Библиотека
ЭЛЕКТРОМОНТЕРА

Выпуск 469

Л. Б. МАСАНДИЛОВ, В. В. МОСКАЛЕНКО

РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

ВТОРОЕ ИЗДАНИЕ,
ПЕРЕРАБОТАННОЕ
И ДОПОЛНЕННОЕ

МОСКВА
«ЭНЕРГИЯ»
1978

31.291
М 31
УДК 621.313.333.07

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Андриевский В. Н., Большам Я. М., Зевакин А. И., Каминский Е. А., Ларионов В. П., Мусаэлян Э. С., Розанов С. П., Синьчугов Ф. И., Семенов В. А., Смирнов А. Д., Соколов Б. А., Устинов П. И.

BOOKS.PROEKTANT.ORG

БИБЛИОТЕКА ЭЛЕКТРОННЫХ КОПИЙ КНИГ

для проектировщиков и технических специалистов

Масандилов Л. Б., Москаленко В. В.

М 31 Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей. 2-е изд., перераб. и доп.— М.: Энергия, 1978. — 96 с., ил. (Б-ка электромонтера; Вып. 469)

Первое издание книги вышло в 1968 г.

Книга посвящена основным методам регулирования частоты вращения трехфазных асинхронных двигателей. Описаны особенности регулирования при использовании тиристорных преобразователей. Рассмотрены технико-экономические показатели методов регулирования и возможные области применения.

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

М $\frac{30307-040}{051(01)-78}$ 72-77 31.291

© Издательство «Энергия», 1978

ВВЕДЕНИЕ

Для приведения в движение рабочих органов различных производственных механизмов преимущественно используются электрические двигатели. Электродвигатель, его система управления и механическое устройство (например, редуктор), передающее движение от вала двигателя к производственному механизму, образуют систему электрического привода. В настоящее время электропривод является основным потребителем вырабатываемой в стране электроэнергии — более 60% ее расходуется на его нужды.

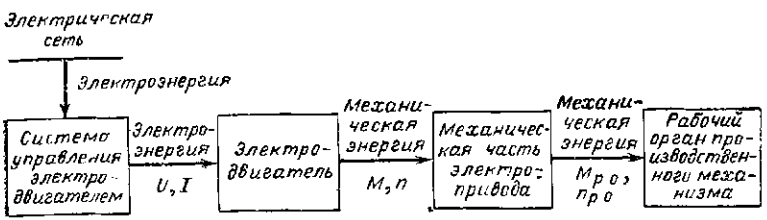


Рис. 1. Блок-схема системы электропривода.

Структурная схема электропривода показана на рис. 1. Основным ее элементом является электрический двигатель, в качестве которого используется двигатель постоянного тока, асинхронный или синхронный.

Система управления электродвигателем содержит различные аппараты (контакторы, реле, магнитные и электронные усилители, полупроводниковые устройства и т. д.) и обеспечивает его пуск, торможение, реверс, регулирование частоты вращения и защиту.

Механическая часть привода служит для согласования скоростей движения двигателя и производственного механизма, а также при необходимости для преобразования одного вида движения в другой (например, вращательного в поступательное). Примерами механиче-

ской части электропривода могут служить различные цилиндрические или червячные редукторы, коробки скоростей, ременные передачи, кривошипно-шатунные механизмы и другие подобные устройства.

Работа электрического привода характеризуется целым рядом электрических и механических величин. К электрическим величинам относятся, например, напряжение сети, ток электродвигателя, его магнитный поток и электродвижущая сила (э. д. с.). Основными механическими величинами являются частота вращения n (об/мин), момент M (Н·м), а также механическая мощность электродвигателя P (Вт), определяемая произведением момента на частоту вращения:

$$P=\frac{Mn}{9,55}. \qquad (1)$$

Для обозначения скорости вращательного движения наряду с частотой вращения n используется и другая известная из физики величина — угловая скорость ω, которая выражается в радианах за секунду (рад/с). Между угловой скоростью ω и частотой вращения n существует следующая связь:

$$\omega=\frac{2\pi n}{60}=\frac{n}{9,55},$$

при учете которой формула (1) представляется в виде

$$P=M\omega. \qquad (1а)$$

Зависимость вращающего момента двигателя M от частоты вращения его ротора n называется механической характеристикой электродвигателя. Отметим, что понятие механической характеристики применимо ко всем типам двигателей, например паровым, газовым, гидравлическим, внутреннего сгорания, а также любым производственным механизмам.

Различают естественную и искусственную характеристики двигателя. Если параметры питающего напряжения соответствуют паспортным (номинальным) значениям, а в цепях ротора и статора отсутствуют какие-либо добавочные сопротивления, то двигатель имеет так называемую естественную характеристику. Эта характеристика у двигателя одна. Все остальные характеристики, получающиеся при наличии добавочных сопротивлений в обмотках или отклонении параметров питающих напряжений от их паспортных значений, называются

искусственными характеристиками. Таких характеристик у двигателя множество.

На рис. 2,*а* показаны естественные механические характеристики наиболее распространенных типов электродвигателей. Зависимость вида *I*, представляющая собой прямую горизонтальную линию, является характеристикой синхронного электродвигателя. Характеристика *II*, также являющаяся прямой линией, но имеющая некоторый наклон, принадлежит двигателю постоянного тока с независимым возбуждением. Криволинейные характе-

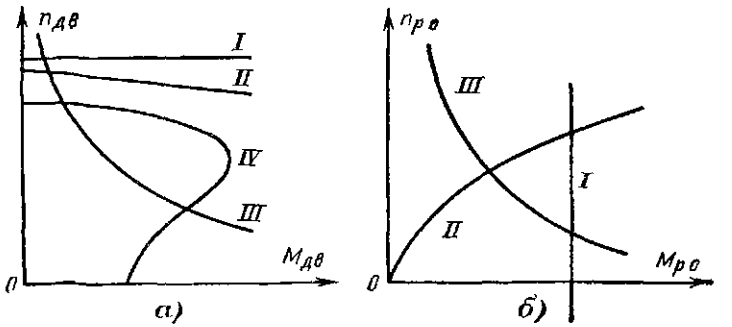


Рис 2 Механические характеристики.
а — электродвигатели, *б* — рабочие органы производственных механизмов

ристики *III* и *IV* относятся соответственно к двигателям постоянного тока с последовательным возбуждением и асинхронному.

По аналогии с электродвигателем зависимость между частотой вращения рабочего органа производственного механизма $n_{ро}$ и его моментом $M_{ро}$ называется механической характеристикой производственного механизма

На рис. 2,*б* в качестве примера показаны механические характеристики некоторых производственных механизмов: *I* — подъемной лебедки; *II* — вентилятора, компрессора или насоса; *III* — металлорежущего станка

Большое число производственных механизмов в процессе работы требуют регулирования скорости движения рабочих органов. К таким механизмам, кроме названных выше, относятся прокатные станы, транспортеры, экскаваторы, лифты и др.

Для изменения частоты вращения входного вала производственного механизма, а тем самым и скорости движения его рабочего органа имеются следующие две принципиальные возможности:

1. При постоянной частоте вращения вала двигателя можно изменять передаточное число i механической части, представляющее собой отношение частот вращения валов двигателя и рабочего органа производственного механизма:

$$i = n / n_{\text{р.о.}}$$

Этот способ регулирования, часто называемый механическим, может быть реализован с помощью таких механических устройств, как вариаторы, коробки скоростей и пр.

2. При неизменном передаточном числе i механической части привода можно изменять частоту вращения вала двигателя. Этот способ получил название электрического способа регулирования.

Технико-экономическое сопоставление обоих способов обнаруживает большие преимущества второго способа, поскольку он более экономичен, обеспечивает бо́льшой диапазон и плавность регулирования, позволяет просто автоматизировать производственные процессы. В некоторых случаях применение электрического способа регулирования позволяет упростить или даже исключить механическую передачу, что удешевляет конструкцию и уменьшает размеры и массу электропривода. В силу этих положений в настоящее время, как правило, используется именно этот способ регулирования скорости движения рабочего органа производственного механизма, который мы и рассматриваем в дальнейшем изложении.

Следует отметить, что для ряда механизмов (главным образом металлорежущих станков) применяется комбинированное регулирование, когда электрический способ сочетается с механическим.

Понятие регулирования частоты вращения при электрическом способе можно дать, воспользовавшись упомянутыми выше механическими характеристиками двигателя и производственного механизма.

Рассмотрим для примера вентилятор, который непосредственно, без механической передачи приводится во вращение асинхронным электродвигателем. Совместим на одном чертеже (рис. 3) механические характеристики

двигателя (кривая *I*) и вентилятора (кривая *II*). Тогда по известному в теории электропривода правилу, основанному на втором законе механики Ньютона, точка пересечения этих характеристик *A*, в которой моменты двигателя и вентилятора равны друг другу, определит частоту вращения $n_{уст}$ их установившегося движения. Рассмотрим теперь два возможных случая изменения частоты вращения двигателя и, соответственно, вентилятора.

1. Пусть по каким-то причинам (например, случайно увеличилось трение в подшипниках) момент на валу вентилятора возрос и его механическая характеристика приняла вид штрихпунктирной кривой *IV*. Тогда двигатель и вентилятор будут вращаться уже с другой установившейся частотой вращения $n'_{уст}$, соответствующей новому увеличивающемуся значению момента вентилятора. Можно ли назвать такое изменение частоты вращения производственного механизма регулированием? Очевидно, нет, так как это изменение произошло не в результате сознательного воздействия со стороны человека.

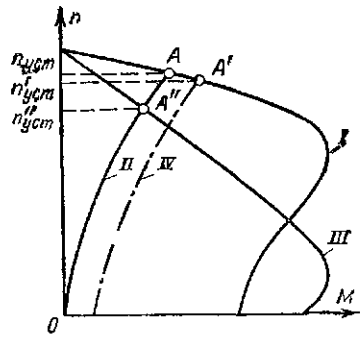


Рис. 3. К понятию регулирования частоты вращения асинхронного двигателя.

2. Рассмотрим теперь другой случай. Предположим, что нам каким-то образом (речь об этом будет подробно идти ниже) удалось получить новую искусственную характеристику двигателя в виде кривой *III*. Тогда при первоначальной характеристике вентилятора новая установившаяся частота вращения $n''_{уст}$ двигателя и вентилятора определится точкой *A''*. Можем ли мы такое изменение частоты вращения называть регулированием? Очевидно, да, поскольку оно произошло в результате наших сознательных, целенаправленных действий.

Итак, под электрическим регулированием частоты вращения будем понимать принудительное, сознательное изменение частоты вращения электродвигателя в соответствии с требованиями производственного процесса путем получения нужных искусственных механических характеристик. Регулирование частоты вращения элек-

тродвигателей обычно характеризуется определенными показателями, которые позволяют оценивать качество каждого конкретного способа регулирования, его соответствие условиям работы производственного механизма, а также сопоставлять между собой различные способы. Такими показателями являются:

1. Диапазон регулирования $Д$ частоты вращения электродвигателя, который определяется отношением максимальной частоты вращения к минимальной при заданном моменте нагрузки.

2. Плавность регулирования. Этот показатель характеризуется числом искусственных (регулировочных) характеристик при данном диапазоне регулирования. Чем больше искусственных характеристик внутри диапазона регулирования может быть получено, тем более плавно будет регулироваться частота вращения вала электродвигателя, и наоборот.

3. Направление возможного изменения частоты вращения определяется расположением получаемых искусственных характеристик относительно естественной характеристики двигателя. Если эти характеристики лежат выше естественной, то говорят о регулировании частоты вращения «вверх», если ниже — о регулировании «вниз».

4. Стабильность при работе на искусственных характеристиках характеризуется изменениями частоты вращения двигателя при колебаниях момента нагрузки. Небольшие перепады частоты вращения при возможных колебаниях момента нагрузки характеризуют стабильную работу электропривода на искусственных характеристиках, которые в этом случае часто называют «жесткими» характеристиками. Заметные (значительные) изменения частоты вращения при колебаниях момента нагрузки будут иметь место при «мягких» искусственных характеристиках двигателя, работа на которых будет нестабильной.

5. Экономичность регулирования характеризуется капитальными затратами, связанными с созданием системы электропривода, и потерями электрической энергии, которые имеют место при регулировании частоты вращения. При создании 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.), бо́льшую часть рабочего цикла двигатель работает на естественной характеристике и только относительно небольшое время работает на регулировочной характеристике, обычно на пониженной частоте вращения. 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 вызывают повышенные потери мощности в обмотках.

6. Допустимая нагрузка двигателя при его работе на регулировочных характеристиках. Нормальным режимом работы двигателя при различных частотах 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., $\cos\varphi$). Нагрев двигателя определяется главным образом значением 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 токов. Таким образом, при работе двигателя на регулировочных характеристиках он может нести только такую нагрузку (момент), при которой токи в его статорной и роторной цепях не превосходят номинальных. Эта нагрузка получила название допустимой нагрузки двигателя при его работе на искусственных характеристиках.

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 требуемые искусственные характеристики полу-

чаются у двигателей постоянного тока, поэтому до недавнего времени они преимущественно и находили применение для регулируемых электроприводов. С другой стороны, асинхронные двигатели, уступая двигателям постоянного тока по возможностям регулирования частоты вращения, по сравнению с последними проще в изготовлении и эксплуатации и имеют относительно меньшие массу, размеры и стоимость. Именно эти отличительные свойства асинхронных двигателей определили их главенствующее использование в промышленном нерегулируемом электроприводе. Достаточно сказать, что число выпускаемых двигателей постоянного тока составляет лишь 4—5% числа двигателей переменного тока.

Последние годы характеризуются уже созданием многих систем регулируемого асинхронного электропривода, не уступающих традиционным электроприводам постоянного тока.

В настоящей работе описываются основные методы регулирования частоты вращения асинхронного электродвигателя.

1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Асинхронный двигатель (рис. 4) 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. 4,*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. 4,*б*).

Различают асинхронные двигатели с фазным (рис. 4,*д*) и короткозамкнутым (рис. 4,*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. 5,*а*) или в треугольник (рис. 5,*б*). Трехфазные токи, проходя по обмоткам, образуют вращающееся магнитное поле.

Рассмотрим предварительно магнитное поле, образованное переменным током, проходящим по одному витку, состоящему из двух проводников, как показано на рис. 6,*а*. На рис. 6,*в* изображена синусоида (периодическая кривая, показывающая изменение переменного тока

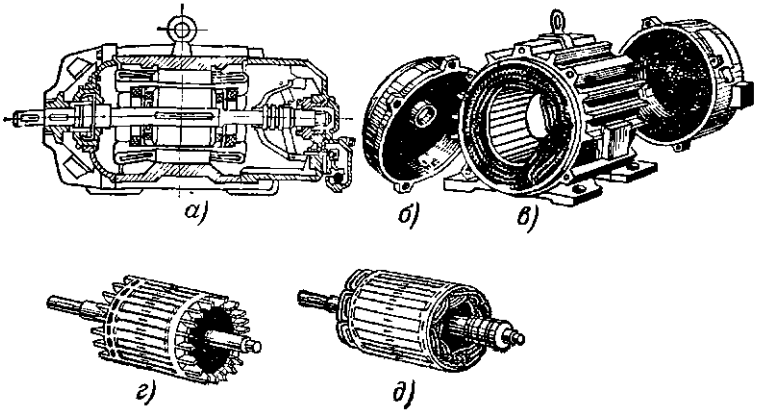


Рис. 4. Асинхронный двигатель.
а — разрез; *б* — подшипниковые щиты; *в* — статор; *г* — короткозамкнутый ротор; *д* — ротор с контактными кольцами.

во времени). Ток периодически изменяется: в течение полупериода 0—t_1 направление тока остается тем же, но меняется его величина от нулевого значения до максимального $I_{макс}$ при t' и затем вновь до нулевого при t_1; в течение последующего полупериода t_1—t_2 ток изменяется аналогично предыдущему, но направление меняется на обратное.

Предположим, что направление тока i, указанное стрелкой на рис. 6,*а*, соответствует моменту времени t' на рис. 6,*в*. Ток, проходя по прямолинейному проводнику, образует магнитное поле, силовые линии которого показаны на рис. 6,*б*, причем направление поля определяется по правилу буравчика. На рис. 6,*б* изображена

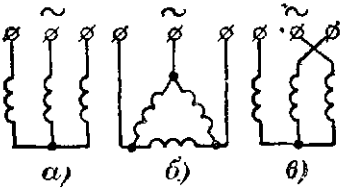


Рис. 5. Схемы подключения к сети обмоток статора асинхронного двигателя.
а — обмотки соединены в звезду; *б* — обмотки соединены в треугольник; *в* — соединение в звезду при реверсе двигателя.

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.

На рис. 6,*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. 6,*в*) магнитное

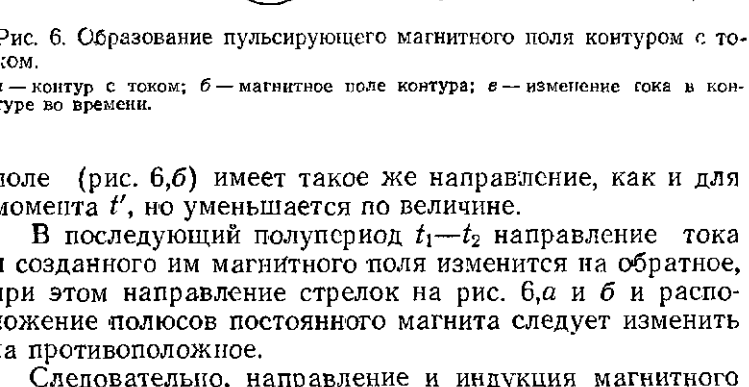


Рис. 6. Образование пульсирующего магнитного поля контуром с током.

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

поле (рис. 6,*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. 6,*а* и *б* и расположение полюсов постоянного магнита следует изменить на противоположное.

Следовательно, направление и индукция магнитного поля, образованного витком (рис. 6,*а*), периодически изменяются. Такое магнитное поле называется пульсирующим.

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

На рис. 7,*б* представлена простейшая обмотка статора трехфазного асинхронного двигателя, в которой каждая фаза состоит из одного витка. Плоскости витков сдвинуты относительно друг друга на 120°, или на $^1/_3$ окружности. В фазах обмотки проходят переменные токи. Следовательно, ток каждой 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 третью часть периода, как показано на рис. 7,*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, затем — ток фазы A и т. д.

Токи считаются положительными, когда они в началах фаз (проводники $A_н$, $B_н$, $C_н$) вытекают из плоскости

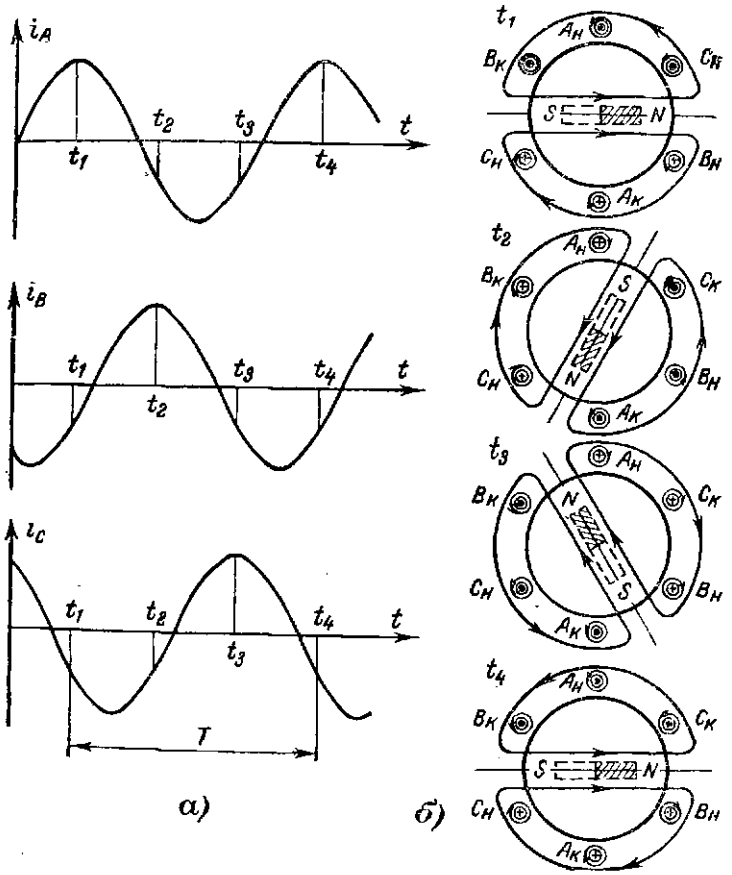


Рис. 7. Образование вращающегося магнитного поля трехфазным током.

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

чертежа, что на рис. 7,*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. 7,*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. 7,*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, 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. 7,*б* пунктиром.

Если поменять чередование двух фаз обмотки статора, т. е. если подключить к сети статорные обмотки по схеме на рис. 5,*в*, а не по схеме на рис. 5,*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. 5,*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 совпа-

дает 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. 7,*б*, располагаются не на всей окружности статора, а на некоторой части ее, как показано на рис. 8,*а*. Однако и в этом случае направление результирующего магнитного поля совпадает с осью той фазы, в которой ток в данный момент достигает наибольшего значения. По-

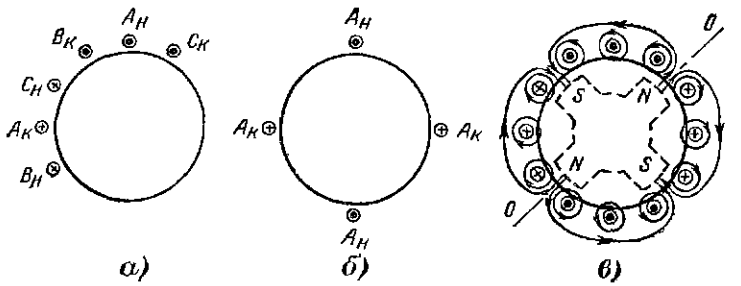


Рис. 8. К принципу образования многополюсного магнитного поля. *а* — распределение фазных обмоток на части окружности статора; *б* — расположение проводников одной фазы четырехполюсного двигателя; *в* — магнитное поле четырехполюсного двигателя.

этому за один период частоты тока магнитное поле повернется не на полный оборот, а на угол, соответствующий расположению проводников на рис. 8,*а*. Этот принцип используется для создания обмоток асинхронного двигателя с числом пар полюсов, большим единицы.

На рис. 8,*б* представлена простейшая обмотка одной фазы статора четырехполюсного асинхронного двигателя, а на рис. 8,*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. 8,*в* пунктиром. Так как этот магнит имеет четыре полюса, то соответствующее магнитное поле называется четырехполюсным. Расположение проводников статора четырехполюсного асинхронного двигателя, изображенного на рис. 8,*в*, одинаково по обе стороны от прямой *00*. Каждая половина статора состоит из трех фаз, создающих магнитное поле. Поэтому за один период частоты сети магнитное поле перемещается

на $^1/_2$ окружности. Следовательно, при увеличении числа пар полюсов частота вращения магнитного поля уменьшается.

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

$$f = \frac{pn_0}{60} \text{ или } f = \frac{p\omega_0}{2\pi}, \qquad (2)$$

где f — частота тока, Гц; p — число пар полюсов; ω_0 — угловая скорость вращения магнитного поля, рад/с; n_0 — частота вращения магнитного поля, об/мин.

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

$$n_0 = \frac{3000}{p} \text{ или } \omega_0 = \frac{2\pi f}{p} = \frac{314}{p}. \qquad (3)$$

Ниже приведены частоты вращения магнитного поля при частоте сети 50 Гц и разных числах пар полюсов:

Число пар полюсов	1	2	3	4	5	6	8	10
n_0, об/мин	3000	1500	1000	750	600	500	375	300
ω_0, рад/с	314	157	104,6	78,5	62,8	52,3	39,25	31,4

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 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 вра-

щающегося 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 ее оценки пользуются понятием «скольжение»:

$$s=\frac{n_0-n}{n_0}=\frac{\omega_0-\omega}{\omega_0}, \qquad (4)$$

где n — частота вращения ротора; ω — угловая скорость ротора.

Из выражения (4) следуют соотношения

$$n=n_0(1-s) \text{ и } \omega=\omega_0(1-s), \qquad (5)$$

позволяющие по известному скольжению определить соответствующую частоту вращения и угловую скорость.

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, которая определяется по формуле (1).

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

Как уже было сказано, зависимость вращающего момента от частоты вращения (уголовой скорости) ротора называется механической характеристикой электрического двигателя. На рис. 9,*а* изображена механическая характеристика асинхронного двигателя.

Остановимся подробнее на механической характеристике асинхронного двигателя. При подключении асинхронного двигателя к сети возникающее вращающееся поле взаимодействует с током ротора, определяя появление вращающего момента. Вращающий момент электрической машины часто называют электромагнитным моментом. Электромагнитный момент, развиваемый асинхронным двигателем, при частоте вращения, равной нулю, называется пусковым и обозначается $M_п$ (рис. 9,*а*).

Если статический момент механизма $M_с$ больше пускового момента двигателя $M_п$, двигатель не сможет разогнаться. Если же пусковой момент двигателя больше

статического M_c, то ротор двигателя будет ускоряться, а частота вращения двигателя увеличивается. При изменении частоты вращения 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 частоты вращения также изменяется. При определенной частоте вращения эти моменты оказываются одинаковыми, при этом частота вращения системы двигатель — механизм устанавливается постоянной и соответствует точке *A* на рис. 9,*а*.

Из изложенного ясно, что установившаяся частота вращения асинхронного двигателя зависит от нагрузки на его валу, т. е. от статического момента. При синхронной частоте вращения ротора 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 частоте вращения 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. 9,*а* буквой *N* обозначена точка механической характеристики, соответствующая номинальному режиму работы асинхронного двигателя. При этом двигатель, развивая номинальный момент $M_н$, вращается с номинальной частотой вращения. По обмоткам проходит номинальный ток. Номинальный режим работы характеризуется тем, что двигатель в этом режиме может работать длительно. При этом номинальные токи определяют нагрев обмоток до температуры, несколько меньшей, чем допустимая температура для данного класса изоляции обмоток.

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 $M_к$, как показано на рис. 9,*а*. Частота вращения двигателя, соответствующая этому моменту, равна:

$$n_к = n_0(1 - s_к),$$

где $s_к$ — так называемое критическое скольжение.

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

$$\lambda = \frac{M_к}{M_н}.$$

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 частоты вращения до частоты вращения $n_к$, соответствующей критическому моменту. Этот участок характеристики часто называется поэтому рабочим.

На рис. 9,*б* изображены две механические характеристики асинхронных двигателей. Характеристика *а* отличается незначительным изменением частоты вращения при изменении момента на рабочем участке характеристики. Такие характеристики называются жесткими. Характеристика *б* отличается значительным изменением частоты вращения при изменении момента и называется мягкой. Если к валу двигателя приложен статический момент $M_{с1}$, то на характеристике *а* этому моменту соответствует частота вращения $n_{а1}$, а на характеристике *б* — частота вращения $n_{б1}$. При изменении статического момента до $M_{с2}$ частота вращения двигателя изменится по характеристикам *а* и *б* до величин соответственно $n_{а2}$ и $n_{б2}$. Изменение частоты вращения по харак-

теристике *б* ($n_{б2}$—$n_{б1}$) значительно больше, чем по характеристике *а* ($n_{а2}$—$n_{а1}$). Жесткая характеристика *а* обычно больше удовлетворяет требованиям производственного механизма по сравнению с характеристикой *б*, так как при работе на характеристике *а* частота вращения двигателя, а значит и производительность рабочего механизма изменяются незначительно с изменением нагрузки.

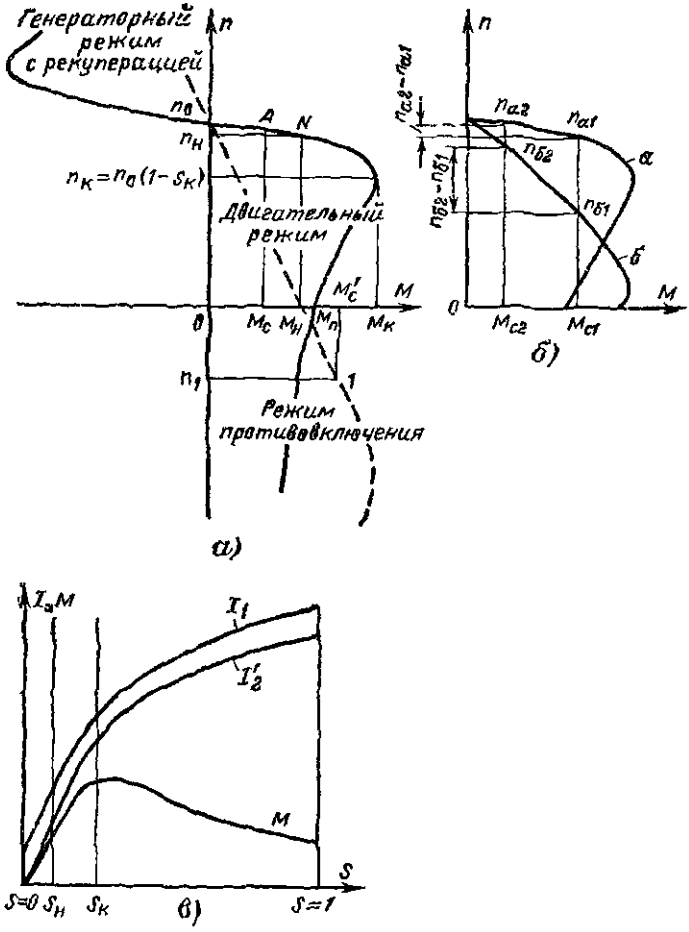


Рис. 9. Характеристики асинхронного двигателя.

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

Для более детального анализа свойств асинхронного двигателя необходимо получить определенные количественные соотношения, которые характеризуют его работу. С этой целью рассмотрим вначале более подробно некоторые физические особенности его работы. Допустим, что асинхронный двигатель подключен к сети и работает в установившемся режиме с постоянной частотой вращения, преодолевая момент сопротивления M_c. При

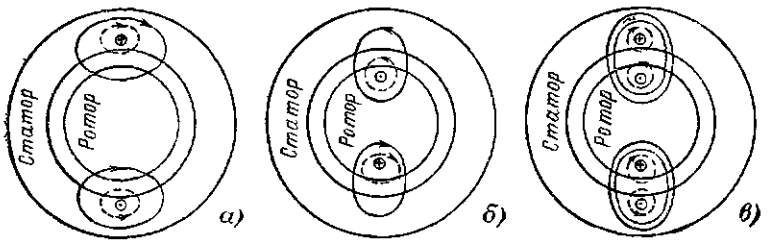


Рис. 10. Магнитные поля в асинхронной машине.
а — для статорного контура с током; *б* — для роторного контура с током, *в* — результирующее магнитное поле контуров с токами статора и ротора.

этом в обмотках статора и ротора проходят соответствующие токи, которые образуют магнитные поля в машине. В асинхронной машине различают три магнитных поля: поле рассеяния статора, поле рассеяния ротора и главное (или результирующее) поле.

На рис. 10 показаны картины распределения силовых линий контура с током, расположенного в пазах статора (рис. 10,*а*), контура с током, расположенного в пазах ротора (рис. 10,*б*), и обоих этих контуров (рис. 10,*в*). Магнитное поле каждого отдельного контура, показанного на рис. 10, аналогично магнитному полю контура, изображенного на рис. 6. Однако важно отметить одно обстоятельство для контуров асинхронной машины, показанных на рис. 10, а именно: часть силовых линий магнитного поля, обозначенных пунктирными линиями, не пересекает воздушный зазор между статором и ротором и связана с проводниками только одной обмотки — статора или ротора; другая часть силовых линий, обозначенных сплошными линиями, пересекает воздушный зазор и связана с проводниками обеих обмоток. Магнитное поле, связанное с одной обмоткой и создаваемое током только этой обмотки, называется полем рассеяния. Магнитное поле, связанное с обеими обмот-

ками и создаваемое токами этих обмоток, называют главным полем.

Из физики известно, что если по катушке индуктивности протекает переменный ток, в ней наводится э. д. с. самоиндукции. В соответствии с этим в обмотке статора возникают две э. д. с.: от поля рассеяния статора $e_{\sigma 1}$ и от главного поля $e_{гл1}$. Аналогично в обмотке ротора также возникают две э. д. с.: от поля рассеяния ротора $e_{\sigma 2}$ и от главного поля $e_{гл2}$.

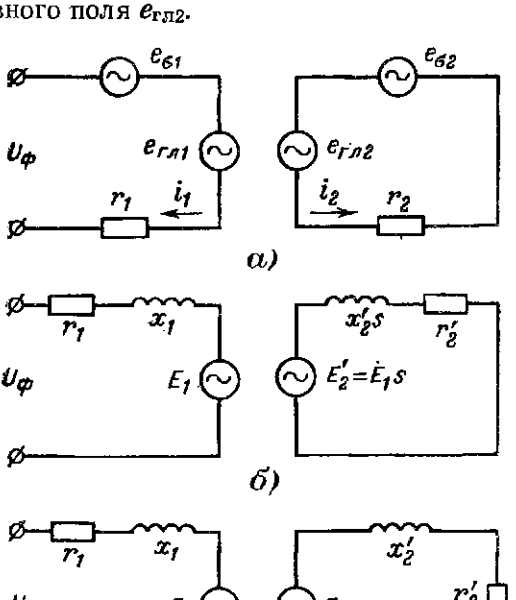


Рис. 11. К понятию схемы замещения асинхронной машины.

Приведенные соображения позволяют для расчета токов в обмотках асинхронной машины использовать схему, приведенную на рис. 11, в которую включены все указанные э. д. с. и дополнительно активные сопротивления фазных обмоток статора r_1 и ротора r_2, а также фазное напряжение $U_ф$ сети. Следует отметить, что использование для расчетов схемы на рис. 11 затруднительно по следующим соображениям.

Во-первых, обычно число витков обмоток статора и ротора неодинаково. Поэтому одинаковые токи в обмотках создают различные магнитные потоки, что неудобно для расчетов. Однако этот недостаток легко устраняется тем, что напряжения, токи и сопротивления цепи ротора можно привести к числу витков обмотки статора. Такое приведение рассматривается в любом учебнике по электрическим машинам. В дальнейшем будем полагать, что все величины роторной цепи приведены к числу витков обмотки статора. Отметим, что все приведенные величины обозначаются со штрихом, например r'_2 — активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к статору.

Во-вторых, частота тока в роторе зависит от его скорости, а частота тока в статоре постоянна и равна частоте питающей сети f_1. Действительно, частота тока ротора определяется скоростью пересечения магнитным полем проводников ротора, а эта скорость определяется разностью частот вращения магнитного поля n_0 и ротора n. При этом частота тока в роторе равна:

$$f_2 = f_1 \frac{n_0 - n}{n_0} = f_1 s, \qquad (6)$$

т. е. согласно формуле (4) частота тока ротора пропорциональна частоте сети и скольжению.

Действующее значение э. д. с. самоиндукции и взаимоиндукции какой-либо обмотки

$$E = 2\pi f L I \qquad (7)$$

пропорционально частоте f в цепи, индуктивности L и действующему значению тока I, создающему магнитный поток в обмотке. С учетом сказанного действующие значения указанных выше э. д. с. рассеяния можно представить в виде

$$E_{\sigma 1} = 2\pi f_1 L_{\sigma 1} I_1 = x_1 I_1; \qquad (7а)$$

$$E'_{\sigma 2} = 2\pi f_2 L'_{\sigma 2} I'_2 = \frac{f_2}{f_1} 2\pi f_1 L'_{\sigma 2} I'_2 = s x'_2 I'_2, \qquad (7б)$$

где x_1 — индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки статора; x'_2 — индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки ротора, приведенное к цепи статора.

Отметим, что индуктивные сопротивления рассеяния x_1 и x'_2 согласно (7а) и (7б) соответствуют частоте f_1 питающей сети.

Действующие значения э. д. с. в обмотках статора и ротора от главного поля согласно (7) выражаются следующим образом:

$$E_1 = 2\pi f_1 L_0 I_\mu = x_0 I_\mu; \tag{8}$$

$$E'_2 = 2\pi f_2 L_0 I_\mu = \frac{f_2}{f_1} 2\pi f_1 L_0 I_\mu = s x_0 I_\mu, \tag{8a}$$

где I_μ — так называемый намагничивающий ток, который определяет главное магнитное поле машины. Из сказанного выше (см. рис. 10, *в*) следует, что ток I_μ характеризует совместное действие токов I_1 статора и I'_2 ротора в создании главного поля; $x_0 = 2\pi f_1 L_0$ — соответствующее частоте сети индуктивное сопротивление, характеризующее главное поле.

Отметим, что индуктивность L_c определяется параметрами обмотки, в частности ее числом витков. Поскольку выше было принято, что число витков ротора приведено к числу витков статора, то в (8) и (8а) взяты одинаковые значения L_0.

Из (8) и (8а) вытекает важное соотношение

$$E'_2 = E_1 s, \tag{9}$$

из которого следует, что э. д. с. ротора от главного поля пропорциональна э. д. с. статора и скольжению асинхронной машины.

На рис. 11,*б* приведены эквивалентные схемы для цепей статора и ротора, соответствующие рис. 11,*а* с учетом полученных выражений для э. д. с.

Эквивалентные схемы, приведенные на рис. 11, не нашли распространения в теории электрических машин из-за сложностей расчетов при их использовании. Широкое распространение получили так называемые схемы замещения. Схемы замещения — это электрические схемы, которые описываются такими же уравнениями (на основании законов Кирхгофа для электрических цепей), как и схемы обмоток реальной электрической машины. По всем ветвям этой схемы проходят токи одинаковой частоты, обычно равной частоте питающей сети.

Используя схему на рис. 11,*б*, получаем схему замещения асинхронной машины. Предварительно отметим, что при работе асинхронной машины со статора на ротор передается через воздушный зазор с помощью элек-

тромагнитного поля так называемая электромагнитная мощность:

$$P_{эм} = M\omega_0, \tag{10}$$

где M — электромагнитный момент машины; ω_0 — угловая скорость магнитного поля.

Часть этой мощности передается на вал ротора в виде механической мощности [см. формулу (1а)], а остальная часть выделяется в виде потерь в активных сопротивлениях всех трех фаз роторной цепи. Эти потери, называемые электрическими, равны:

$$\Delta P_{эл2} = 3(I'_2)^2 r'_2. \tag{11}$$

Из (10), (1а) и (11) следует:

$$3(I'_2)^2 r'_2 = M\omega_0 - M\omega = M(\omega_0 - \omega) = M\omega_0 s. \tag{12}$$

Полученное выражение (12) позволяет определить момент асинхронной машины, если известны электрические потери в роторе и скольжение.

Эквивалентная схема на рис. 11,*б* не учитывает факт преобразования в асинхронной машине электрической энергии в механическую. В искомой электрической схеме замещения он обязательно должен учитываться. Однако, поскольку в электрической схеме затруднительно отразить преобразование электрической энергии в механическую, можно в цепь ротора включить некоторое дополнительное (фактически несуществующее) активное сопротивление, в котором будут выделяться потери, равные механической мощности. При этом в цепи ротора общие электрические потери должны равняться электромагнитной мощности.

Новое активное сопротивление $R'_{экв}$ в цепи ротора следует выбрать таким образом, чтобы ток в роторе равнялся реальному току. Этот ток согласно (12) равен:

$$I'_2 = \sqrt{\frac{M\omega_0 s}{3r'_2}}. \tag{13}$$

В соответствии со сказанным электрические потери в сопротивлении $R'_{экв}$ роторной цепи

$$\Delta P_{эл\,2\,экв} = 3(I'_2)^2 R'_{экв}. \tag{13а}$$

Используя равенство

$$M\omega_0 = \Delta P_{эл\,2\,экв}$$

и подставляя в него (13) и (13а), находим:

$$M\omega_0 = 3(I'_2)^2 R'_{экв} = 3\frac{M\omega_0 s}{3r'_2} R'_{экв}$$

и далее получаем:

$$R'_{экв} = \frac{r'_2}{s}. \qquad (14)$$

С другой стороны, из эквивалентной схемы роторной цепи на рис. 11,*б* находим ток ротора

$$I'_2 = \frac{E_1 s}{\sqrt{(r'_2)^2 + (x'_2 s)^2}} = \frac{E_1}{\sqrt{(r'_2/s)^2 + (x'_2)^2}}. \qquad (15)$$

Согласно (15) ток в обмотке ротора определяется э. д. с. статора, индуктивным сопротивлением рассеяния x'_2 ротора и эквивалентным активным сопротивлением $r'_2/s = R'_{экв}$ [см. формулу (14)]. Поэтому вместо эквивалентной цепи ротора на рис. 11,*б* можно изобразить новую эквивалентную цепь ротора, показанную на рис. 11,*в*.

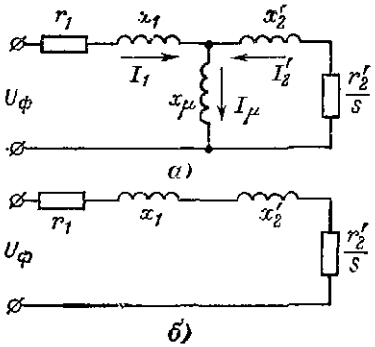


Рис. 12. Полная (*а*) и упрощенная (*б*) схемы замещения асинхронной машины.

На рис. 12,*а* приведена искомая схема замещения асинхронной машины, которая получается из эквивалентной схемы на рис. 11,*в*. Следует отметить, что обычно $x_0 \gg x_1$ и $x_0 \gg x'_2$. Поэтому часто индуктивное сопротивление x_0 не учитывают при расчетах. На рис. 12,*б* приведена упрощенная схема замещения асинхронной машины.

Зависимость тока ротора, обозначаемого I'_2, от фазного напряжения $U_ф$ и скольжения s согласно схеме на рис. 12,*б* имеет следующий вид:

$$I'_2 = \frac{U_ф}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r'_2}{s}\right)^2 + (x_1 + x'_2)^2}}. \qquad (16)$$

На рис. 9,*в* эта зависимость показана графически. В рабочей части механической характеристики от $s=0$

и почти до $s \approx s_к$ ток ротора примерно пропорционален скольжению.

Ток статора асинхронной машины I_1 определяется двумя составляющими. Первая из них — ток ротора; вторая составляющая — это так называемый ток холостого хода, определяемый током намагничивания и небольшими потерями в машине при холостом ходе. На рис. 9,*в* показана зависимость тока статора от скольжения.

Зависимость момента асинхронного двигателя от напряжения, скольжения и сопротивлений обмоток может быть получена из (12) и (16):

$$M = \frac{3U^2_ф}{\omega_0} \frac{r'_2/s}{(r_1 + r'_2/s)^2 + (x_1 + x'_2)^2}. \qquad (17)$$

Эта зависимость также изображена на рис. 9,*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 (16) и (17) следует, что при неизменном скольжении ток ротора двигателя пропорционален напряжению, приложенному к статору, а момент двигателя пропорционален квадрату этого напряжения.

Формулу (17) можно записать в другом виде:

$$M = \frac{2M_к(1 + as_к)}{s/s_к + s_к/s + 2as_к}, \qquad (18)$$

где

$$M_к = \frac{3U^2_ф}{2\omega_0 [r_1 + \sqrt{r^2_1 + (x_1 + x'_2)^2}]}; \qquad (19)$$

$$s_к = \frac{r'_2}{\sqrt{r^2_1 + (x_1 + x'_2)^2}}; \qquad (20)$$

$$a = r_1/r'_2.$$

Величины $M_к$ и $s_к$ представляют собой соответственно критический момент и критическое скольжение асинхронного двигателя, которые в значительной мере определяют форму его механической характеристики и показаны на рис. 9,*а*. Существенно отметить, что критический момент не зависит от активного сопротивления r'_2

роторной цепи, а критическое скольжение прямо пропорционально ему.

В тех случаях, когда активное сопротивление статора значительно меньше суммы индуктивных сопротивлений рассеяния обмоток, т. е. когда $r_1 \ll x_1 + x'_2$, то $as_к \ll 1$. При этом в формулах (18)—(20) можно пренебречь r_1 и тогда эти формулы можно записать следующим образом:

$$M = \frac{2M_к}{s/s_к + s_к/s}; \tag{18a}$$

$$M_к = \frac{3U^2_ф}{2\omega_0 (x_1 + x'_2)}; \tag{19a}$$

$$s_к = \frac{r'_2}{x_1 + x'_2}. \tag{20a}$$

Выражение (18) называется формулой Клосса, а выражение (18а) — упрощенной формулой Клосса. Эти формулы часто применяются при анализе свойств асинхронного двигателя, потому что они записаны в форме, удобной для запоминания.

Формулы вида (17), (18) и (18а), определяющие зависимость момента асинхронного двигателя от скольжения, представляют собой по существу выражения для механической характеристики асинхронного двигателя, потому что его скольжение согласно (5) однозначно связано с частотой вращения.

Для регулирования частоты вращения асинхронного двигателя необходимо изменять зависимость его момента от частоты вращения или, что то же самое, от скольжения. В соответствии с формулой (17) этого можно достигнуть, изменяя следующие величины: фазное напряжение $U_ф$, сопротивление ротора r'_2 и статора r_1, угловую скорость ω_0 магнитного поля и т. д. Рассмотрим один из важнейших вопросов о потерях в асинхронной машине при регулировании частоты ее вращения, а конкретные виды регулирования частоты вращения ротора будут проанализированы в дальнейшем.

Электрический ток, проходя по проводнику, нагревает его. Количество тепла, выделяемое при этом, пропорционально значению 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 по-

тери, 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 существенно. Поэтому рассмотрим, как изменяются электрические потери асинхронного двигателя при регулировании частоты вращения. Электрические потери в статоре асинхронного двигателя примерно пропорциональны электрическим потерям в роторе, которые мы кратко рассмотрим.

Электрические потери в роторной цепи согласно (11) можно записать в виде

$$3I'^2_2(r'_2+R'_{2д}),$$

где $R'_{2д}$ — приведенное к цепи статора дополнительное активное сопротивление в цепи ротора.

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 к. п. д. 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 частоты вращения двигателя является экономичным, при котором электрические потери в роторе относительно невелики.

Из изложенного выше и из анализа выражения (12) следует, что электрические потери пропорциональны разности частот вращения магнитного поля и ротора двигателя или, что то же самое, пропорциональны скольже-

нию. По экономичности работы способы регулирования частоты вращения асинхронных двигателей могут быть разделены на две большие группы:

а) неэкономичные способы регулирования, при которых частота вращения ротора может значительно отличаться от синхронной, что вызывает наличие больших потерь в обмотке ротора. К таким способам 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 частота вращения ротора близка к синхронной, что определяет относительно небольшие по величине потери в цепи ротора. К таким способам относятся частотное регулирование и регулирование изменением числа пар полюсов обмотки статора.

К экономичным способам 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 генераторных режимах, когда на вал ротора поступает механическая энергия и преобразуется с помощью магнитного поля в электрическую. Генераторные режимы бывают разные: с рекуперацией (возвращением) энергии в сеть, режимы противовключения и динамического торможения. В генераторном режиме с рекуперацией асинхронная машина в схемах на рис. 5 работает при частоте вращения 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 частотах 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, нужные для уравновешивания груза ток и момент двигатель развивает лишь при вращении в направ-

лении спуска, т. е. при скольжении, большем единицы. При таком режиме двигатель потребляет электрическую энергию из сети и механическую с вала за счет изменения потенциальной энергии при спуске груза. И та и другая части энергии выделяются в виде тепла в цепи ротора, главным образом в добавочных сопротивлениях. Механическая характеристика, соответствующая спуску при торможении противовключением, показана на рис. 9,*а* пунктиром.

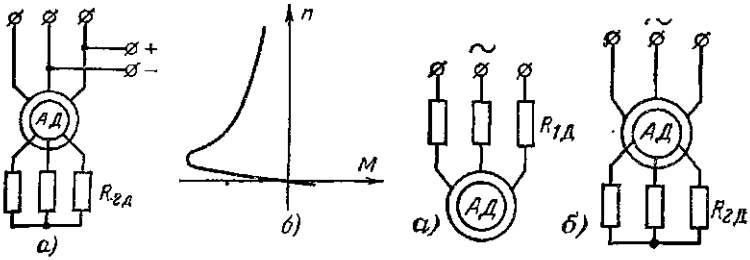


Рис. 13. Схема соединения (*а*) и механическая характеристика (*б*) асинхронного двигателя при динамическом торможении.

Рис. 14. Включение дополнительных активных сопротивлений в цепи статора (*а*) и ротора (*б*) асинхронного двигателя.

На рис. 9,*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 квадранте — от синхронной частоты вращения и выше — генераторному режиму с рекуперацией энергии в сеть, в четвертом квадранте — противовключению.

На рис. 13,*а* представлена схема включения двигателя при динамическом торможении. Обмотки статора при этом подключаются к сети постоянного тока. На рис. 13,*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.

2. РЕОСТАТНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ

Одним из наиболее простых способов регулирования частоты 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. 14,*а*) или в роторные (рис. 14,*б*) цепи. Однако практически для целей регулирования частоты вращения преимущественно применяются дополнительные сопротивления роторной цепи по схеме на рис. 14,*б*. Это связано с тем, что схеме на рис. 14,*а* свойственны следующие существенные недостатки.

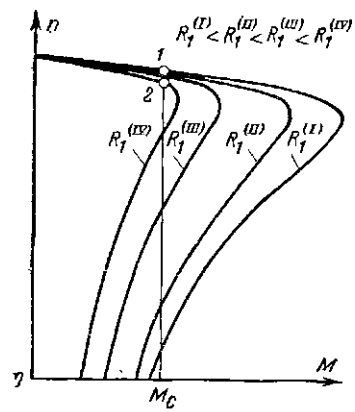


Рис. 15. Механические характеристики при различных дополнительных активных сопротивлениях в статорной цепи.

На рис. 15 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 зажимах 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 при постоянном моменте нагрузки возможна только в пределах критического момента, снижаемого введением в статорную цепь сопротивлений, то диапазон регулирования при таком способе невелик. Так, например, введение дополнительного сопротивления $R^{(IV)}_1$, уменьшающего критический момент приблизительно вдвое, снижает частоту

вращения двигателя от соответствующей точки *1* (рис. 15) до точки *2*, т. е. незначительно.

Наконец, при понижении напряжения на статоре при постоянном моменте двигателя возрастает его скольжение и повышаются роторный и статорный токи, как это следует из формулы (12).

Рассмотренные причины — уменьшение критического момента и малый диапазон регулирования — определяют тот факт, что реостатное регулирование частоты вращения введением активного сопротивления в статорную цепь не получило широкого практического распространения.

Следует отметить, что схема, приведенная на рис. 14,*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 частоты вращения 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 частоту вращения двигателя в относительно широких пределах. Допустим, что асинхронный двигатель вращается с частотой n_1 и преодолевает при этом постоянный 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 частота вращения двигателя начнет уменьшаться. Уменьшению частоты вращения 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 статическо-

му моменту, изменение частоты вращения прекратится, и двигатель вновь будет работать в установившемся режиме с частотой вращения n_2, которая меньше n_1.

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

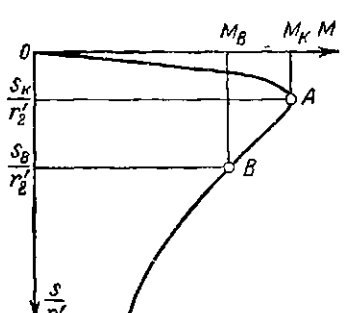


Рис. 16. Зависимость момента асинхронного двигателя от отношения s/r'_2.

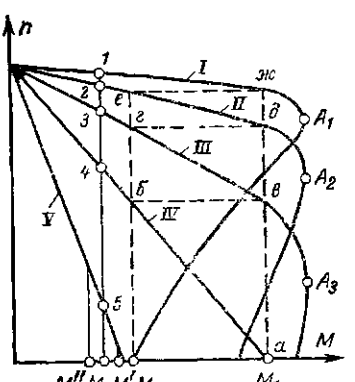


Рис. 17. Механические характеристики при различных дополнительных сопротивлениях в роторной цепи.

Рассмотрим указанные положения несколько подробнее. Располагая параметрами ω_0, r_1, x_1, x'_2 асинхронного двигателя, можно на основании формулы (17) построить зависимость момента двигателя M от отношения s/r'_2.

Эта зависимость имеет вид кривой, представленной на рис. 16, и верна при любом сопротивлении ротора r'_2. Следовательно, значение критического момента не зависит от сопротивления ротора. График кривой на рис. 16 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 характе-

ристику, учитывая, что частота вращения связана со скольжением выражением

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

Если график на рис. 16 перестроить для сопротивления обмотки ротора, получим естественную механическую характеристику (кривая *I* на рис. 17).

Возьмем на графике рис. 16 точку *A*, которая соответствует критическому моменту асинхронного двигателя. Абсцисса точки *A* равна критическому моменту $M_к$, а ордината — отношению критического скольжения к сопротивлению ротора $s_к/r'_2$. Умножив $s_к/r'_2$ на сопротивление обмотки ротора $r'_{2обм}$, получим критическое скольжение, соответствующее естественной механической характеристике. Точке *A* на рис. 16 будет соответствовать точка A_1 кривой *I* на рис. 17. Умножив далее $s_к/r'_2$ на значение сопротивления, большее сопротивления обмотки ротора ($r'_{2обм}+R'_{2д}$), получим критическое скольжение реостатной характеристики, которое больше критического скольжения естественной характеристики. Точке *A* на рис. 16 соответствует для сопротивления $r'_{2обм}+R'_{2д}$ точка A_2 на рис. 17. Точка A_2 располагается ниже точки A_1 и лежит на механической характеристике *II*, которая соответствует сопротивлению ротора $r'_{2обм}+R'_{2д}$. При дальнейшем увеличении сопротивления роторной цепи соответствующее критическое скольжение еще больше увеличится. В этом случае точке *A* на рис. 16 будет соответствовать точка A_3 на рис. 17.

Итак, при введении в роторную цепь асинхронного двигателя дополнительного активного сопротивления величина критического скольжения увеличивается, а механические характеристики деформируются, изменяются. Кривая *I* на рис. 17 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 частотах вращения, т. е. в режиме противовключения, что на рис. 17 не показано.

Допустим, что асинхронный двигатель приводит в движение механизм, который характеризуется статическим моментом M_c, не зависящим от скорости, как показано на рис. 17. На естественной характеристике двигатель будет работать в точке *1*, при введении дополни-

тельного сопротивления в роторную цепь двигатель начинает работать в точке *2*, при дальнейшем увеличении сопротивления в точке *3* и т. д. Как видно из рис. 17, при введении дополнительного сопротивления в роторную цепь частота вращения двигателя уменьшается. При таком регулировании частота вращения изменяется в относительно широких пределах — от частоты вращения, соответствующей точке *1*, до частоты вращения, соответствующей точке *5*, как показано на рис. 17.

Следует подчеркнуть, что характеристики *I*, *II*, *III*, *IV* и *V* дают разные качественные показатели регулирования частоты вращения 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, частота вращения двигателя возрастает почти в 2 раза, а при увеличении от M_c до M'_c частота вращения уменьшается почти до 0.

Если двигатель работает в точке *1* на характеристике *I*, то его работа будет намного стабильнее, так как при изменении момента частота вращения 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 слабины 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, то легко можно построить механические характеристики при любом другом сопротивлении ротора. Для доказательства этого положения рассмотрим произвольную точку *B* на рис. 16. Ордината точки *B* равна s_B/r'_2. При этом, когда двигатель развивает момент M_B, при любых сопротивлениях ротора $r_2'^{(1)}$ и $r_2'^{(2)}$ соблюдается равенство

$$\frac{s_B^{(1)}}{r_2'^{(1)}} = \frac{s_B^{(2)}}{r_2'^{(2)}} \text{ или } \frac{s_B^{(1)}}{s_B^{(2)}} = \frac{r_2'^{(1)}}{r_2'^{(2)}} \qquad (21)$$

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 (21) в виде

$$s^{(2)} = s^{(1)} \frac{r'_2}{r'_{2обм}}. \qquad (22)$$

Допустим, что нам известно сопротивление обмотки ротора $r'_{2обм}$ и соответствующая механическая характеристика представлена кривой *I* на рис. 17. Необходимо

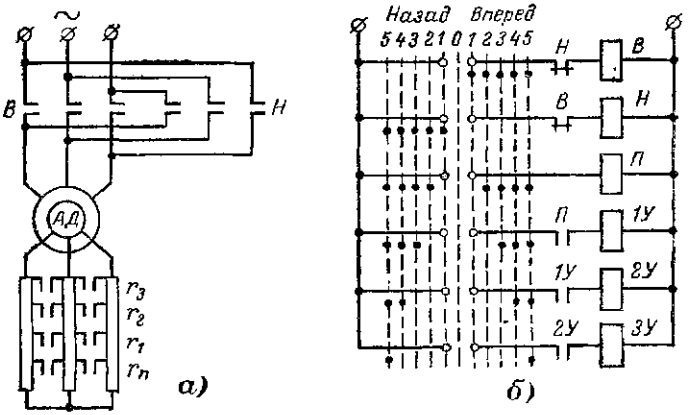


Рис. 18. Магнитный контроллер.
а — силовая схема; *б* — схема управления.

построить характеристику, соответствующую сопротивлению роторной цепи R'_2. Выражение (22) в этом случае имеет вид:

$$s^{(2)} = s^{(1)} \frac{R'_2}{r'_{2обм}}. \qquad (22а)$$

Зная скольжение для точки *1* на рис. 17, находим по выражению (22а) скольжение точки *2*, соответствующее тому же моменту двигателя, что и для точки *1*. Аналогично можно по точке *ж* найти точку *д*, по точке A_1 найти точку A_2 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. 18 представлена схема включения асинхронного двигателя, позволяющая осуществить пуск, реверсирование и регулирование частоты 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 двигателя. Силовые контакты контакторов *П*, *1У*, *2У* и *3У* осуществляют переключения ступеней сопротивлений в роторной цепи. Контактор *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 его частота вращения начнет увеличиваться.

При разгоне частота вращения и момент двигателя изменяются. Это изменение соответствует характеристике *IV* (рис. 17), пока сопротивление ротора не меняется. Поэтому можно считать, что каждому моменту времени соответствует определенная точка характеристики *IV*. В начале разгона состояние двигателя соответствует точке *а*, т. е. частота вращения равна нулю, а момент двигателя M_1. Дальше эта точка перемещается вверх по характеристике *IV*.

Когда будет достигнута точка *б*, 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 ха-

рактеристика *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 точки *б* на характеристике *IV* в точку *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 защунтируют сопротивление r_2 роторной цепи.

Точка, характеризующая состояние двигателя, переместится из *г* на характеристике *III* в *д* на характеристике *II*, по которой производится дальнейший разгон двигателя до точки *е*, после чего рукоятку командоконтроллера следует перевести в пятое положение, что приведет к срабатыванию контактора *3У* 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 *1*; когда момент двигателя станет равным статическому, частота вращения 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. 18 позволяет производить реостатный пуск и регулирование частоты 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 частоты вращения асинхронных двигателей рассмотрим основные показатели такого регулирования.

Диапазон регулирования при реостатном регулировании небольшой — около (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, 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 (12):

$$\Delta P_{эл2} = \frac{Mn_0 s}{9,55} \quad \text{или} \quad \Delta P_{эл2} = M\omega_0 s.$$

Чем больше величина скольжения s, тем больше потери в роторной цепи. Реостатное регулирование частоты вращения асинхронных двигателей при большом диапазоне регулирования связано с большими потерями.

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

3. РЕГУЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЕМ НАПРЯЖЕНИЯ СТАТОРА ДВИГАТЕЛЯ

Одним из возможных способов регулирования частоты вращения асинхронных двигателей является изменение напряжения на зажимах его статора, при этом частота такого напряжения постоянна и равна частоте промышленной сети переменного тока.

На рис. 19,*а* приведена принципиальная блок-схема рассматриваемого электропривода. Между зажимами питающей сети и зажимами статора асинхронного двига-

теля включен преобразователь напряжения, при использовании которого изменяется напряжение, подводимое к статору двигателя. Возможность регулирования частоты вращения асинхронного двигателя с помощью изменения фазного напряжения следует из анализа формулы (18). Критическое скольжение согласно (20) не зависит от напряжения, поэтому оно при изменении $U_ф$ остается неизменным. Критический момент пропорционален квадрату напряжения и при уменьшении $U_ф$ также уменьшается [см. формулу (19)].

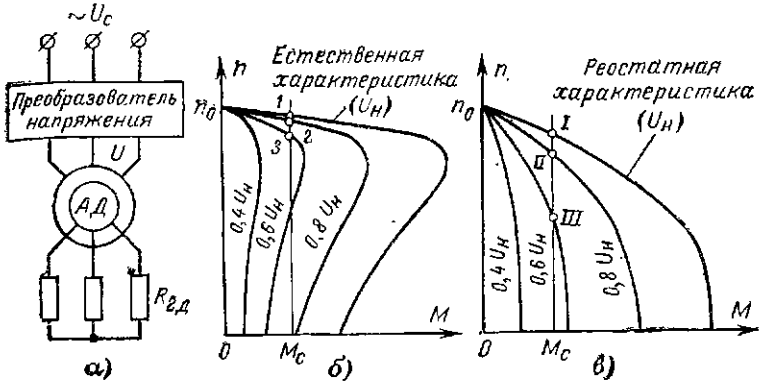


Рис. 19. Блок-схема (*а*) и механические характеристики при регулировании напряжением для случаев отсутствия (*б*) и наличия (*в*) добавочного сопротивления в роторе.

На рис. 19,*б* и *в* приведены механические характеристики, соответственно при отсутствии и наличии добавочных активных сопротивлений $R_{2д}$ в цепи обмотки ротора. Из графиков на рис. 19,*б* следует, что при постоянном моменте M_c нагрузки в случае $R_{2д}=0$ частота вращения двигателя изменяется в небольших пределах между точками *1* и *3*, а из графиков на рис. 19,*в* видно, что пределы возможного изменения частоты вращения в случае наличия добавочного сопротивления в роторе более широкие (см. участок между точками *I* и *III* на рис. 19,*в*).

Следует отметить, что реализация преобразователя напряжения в «чистом» виде, когда фазное напряжение синусоидально, затруднительна. Практически указанное напряжение имеет сложную несинусоидальную форму. Рассмотрим широко используемые в настоящее время

преобразователи напряжения — так называемые тиристорные регуляторы напряжения.

Предварительно для ознакомления с принципом действия регулятора напряжения проанализируем работу однофазной схемы на рис. 20,*а*. В схеме на рис. 20,*а* напряжение U переменного тока синусоидальной формы подводится к электрической цепи, содержащей активное сопротивление $R_{нг}$ нагрузки и две параллельные цепочки, каждая из которых содержит ключ K и неуправляемый вентиль (диод) B. Допустим, что ключ $K1$ может

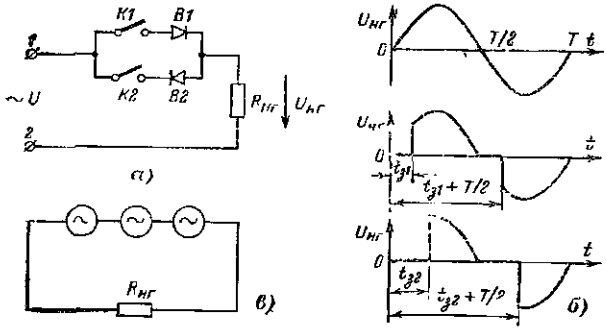


Рис. 20. Принципиальная (*а*) и эквивалентная (*в*) схемы однофазного регулятора напряжения и зависимости напряжения на нагрузке от времени при различных временах запаздывания (*б*).

замыкаться только в положительный полупериод напряжения (участок $0—T/2$ на рис. 20,*б*), а в отрицательный полупериод (участок $T/2—T$ на рис. 20,*б*) он разомкнут. Ключ $K2$ работает аналогичным образом, но только замкнутое его состояние возможно в отрицательном полупериоде, а разомкнутое — в положительном полупериоде.

Рассмотрим работу схемы при следующих условиях: в начале каждого положительного полупериода кривой напряжения U ключ $K1$ замыкается и остается замкнутым до конца этого полупериода, а ключ $K2$ при этом разомкнут; в течение каждого отрицательного полупериода состояние ключей $K1$ и $K2$ изменяется на противоположное. При указанных условиях в положительные полупериоды ток протекает по цепи: зажим *1* — ключ $K1$ — диод $B1$ — сопротивление $R_{нг}$ — зажим *2*, а в отрицательные полупериоды — по цепи: зажим *2* — $R_{нг}$ —

$B2-K2$ — зажим *1*. В этом случае напряжение U все время приложено к сопротивлению $R_{нг}$ нагрузки, и по нему проходит непрерывный синусоидальный ток.

Рассмотрим работу схемы при несколько иных условиях: ключ *K1* замыкается не в самом начале положительного полупериода кривой напряжения, а внутри его в некоторый момент времени $t_{з1}$ после начального момента; аналогично ключ *K2* замыкается не в начале отрицательного полупериода, а внутри его в момент времени $t_{з1}+T/2$, как показано на рис. 20,*б*. В таких условиях в течение каждого полупериода имеются интервалы времени $0-t_{з1}$ и $T/2-t_{з1}+T/2$, когда ток в нагрузке не проходит, а напряжение на нагрузке равно нулю. Часть синусоиды, показанная на среднем графике рис. 20,*б*, представляет собой зависимость напряжения на нагрузке от времени для данного случая.

Нижний график на рис. 20,*б* иллюстрирует случай, когда время $t_{з2}$ задержки замыкания ключа *K1* больше, чем в предыдущем случае.

Из приведенных на рис. 20,*б* графиков видно, что при появлении задержки в замыкании ключей *K1* и *K2* форма напряжения на нагрузке изменяется, а именно: из синусоиды как бы «вырезается» определенная часть, причем при увеличении времени задержки «вырезаемая» часть также увеличивается.

Существенно отметить, что форма напряжения на нагрузке при наличии описанного запаздывания становится несинусоидальной. Несинусоидальное напряжение можно представить как совокупность нескольких синусоидальных напряжений, каждое из которых изменяется с определенной частотой. Это положение доказано строго математически (так называемые ряды Фурье) и формулируется следующим образом: если имеется периодическая кривая несинусоидальной формы, то она может быть представлена суммой множества кривых синусоидальной формы, причем частота первой из них равна частоте периодического изменения исходной кривой, а частоты всех других выше этой основной частоты и кратны ей.

Из приведенных рассуждений вытекает следующий вывод: кривую напряжения на нагрузке при работе схемы на рис. 20,*а* можно разложить на отдельные синусоидальные составляющие, причем частота изменения первой из них равна частоте питающего напряжения, а частоты других составляющих больше, чем первой. Ука-

занная первая составляющая называется первой или основной гармоникой, а все другие составляющие называются высшими гармониками. Обычно первая гармоника имеет наибольшую амплитуду.

На рис. 20,*в* приведена эквивалентная схема, соответствующая схеме на рис. 20,*а*. Вместо напряжения U сети и цепочки, состоящей из ключей и вентилей, на рис. 20,*в* показаны три источника напряжения, характеризующие три первые гармоники. Важно подчеркнуть, что при изменении указанного выше времени запаздывания ключей *К1* и *К2* в схеме на рис. 20,*а* изменяются амплитуды синусоидальных составляющих напряжений, показанных на эквивалентной схеме на рис. 20,*в*. Следовательно, при изменении времени задержки $t_з$, показанного на графиках рис. 20,*б*, изменяется амплитуда первой гармоники напряжения на нагрузке. В этом смысле можно сказать, что схема на рис. 20,*а* является регулятором напряжения.

Отметим еще, что период задержки замыкания ключей в схеме на рис. 20,*а* обычно выражают не в секундах, а в градусах. Поскольку один период синусоидального напряжения соответствует 360°, то времени задержки $t_з$ соответствует пропорциональный этому времени угол $\alpha°$, определяемый по соотношению

$$\alpha = \frac{t_з}{T} 360.$$

Угол α обычно называется углом регулирования.

В схеме на рис. 20,*а* показаны ключи *К1* и *К2*, которые замыкаются и размыкаются в определенные моменты времени, и последовательно с ними включенные диоды *В1* и *В2*. В действительности такие ключи не применяются. Практически широко используются в качестве коммутирующих элементов тиристоры, принцип работы которых соответствует работе ключей и диодов в схеме на рис. 20,*а*.

Тиристор представляет собой полупроводниковый прибор, который в настоящее время находит очень широкое применение на практике. Не останавливаясь подробно на описании этого прибора, которое приведено во многих работах по промышленной электронике [4], укажем лишь некоторые принципиальные особенности его работы.

На рис. 21,*а* показано обозначение тиристора, который имеет три внешних вывода: анод, катод и управ-

ляющий электрод. Если по цепи анод — катод проходит ток $I_а$, то говорят, что «тиристор открыт». Если же этот ток отсутствует, то говорят, что «тиристор закрыт». Открытое состояние тиристора возможно при наличии следующих условий: 1) потенциал анода должен быть выше потенциала катода; 2) на управляющий электрод тиристора должен быть подан импульс тока $I_у$ управления определенной величины.

При этих условиях ток через тиристор протекает только в одном направлении — от анода к катоду, как показано стрелкой на рис. 21,*а*. Отметим, что тиристор

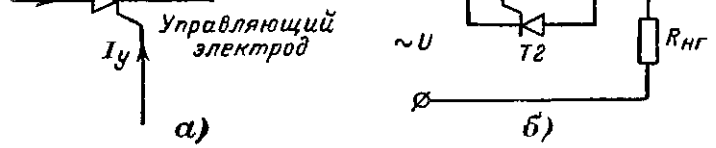


Рис 21. Обозначение тиристора (*а*) и схема однофазного тиристорного регулятора напряжения (*б*).

может самопроизвольно открыться и при отсутствии то- управления, но при этом к его зажимам анод — катод должно быть приложено положительное напряжение достаточно большой величины. Правда, тиристор обычно не рассчитан на такой режим, а если указанное напряжение все-таки существует, то оно может вывести тиристор из строя. Поэтому при работе в какой-либо схеме тиристор должен выбираться так, чтобы допустимое напряжение тиристора было выше всех возможных рабочих напряжений в данной схеме включения. В этом случае без наличия определенного тока в цепи управляющего электрода тиристор самопроизвольно включиться не сможет.

Важно отметить, что если к зажимам анод — катод тиристора приложено положительное напряжение, то при подаче в управляющий электрод тока управления тиристор откроется, но если тиристор уже открыт и ток управления снят (равен нулю), то тиристор не закроется. Он может закрыться только при изменении знака полярности напряжения на зажимах анод — катод,

а именно: когда напряжение на аноде относительно напряжения на катоде отрицательно. Поэтому тиристор называют управляемым выпрямителем с неполным управлением.

На рис. 21,*б* приведена однофазная схема регулирования напряжения на сопротивлении $R_{нг}$ нагрузки, которая по своему принципу действия полностью соответствует схеме на рис. 20,*а*. Если токи управления на тиристоры *T1* и *T2* не подаются, то они закрыты, и ток в нагрузке не проходит. Это состояние схемы соответствует разомкнутому положению ключей на рис. 20,*а*. Если в течение положительного полупериода напряжения *U* с задержкой на угол α относительно начала полупериода подать ток в управляющий электрод тиристора *T1*, то он включится, и в конце полупериода, когда напряжение сети станет равным нулю, отключится. То же самое произойдет с тиристором *T2* в отрицательный полупериод напряжения, если на управляющий электрод тиристора *T2* подать ток с задержкой на угол α относительно начала этого полупериода.

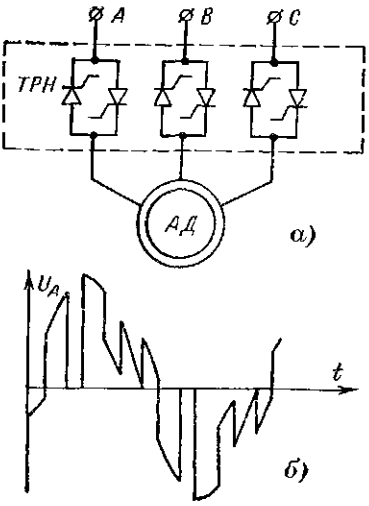


Рис. 22. Схема управления асинхронного двигателя с тиристорным регулятором напряжения.

Из изложенного ясно, что работа схемы на рис. 21,*б* полностью эквивалентна работе схемы на рис. 20,*а*. При этом термины «тиристор открыт» и «тиристор закрыт» следует понимать в том смысле, что когда он открыт, то через него в нагрузку проходит ток по цепи анод — катод, а когда он закрыт, то ток в этой цепи пренебрежимо мал, а сопротивление тиристора при этом очень велико.

Показанное на рис. 21,*б* соединение тиристоров называется встречно-параллельным. Оно обеспечивает поочередную работу каждого из тиристоров в течение одного полупериода частоты сети. Такие пары встречно-парал-

лельно соединенных тиристоров используются и для регулирования напряжения трехфазного асинхронного двигателя.

На рис. 22,*а* приведена практическая схема управления асинхронным двигателем с помощью тиристорного регулятора напряжения, состоящего из трех пар встречно-параллельно соединенных тиристоров, каждая из которых включена между фазой сети и фазой статора асинхронного двигателя. Регулирование напряжения на двигателе в этой схеме осуществляется, как и в схеме на рис. 21,*б*, изменением угла регулирования α, т. е. сдвигом во времени управляющих импульсов тока, подаваемых на управляющие электроды тиристоров.

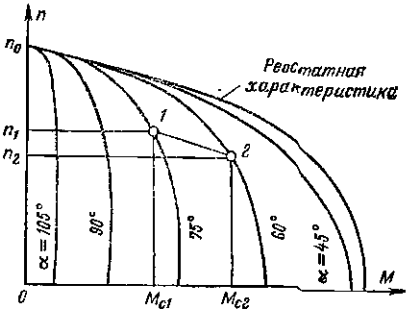


Рис. 23. Механические характеристики асинхронного электропривода с тиристорными регуляторами напряжения при различных углах регулирования α.

Управляющие импульсы подаются на все тиристоры не одновременно, а со сдвигом во времени на определенную часть периода частоты сети. Это определяется тем, что управляющий импульс каждого тиристора должен быть сдвинут относительно напряжения фазы сети, к которой подключен тиристор, на один и тот же угол регулирования α. А фазные напряжения сети для разных фаз сдвинуты относительно друг друга на 120°.

При изменении угла регулирования α изменяется форма напряжений на фазах двигателя аналогично тому, как это было рассмотрено для однофазной цепи (см. рис. 20). Форма напряжения при питания асинхронного двигателя от трехфазного регулятора напряжения отличается от рассмотренной формы напряжения при анализе схемы на рис. 20. Для примера на рис. 22,*б* показана форма напряжения для одной фазы асинхронного двигателя при управлении с помощью регулятора напряжения. Однако общая тенденция регулирования напряжения одинакова, а именно: при увеличении угла α амплитуда первой гармоники напряжения уменьшается. Для асинхронного двигателя это приводит

к уменьшению момента, поскольку момент асинхронного двигателя определяется согласно (17) квадратом фазного напряжения. На рис. 23 приведены механические характеристики асинхронного двигателя, каждая из которых соответствует одному значению угла регулирования α. Эти характеристики близки по виду к показанным на рис. 19,*в* характеристикам, соответствующим случаю питания двигателя от идеального источника изменяющегося синусоидального напряжения.

Возникающие на выходе тиристорного регулятора высшие гармоники напряжения оказывают определенное влияние на работу асинхронного двигателя. В частности, каждая гармоника напряжения определяет прохождение дополнительного тока в обмотках двигателя. Этот ток вызывает соответствующие дополнительные потери в обмотках. Анализ показывает, что в случае питания двигателя от регулятора по схеме на рис. 22,*а* потери на 10—20% больше, чем при питании двигателя от источника изменяющегося синусоидального напряжения. Вместе с тем следует отметить, что высшие гармоники напряжения оказывают незначительное влияние на момент двигателя.

Характеристики, приведенные на рис. 23, не всегда удовлетворяют целям регулирования частоты вращения асинхронных двигателей. Из графиков на рис. 23 следует, что с увеличением угла регулирования α снижается критический момент двигателя и падает жесткость его механических характеристик. Вследствие этого при возможных колебаниях момента сопротивления механизма M_c скорость его движения может резко изменяться, что в большинстве случаев недопустимо.

Действительно, пусть, например, момент сопротивления на валу двигателя равен M_{c1}. Если угол регулирования α равен 75°, 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 при этом начнет замедляться и в конечном итоге остановится, так как его критический момент меньше момента сопротивления M_{c2}. В то же время по условиям производственного процесса допустимо уменьшение частоты вращения только до значения n_2. Очевидно, что для выполнения этого требования должен быть уменьшен угол α до значения 60°, при этом момент двигателя увеличится и рабочая точка электропривода переместится в положение *2*.

Высказанные соображения показывают, что для получения благоприятных механических характеристик асинхронного двигателя, управляемого с помощью тиристорного регулятора напряжения, необходимо регулировать угол α в зависимости от изменения момента M_c нагрузки. В принципе такое регулирование можно осуществить вручную, когда за работой электропривода наблюдает оператор, который при недопустимых колебаниях скорости производственного механизма регулирует положение определенной рукоятки управления, изменяющей угол α. Однако наиболее просто и с лучшими результатами эти функции могут выполнить системы автоматического регулирования, которые без участия человека обеспечивают поддержание частоты вращения электродвигателя на заданном уровне. Достигается это за счет введения в цепь устройства управления тиристорами дополнительных электрических сигналов, которые реагируют на колебания момента нагрузки или частоты вращения двигателя и соответствующим образом изменяют угол регулирования тиристоров α.

Рассмотрим для примера принцип действия широко распространенной системы автоматического регулирования частоты вращения асинхронного электродвигателя с контактными кольцами, в которой используется сигнал, пропорциональный частоте вращения двигателя, или, как говорят, обратная связь по частоте вращения двигателя. Принципиальная электрическая схема для этого случая показана на рис. 24,*а*.

Между зажимами сети и статора двигателя включены три пары встречно-параллельно соединенных тиристоров: *Т1—Т2*; *Т3—Т4* и *Т5—Т6*. Управляющие электроды тиристоров подсоединены к выходам системы импульсно-фазового управления (СИФУ). Система импульсно-фазового управления распределяет управляющие импульсы тока на все тиристоры и, кроме того, с помощью подключенного на вход напряжения $U_у$ управления сдвигает управляющие импульсы тока для каждого тиристора относительно соответствующего фазного напряжения, т. е. с помощью СИФУ производится регулирование угла α управления тиристорами. К валу двигателя подсоединен вал тахогенератора *ТГ*, э. д. с. $e_{тг}$ на зажимах якоря которого пропорциональна частоте вращения двигателя $e_{тг}=\gamma n$, где γ — коэффициент пропорциональности. Электродвижущая сила тахо-

генератора сравнивается с задающим напряжением $U_з$, снимаемым с потенциометра *ЗП*, причем эти напряжения включены навстречу друг другу. Разность напряжений $U_з$ и $e_{тг}$, равная напряжению управления

$$U_у = U_з - \gamma n, \qquad (23)$$

поступает на вход СИФУ.

BOOKS.PROEKTANT.ORG
БИБЛИОТЕКА ЭЛЕКТРОННЫХ КОПИЙ КНИГ
для проектировщиков и технических специалистов

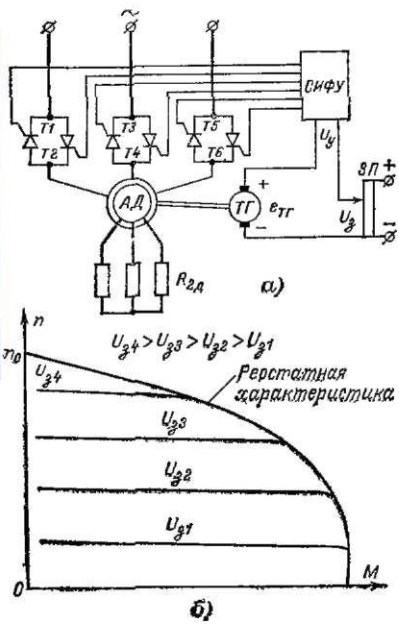


Рис. 24. Схема асинхронного электропривода с тиристорными регуляторами напряжения при наличии обратной связи по частоте вращения (*а*) и механические характеристики двигателя в этой схеме (*б*).

Рассмотрим работу схемы на рис. 24,*а* при увеличении нагрузки на валу двигателя. Пусть при частоте вращения n_1 двигателя таким образом были подобраны задающий сигнал $U_з$ и сигнал обратной связи $e_{тг}$, что напряжение управления определяет угол регулирования α, равный 75° (см. рис. 23). Тогда при моменте сопротивления M_{c1} состояние электропривода характеризуется точкой *1*. При увеличении нагрузки на валу двигателя

до значения M_{c2} частота вращения двигателя начнет снижаться, соответственно начнет уменьшаться и э. д. с. тахогенератора $e_{тг}=\gamma n$. Уменьшение $e_{тг}$ вызовет согласно (23) увеличение напряжения $U_у$ управления, что определит уменьшение с помощью СИФУ угла регулирования до значения $\alpha=60°$. Двигатель при этом станет работать в точке *2* на характеристике, соответствующей $\alpha=60°$. При этом частота вращения n_2 будет меньше, чем n_1, однако путем соответствующего выбора тахогенератора и параметров СИФУ можно получить достаточно жесткие механические характеристики, например характеристику вида *1—2*, показанную на рис. 23.

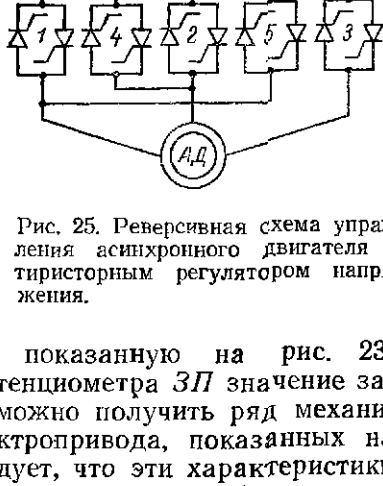


Рис. 25. Реверсивная схема управления асинхронного двигателя с тиристорным регулятором напряжения.

Изменяя с помощью потенциометра *ЗП* значение задающего напряжения $U_з$, можно получить ряд механических характеристик электропривода, показанных на рис. 24,*б*. Из рис. 24,*б* следует, что эти характеристики имеют относительно высокую жесткость и перегрузочную способность и позволяют обеспечить большой диапазон регулирования частоты вращения двигателя.

Кроме регулирования частоты вращения асинхронного двигателя, включение тиристоров в цепь статора позволяет осуществить изменение направления частоты вращения, т. е. реверс двигателя. На рис. 25 приведена реверсивная схема управления асинхронного двигателя, осуществляемая с помощью пяти пар встречно-параллельно соединенных тиристоров. Если сигналы управления подать на тиристорные пары *1*, *2* и *3*, то на зажимах двигателя будет питающее напряжение с последовательностью фаз сети *ABC* и он будет вращаться, например, по часовой стрелке. Если же сигналы управления подать на тиристорные пары *4*, *5* и *3*, а с тиристорных пар *1* и *2* снять сигналы управления, то на зажимах двигателя будет другая последовательность фаз сети *BAC*; при этом направление вращения магнитного поля и соответственно ротора двигателя изменится на обратное.

Используя тиристоры реверсивного регулятора напряжения, можно обеспечить подачу в цепь статора постоянного тока и осуществить тем самым режим динамического торможения асинхронного двигателя, механическая характеристика которого приведена на рис. 13,*б*.

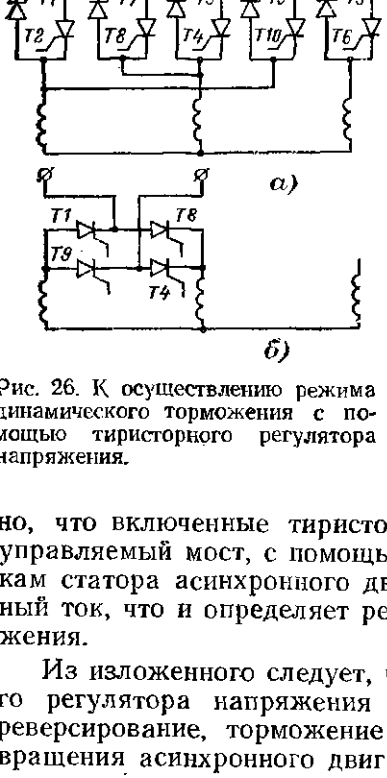


Рис. 26. К осуществлению режима динамического торможения с помощью тиристорного регулятора напряжения.

На рис. 26,*б* показаны тиристоры, на которые при осуществлении динамического торможения подаются импульсы управления. На остальные тиристоры управляющие импульсы не подаются. Если на тиристоры не подаются управляющие импульсы, то они закрыты, их сопротивление велико. Поэтому такие тиристоры не влияют на работу схемы и их можно исключить из рассмотрения. На рис. 26,*б* представлена схема, составленная из схемы на рис. 26,*а* таким образом, что закрытые тиристоры не изображены. Из схемы на рис. 26,*б* ясно видно, что включенные тиристоры образуют однофазный управляемый мост, с помощью которого по двум обмоткам статора асинхронного двигателя проходит постоянный ток, что и определяет режим динамического торможения.

Из изложенного следует, что с помощью тиристорного регулятора напряжения можно осуществить пуск, реверсирование, торможение и регулирование частоты вращения асинхронного двигателя. Это говорит о больших возможностях использования асинхронного электропривода с тиристорными регуляторами напряжения и определяет широкую область его применения.

Основными достоинствами рассматриваемой системы электропривода является ее относительная простота, надежность, легкость автоматизации в общей технологической схеме производства, удобство управления. Вместе с тем эта система электропривода имеет существенный

недостаток, заключающийся в больших потерях в обмотке ротора при работе на низких частотах вращения. Действительно, согласно формуле (12) электрические потери в роторе при низких частотах вращения и, следовательно, при больших скольжениях могут быть весьма высокими, что уменьшает к. п. д. электропривода. Отмеченный недостаток не является очень серьезным в том случае, когда время работы двигателя на пониженной частоте вращения мало по сравнению со временем цикла его работы. Для примера упомянем механизм передвижения (тележку) электрических кранов, где пониженная частота вращения двигателя используется для точной остановки тележки с грузом. В этих случаях рассматриваемая система электропривода весьма целесообразна.

Остановимся кратко на основных показателях регулирования данной системы электропривода.

Диапазон регулирования частоты вращения при использовании обратных связей, например обратной связи по частоте вращения, относительно высок и достигает значения 10 : 1.

При использовании обратных связей могут быть получены жесткие характеристики.

Экономичность регулирования зависит от конкретных условий работы электропривода. В частности, если время работы на пониженной частоте вращения невелико по сравнению с временем цикла, то экономичность может быть высокой.

Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя в этой системе плавное.

Регулирование частоты вращения может производиться только вниз от естественной (основной) характеристики.

Использование рассмотренной системы электропривода целесообразно при номинальной мощности двигателя до 100—120 кВт.

4. ЧАСТОТНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ

Частотный способ является одним из наиболее перспективных и широко используемых в настоящее время способов регулирования частоты вращения асинхронных двигателей. Принцип его заключается в том, что, изменяя частоту питающего двигатель напряжения, можно

в соответствии с выражением (2) изменять его частоту вращения холостого хода, получая тем самым различные искусственные характеристики. Этот способ обеспечивает плавное регулирование в широком диапазоне, получаемые характеристики обладают высокой жесткостью. Частотный способ к тому же отличается и еще одним весьма важным свойством: при регулировании частоты вращения асинхронного двигателя не происходит увеличения его скольжения, как это имеет место, например, при реостатном регулировании. Поэтому при этом способе регулирования потери скольжения, определяемые по выражению (12), оказываются небольшими, в связи с чем частотный способ оказывается весьма экономичным.

Как правило, для лучшего использования электродвигателя и получения высоких энергетических показателей его работы (коэффициентов мощности и полезного действия, перегрузочной способности) одновременно с изменением частоты питающего напряжения необходимо изменять и значение этого напряжения. Закон изменения напряжения при этом зависит от характера момента нагрузки. Так, для весьма часто встречающегося случая постоянства статического момента нагрузки M_c (характеристика *I* на рис. 2,*б*) зависимость между напряжением и частотой определяется выражением

$$\frac{U_c}{f_c}=\frac{U_{per}}{f_{per}}=\text{const}, \tag{24}$$

где U_c — напряжение сети; f_c — частота сети.

Это выражение означает, что при частотном регулировании частота питающего напряжения f_{per} и его значение U_{per} должны изменяться пропорционально.

Для «вентиляторного» характера момента нагрузки (кривая *II* на рис. 2,*б*) это соотношение имеет вид:

$$\frac{U_c}{f^2_c}=\frac{U_{per}}{f^2_{per}}=\text{const}. \tag{25}$$

Необходимо отметить, что эти соотношения получены для некоторого идеализированного двигателя, у которого сопротивление статора принималось равным нулю ($r_1=0$). Поэтому на практике они оказываются пригодными лишь в тех случаях, когда частота вращения двигателя регулируется в небольших пределах ($D<2:1$).

При значительных изменениях частоты вращения двигателя, вызванных соответствующим изменением частоты питающего напряжения, выполнение этих соотношений уже не обеспечивает постоянства перегрузочной способности и коэффициента мощности двигателя $\cos\varphi$.

Для примера на рис. 27,*а* показано семейство экспериментальных механических характеристик частотного асинхронного привода при выполнении соотношения U/f=const. Рассмотрение этих характеристик показывает, что при малых частотах питающего напряжения

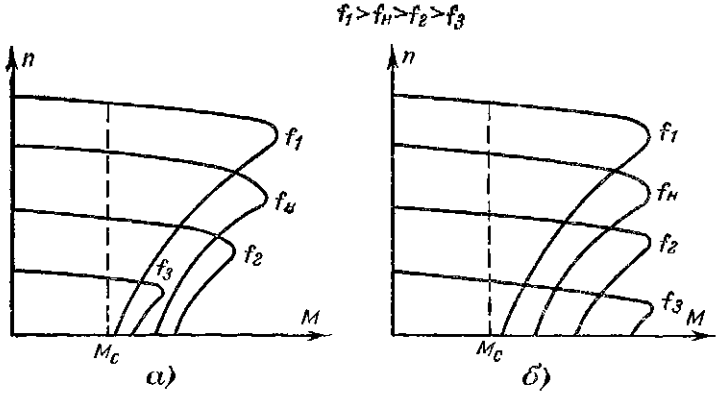


Рис 27. Механические характеристики двигателя при разных частотах питающего напряжения.

произошло уменьшение перегрузочной способности электродвигателя и некоторое снижение жесткости его механических характеристик. Причина этого явления заключается в уменьшении магнитного потока двигателя вследствие влияния активного сопротивления статора, особенно заметного при низких частотах. Чтобы компенсировать в какой-то степени это влияние, следует с уменьшением частоты напряжение снижать в несколько меньшей степени, чем это определяется соотношением (24). Таким образом, приведенные выражения (24) и (25) позволяют лишь приближенно обеспечить хорошие показатели частотного регулирования.

При осуществлении частотного регулирования с учетом влияния активного сопротивления статора по более сложным закономерностям, чем (24) и (25), могут быть получены характеристики, показанные на рис. 27,*б*.

Жесткость этих регулировочных характеристик и перегрузочная способность двигателя остаются практически неизменными.

Упрощенная блок-схема частотного регулируемого электропривода показана на рис. 28. Необходимым элементом привода является преобразователь частоты (и напряжения), на вход которого подается стандартное напряжение сети U_c (220, 380 В и т. д.) стандартной промышленной частоты f_c=50 Гц, а с его выхода снимается переменное напряжение $U_{рег}$ регулируемой частоты $f_{рег}$, 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 частоты вращения асинхронного двигателя.

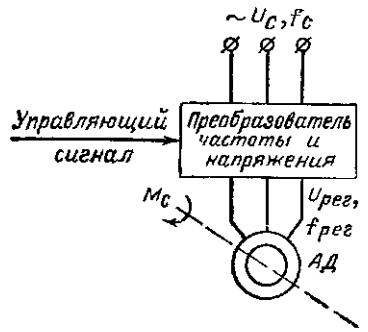
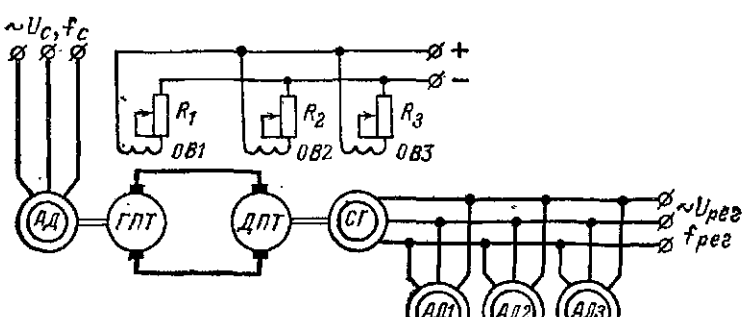


Рис. 28. Блок-схема частотного асинхронного электропривода.

На рис. 28 в качестве 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.

Первую группу составляют так называемые машинные или вращающиеся преобразователи, в которых для получения переменной частоты используются обычные или специальные электрические машины. На рис. 29 в качестве примера приведена схема преобразователя частоты с синхронным генератором. Преобразователь 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 агрега-

та переменной скорости, 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, а на зажимах генератора *СГ* частота может регулироваться. При изменении с помощью сопротивления R_1 тока возбуждения генератора *ГПТ* изменяются напряже-



29. Электромашинный преобразователь частоты.

ие, подводимое к якорю двигателя *ДПТ*, и частота его вращения. При этом меняется и частота напряжения на зажимах генератора *СГ* (определяемая по выражению $f_{с.г}=pn_{с.г}/60$, где $n_{с.г}$ — частота вращения ротора генератора *СГ*; p — число пар полюсов генератора) и частота питания приводных асинхронных двигателей *АД1*, *АД2* и *АД3*, подключенных к генератору *СГ*. Напряжение на зажимах асинхронных двигателей регулируется с помощью сопротивления R_3, включенного в цепь возбуждения генератора *СГ*.

Применение этого преобразователя частоты позволяет плавно регулировать частоту вращения асинхронных двигателей *АД1—АД3* в широком диапазоне, однако процессу регулирования частоты в этой системе присущи и существенные недостатки. Как видно из рис. 29, для создания преобразователя необходимо использование четырех электрических машин, рассчитанных на полную мощность потребителей (группы асинхронных двигателей), что определяет громоздкость установки и ее дороговизну, особенно при больших мощностях нагрузки. 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 к. п. д. системы. Например, если к. п. д. каждой из четырех машин системы (рис. 29) 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 шумом. И, наконец, процессу изменения частоты в этой системе свойственна инерционность регулирования, так как регулирование частоты связано с изменением частоты вращения агрегата *ДПТ—СГ*, обладающего механической инерцией. Тем не менее машинный преобразователь частоты, построенный по схеме на рис. 29, использовался для осуществления индивидуального привода рабочих рольгангов 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. Наибольшее распространение среди них получили 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 схемы на рис. 29. Поэтому большое развитие, особенно в последнее время, получила вторая группа преобразователей частоты — так называемые статические преобразователи. Название это они получили потому, что система построена на статических элементах и устройствах, таких, как полупроводниковые приборы, конденсаторы, магнитные усилители и т. д. Развитие статических преобразователей частоты особенно ускорилось в связи с появлением новых мощных полупроводниковых приборов, в частности тиристоров, принцип действия которых описан в § 3. Большое внимание, которое уделяется 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. В дальнейшем изложении рассматриваются только тиристорные преобразователи частоты.

Все статические преобразователи частоты (ПЧ) могут быть разделены на две группы: преобразователи без звена постоянного тока с непосредственной связью питающей сети и нагрузки; преобразователи с промежуточным звеном постоянного тока. Рассмотрим схемы и принцип действия каждого вида преобразователя.

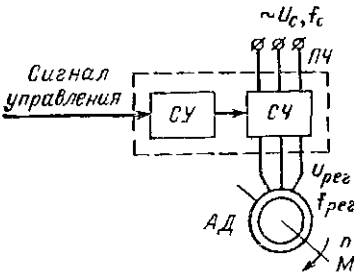


Рис. 30. Блок-схема преобразователя частоты с непосредственной связью.

Упрощенная блок-схема преобразователя частоты (ПЧ) без звена постоянного тока показана на рис. 30. Пунктиром обведен собственно ПЧ, который состоит из силовой части (СЧ) и схемы управления (СУ). В силовую часть ПЧ, которая осуществляет преобразование электрической энергии переменного тока с постоянными напряжением U_c и частотой f_c в энергию переменного тока с регулируемыми напряжением $U_{рег}$ и частотой $f_{рег}$, входят тиристоры и в некоторых случаях согласующие трансформаторы.

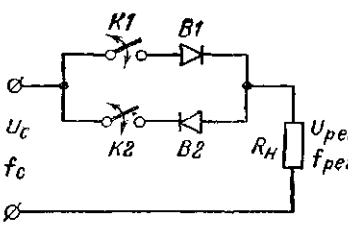


Рис. 31. К принципу работы преобразователя частоты с непосредственной связью.

Схема управления обеспечивает управление тиристорами силовой части ПЧ с помощью импульсов напряжения, подаваемых на управляющие электроды тиристоров в нужный момент времени.

Принцип получения переменной частоты $f_{рег}$ (и переменного напряжения $U_{рег}$) на выходе ПЧ этого типа рассмотрим на примере простейшей схемы на рис. 31, представляющей лишь силовую часть ПЧ. Отметим, что эта схема полностью аналогична схеме на рис. 20,*а*, однако несколько другой принцип управления ключами *K1* и *K2* позволяет осуществлять преобразование часто-

ты питающего напряжения. Рассмотрим, каким будет напряжение на нагрузке $U_{рег}$ при различных возможных режимах работы ключей, предположив при этом, что на вход схемы подано синусоидальное напряжение $U_с$ стандартной частоты $f_с$ (рис. 32,*а*).

1. Если ключи постоянно разомкнуты, то, очевидно, напряжение на нагрузке отсутствует.

2. При постоянно замкнутых ключах напряжение на нагрузке $U_{рег}$ равно напряжению сети $U_с$ и может быть изображено синусоидой на рис. 32,*а*. При этом в силу наличия диодов ток через каждый ключ проходит только половину периода $T_с$ напряжения сети, соответствующего проводящему направлению данного диода.

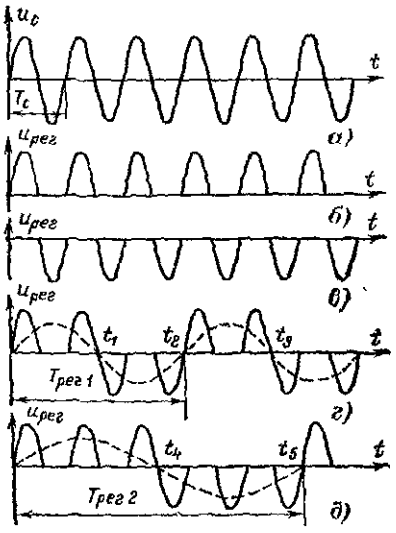


Рис 32 Кривые напряжения на нагрузке.

а — при постоянно закрытых ключах; *б* — при замыкании ключа *К1*, *в* — при замыкании ключа *К2*, *г*, *д* — при поочередном замыкании ключей

3. Если постоянно замкнут лишь один из ключей, то ПЧ представляет собой однополупериодную схему выпрямления и напряжение на нагрузке представляет собой однополупериодное выпрямленное напряжение той или иной полярности, как это показано на рис. 32,*б* и *в*.

4. Допустим теперь, что ключи *К1* и *К2* замыкаются попеременно, на одинаковый интервал времени (рис. 32,*г*); вначале до момента времени t_1 замкнут *К1*, затем в этот момент времени *К1* размыкается и замыкается *К2*, оставаясь в этом положении до момента времени t_2, затем *К2* размыкается и вновь замыкается *К1* и т. д. Нетрудно заметить, что при такой работе ключей на нагрузке образуется уже переменное напряжение, состоящее из полусинусоид выпрямленного напряжения различной полярности. Если для наглядности заменить реальное напряжение на нагрузке (рис. 32,*г*) привыч-

ной нам синусоидой (пунктир на рисунке), то окажется, что ее период $T_{рег1}$ и соответственно частота $f_{рег1}$ будут уже отличаться от тех же параметров напряжения сети.

Увеличим теперь время замкнутого состояния каждого из ключей (рис. 32,*д*). Вновь на нагрузке образуется напряжение переменного тока, но уже имеющее новое значение частоты $f_{рег2}$, отличное от f_c и $f_{рег1}$. Итак, меняя продолжительность поочередного замыкания ключей *К1* и *К2*, можно изменять частоту $f_{рег}$ напряжения

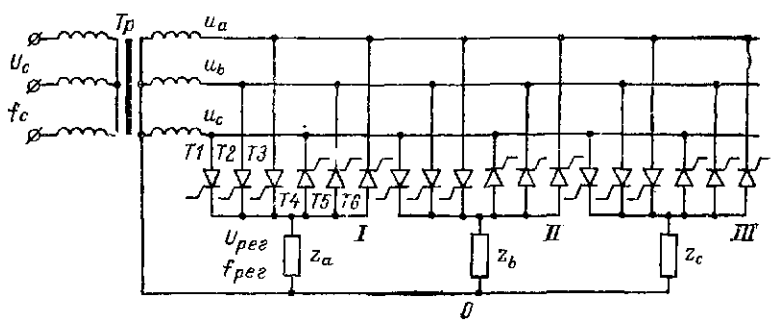


Рис. 33. Схема преобразователя частоты с непосредственной связью.

переменного тока на нагрузке. В этом и заключается принцип регулирования частоты в ПЧ с непосредственной связью.

Отметим два важных свойства ПЧ этого типа: регулируемая частота $f_{рег}$ всегда меньше частоты сети f_c, а переменное напряжение на нагрузке не является синусоидальным, хотя и состоит из частей синусоиды напряжения сети. Более качественные кривые напряжения на нагрузке получаются в трехфазных схемах ПЧ, к рассмотрению которых мы и переходим.

Одна из распространенных тиристорных схем трехфазного ПЧ с непосредственной связью представлена на рис. 33. Схема состоит из трех одинаковых групп (фаз) тиристоров, обеспечивающих питание трехфазной нагрузке z_a, z_b и z_c. Каждая из групп содержит шесть тиристоров, три из которых подсоединены анодами ко вторичным обмоткам трансформатора *Тр*, а три другие — катодами к тем же обмоткам. В схеме имеется нулевой провод, связывающий нулевую точку трансформатора *Тр* и общую точку трехфазной нагрузки, в силу чего схема на рис. 33 обычно называется нулевой. Каждая

фаза этой схемы работает независимо от остальных, поэтому для пояснения принципа ее действия можно рассмотреть одну из фаз, например фазу *А*, управляемую группой *I* тиристоров *Т1—Т6*. Предположим, что фазные напряжения на вторичных обмотках трансформатора *Тр* изменяются по синусоидальному закону, как это показано на рис. 34,*а*, а нагрузка имеет активный характер. Если тиристоры *Т1—Т6* закрыты (управляющие импульсы от СУ не подаются), то все напряжение прикладывается к «закрытым» тиристорам и напряжение на нагрузке z_a равно нулю.

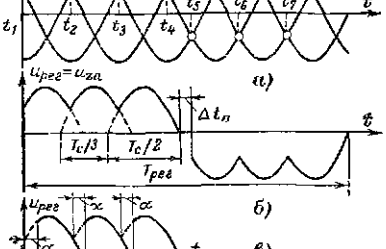


Рис. 34. Кривые напряжений преобразователя частоты с непосредственной связью.

а — напряжение сети; *б*, *в* — напряжение на нагрузке при преобразовании частоты.

Подадим теперь от СУ открывающие импульсы на *Т1* в момент t_1, на *Т2* в момент t_2 и на *Т3* в момент t_3. Так как эти моменты времени являются моментами естественного открытия тиристоров (потенциал анода тиристора становится более положительным, чем катода), они откроются и к нагрузке Z_a будет приложено напряжение, представляющее собой участки трех синусоид вторичных напряжений u_a, u_b и u_c, как это показано на рис. 34,*б*. Если теперь снять управляющие импульсы с *Т1—Т3* и подать импульсы на тиристоры *Т6*, *Т4* и *Т5* в моменты t_5, t_6, t_7, являющимися для них моментами естественного открывания, то на нагрузке также образуется напряжение в виде участков синусоид, но уже имеющее противоположную полярность. Если теперь осуществлять поочередное открытие тиристоров *Т1—Т3* и *Т4—Т6* в указанном порядке, то изображенная на рис. 34,*б* кривая $u_{z_a}(t)$ будет периодически повторяться.

Таким образом на нагрузке z_a образуется напряжение переменного тока с периодом $T_{рег}$ и частотой $f_{рег}=1/T_{рег}$. Нетрудно заметить из рис. 34, что период $T_{рег}$ этого напряжения больше, чем период сетевого напряжения T_c, или, что то же самое, частота напряжения на нагрузке $f_{рег}$ меньше, чем частота питающего напряжения f_c.

Соотношение между этими величинами можно найти с помощью рис. 34, из рассмотрения которого следует, что

$$\frac{T_{\text{рег}}}{2}=\frac{T_{\text{с}}}{2}+h\frac{T_{\text{с}}}{3}=T_{\text{с}}\left(\frac{1}{2}+\frac{h}{3}\right)=T_{\text{с}}\frac{3+2h}{6}, \qquad (26)$$

где $h=0, 1, 2, 3 \ldots$ — число открываемых тиристоров в группе за вычетом одного.

Тогда

$$f_{\text{рег}}=\frac{1}{T_{\text{рег}}}=f_{\text{с}}\frac{3}{3+2h}. \qquad (27)$$

Выражение (27) является частным видом зависимости между входной $f_{\text{с}}$ и выходной $f_{\text{рег}}$ частотами преобразователя, записанной для трехфазной системы напряжений. Если же имеется система m_1 — фазного первичного напряжения, то соотношение между частотами выразится как

$$f_{\text{рег}}=f_{\text{с}}\frac{m_1}{m_1+2h}. \qquad (28)$$

Из (27) или (28) видно, что регулируемая частота $f_{\text{рег}}$ при рассмотренном принципе управления тиристорами *Т1—Т6* может изменяться лишь дискретно, в зависимости от числа открывающихся тиристоров h. Ниже для примера приведен ряд значений частоты $f_{\text{рег}}$ в зависимости от h при $m_1=3$ и $f_{\text{с}}=50$ Гц:

h	2	3	4	5	6	7
$f_{\text{рег}}$, Гц	21,4	16,7	13,6	11,5	10	8,8

Следует отметить, что в принципе рассматриваемый ПЧ позволяет и плавно регулировать выходную частоту $f_{\text{рег}}$. Это достигается тем, что между моментом снятия управляющих импульсов с группы тиристоров *Т1—Т3* и моментом подачи импульсов на тиристоры группы *Т4—Т6* искусственно вводится временная пауза $\Delta t_{\text{п}}$ (см. рис. 34,*б*). В этом случае выходная частота $f_{\text{рег}}$ определится выражением

$$f_{\text{рег}}=f_{\text{с}}\frac{m_1}{m_1+2h+\Delta t_{\text{п}}f_{\text{с}}}. \qquad (29)$$

Плавно регулируя паузу $\Delta t_{\text{п}}$, можно плавно изменять выходную частоту $f_{\text{рег}}$. Возвращаясь вновь к трехфазной схеме на рис. 33, отметим, что получение на нагрузке стандартной системы трехфазного напряжения со сдвигом фазных напряжений на треть периода достигается тем, что управляющие импульсы на тиристоры

групп (фаз) *I*, *II* и *III* подаются со сдвигом на треть периода выходной регулируемой частоты $f_{рег}$.

Рассматриваемые ПЧ позволяют просто регулировать и напряжение на нагрузке $U_{рег}$, что бывает необходимо при регулировании частоты вращения асинхронных двигателей. Достигается это тем, что управляющие импульсы на тиристоры подаются не в момент их естественного открытия (точки t_1, t_2, t_3 и т. д. на рис. 34,*а*), а с некоторой задержкой. Эта задержка открытия, выраженная в угловом измерении, обычно называется углом регулирования или зажигания α. Кривые напряжения на нагрузке $u_{рег}$ при некотором угле $\alpha>0$ показаны на рис. 34,*в*, а зависимость действующего напряжения на нагрузке от угла α выражается следующей формулой:

$$U_{рег} = \frac{\sqrt{2}\, m_1 U_{с.ф} \sin \pi/m_1}{\pi} \cos \alpha, \qquad (30)$$

где $U_{с.ф}$ — величина фазного напряжения питающей сети.

Изменяя с помощью системы управления момент подачи импульсов на тиристоры, можно регулировать напряжение нагрузки от 0 ($\alpha=90°$) до максимального значения:

$$U_{рег.м} = \sqrt{2}\, \frac{m_1}{\pi} \sin \frac{\pi}{m_1} U_{с.ф}. \qquad (31)$$

Завершая рассмотрение схемы на рис. 33, отметим, что принцип ее действия и полученные соотношения остаются теми же самыми и для случая активно-индуктивной нагрузки ПЧ, которой, например, являются статорные обмотки асинхронного электродвигателя. В этом случае усложняется процесс работы тиристоров ПЧ и изменяется форма напряжения на нагрузке.

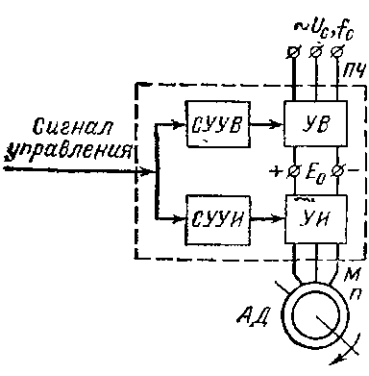


Рис. 35. Блок-схема преобразователя частоты со звеном постоянного тока.

Определенным недостатком схемы рис. 33 является необходимость наличия нулевого вывода трансформатора и нагрузки. Поэтому на практике распространение

получили и так называемые мостовые схемы ПЧ, в которых нулевой провод отсутствует. В принципе и схема на рис. 33 может быть превращена в мостовую, если устранить в ней нулевой провод. В этом случае каждая фаза ПЧ уже не может работать независимо от остальных, как это было ранее, а требует уже согласования с работой других фаз. Имеются и другие мостовые схемы ПЧ с непосредственной связью, принцип действия которых ничем не отличается от изложенного выше.

Рассмотрим теперь преобразователи частоты со звеном постоянного тока. Блочная схема ПЧ показана на рис. 35. Силовая часть ПЧ этого типа состоит из двух основных блоков: управляемого выпрямителя (УВ) и управляемого инвертора (УИ). Напряжение сети U_c стандартной частоты f_c подается на вход УВ, преобразующего переменное напряжение U_c в постоянное E_0. Значение этого напряжения может регулироваться в широких пределах с помощью схемы управления (СУУВ). Выпрямленное (и регулируемое в общем случае) напряжение E_0 подается на вход управляемого инвертора (УИ), который преобразует напряжение постоянного тока E_0 в трехфазное переменное напряжение U_{per} регулируемой частоты f_{per}. Частота выходного напряжения f_{per} УИ задается его схемой управления СУУИ в функции сигнала управления.

Рис. 36. Схема управляемого инвертора.

Принцип действия управляемых выпрямителей достаточно широко и полно рассмотрен в технической литературе, например [3]. Остановимся же подробнее на работе управляемого инвертора, полагая при этом, что с помощью тех или иных УВ на его вход подается напряжение постоянного тока E_0 [отметим, что в таких ПЧ иногда используется и нерегулируемый выпрямитель, тогда функции регулирования значения напряжения на нагрузке (асинхронном двигателе) выполняет УИ].

Принцип получения регулируемой частоты f_{per} рассмотрим на примере схемы на рис. 36. Предположим,

что трехфазная активная нагрузка соединена в звезду, а тиристоры *T1—T6*, собранные в мостовую схему, с помощью схемы управления СУУИ могут открываться в требуемой последовательности и на любой отрезок времени. Чаще всего на практике используются схемы ПЧ, в которых продолжительность открытого состояния каждого тиристора λ составляет половину или треть периода $T_{рег}$ выходной частоты $f_{рег}$, а сдвиг моментов открытия тиристоров *T1—T6* составляет шестую часть этого периода.

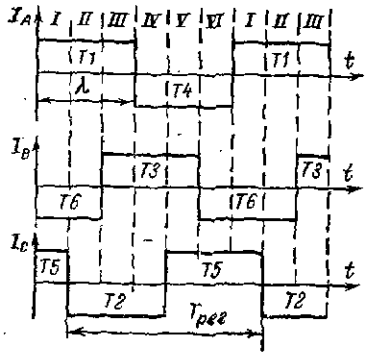


Рис. 37. Диаграмма работы тиристоров при $\lambda=T_{рег}/2$.

Рассмотрим вначале работу схемы с $\lambda=T_{рег}/2$. Временна́я токовая диаграмма работы тиристоров для этого случая показана на рис. 37, где проходящие через нечетные тиристоры токи фаз I_A, I_B, I_C отложены в положительном направлении, а проходящие через четные — в отрицательном. Как видно из этой диаграммы, в каждый момент времени оказываются включенными три тиристора из шести, причем за время периода имеется шесть интервалов (*I*, *II*, *III*, *IV*, *V*, *VI*) различных сочетаний открытых и закрытых состояний тиристоров. Для определения формы напряжения на нагрузке рассмотрим схемы включения нагрузки на каждом из этих шести интервалов.

Изобразим вначале эту схему для интервала *I*, где открыты тиристоры *T1*, *T5* и *T6*, в виде эквивалентной схемы на рис. 38,*а*. На этом интервале работы ПЧ начала фаз *A* и *C* оказываются включенными на точку $+E_0$, а начало фазы *B* — на точку $-E_0$. Если при этом сопротивления всех трех фаз одинаковы, то эквивалентное сопротивление параллельно соединенных фаз *A* и *C* будет в 2 раза меньше сопротивления фазы *B*. Тогда и напряжение на параллельно соединенных фазах *A* и *C* в 2 раза меньше, чем на фазе *B*, т. е. составляет величину $^1/_3E_0$.

Рассмотрим теперь *II* интервал, на котором продолжают быть открытыми тиристоры *T1* и *T6*, закрылся тиристор *T5* и открылся тиристор *T2*. Получающаяся при

этом схема представлена на рис. 38,*б*. Как видно, на этом интервале фазы *B* и *C* оказываются включенными параллельно, к ним прикладывается напряжение $^1/_3E_0$, а к фазе *A* — напряжение $^2/_3E_0$.

На *III* интервале закрывается тиристор *T6* и открывается тиристор *T3* (тиристоры *T1* и *T2* по-прежнему открыты), в соответствии с чем этому интервалу соответствует схема рис. 38,*в*, в которой уже фазы *A* и *B* оказались включенными параллельно.

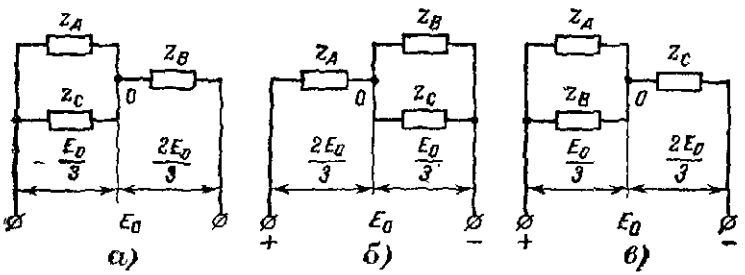
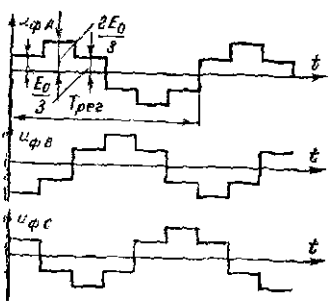


Рис. 38. Схемы соединения нагрузки.

а — на *I* интервале работы инвертора; *б* — на *II* интервале; *в* — на *III* интервале.



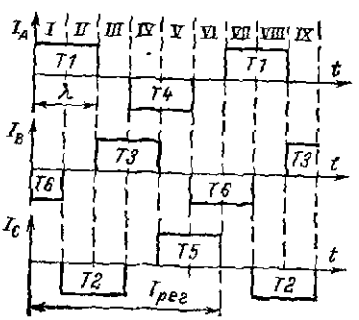


Рис. 39. Напряжение на нагрузке при работе преобразователя частоты при $\lambda = T_{рег}/2$.

Рис. 40. Диаграмма работы тиристоров при $\lambda = T_{рег}/3$.

Таким же образом можно изобразить схемы для *IV*, *V* и *VI* интервалов. Нетрудно заметить, что они окажутся аналогичными соответственно схемам для *I*, *II* и *III* интервалов, но с другой полярностью напряжения на началах фаз. Если теперь представить графически напря-

жение на фазах нагрузки, то оно изобразится в виде кривых на рис. 39. Их рассмотрение позволяет сделать важное заключение: фазы нагрузки питаются переменным напряжением, причем максимумы этого напряжения сдвинуты по фазам на треть периода. Другими словами, на нагрузке получилась стандартная система трехфазного напряжения переменного тока, но только несинусоидальной формы.

Несколько другая форма выходного напряжения ПЧ будет в том случае, если продолжительность открытого состояния каждого тиристора будет составлять треть периода $T_{рег}$ регулируемой выходной частоты $f_{рег}$, а нагрузка будет по-прежнему соединена в звезду. Для этого случая токовая диаграмма работы тиристоров представится в виде рис. 40, из которого видно, что при $\lambda = T_{рег}/3$ в каждый интервал времени открыты лишь два тиристора. Это приводит к тому, что в каждом интервале времени две фазы нагрузки оказываются последовательно включенными на напряжение E_0, а третья фаза оказывается отключенной. В соответствии с этим напряжение на каждой из последовательно соединенных фаз равно $E_0/2$, а на третьей (свободной) равно нулю. Кривые фазного напряжения для этого случая приведены на рис. 41.

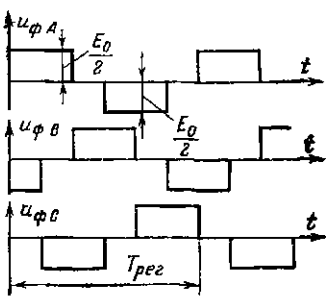


Рис 41. Напряжение на нагрузке при работе преобразователя частоты при $\lambda = T_{рег}/3$.

Аналогичным способом можно проанализировать работу схемы на рис. 36 и при соединении нагрузки в треугольник. Оказывается, что при $\lambda = T_{рег}/2$ форма напряжения на фазах нагрузки аналогична кривым на рис. 41, но с амплитудой напряжения, равной E_0, а при $\lambda = T_{рег}/3$ форма напряжения повторяет кривые на рис. 39, но с заменой $E_0/3$ на $E_0/2$ и $2E_0/3$ на E_0.

Рассмотренные выше диаграммы работы тиристоров и кривые напряжения на нагрузке соответствуют, строго говоря, работе некоторого идеализированного, упрощенного инвертора на активную нагрузку. Практические же схемы инвертора, используемые в регулируемом асинхронном электроприводе, оказываются существенно

сложнее. Вызвано это в первую очередь двумя обстоятельствами. Первое из них заключается в том, что для закрытия тиристоров в схеме на рис. 36 необходимо использование дополнительных элементов, поскольку тиристоры при питании от источника постоянного напряжения E_0 не могут при снятии управляющего импульса закрыться самостоятельно и требуют искусственной коммутации. Чаще всего используются схемы искусственной коммутации с применением конденсаторов и индуктивных сопротивлений.

Второе обстоятельство, также приводящее к усложнению схемы инвертора, связано с тем, что асинхронный электродвигатель представляет собой активно-индуктивную нагрузку, т. е. является потребителем реактивной мощности. Для обеспечения возможности циркуляции реактивной мощности в схему инвертора включаются соответствующим образом неуправляемые диоды, а на выход управляемого выпрямителя (УВ) — дополнительный конденсатор или индуктивность.

Одна из распространенных практических схем силовой части преобразователя частоты приведена на рис. 42. В этой схеме тиристоры *Т7—Т12* образуют управляемый выпрямитель (УВ). На выходе УВ включены дроссель L_0 и конденсатор C_0, обеспечивающие вместе с диодами *Д7—Д12* циркуляцию реактивной мощности. Назначение тиристоров *Т1—Т6* было рассмотрено выше. Конденсаторы *С* и индуктивности *L* вместе с диодами *Д1—Д6* образуют цепи искусственной коммутации, обеспечивающие закрытие основных тиристоров *Т1—Т6* в нужный момент времени. Напомним, что значение (амплитуда) напряжения на выходе ПЧ $U_{\text{рег}}$ регулируется изменением E_0 на выходе УВ, а его частота $f_{\text{рег}}$ определяется частотой коммутации тиристоров *Т1—Т6*, задаваемой схемой управления *СУУИ*. Отметим, что из-за активно-индуктивного характера нагрузки ПЧ формы его выходного напряжения $U_{\text{рег}}$ отличаются от приведенных на рис. 39 и 41.

Приведенная на рис. 42 силовая схема ПЧ является хотя и весьма распространенной, но далеко не единственной. На практике нашли применение и другие виды схем ПЧ со звеном постоянного тока, которые отличаются схемами УВ, искусственной коммутации тиристоров или формами выходного напряжения. Однако общие принципы их работы остаются теми же.

Сопоставим теперь два рассмотренных вида ПЧ — с непосредственной связью и со звеном постоянного тока. Основное преимущество ПЧ с непосредственной связью состоит в его более простой силовой схеме с меньшим числом элементов, поскольку для его работы не требуется управляемого выпрямителя, коммутирующих цепей, а также элементов контура реактивной мощности. В соответствии с этим и надежность его работы может оказаться выше, чем у ПЧ со звеном постоянного тока. Однако в свою очередь ПЧ с непосредственной

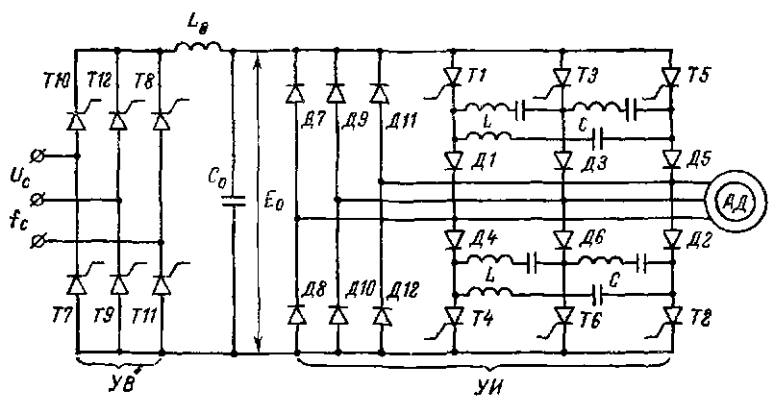


Рис. 42. Практическая схема преобразователя частоты со звеном постоянного тока.

связью имеют один очень существенный недостаток, уже отмеченный выше — максимальное значение выходной регулируемой частоты $f_{рег}$ не превосходит практически 40% частоты питающей сети, что ограничивает область их применения в регулируемом электроприводе.

Остановимся в заключении на общих показателях частотного способа регулирования асинхронных электродвигателей и возможных областях его применения.

Частотное регулирование является весьма экономичным, так как регулирование частоты вращения 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 частоты вращения в этой системе может осуществляться плавно, в широком диапазоне, в обе

стороны от естественной характеристики, т. е. двигатель может иметь частоту вращения, большую 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 к электроприводу необходимо использование тех или иных обратных связей, т. е. применение замкнутой системы регулирования.

В силу высоких отмеченных показателей частотный способ регулирования в настоящее время нашел очень широкое применение и имеет наилучшие перспективы развития. Укажем лишь 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 рольганга прокатного стана, при котором каждый валок приводится во вращение отдельным асинхронным электродвигателем. Все двигатели рольганга 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. Частота вращения этих электроприводов достигает 150 000 об/мин и более. Получение таких больших частот вращения с помощью двигателей постоянного тока технически неосуществимо и возможно только при использовании специальных короткозамкну-

тых асинхронных двигателей при питании их током повышенной частоты (до 2500 Гц при частоте вращения 150 000 об/мин).

Частотное управление нашло применение в транспорте для регулирования частоты 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.

Широкое внедрение частотного электропривода во многом определяется также и тем обстоятельством, что отечественной промышленностью освоен выпуск широкой номенклатуры статических преобразователей частоты. Среди них — преобразователи для питания электроинструмента типа ПЧС, преобразователи для питания приводов прядильных машин типа ААТр 125/100, преобразователи широкого назначения типа ТПЧ и некоторые др.

5. РЕГУЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЕМ ЧИСЛА ПАР ПОЛЮСОВ

Среди производственных механизмов, требующих изменения скорости движения рабочего органа, имеются такие, у которых это изменение может происходить не плавно, а 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 частоты вращения приводного электродвигателя. В этих случаях, а также и в некоторых других в качестве приводных двигателей широко используются многоскоростные асинхронные электродвигатели, у которых регулирование частоты вращения производится путем изменения числа пар полюсов статорной обмотки. При этом изменяется частота вращения магнитного поля, создаваемого обмоткой статора, а тем самым и частота вращения ротора двигателя.

Число пар полюсов асинхронного двигателя может быть равным 1, 2, 3, 4, 5 и т. д., тем самым изменение

числа пар полюсов электродвигателя может привести только к ступенчатому регулированию частоты его вращения. Двигатели, допускающие регулирование их скорости вращения этим способом, называются многоскоростными.

Изменение числа полюсов двигателя 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 частоту вращения:

$$n_{01} = \frac{60f_1}{p_1}.$$

Вторая обмотка при этом обесточена. Для получения другой частоты вращения отключается первая обмотка и подключается на сеть вторая обмотка с p_2 парами полюсов, при этом синхронная частота вращения двигателя станет равной

$$n_{02} = \frac{60f_1}{p_2}$$

и двигатель будет иметь уже другую механическую характеристику.

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. 43 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. 43,*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. 43,*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. 43,*а*. Уменьшение вдвое числа пар полюсов достигается и в схеме на рис. 43,*в*, где полуобмотки соединены параллельно (*1н* с *2к* и *1к* с *2н*). В том и другом случае (рис. 43,*б* и *в*) уменьшение числа пар полюсов, а тем самым увеличение частоты вращения двигателя достигается изменением направления тока на противополож-

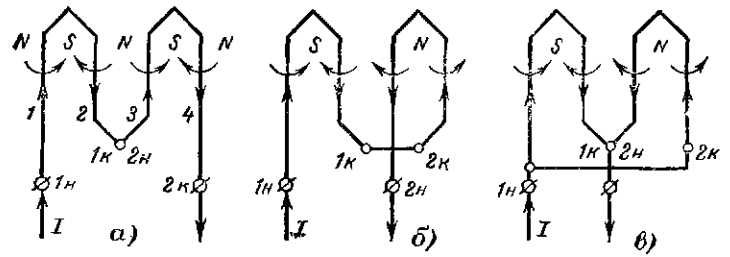


Рис. 43. Изменение числа пар полюсов обмотки статора.

ное в одной из полуобмоток (в данном случае во второй). При этом диапазон изменения частоты 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.

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. 44,*а*, где $A_{1н}$ и $A_{2н}$ — начала соответственно первой и второй полуобмоток фазы *A*; $A_{1к}$ и $A_{2к}$ — их концы; обозначения для зажимов полуобмоток фаз *B* и *C*, схемы включения которых аналогичны схемам фазы *A*, опущены. Соединение полуобмоток по схеме на рис. 44,*б*, как отмечалось выше, вызовет уменьшение вдвое числа пар полюсов двигателя. Схема на рис. 44,*б* получила название двойной звезды. Механические характеристики двигателя изображены на рис. 44,*в*.

Принципиальная контакторная схема управления, позволяющая осуществлять необходимые переключения полуобмоток, показана на рис. 45. При замкнутом контакторе *НС* (низкая скорость) обмотки двигателя соединены в треугольник, при замыкании контактора *ВС* обмотки пересоединяются в двойную звезду и двигатель увеличивает частоту вращения вдвое.

Звезда — двойная звезда. В этой схеме меньшей частоте вращения двигателя соответствует соединение обмоток статора, показанное на рис. 46,*а*. Полуобмотки фаз статора соединены в этой схеме также последова-

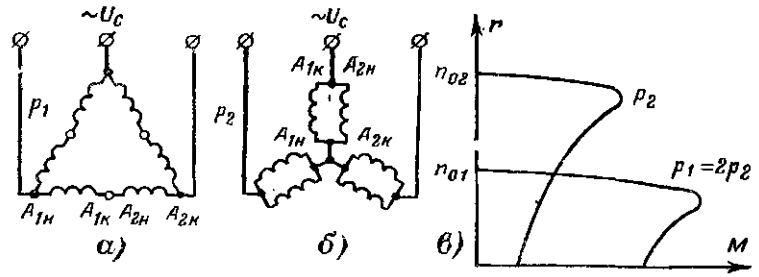


Рис. 44. Схемы соединения обмотки статора (*а*, *б*) и механические характеристики (*в*) при переключении «треугольник — двойная звезда».

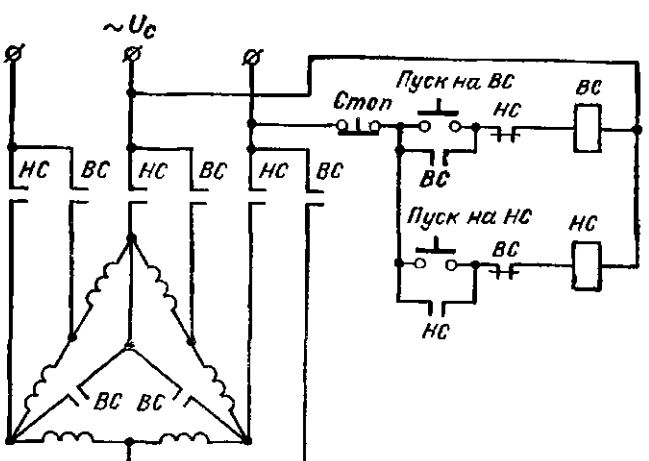


Рис. 45. Схема управления при переключении «треугольник — двойная звезда».

тельно «согласно» и образуют при подключении двигателя к сети систему p_1 пар полюсов вращающегося магнитного поля, которой соответствует синхронная частота вращения n_{01}. Переключение на двойную звезду осуществляется по схеме на рис. 44,*б*, при этом число пар полюсов станет $p_2=p_1/2$. Получаемые механические характеристики такого двухскоростного двигателя изображены на рис. 46,*б*. В отличие от рассмотренной выше схемы переключения треугольник — двойная звезда, где целесообразно регулирование частоты вращения двига-

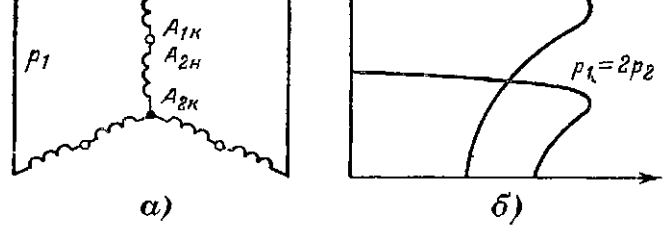


Рис. 46. Схема соединения обмотки статора на низшей скорости вращения (*а*) и механические характеристики (*б*) двигателя при переключении «звезда — двойная звезда».

теля при постоянной мощности нагрузки на его валу, в этой схеме изменение частоты вращения может осуществляться при постоянном моменте нагрузки M_c.

Схема управления двигателем для получения различных частот вращения двигателя может быть выполнена аналогично схеме на рис. 45.

Рассмотренные схемы соединений полуобмоток фаз статора многоскоростных асинхронных электродвигателей не исчерпывают всех возможных вариантов, а являются 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 частоты вращения — например 3000/1500/1000/500 или 1500/1000/750/500 об/мин.

У всех многоскоростных двигателей независимо от схемы статорной обмотки ротор выполняется короткозамкнутым.

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

Вместе с тем данный метод регулирования частоты вращения 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 частоты вращения асинхронных электродвигателей изменением числа пар полюсов не сопровождается выделением в роторной цепи больших потерь энергии скольжения, вызывающих излишний нагрев двигателя и ухудшающих его к. п. д.

Как видно из рис. 44,*в* и 46,*б*, механические характеристики многоскоростных асинхронных электродвигателей отличаются хорошей жесткостью и достаточной перегрузочной способностью.

6. РЕГУЛИРОВАНИЕ В КАСКАДНЫХ СХЕМАХ ВКЛЮЧЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В предыдущих параграфах было показано, что при реостатном методе регулирования частоты 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 энергия скольжения становится весьма большой по абсолютной величине.

В связи с этим появляется стремление использовать энергию скольжения для совершения полезной работы. Оказывается, что в ряде случаев это можно осуществить. Первые схемы, в которых полезно используются потери скольжения, создавались путем специального соединения асинхронного двигателя с другими электрическими машинами. Поэтому эти схемы получили название каскадных. В настоящее время существуют схе-

мы, использующие энергию скольжения асинхронного двигателя без добавочных вращающихся электрических машин, а с помощью 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. 47. Допустим, что по активному сопротивлению

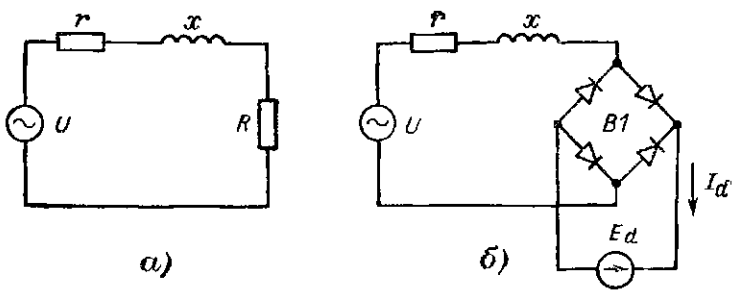


Рис. 47. К принципу работы каскадных схем включения асинхронных двигателей.

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. 47,*а*), величину которого рассчитывают исходя из условия получения нужного значения тока при заданном напряжении U источника питания переменного тока. Ток, проходя по сопротивлению R, нагревает его. Потери энергии на сопротивлении R тем больше, чем больше значения тока и сопротивления R. Очевидно, что рассмотренный способ получения необходимого тока в сопротивлениях r и x является неэкономичным.

На рис. 47,*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 *B1*, нагрузкой которого служит источник

постоянного тока с величиной э. д. с., равной E_d. Выпрямитель $B1$ 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.

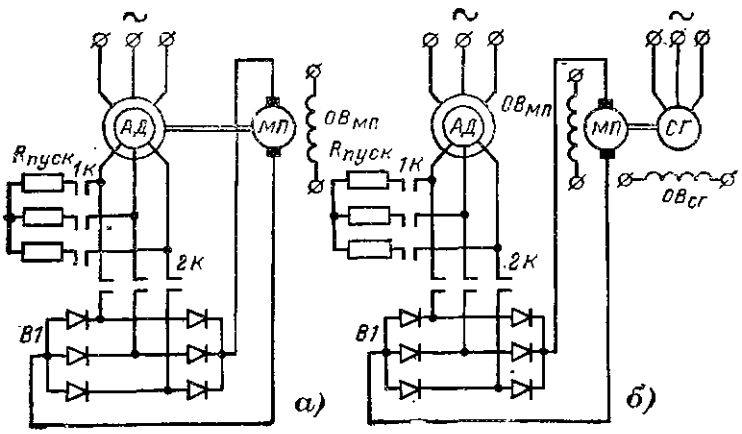


Рис. 48. Схемы электромеханического (*а*) и электрического (*б*) асинхронного вентильно-машинных каскадов.

Отметим, что обе схемы, приведенные на рис. 47, позволяют изменять ток, проходящий через сопротивления r и x. В схеме на рис. 47,*а* для этого необходимо изменить сопротивление R, а в схеме на рис. 47,*б* — э. д. с. E_d.

Схема на рис. 47,*б* позволяет, во-первых, экономичным путем получить заданный ток, проходящий по сопротивлениям r и x, и, во-вторых, регулировать этот ток изменением э. д. с. E_d.

На рис. 48 приведены две типичные схемы 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. 48 очень напоминают схему на рис. 47,*б*. Между этими схемами может быть установлено определенное соответствие: э. д. с. ротора асинхронного двигателя (АД) соответствует источник напряжения в схеме на рис. 47,*б*, активные и индуктивные сопротивления рассеяния обмоток двигателя соответствуют активному сопротивлению r и индуктивному x в схеме на рис. 47,*б*. Отличие между схемами состоит только в том, что на рис. 47 схема однофазная, а на рис. 48 — трехфазная.

В схеме на рис. 48,*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. 48,*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. 48 контакты *2К* замкнуты, а контакты *1К* разомкнуты. Назначение контактов *1К* будет пояснено далее.

Принцип действия электромеханического вентильно-машинного каскада схемы на рис. 48,*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, взаимодействуя 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 данным 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 частоту вращения каскада.

Увеличение тока возбуждения МП при данной частоте 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. 47,*а* и *б*. Уменьшение тока при данном напряжении питания U на схеме на рис. 47,*а* является следствием увеличения сопротивления R, а в схеме на рис. 47,*б* — увеличения э. д. с. E_d). Вследствие уменьшения тока ротора асинхронного двигателя уменьшится его вращающий момент, что определяет уменьшение частоты вращения двигателя при данном статическом моменте. Уменьшению частоты вращения двигателя соответствует увеличение скольжения, что приводит к увеличению э. д. с. ротора, которая равна $E_{2к}s$. Возрастание э. д. с. ротора приведет к увеличению тока ротора, а значит и момента двигателя, который при этом вновь достигнет статического момента, вследствие чего частота вращения двигателя перестанет изменяться. Двигатель опять будет работать в установившемся режиме, но уже при более низком значении частоты вращения.

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

Рассмотренной каскадной схеме на рис. 48,*а* соответствуют механические характеристики, приведенные на рис. 49,*а*. Из кривых на рис. 49,*а* видно, что с увеличением тока возбуждения МП при данном моменте частота вращения каскада уменьшается.

Рассмотрение механических характеристик, приведенных на рис. 49,*а*, показывает, что максимальное значение момента двигателя возрастает при увеличении тока возбуждения МП. Частота вращения, при которой момент достигает максимального значения, уменьшается.

Электроприводы, которые имеют механические характеристики, аналогичные приведенным на рис. 49,*а*, называют приводами с постоянной мощностью. При этом максимальная механическая мощность каскада, определяемая произведением максимального момента на соответствующую этому моменту частоту вращения, при разных токах возбуждения МП примерно одинакова.

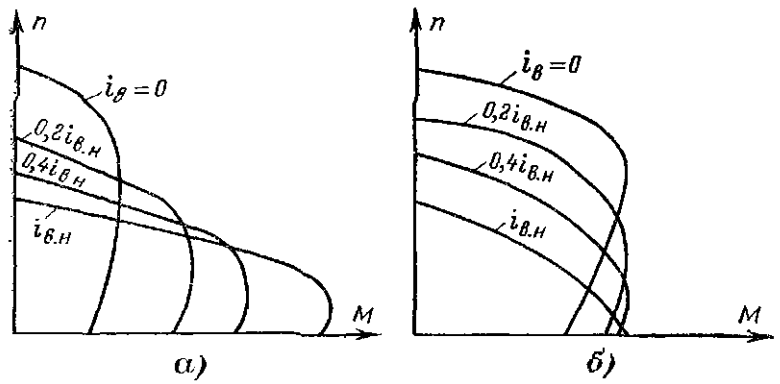


Рис. 49. Механические характеристики электромеханического (а) и электрического (б) каскадов.

Согласно сказанному асинхронный электропривод по схеме на рис. 48,*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. 48,*а* на максимальную частоту вращения производится следующим образом. Вначале контакты *1К* замкнуты, а *2К* разомкнуты. Двигатель АД разгоняется до номинальной частоты вращения при наличии дополнительных активных сопротивлений $R_{пуск}$ в роторной цепи. По достижении двигателем частоты вращения, близкой к номинальной, замыкаются контакты *2К* и размыкаются контакты *1К*, после чего подается ток в обмотку возбуждения *МП*. Изменением тока возбуждения МП добиваются необходимой частоты вращения каскада.

Работа каскадного электропривода по схеме на рис. 48,*б* аналогична работе схемы на рис. 48,*а*, но есть и некоторые различия. Принцип действия этой схемы заключается в следующем. Электродвижущая сила 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 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. 48,*б*, равен моменту только асинхронного двигателя. Поэтому максимальный момент, развиваемый АД в данной схеме включения, не зависит от тока возбуждения МП. На рис. 49,*б* приведены механические характеристики электропривода, собранного по схеме на рис. 48,*б*. Рассмотрение графиков кривых на рис. 49,*б* показывает, что с увеличением тока возбуждения МП частота вращения АД уменьшается.

Электропривод, собранный по схеме на рис. 48,*б*, называют каскадом с постоянным моментом.

Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя в каскадной схеме на рис. 48,*б* осуществляется изменением тока возбуждения МП. При номинальном токе возбуждения МП асинхронный двигатель работает при наименьшей частоте вращения. При отсутствии тока в обмотке возбуждения МП частота вращения АД близка к частоте вращения, определяемой естественной механической характеристикой.

Пуск каскада в схеме на рис. 48,*б* на максимальную частоту вращения производится следующим образом. Вначале запускается агрегат МП—СГ с помощью синхронной машины, которая при этом работает двигателем. Затем замыкаются контакты *1К*, подключая пусковое сопротивление $R_{пуск}$ к роторной цепи АД. Происходит реостатный пуск асинхронного двигателя. По достижении двигателем АД частоты вращения, близкой к номинальной, замыкаются контакты *2К*, а затем раз-

мыкаются *1К*. Изменением тока возбуждения МП доводят частоту вращения АД до требуемого значения.

В настоящее время в связи с широким развитием и распространением силовой полупроводниковой аппаратуры, в частности тиристоров, повсеместно наблюдается тенденция заменить электромашинные вращающиеся преобразователи энергии на статические преобразователи. В частности, электромашинный агрегат МП—СГ на рис. 48,*б* представляет собой преобразователь энергии постоянного тока, поступающей 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. 50. Принципы действия схем, приведенных на рис. 50 и 48,*б*, аналогичны друг другу.

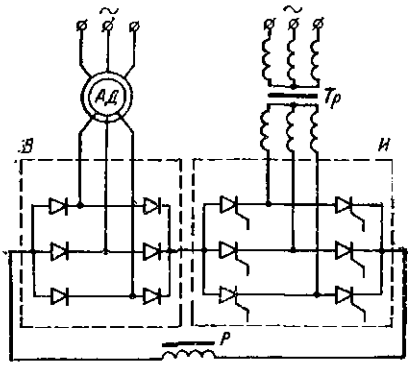


Рис. 50. Схема асинхронного вентильного каскада.

Инвертор представляет собой преобразователь энергии постоянного тока в энергию переменного тока. Электродвижущую силу инвертора можно регулировать специальной схемой управления, аналогично тому, как регулируется э. д. с. машины постоянного тока. Поэтому механические характеристики асинхронного каскада по схеме на рис. 50 аналогичны характеристикам вентильно-машинного электрического каскада по схеме на рис. 48,*б* и подобны приведенным на рис. 49,*б*. В схеме на рис. 50 в роторную цепь асинхронного двигателя включены полупроводниковые неуправляемые вентили выпрямителя *В* и управляемые вентили инвертора *И*, а также реактор *Р* (катушка индуктивности), который служит для сглаживания пульсаций выпрямленного тока. Асинхронный электропривод по схеме на рис. 50 получил название асинхронного вентильного каскада.

Существует еще довольно много схем асинхронных вентильных каскадов, аналогичных представленным на

рис. 50. Эти схемы несколько отличаются по своей сложности, техническим возможностям регулирования частоты вращения, энергетическим показателям и т. д. Однако принцип действия и назначение этих схем аналогичны схеме на рис. 50 — использование энергии скольжения для совершения полезной работы и возможность плавного регулирования частоты вращения асинхронного двигателя. Диапазон регулирования в случае машинных каскадов обычно небольшой — порядка 2 : 1, а в случае асинхронного вентильного каскада он может достигать значения примерно 10 : 1.

Плавность регулирования частоты вращения 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 частоты вращения коэффициент мощности привода относительно невелик, что вызывает необходимость применения компенсирующих устройств, например конденсаторов. Следует отметить также, что в каскадных схемах включения критический момент асинхронного двигателя снижается на 15—17% по сравнению с естественной характеристикой.

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

Специальные каскадные установки позволяют регулировать частоту 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. Однако каскады с двухзонным регулированием дороже и сложнее установок, собранных по схеме на рис. 50.

Каскадные установки применяются для асинхронных электроприводов мощностью от 5—10 кВт до нескольких тысяч киловатт. Они используются для привода компрессоров, вентиляторов, насосов средней и большой мощности, шахтных подъемных машин и т. д.

7. ИМПУЛЬСНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ

В последние годы для регулирования частоты вращения асинхронных двигателей широкое применение находит импульсный способ. Сущность его заключается в периодическом (импульсном) изменении какого-либо параметра двигателя или питающей сети, в силу чего способ и получил название импульсного. Обычно такими параметрами являются напряжение питающей сети или активные сопротивления в цепях статора или ротора двигателя.

Принцип импульсного регулирования частоты вращения асинхронного двигателя рассмотрим на примере работы схемы на рис. 51. В этой схеме в цепь ротора включено добавочное активное сопротивление $R_{2д}$, которое может закорачиваться трехфазным ключом K. Допустим, что двигатель при закороченном сопротивлении $R_{2д}$ (ключ K замкнут) имеет естественную механическую характеристику I (рис. 52,*а*), а при наличии сопротивления (ключ K разомкнут) — искусственную характеристику II. Предположим, что ключ K может периодически замыкаться и размыкаться с некоторой постоянной частотой и регулируемой в широком диапазоне длительностью его замкнутого состояния. Временна́я диаграмма работы ключа K может быть проиллюстрирована рис. 52,*б*, где обозначено: $t_о$ — время открытого состояния ключа; $t_з$ — время его закрытого состояния; $T = t_з + t_о$ — время (период) повторяющегося цикла. Часто работу такого ключа характеризуют отношением времени закрытого состояния ко времени цикла и называют скважностью γ:

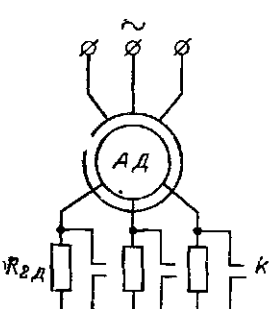


Рис. 51. Схема импульсного регулирования.

$$\gamma = \frac{t_з}{T}.$$

Тогда можно сказать, что естественная характеристика I двигателя (рис. 52,*а*) соответствует скважности $\gamma_з = 1$ (ключ замкнут), а искусственная — скважности $\gamma_о = 0$ (ключ разомкнут). Если при этом момент нагрузки

равен M_c, то скважности $\gamma_з=1$ соответствует частота вращения $n_{уст.з}$, а скважности $\gamma_0=0$ — $n_{уст.0}$, так как при этих частотах вращения момент двигателя равен моменту нагрузки. Эти два значения являются граничными, предельными частотами вращения, определяющими диапазон ее регулирования при данном M_c.

Определим теперь, с какой частотой будет вращаться электродвигатель при некотором промежуточном значении скважности работы ключа $0<\gamma<1$. Отметим вначале одно очень важное обстоятельство: так как состояние ключа K, а тем самым сопротивление в роторной цепи периодически меняется, то периодически меняются токи и момент двигателя. Тогда в соответствии со вто-

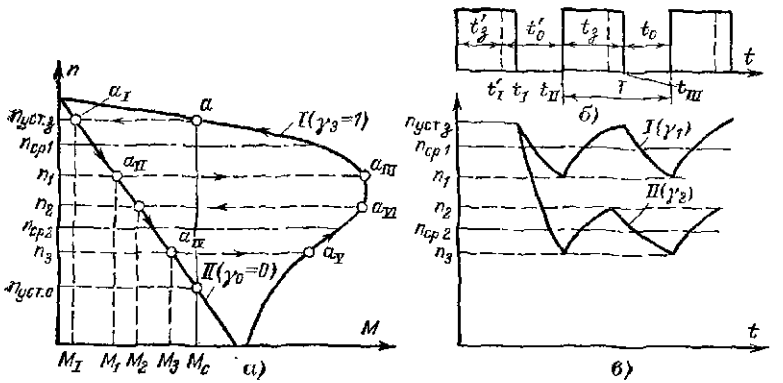


Рис. 52. К принципу импульсного регулирования

а — механические характеристики двигателя; *б* — диаграмма работы ключа *К*; *в* — изменение частоты вращения двигателя во времени.

рым законом механики Ньютона будет периодически изменяться и его частота вращения. Напомним, что этот закон механики для вращательного движения записывается следующим образом:

$$M-M_c=J\varepsilon, \qquad (32)$$

где M — момент двигателя; M_c — момент нагрузки производственного механизма; J — момент инерции всех вращающихся частей; ε — угловое ускорение (или замедление) привода.

Из этого соотношения видно, что если момент двигателя превышает момент нагрузки, то привод ускоряется и его частота вращения увеличивается. При обратном

соотношении моментов привод замедляется и его частота вращения снижается. Именно такой процесс периодического изменения частоты вращения электродвигателя около некоторого среднего значения и имеет место при импульсном регулировании. Покажем это подробнее с помощью рис. 52.

Пусть вначале ключ K был закрыт ($\gamma_з=1$) и двигатель работал на характеристике I в точке a, где его момент равен моменту нагрузки, вращаясь с частотой $n_{уст\,з}$. Уменьшим теперь скважность работы ключа K до некоторого значения $\gamma_1=\frac{t_з}{T}<\gamma_з$. Тогда в момент времени t_1 (рис. 52,*б*) ключ K разомкнется и будет введено в цепь ротора сопротивление, которому соответствует характеристика II. При этом точка a с характеристики I переместится в положение точки a_I на характеристику II (пунктир на рисунке), причем в силу механической инерции практически при постоянной частоте вращения $n_{уст\,з}$. Этой частоте вращения на новой характеристике двигателя соответствует момент M_I, меньший момента нагрузки M_c. Поэтому в соответствии с выражением (32) ротор двигателя начнет замедляться и частота его вращения будет снижаться до тех пор, пока в момент времени t_{II}, соответствующий точке a_{II}, ключ K вновь не замкнется. При этом изображающая точка переместится в положение a_{III} на характеристике I, в которой момент двигателя M_{III} уже превышает M_c, и двигатель начнет разгоняться. В точке a, соответствующей теперь уже моменту времени $t_{III}=t_I+T$, ключ вновь откроется и весь цикл начнет повторяться. Из рис. 52,*а* видно, что частота вращения двигателя, а тем самым и производственного механизма колеблется в пределах от $n_{уст.з}$ до n_I около некоторой средней частоты вращения $n_{ср1}$, соответствующей заданной скважности γ_1. График изменения частоты вращения в функции времени показан на рис. 52,*в* в виде кривой I.

Уменьшим теперь скважность работы ключа K до значения $\gamma_2=\frac{t'_з}{T}<\gamma_1$ (пунктир на рис. 52, *б*), т. е. сократим время закрытого состояния ключа В этом случае частота вращения двигателя за время увеличившейся паузы t'_0 уменьшится до более низкой частоты вращения (точка a_{IV} на характеристике II), а за время закры-

того состояния ключа $t'_з$ увеличится лишь до n_2 (точка a_{VI}), меньшей, чем начальная частота вращения $n_{уст.з}$. Нетрудно заметить, что уменьшилась и средняя частота вращения двигателя до значения $n_{ср2}$, а график частоты вращения в функции времени (кривая *II* на рис. 52,*в*) будет располагаться ниже кривой *I*, соответствующей скважности γ_1. Таким образом, изменяя скважность работы ключа *К*, можно регулировать среднюю частоту вращения электродвигателя.

В этом и заключается принцип регулирования частоты вращения электродвигателей в схемах импульсного регулирования.

Аналогичным образом будет происходить и регулирование частоты вращения асинхронного двигателя при изменении не скважности, а частоты замыкания ключа *К*. Такой способ управления также находит применение в импульсном электроприводе.

Рассмотренная схема на рис. 51, отличаясь простотой технической реализации и регулирования частоты вращения электродвигателя, обладает в то же время весьма существенным недостатком: средняя частота вращения двигателя сильно зависит от момента нагрузки M_c на его валу. Действительно, если обратиться к рис. 52,*а* и уравнению (32), можно заметить, что при увеличении момента нагрузки M_c и неизменной скважности средняя частота вращения двигателя уменьшится, так как за время t_0 частота вращения снизится в более значительной степени, а за время $t_з$ — увеличится уже в меньшей степени. При снижении M_c наблюдается обратная картина. Тем самым можно сказать, что рассмотренная схема импульсного электропривода, которая обычно называется разомкнутой, обеспечивает лишь «мягкие» механические характеристики привода, работа на которых отличается существенными перепадами частоты вращения при возможных колебаниях момента нагрузки. Поэтому такие схемы применяются относительно редко, а чаще используются схемы с различными обратными связями

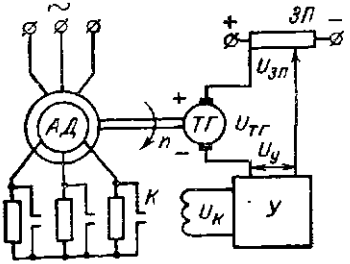


Рис. 53. Замкнутая система импульсного регулирования.

(так называемые замкнутые схемы регулирования), с помощью которых удается получить «жесткие» механические характеристики привода.

Наиболее часто в этих схемах используется обратная связь по частоте вращения электродвигателя. Одна из практических схем такого типа, построенная по принципу схемы на рис. 24,*а*, представлена на рис. 53. Роль ключа в этой схеме выполняет трехполюсный контактор *К*, контакты которого включены параллельно добавочному сопротивлению $R_{2д}$, а катушка получает напряжение питания $U_К$ от усилителя мощности *У*. Напряжение на входе усилителя $U_У$ представляет собой разность двух напряжений: напряжения $U_{ЗП}$, снимаемого с потенциометра *ЗП*, и напряжения $U_{ТГ}=\gamma n$, снимаемого с якоря тахогенератора *ТГ*, который механически связан с валом двигателя *АД*:

$$U_У=U_{ЗП}-\gamma n. \qquad (33)$$

Рассмотрим работу такой схемы, предположив, что в начальный момент времени контактор *К* был отключен и в ротор было введено сопротивление $R_{2д}$. Тогда в полном соответствии с описанным выше принципом работы схемы на рис. 51 частота вращения электродвигателя n начнет снижаться и пропорционально будет снижаться напряжение на якоре тахогенератора $U_{ТГ}=\gamma n$. Снижение этого напряжения вызовет в соответствии с выражением (33) увеличение напряжения на входе усилителя и соответственно на катушке контактора *К*. При достижении этим напряжением уровня срабатывания контактора *К* последний включится и зашунтирует сопротивление $R_{2д}$. Момент двигателя при этом возрастает и его частота вращения начнет увеличиваться. Одновременно с этим начнет увеличиваться напряжение $U_{ТГ}$, а напряжение на катушке контактора начнет снижаться. При некотором его уровне, соответствующем напряжению отпускания контактора, последний отключится и введет в цепь ротора сопротивление. Момент двигателя уменьшится и частота его вращения начнет снижаться, вновь будет повторяться цикл, который уже описан выше. Колебания скорости около некоторого среднего уровня, который определяется значением напряжения $U_{ЗП}$,

в этой схеме зависят только от напряжений срабатывания и отпускания контактора K и мало зависят от изменения момента нагрузки M_c на валу двигателя. Другими словами, характеристики привода в такой схеме являются «жесткими», в силу чего замкнутые схемы и нашли на практике широкое использование.

Область применения импульсных схем в последние годы расширилась в связи с использованием в них полупроводниковых управляемых вентилей в качестве коммутирующих ключей. На рис. 54 показана модификация схемы на рис. 51, в которой в качестве ключа использован тиристор T, коммутирующий добавочное сопротивление $R_{2д}$, включенное в цепь выпрямленного тока ротора. По принципу своего действия и получаемым характеристикам она аналогична схеме на рис. 51.

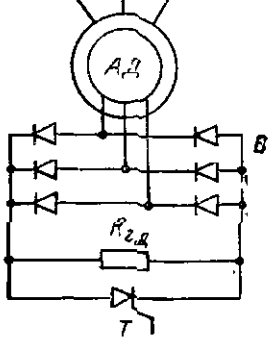


Рис. 54. Тиристорная схема импульсного регулирования.

Помимо рассмотренного выше импульсного регулирования в цепи ротора применяются, хотя и реже, схемы импульсного регулирования по цепи статора. Примером является схема на рис. 22. Если в этой схеме управлять тиристорами таким образом, чтобы они периодически или полностью открывались (проводящее их состояние) или полностью закрывались (непроводящее состояние), то двигатель будет или подключаться к сети, или отключаться от нее. Частота вращения двигателя при этом также будет периодически колебаться около некоторого среднего значения, возрастая при его подключении и снижаясь при его отключении, как это имело место и при работе схемы на рис. 51. Изменяя продолжительность (скважность) включения тиристоров, можно изменить и среднее значение частоты вращения электродвигателя. При импульсном регулировании в цепи статора также используются различные обратные связи для получения «жестких» механических характеристик.

Сопоставляя регулирование частоты вращения асинхронного электродвигателя с помощью простейших ра-

зомкнутых схем импульсного управления, можно отметить сходство этого способа с реостатным регулированием: получаемые характеристики имеют малую жесткость, располагаются ниже естественной характеристики двигателя и позволяют получить лишь небольшой диапазон регулирования. Невысока и экономичность этого способа из-за значительных потерь энергии при регулировании частоты вращения асинхронного двигателя. Возможности импульсного привода, а тем самым и области его применения существенно расширяются при использовании тиристоров и создании замкнутых систем. Такие системы, позволяющие получать плавное регулирование частоты вращения в диапазоне до 20 : 1, находят все большее применение на транспорте, в станкостроении, для привода механизмов подъемных кранов и некоторых других производственных механизмов.

8. СПЕЦИАЛЬНЫЕ СПОСОБЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

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

Широкое распространение в практике асинхронного

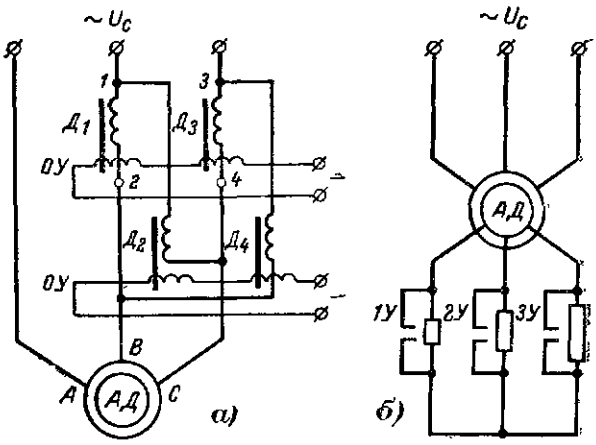


Рис. 55. Несимметричные схемы включения статорных (*а*) и роторных (*б*) обмоток асинхронного двигателя.

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. 55,*а* изображена так называемая четырехдроссельная реверсивная схема управления асинхронным двигателем. Если подать номинальный ток в обмотки управления (подмагнитить дроссели) $Д_1$ и $Д_3$, 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. 5,*а*. Если ток обмоток управления дросселей насыщения $Д_1$ и $Д_3$ сделать меньше номинального, то сопротивление их рабочих обмоток несколько возрастет, в результате чего в фазные обмотки статора будут включены разные сопротивления: добавочное сопротивление фазы *А* равно нулю, а в других фазах добавочное сопротивление будет определяться током подмагничивания $Д_1$ и $Д_3$. 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. 9,*а*. При изменении тока обмоток управления $Д_1$ и $Д_3$ будут меняться значения сопротивлений рабочих обмоток этих дросселей, что в конечном счете приведет к изменению механических характеристик двигателя. Таким образом производится регулирование частоты вращения асинхронного двигателя в несимметричной схеме его включения.

Если ток обмоток управления $Д_1$ и $Д_3$ 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 $Д_2$ и $Д_4$ до номинального значения, то сопротивление их рабочих обмоток станет весьма малым. Схема включения асинхронного двигателя в этом случае будет похожей на изображенную на рис. 5,*в*. Следова-

тельно, направление вращения асинхронного двигателя при подмагничивании дросселей насыщения $Д_2$ и $Д_4$ будет противоположным тому, которое имело место при подмагничивании $Д_1$ и $Д_3$. Итак, схема включения двигателя на рис. 55,*а* позволяет регулировать частоту вращения 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 частоте вращения двигателя.

Основное достоинство несимметричных схем включения — меньшие габариты системы электропривода при регулировании частоты 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.

На рис. 55,*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. 55,*б* обеспечивает меньшие размеры контроллера за счет меньшего числа контактов, коммутирующих дополнительные активные сопротивления роторной цепи. Действительно, сравнивая симметричную схему на рис. 18,*а* с несимметричной схемой на рис. 55,*б*, можно заметить, что в последней для получения трех регулировочных ступеней сопротивления используются три контакта, а в схеме на рис. 18,*а* — шесть контактов. Недостатком схемы на рис. 55,*б* являются несколько повышенные потери при регулировании частоты вращения.

Основная задача регулирования частоты вращения двигателей, как уже отмечалось, состоит в необходимости получения определенных его механических характеристик. В ряде случаев это может быть достигнуто применением нескольких электрических двигателей. На рис. 56,*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. 56,*б*, а машина $АД_2$ работает в режиме динамического торможения, которому соответствует характеристика *2* на рис. 56,*б*. Поскольку валы $АД_1$ и $АД_2$ механически соединены между собой, то общий момент системы электропривода для каждой частоты вращения складывается из моментов, развиваемых обеими электрическими машинами. Кривая *3* на рис. 56,*б*

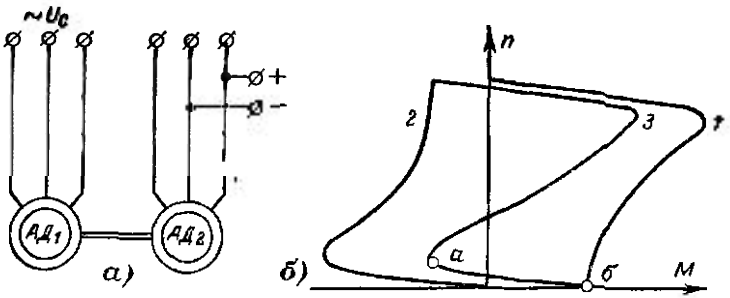


Рис. 56. Схема соединения (*а*) и механические характеристики двухдвигательного электропривода (*б*).

представляет собой результирующую механическую характеристику системы электропривода (рис. 56,*а*), которая имеет жесткий участок *аб* при низких частотах вращения двигателей.

Схема на рис. 56,*а* используется для получения низкой устойчивой частоты вращения двигателя при точной остановке электроприводов.

BOOKS.PROEKTANT.ORG

БИБЛИОТЕКА ЭЛЕКТРОННЫХ КОПИЙ КНИГ

для проектировщиков и технических специалистов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Чиликин М. Г.** Общий курс электропривода. М., «Энергия», 1971. 432 с.

2. **Основы** автоматизированного электропривода. М., «Энергия», 1974. 568 с. — Авт.: М. Г. Чиликин, М. М. Соколов, В. М. Терехов, А. В. Шинянский.

3. **Чиженко И. М., Рудейко В. С., Сенько В. И.** Основы преобразовательной техники. М., «Высшая школа», 1974. 430 с.

4. **Преображенский В. И., Зимин Е. Н.** Силовые кремниевые вентили. М., «Энергия», 1971. 81 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 3
1. Принцип действия и особенности работы асинхронного двигателя 10
2. Реостатное регулирование 32
3. Регулирование изменением напряжения статора двигателя 40
4. Частотное регулирование 53
5. Регулирование изменением числа пар полюсов 72
6. Регулирование в каскадных схемах включения асинхронных двигателей 77
7. Импульсное регулирование 86
8. Специальные способы регулирования . . . 92
Список литературы 95

Лев Борисович Масандилов
Владимир Валентинович Москаленко
РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Редактор издательства И. П. Березина
Художественный редактор Д. И. Чернышев
Технический редактор М. Г. Юханова
Корректор В. С. Антипова

ИБ № 992

Сдано в набор 23/IX 1977 г. Подписано к печати 1/XII 1977 г
Т-20326 Формат 84×108 1/32 Бумага типографская № 3 Усл. печ. л. 5,04
Уч.-изд. л. 5,15 Тираж 20 000 экз. Зак. 327 Цена 20 коп.

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

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10