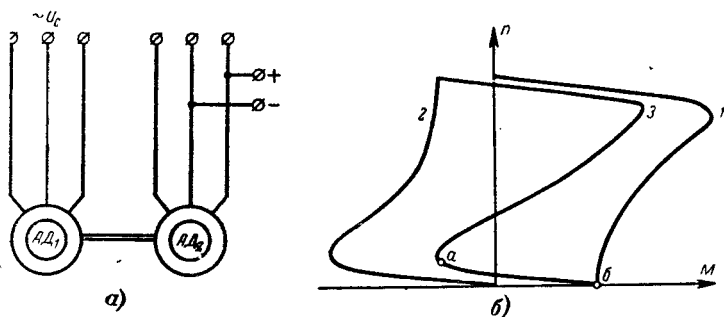


Рис. 34. Схема соединения (а) и механические характеристики (б) двухдвигательного электропривода.

На рис. 33,б представлена схема включения асинхронного двигателя, в роторные цепи которого включены различные по фазам дополнительные активные сопротивления. Эта схема находит довольно широкое применение в контроллерах, служащих для управления механизмами подъемных мостовых электрических кранов. Схема на рис. 33,б обеспечивает меньшие размеры контроллера за счет меньшего числа контактов, коммутирующих дополнительные активные сопротивления роторной цепи. Действительно, сравнивая симметричную схему на рис. 14,а с несимметричной схемой на рис. 33,б, можно заметить, что в последней для получения трех регулировочных ступеней сопротивления используются три контакта, а в схеме на рис. 14,а — шесть контактов.

Недостатком схемы на рис. 33,б являются несколько повышенные потери при регулировании скорости. При большой несимметрии механические характеристики могут иметь провал при скорости, равной половине синхронной, что в ряде случаев может привести к ухудшению условий работы электропривода.

Основная задача регулирования скорости двигателей состоит в необходимости получения определенных его механических характеристик. В ряде случаев это может

быть достигнуто применением нескольких электрических двигателей. На рис. 34,а изображены два асинхронных двигателя, один из которых $АД_1$ подсоединен к трехфазной сети переменного тока, а другой $АД_2$ — к сети постоянного тока.

Асинхронная машина $АД_1$ работает в двигательном режиме, которому соответствует механическая характеристика 1 на рис. 34,б, а машина $АД_2$ работает в режиме динамического торможения, которому соответствует характеристика 2 на рис. 34,б. Поскольку валы $АД_1$ и $АД_2$ механически соединены между собой, то общий момент системы электропривода для каждой скорости вращения складывается из моментов, развиваемых обеими электрическими машинами. Кривая 3 на рис. 34,б представляет собой результирующую механическую характеристику системы электропривода (рис. 34,а), которая имеет жесткий участок ab при низких скоростях вращения двигателей.

Схема на рис. 34,а используется для получения низкой устойчивой скорости, что необходимо для предварительного снижения скорости двигателя при точной остановке электроприводов.

Говоря о системах регулирования скорости асинхронного электропривода, следует остановиться еще на одном важном вопросе — о переходных процессах в системе электропривода. Система регулируемого асинхронного электропривода характеризуется определенным видом механических характеристик. При переходе с одной скорости на другую при ее регулировании, а также при пуске, торможении и реверсе двигателя зависимость от времени моментов, скорости и тока имеет важное значение. Действительно, если переход с одной скорости на другую сопровождается появлением больших по величине бросков момента двигателя, то эти броски могут оказать большое влияние на надежность работы системы электропривода. В частности, эти броски момента могут явиться причиной ударов в звеньях кинематической цепи механической части привода, что может привести к поломке их. Могут возникнуть также значительные величины ускорений, которые для ряда производственных механизмов должны быть ограничены техническими условиями. Поэтому при конструировании системы управления электроприводом стремятся ограничить броски момента и токов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чиликин М. Г., Общий курс электропривода, Госэнергоиздат, 1961.
 2. Чиликин М. Г., Соколов М. М., Шинянский А. В., Асинхронный электропривод с дросселями насыщения, изд-во «Энергия», 1964.
 3. Булгаков А. А., Частотное управление асинхронными электродвигателями, изд-во «Наука», 1966.
 4. Сандлер А. С., Регулирование скорости вращения мощных асинхронных двигателей, изд-во «Энергия», 1966.
 5. Онищенко Г. Б., Асинхронный вентильный каскад, изд-во «Энергия», 1967.
 6. Вешеневский С. Н., Характеристики двигателей в электроприводе, изд-во «Энергия», 1966.
-

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	3
2. Общие вопросы регулирования скорости вращения асинхронных двигателей	5
3. Реостатное регулирование скорости	25
4. Регулирование скорости изменением напряжения двигателя с помощью магнитных усилителей и тиристоров	34
5. Частотное регулирование скорости	46
6. Регулирование скорости изменением числа пар полюсов .	54
7. Каскадные схемы включения асинхронных двигателей .	59
8. Некоторые специальные способы и вопросы регулирования	68
Литература	72

Цена 14 коп.

