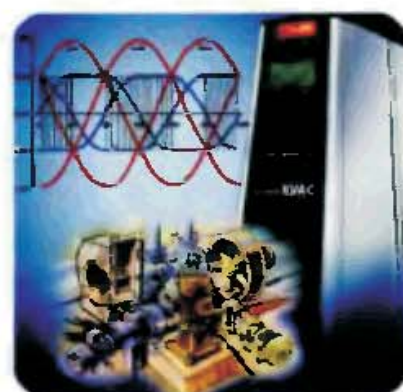
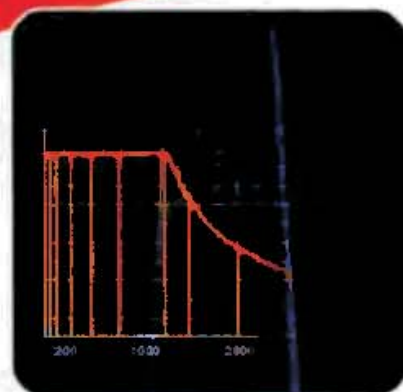
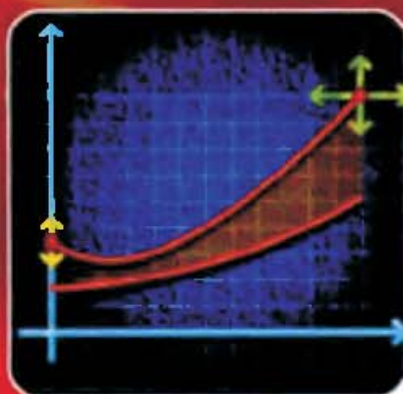
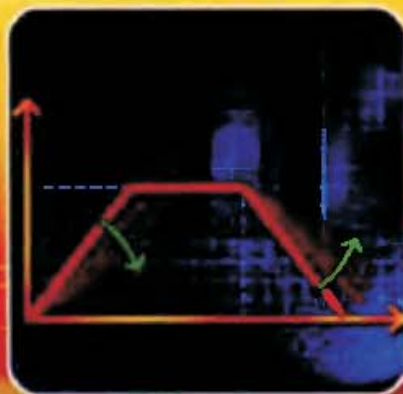


Danfoss



Преобразователи частоты просто о сложном



VLT[®]
THE REAL DRIVE

Оглавление

ГЛАВА 0: ВВЕДЕНИЕ	7
Преимущества плавного регулирования скорости	10
Управление или регулирование?	12
ГЛАВА 1: ТРЕХФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА	13
Асинхронные электродвигатели	15
Статор.....	15
Магнитное поле.....	16
Ротор	18
Скольжение, крутящий момент и скорость	20
Коэффициент полезного действия и потери	23
Магнитное поле.....	25
Эквивалентная схема	25
Диапазон скорости	29
Изменение числа полюсов	29
Управление скольжением	30
Частотное регулирование.....	32
Технические характеристики электродвигателя.....	35
Типы нагрузок	44
Синхронные электродвигатели	47
Реактивные электродвигатели	49
ГЛАВА 2: ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ	52
Выпрямитель	54
Неуправляемые выпрямители.....	54
Управляемые выпрямители	56
Промежуточная цепь	59
Инвертор	62
Транзисторы	65
Амплитудно-импульсная модуляция (АИМ)	68
Широтно-импульсная модуляция (ШИМ)	70
Синусоидально-управляемая ШИМ.....	71
Синхронная ШИМ	74
Асинхронная ШИМ	75
Схема управления	81
Принцип управления, разработанный корпорацией Danfoss	82
Принцип управления VVC.....	84
Принцип управления VVC ^{plus}	86

Управление по полю (векторное управление)	91
Регулирование V/f-характеристик и вектора магнитного потока	93
Компенсация скольжения по методу VVC^{plus}	94
Автоматическая адаптация двигателя (ААД)	95
Автоматическая оптимизация энергопотребления (АОЭ)	95
Работа на предельном токе	96
Защитные функции	98
Краткое описание микрочипа	101
Вычислительные устройства для преобразователей частоты	102
Связь	104
Последовательная связь	106
Общепринятые проколы связи	111
ГЛАВА 3: ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ И ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ	113
Рабочие условия электродвигателя	115
Компенсация	115
Компенсационные параметры, зависящие и не зависящие от нагрузки	115
Компенсация скольжения	116
Характеристики крутящего момента электродвигателя	117
Предел по току	117
Возможности современных цифровых преобразователей частоты	120
Выбор преобразователя частоты	121
Нагрузочные характеристики	121
Распределение тока в преобразователе частоты ($\cos \phi$ электродвигателя)	125
Динамическое торможение	128
Реверс	130
Рампы	131
Текущий контроль	132
Нагрузка и нагрев электродвигателя	134
Коэффициент полезного действия	136
ГЛАВА 4: ЗАЩИТА И БЕЗОПАСНОСТЬ	139
Дополнительная защита	139
Заземление (система TN)	140
Заземление (система TT)	140
Защитные реле	141
Электромагнитная совместимость	143
Основные стандарты	144
Общие стандарты	144
Стандарты на изделия	144
Распространение помех	146
Типы электрической связи	146
Электромагнитные воздействия на электрические кабели	148
Помехи сети питания	148
Переходные напряжения / перенапряжение	149
Радиопомехи	151
Экранированные / бронированные кабели	153
Устройства компенсации коэффициента мощности	154
Выбор преобразователя частоты для приводов с переменной скоростью	155

ПРИЛОЖЕНИЕ I: ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ МЕХАНИКИ	159
Прямолинейное движение	159
Вращательное движение	159
Работа и мощность	161
ПРИЛОЖЕНИЕ II: ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА	162
Коэффициент мощности	165
Трёхфазный переменный ток	166
Соединение звездой или треугольником	167
ПРИЛОЖЕНИЕ III: СОКРАЩЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ.....	168
ЛИТЕРАТУРА	169
АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	170

0. Введение

Статический преобразователь частоты представляет собой электронное устройство, которое обеспечивает плавное регулирование скорости трехфазных электродвигателей переменного тока путем преобразования фиксированных значений напряжения и частоты сети в изменяемые величины. Хотя принцип всегда оставался неизменным, в первоначальные преобразователи частоты было внесено много изменений, в частности применены тиристоры, которые в настоящее время управляются с помощью микропроцессора, и цифровые блоки.

Вследствие возрастающей степени автоматизации в промышленности, существует постоянная потребность в дополнительных средствах автоматического управления, и происходит непрерывное увеличение производственных скоростей и совершенствование методов в целях дальнейшего повышения эффективности промышленных предприятий.

В настоящее время электродвигатели являются важными стандартными промышленными изделиями. Эти двигатели рассчитаны на работу с фиксированной скоростью, и в течение многих лет продолжается работа, направленная на оптимизацию регулирования их рабочей скорости.

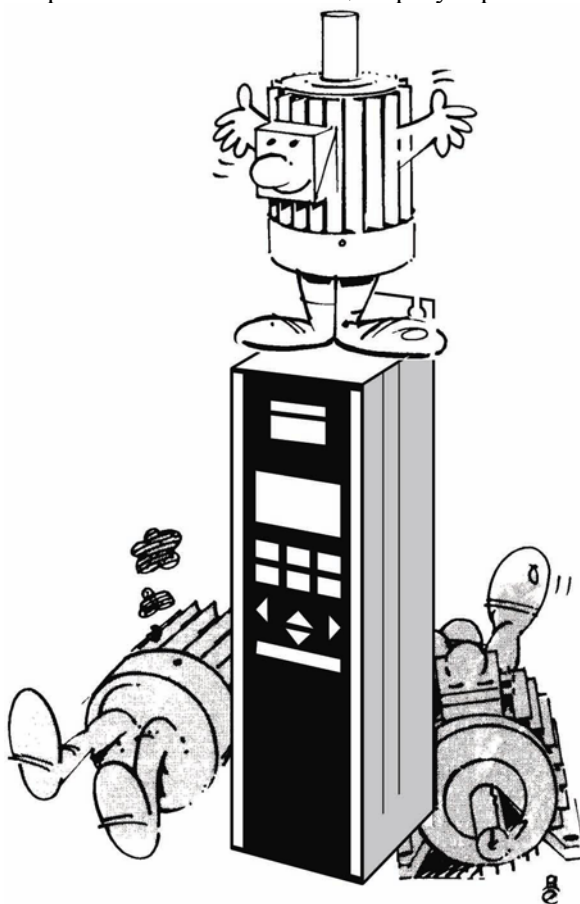


Рис. 001

Этого не удавалось обеспечить до тех пор, пока не были внедрены статические преобразователи частоты, способные эффективно использоваться для плавного регулирования скорости трехфазных электродвигателей переменного тока.

Подавляющее большинство статических преобразователей частоты, используемых в настоящее время в промышленности для управления или регулирования скорости трехфазных электродвигателей переменного тока, разработаны с применением двух разных принципов (рис. 0.02):

- преобразователи частоты без промежуточной цепи (также называемые прямыми преобразователями)
- преобразователи частоты с изменяемой или неизменной промежуточной цепью.

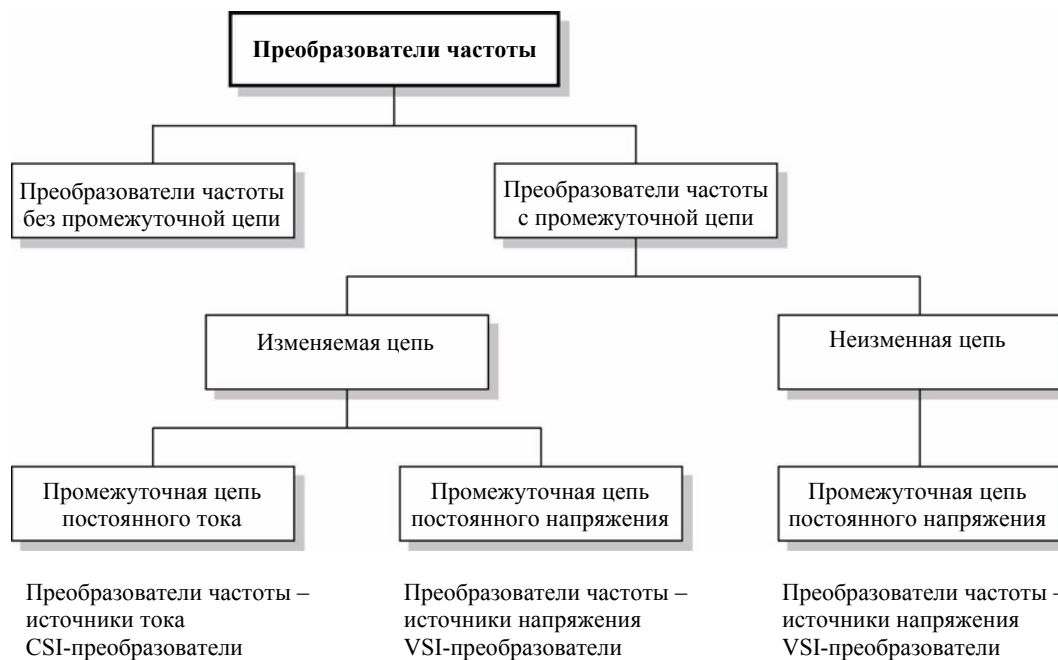


Рис. 0.02 Принципы построения преобразователей

Преобразователи частоты с промежуточной цепью имеют промежуточную цепь либо постоянного тока, либо постоянного напряжения и называются, соответственно, преобразователями – источниками тока и преобразователями – источниками напряжения.

Преобразователи с промежуточной цепью имеют ряд преимуществ перед прямыми преобразователями, а именно:

- Лучшее регулирование реактивного тока
- Уменьшение числа гармоник
- Отсутствие ограничений в отношении выходной частоты (однако здесь имеется ограничение по управлению и свойствам используемых электронных компонентов). Для работы на высоких выходных частотах используются главным образом преобразователи с промежуточной цепью.

Как правило, прямые преобразователи дешевле, чем преобразователи с промежуточной цепью, но они обычно хуже подавляют гармоники.

Поскольку большинство преобразователей частоты используют промежуточную цепь напряжения постоянного тока, в настоящей брошюре делается упор именно на эту группу преобразователей.

Преимущества плавного регулирования скорости

Сегодня трехфазный электродвигатель переменного тока, управляемый преобразователем частоты, является стандартным элементом технологических установок.

Наряду с возможностью использования положительных свойств трехфазных электродвигателей переменного тока, основным требованием при проектировании установки часто оказывается наличие плавного регулирования скорости. Также имеется ряд других преимуществ:

Энергосбережение

Экономия энергии возможна, если скорость электродвигателя соответствует требованиям в любой заданный момент времени. Это применимо, в частности, к центробежным насосам и приводам вентиляторов, у которых потребляемая электроэнергия уменьшается пропорционально кубу скорости. Таким образом, если уменьшить скорость вдвое, то будет расходоваться мощность, составляющая всего 12,5 % от номинальной.



Рис. 0.03 Энергосбережение

Оптимизация производственного процесса

Регулирование скорости производственного процесса имеет ряд преимуществ. В их число входит увеличение производительности с одновременным сокращением процента брака и снижением расхода материалов и износа.

Плавная работа машины

Может быть резко снижено число пусков и остановов с полным изменением скорости. При использовании режимов плавного пуска и останова возможно предотвращение ударных воздействий на компоненты машины.

Уменьшение объема технического обслуживания

Преобразователи частоты не требуют технического обслуживания. При использовании этих установок для управления электродвигателями возможно увеличение их срока службы. Например, в системах водоснабжения устраняются гидравлические удары, которые происходят, когда электродвигатели насосов подключены непосредственно к сети, и предотвращается повреждение водопроводных труб.

Улучшение условий труда

Скорость ленточных конвейеров может быть точно согласована с требуемой рабочей скоростью. Например, бутылки на ленточном конвейере разливочной линии производят гораздо меньше шума, если скорость ленты можно уменьшать при скапливании бутылок.

Если скорость вентилятора можно регулировать, можно уменьшить излишний шум работающего вентилятора.

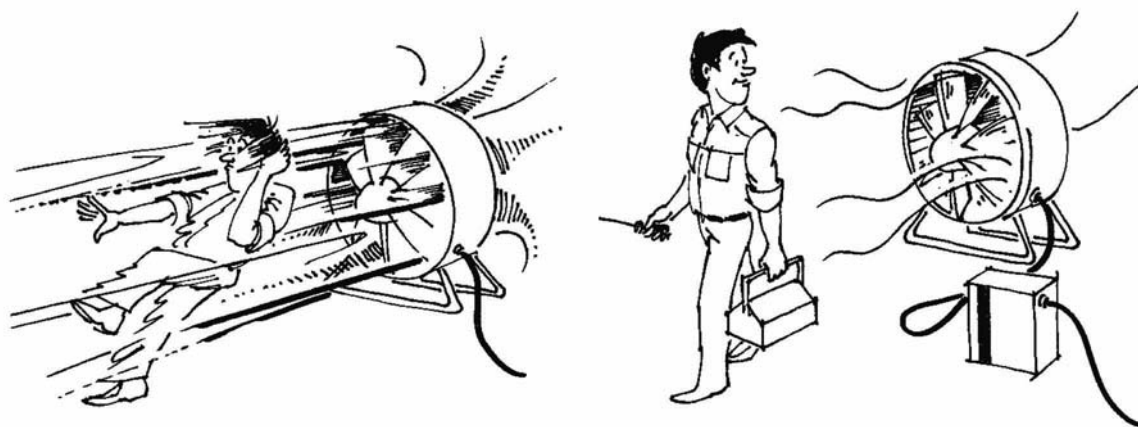


Рис. 0.04 Улучшение условий труда

Управление или регулирование?

Многие считают термины «управление» и «регулирование» синонимами. Однако они имеют точные определения – главным образом, благодаря достижениям в области автоматизации.

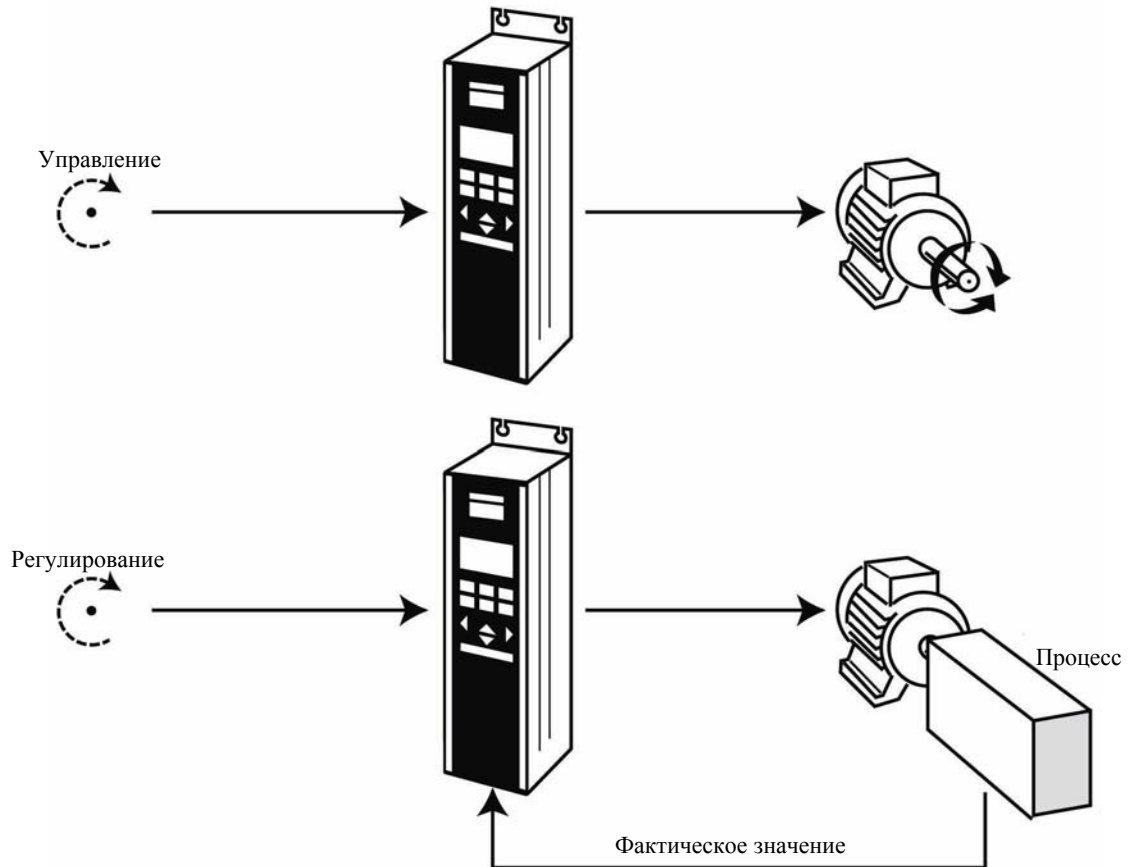


Рис. 0.05 Различие между управлением и регулированием

Термины “управление” и “регулирование” зависят от типа установки. При “управлении” скоростью на электродвигатели посылается сигнал, который, как ожидается, создаст требуемую скорость. При “регулировании” скорости от процесса поступает сигнал обратной связи. Если скорость не соответствует требованиям, сигнал, подаваемый на электродвигатель, автоматически регулируется до тех пор, пока скорость электродвигателя не окажется той, которая должна быть.

1. Трехфазные электродвигатели переменного тока

Первый электродвигатель, двигатель постоянного тока, был создан в 1833 г. Регулирование скорости этого двигателя было простым и удовлетворяло требования самых разнообразных применений и систем.

В 1899 г. был создан первый двигатель переменного тока. Недостатками трехфазного двигателя переменного тока, который гораздо проще и надежнее электродвигателя постоянного тока, были фиксированные значения скорости и характеристики крутящего момента, вследствие чего двигатели переменного тока в течение многих лет не могли использоваться в системах с особыми режимами работы.

Трехфазные двигатели переменного тока представляют собой преобразователи электромагнитной энергии, превращающие электрическую энергию в механическую (вращение электродвигателя) и наоборот (работа в генераторном режиме) с помощью электромагнитной индукции. Закон электромагнитной индукции заключается в том, что при перемещении проводника в магнитном поле (B) наводится напряжение. Если проводник замкнут, в нем потечет ток (I). Когда проводник движется, на него будет действовать сила (F), перпендикулярная магнитному полю.

a) Генераторный режим (индукция как результат движения).

В генераторном режиме перемещение проводник в магнитном поле вызывает появление напряжения (рис. 1.01a).

b) Двигательный режим

В электродвигателях закон электромагнитной индукции действует в обратном направлении, и положение проводника с током определяется магнитным полем.

В этом случае на проводника будет действовать сила (F), которая выталкивает провод из магнитного поля.

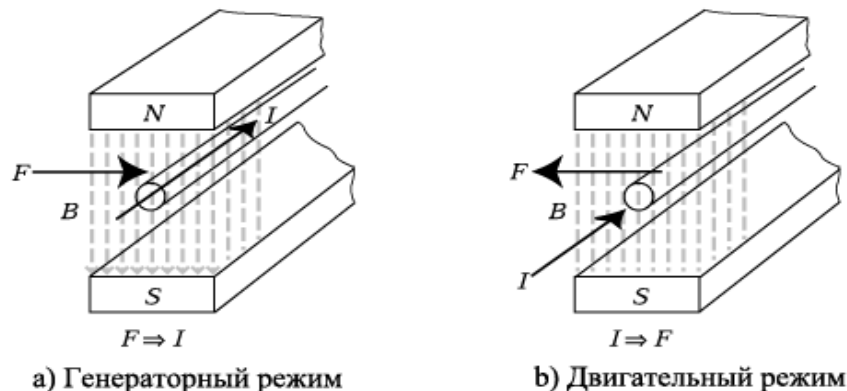


Рис. 1.01. Закон электромагнитной индукции

В двигательном режиме магнитное поле и проводник с током создают движение (рис. 1.01b). В неподвижной части электродвигателя (статоре) создается магнитное поле электродвигателя, а во вращающейся части (роторе) находятся проводники, на которые действуют электромагнитные силы. Трехфазные двигатели переменного тока делятся на две основные группы: асинхронные и синхронные двигатели. Статоры в двигателях обоих типов действуют, в основном, одинаково, но роторы отличаются по конструкции и движению относительно магнитного поля. В синхронном (синхронный означает одновременный или одинаковый) двигателе скорости вращения ротора и магнитного поля одинаковы, а в асинхронном – различны.

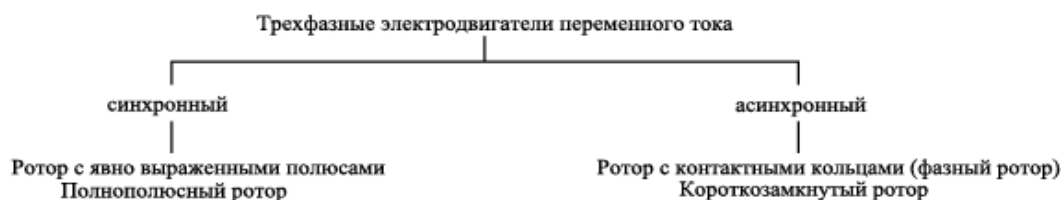


Рис. 1.02. Типы трехфазных электродвигателей переменного тока

Асинхронные электродвигатели

Асинхронные электродвигатели являются наиболее распространенными и практически не требуют никакого технического обслуживания. В механическом отношении они фактически представляют собой стандартные устройства, поэтому всегда имеются соответствующие поставщики таких двигателей. Существует несколько типов асинхронных электродвигателей, причем все они действуют по одному базовому принципу.

Двумя главными компонентами асинхронного электродвигателя являются статор (неподвижный элемент) и ротор (вращающийся элемент).

Статор

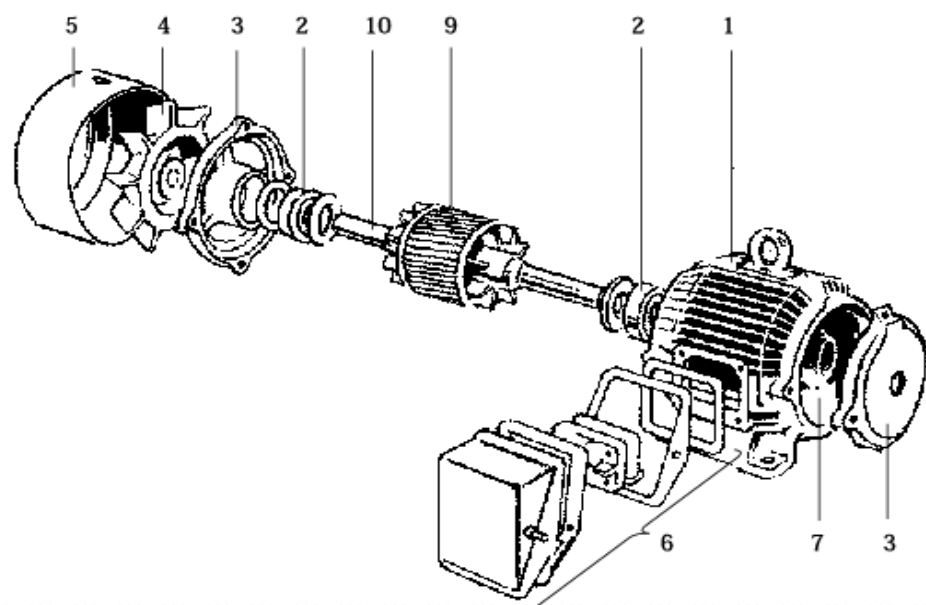


Рис. 1.03. Конструкция асинхронного электродвигателя

Статор является неподвижной частью стационарного электродвигателя. Статор состоит из корпуса (1), шарикоподшипников (2), которые поддерживают ротор (9), опор подшипников (3), фиксирующих положение подшипников и являющихся завершением корпуса, вентилятора (4) для охлаждения электродвигателя и кожуха (5) для защиты от вращающегося вентилятора. Коробка для электрических соединений (6) находится сбоку корпуса статора.

В корпусе статора находится сердечник (7), изготовленный из тонких (от 0,3 до 0,5 мм) стальных пластин. Эти пластины имеют выштампованные пазы для фазных обмоток.

Фазные обмотки и сердечник статора создают магнитное поле. Число пар полюсов (или число полюсов) определяет скорость, с которой вращается магнитное поле. Если электродвигатель подключен к напряжению номинальной частоты, то скорость вращения магнитного поля называют синхронной скоростью электродвигателя (n_0).

Число пар полюсов (р)	1	2	3	4	6
Число полюсов	2	4	6	8	12
n_0 [об/мин]	3000	1500	1000	750	500

Таблица 1.01. Число пар полюсов, число полюсов и синхронная скорость электродвигателя

Магнитное поле

Магнитное поле вращается в воздушном зазоре между статором и ротором. Магнитное поле возникает после подключения фазной обмотки к фазе питающего напряжения.

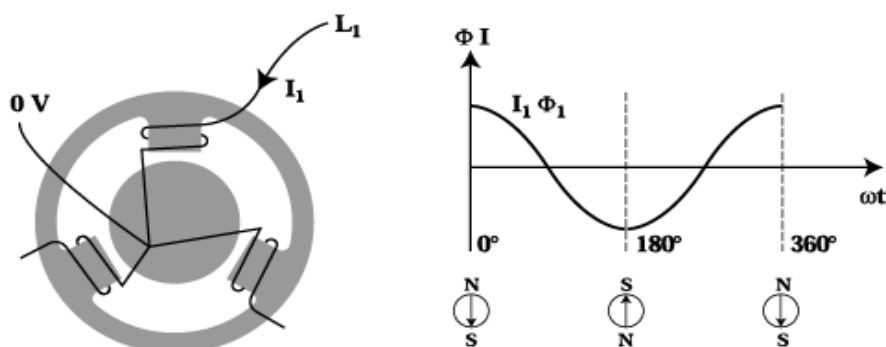


Рис. 1.04 Переменное поле, создаваемое одной фазой

Положение магнитного поля в сердечнике статора постоянно, но его направление меняется. Скорость, с которой меняется направление, определяется частотой напряжения питания. При частоте 50 Гц поле изменяет направление 50 раз в секунду.

Если две фазные обмотки подключены к каждой фазе одновременно, в сердечнике статора возникают два магнитных поля. В 2-полюсном двигателе эти два поля смещены между собой на угол 120 градусов. Максимальные значения полей смещены и во времени.

Это приводит к возникновению в статоре вращающегося магнитного поля. Однако до подключения третьей фазы данное поле будет резко асимметричным.

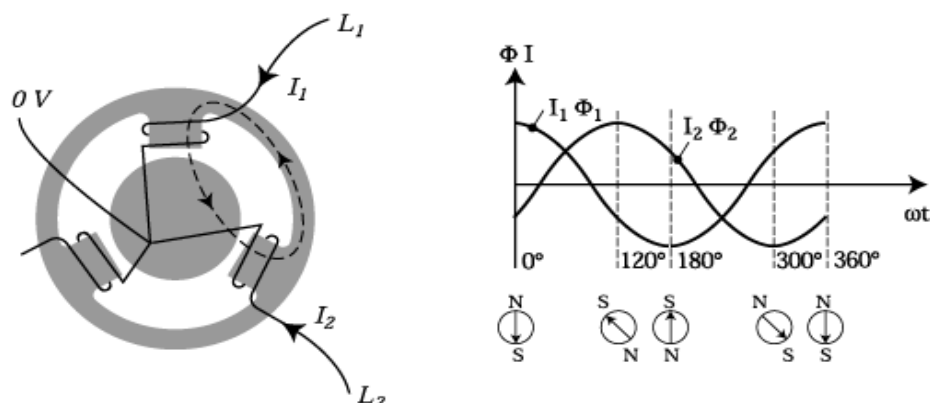


Рис. 1.05. Две фазы создают асимметричное вращающееся поле

Три фазы создают в сердечнике статора магнитные поля, смещенные между собой на 120 градусов.

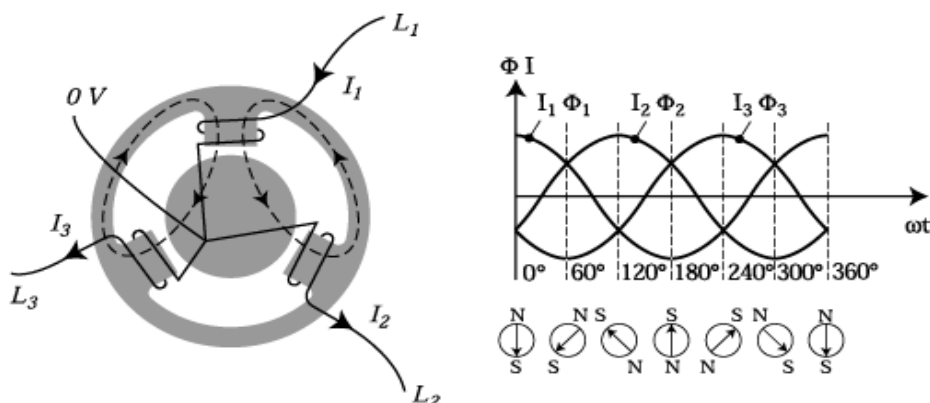


Рис. 1.06. Три фазы создают симметричное вращающееся поле

Теперь статор подключен к трехфазному напряжению питания, и магнитные поля отдельных фазных обмоток создают симметричное вращающееся магнитное поле, называемое вращающимся полем электродвигателя. Амплитуда вращающегося поля постоянна и в $1,5$ раза превышает максимальное значение переменных полей. Вращение происходит со скоростью

$$n_0 = (f \times 60) / p \text{ [об/мин]}$$

f = частота

n_0 = синхронная скорость

p = число пар полюсов

Таким образом, скорость зависит от числа пар полюсов (p) двигателя и частоты (f) напряжения питания. На приведенном ниже рисунке показана величина магнитных полей (Φ) в три разные периода.

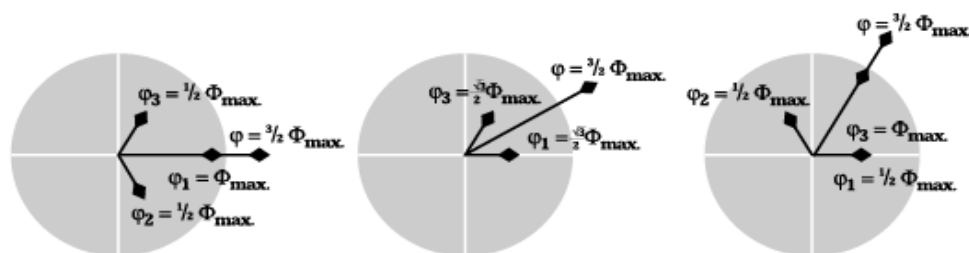


Рис. 1.07. Величина магнитных полей постоянна

Если изобразить вращающееся поле с помощью вектора и соответствующей угловой скорости, то получится окружность. В системе прямоугольных координат вращающееся поле в зависимости от времени имеет вид синусоиды. Если во время вращения происходит изменение амплитуды, вращающееся поле становится эллиптическим.

Ротор

Ротор (9) монтируется на валу электродвигателя (10) (см. рис. 1.03).

Подобно статору ротор изготавливается из тонких стальных пластин с выштампованными пазами.

Роторы бывают двух основных типов: с контактными кольцами и короткозамкнутые: различие обусловлено разными обмотками в пазах.

У роторов с контактными кольцами витки обмоток уложены в пазы подобно обмоткам статора, причем витки разделены на фазы, подключенные к контактным кольцам. Если замкнуть контактные кольца накоротко, то такой ротор будет работать как короткозамкнутый ротор.

В пазах короткозамкнутых роторов уложены алюминиевые стержни. Для замыкания стержней используются алюминиевые кольца, по одному на каждом торце ротора.

Из указанных двух типов роторов чаще используются короткозамкнутые роторы. Поскольку принцип действия роторов обоих типов одинаков, будет рассмотрен только короткозамкнутый ротор.

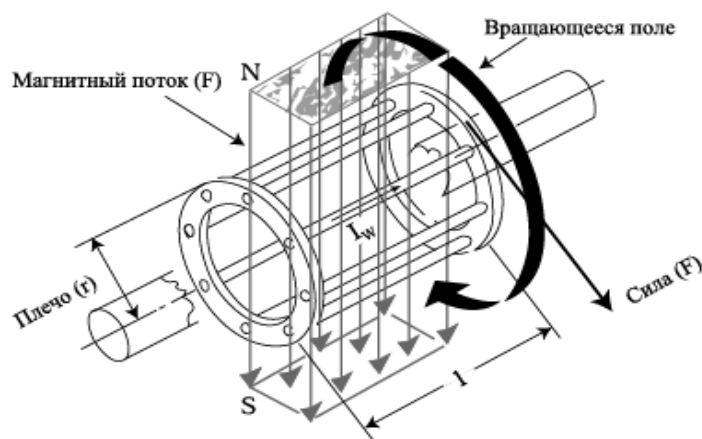


Рис. 1.08. Вращающееся магнитное поле и короткозамкнутый ротор

Когда стержень ротора оказывается в магнитном поле, магнитный полюс проходит через стержень. Магнитное поле полюса наводит ток (I_w) в стержне ротора, на который действует только сила (F) (рис. 1.08 и 1.09a).

Эта сила определяется магнитной индукцией (B), индуктированным током (I_w), длиной (l) ротора и углом (θ) между силой и магнитной индукцией:

$$F = B \times I_w \times l \times \sin \theta$$

Если допустить, что угол $\theta = 90^\circ$, то сила равна:

$$F = B \times I_w \times l \dots\dots\dots 1.01$$

Следующий полюс, который проходит через стержень ротора, имеет противоположную полярность. Тем самым индуцируется ток в противоположном направлении. Поскольку одновременно изменилось и направление магнитного поля, сила действует в том же направлении, что и прежде (рис. 1.09b).

Если поместить во вращающееся поле ротор целиком (см. 1.09c), на стержни ротора будут действовать силы, которые повернут ротор. Скорость (2) ротора не достигает скорости (1) вращающегося поля, поскольку при равенстве скоростей в стержнях ротора не возникал бы ток.

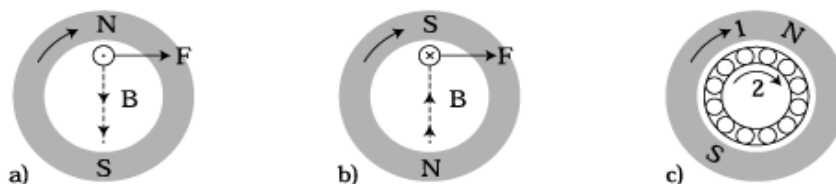


Рис. 1.09. Индукция в стержнях ротора

Скольжение, крутящий момент и скорость

В обычных условиях скорость ротора n_n меньше скорости вращающегося поля n_0 . Разность между скоростью вращающегося поля и скоростью ротора представляет собой скольжение s :

$$n_0 = (f \times 60) / p \text{ [об/мин]}$$

p = число пар полюсов

Скольжение часто выражают в процентах от синхронной скорости, и оно обычно составляет от 4 до 11 % от номинальной скорости.

$$s = n_0 - n_n$$

$$s = (n_0 - n_n) / n_0 \times 100 \text{ [%]}$$

Магнитная индукция (B) определяется как отношение потока (Φ) на площадь поперечного сечения (A). Следовательно, с помощью выражения 1.01 можно вычислить силу:

$$F = \Phi \times I_w \times l / A \quad 1.02$$

Сила, с которой перемещается проводник с током, пропорциональна магнитному потоку (Φ) и току (I_w) в проводнике.

$$F \sim \Phi \times I_w$$

Магнитное поле индуцирует в стержнях ротора напряжение. Это напряжение вызывает протекание в стержнях короткозамкнутого ротора электрического тока (I_w). Отдельные силы, действующие на стержни ротора, суммируются и создают на валу электродвигателя крутящий момент T .

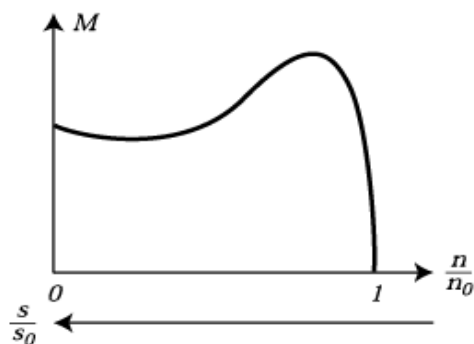
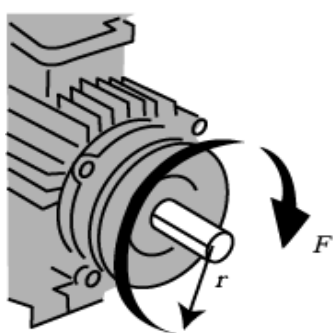


Рис. 1.10. Крутящий момент электродвигателя равен произведению силы на плечо рычага

Зависимость между крутящим моментом и скоростью двигателя представляет собой характеристику, которая зависит от формы ротора. Крутящий момент электродвигателя создает силу, вращающую его вал.

Эта сила возникает, например, на окружности маховика, установленного на валу. Зная силу (F) и радиус маховика (r) можно вычислить крутящий момент электродвигателя:

$$T = F \times r$$

Работа, производимая электродвигателем, может быть выражена формулой: $W = F \times d$, где d – расстояние, на которое электродвигатель перемещает данную нагрузку; оно зависит от числа оборотов n :

$$d = n \times 2 \times \pi \times r$$

Работу можно также определить как мощность, умноженную на время ее действия: $W = P \times t$.

Таким образом, крутящий момент равен:

$$T = F \times r = W/d \times r = (P \times t \times r) / (n \times 2 \times \pi \times r)$$

$$T = P \times 9550/n \quad (t = 60 \text{ с})$$

Эта формула отражает зависимость между скоростью n [об/мин], крутящим моментом T [Нм] и мощностью электродвигателя P [кВт].

Формула позволяет быстро проверить значения n , T и P по отношению к соответствующим значениям в заданной точке (n_r , T_r и P_r). Данная рабочая точка обычно является проектной рабочей точкой электродвигателя, поэтому формулу можно преобразовать следующим образом:

$$T_r = P_r/n_r \text{ и } P_r = T_r \times n_r,$$

$$\text{где } T_r = T/T_n; P_r = P/P_n \text{ и } n_r = n/n_n$$

При таком пропорциональном вычислении константа 9550 не используется.

Пример

Нагрузка = 15 % от номинального значения, скорость = 50 % от номинального значения.

Вырабатываемая мощность составляет 7,5 % от вырабатываемой номинальной мощности, поскольку $P_T = 0,15 \times 0,50 = 0,075$.

Наряду с обычным рабочим диапазоном электродвигателя, существуют два диапазона торможения.

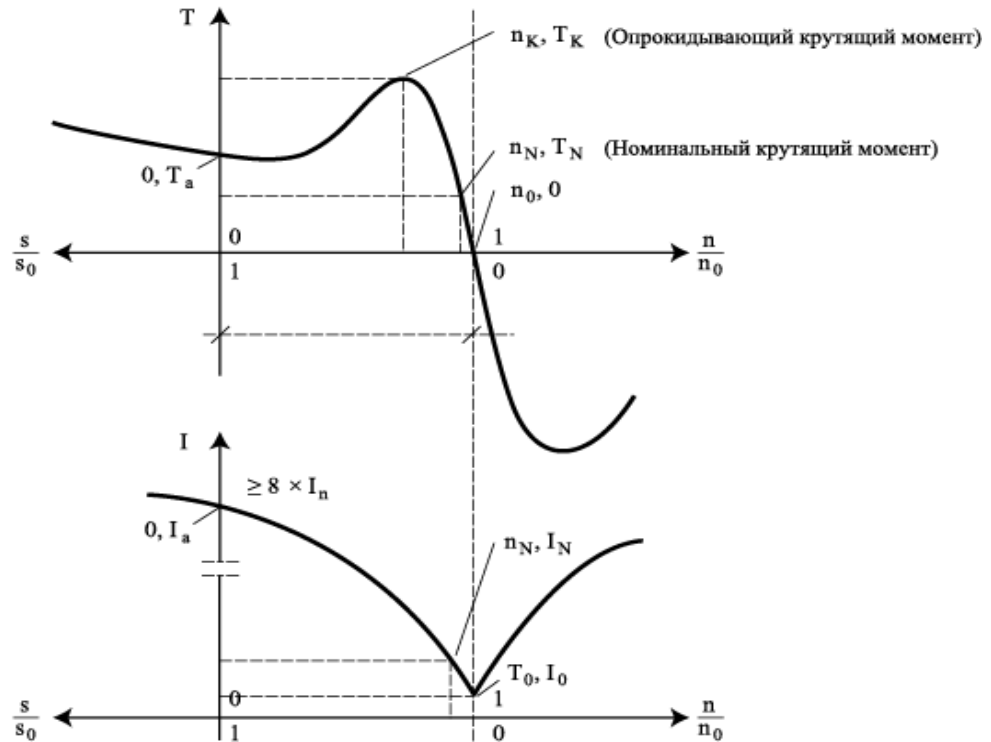


Рис. 1.11. Токовая и нагрузочная характеристики электродвигателя

В диапазоне, где $n/n_0 > 1$, электродвигатель вращается со скоростью, превышающей синхронную, и действует как генератор – создает встречный момент, одновременно возвращая энергию в питающую сеть.

Торможение в диапазоне $n/n_0 < 1$ называют рекуперативным торможением.

Если две фазы внезапно меняются местами, вращающееся поле меняет направление. Непосредственно после этого будет иметь место равенство $n/n_0 = 1$.

Электродвигатель, прежде нагруженный крутящим моментом T , теперь тормозится моментом торможения. Если двигатель не выключается при $n = 0$, он будет продолжать вращаться, но в новом направлении вращающегося поля.

Электродвигатель работает в своем обычном диапазоне $0 < n/n_0 < 1$.

Весь диапазон работы электродвигателя можно разделить на два участка: пусковой диапазон $0 < n/n_0 < n_k/n_0$ и рабочий диапазон $n_k/n_0 < n/n_0 < 1$.

В рабочем диапазоне электродвигателя находятся важные точки:

T_n – пусковой момент электродвигателя – момент, который создает мощность электродвигателя, когда на него подаются номинальное напряжение и номинальная частота, а он неподвижен.

T_k – опрокидывающий крутящий момент электродвигателя. Это наибольший крутящий момент, который способен развивать электродвигатель при подаче на него номинального напряжения и номинальной частоты.

T_n – номинальный крутящий момент электродвигателя. Номинальные параметры электродвигателя – это механические и электрические параметры, на которые электродвигатель был рассчитан в соответствии со стандартом IEC 34. Их можно увидеть на шильдике электродвигателя, и на них можно ссылаться как на паспортные характеристики. Номинальные параметры определяют оптимальную рабочую точку электродвигателя при его непосредственном подключении к питающей сети.

Коэффициент полезного действия и потери

Электродвигатель потребляет электроэнергию из сети питания. Ввиду наличия собственных потерь, входная мощность при постоянной нагрузке всегда больше механической выходной мощности, которую электродвигатель способен обеспечить. Отношение выходной мощности к входной является коэффициентом полезного действия (кпд) электродвигателя – η .

$\eta = P_2/P_1$ = выходная мощность / входная мощность

В зависимости от мощности электродвигателя и числа полюсов КПД электродвигателя обычно составляет от 0,7 до 0,9.

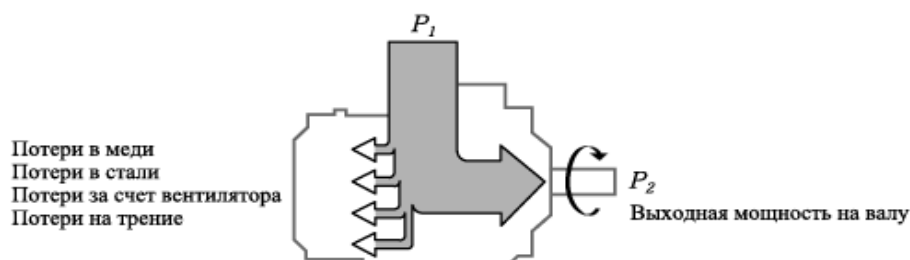


Рис. 1.12. Потери в электродвигателе

Потери в электродвигателе имеют четыре основные составляющие: потери в меди, потери в стали, потери за счет вентилятора и потери на трение.

Потери в меди обусловлены активным сопротивлением обмоток статора и ротора.

Потери в стали состоят из потерь на гистерезис и потерь на вихревые токи. Потери на гистерезис возникают потому, что сталь намагничивается переменным током и при частоте напряжения питания 50 Гц должна перемагничиваться 100 раз в секунду. И для намагничивания, и для размагничивания требуется энергия. Электродвигатель потребляет входную мощность на компенсацию гистерезисных потерь, которые возрастают с увеличением частоты и магнитной индукции.

Потери на вихревые токи обусловлены тем, что магнитные поля индуцируют электрическое напряжение в стальном сердечнике и проводниках. Эти напряжения создают токи, которые вызывают тепловые потери и протекают в контурах, охватывающих магнитные поля.

Потери от вихревых токов радикально снижают путем изготовления сердечника из тонких пластин.

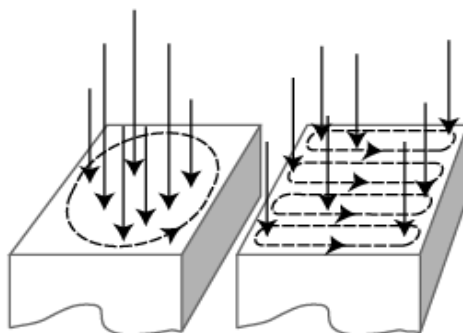


Рис. 1.13. Вихревые токи уменьшают путем использования в электродвигателе тонколистовой стали.

Потери за счет вентилятора обусловлены воздушным сопротивлением вентилятора в электродвигателе.

Потери на трение возникают в шарикоподшипниках ротора.

При определении КПД и выходной мощности электродвигателя потери вычисляются путем измерения входной мощности.

Магнитное поле

Электродвигатель сконструирован в расчете на фиксированные значения напряжения и частоты, и его намагничивание зависит от соотношения между напряжением и частотой.

Если отношение напряжение/частота увеличивается, электродвигатель намагничивается чрезмерно, а если уменьшается – электродвигатель недомагничивается. Магнитное поле в недомагниченном электродвигателе ослабевает, и крутящий момент, который он способен развивать, уменьшается, что может привести к условиям, при которых электродвигатель не запустится или остановится. Другим вариантом может быть чрезмерное увеличение времени пуска, что приводит к перегрузке электродвигателя.

Чрезмерно намагниченный электродвигатель перегружается во время работы. Мощность, которая тратится на это дополнительное намагничивание, превращается в тепло внутри двигателя и может повредить изоляцию. Однако трехфазные двигатели переменного тока и, в частности, асинхронные двигатели обладают очень большой прочностью, так что проблема неправильного намагничивания, приводящего к повреждению, возникает только при длительной работе.

На неправильность намагничивания указывает поведение двигателя: необходимо следить, в частности, за появлением таких признаков, как снижение скорости при меняющейся нагрузке, неустойчивая или толчкообразная работа электродвигателя и т.п.

Эквивалентная схема

В большинстве случаев асинхронные двигатели имеют шесть обмоток: три обмотки на статоре и три в короткозамкнутом роторе (который ведет себя в магнитном отношении так, как если бы он содержал три обмотки). Рассматривая комплект обмоток, можно построить электрическую схему, которая поясняет, как работает электродвигатель.



Рис. 1.14а Расположение обмоток статора и ротора

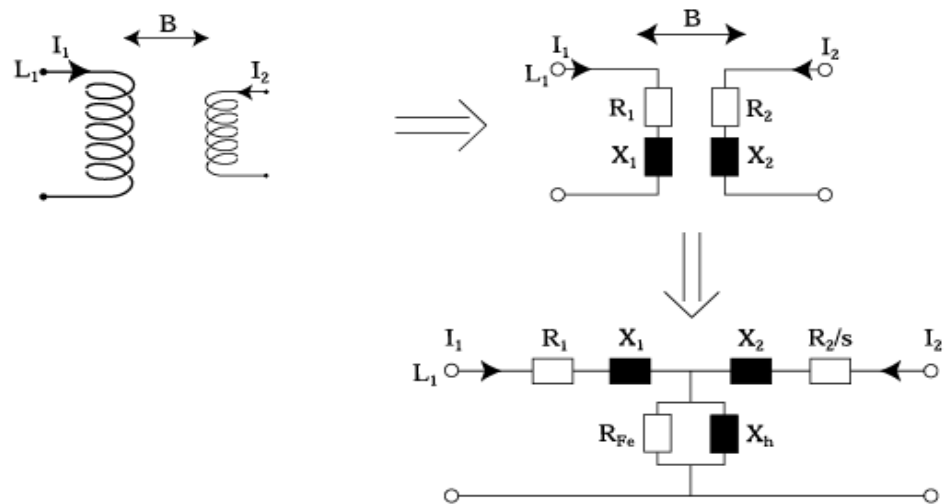


Рис. 1.14б Эквивалентная схема электродвигателя (применительно к фазе L1)

Ток обмотки статора ограничивается не только активным сопротивлением обмотки, но, поскольку каждая обмотка подключена к напряжению переменного тока, возникает сопротивление переменному току. Это сопротивление называется реактивным сопротивлением ($X_L = 2 \times p \times f \times L$) и измеряется в омах [Ом].

f – частота и $2 \times \pi \times f$ – угловая скорость ω , измеряемая в рад/с.

L – индуктивность обмотки, измеряемая в генри [Гн]. Действующее значение тока ограничивается его зависимостью от частоты.

Обмотки взаимно влияют друг на друга благодаря эффекту магнитной индукции (В). Обмотка ротора создает ток в обмотке статора и наоборот (рис. 1.14b). Такое взаимодействие означает, что можно объединить две электрические цепи с помощью общего звена, образованного активным сопротивлением R_{Fe} , связанным с потерями в стали, и реактивным сопротивлением X_h , обусловленным индуктивностью намагничивания. По цепям течет ток, который электродвигатель потребляет для намагничивания статора и ротора. Падение напряжения на "общем звене" называют индуцированным (наведенным) напряжением.

Рабочие условия электродвигателя

В рассматривавшихся до сих пор примерах нагрузка на электродвигатель отсутствовала. Если электродвигатель функционирует в нормальных рабочих условиях, частота ротора меньше частоты вращающегося поля, и параметр X_2 уменьшается за счет коэффициента s (скольжение).

На эквивалентной схеме этот эффект описывается путем изменения активного сопротивления ротора R_2 с помощью коэффициента $1/s$.

Параметр R_2/s можно записать в виде $R_2 + R_2 \times (1-s)/s$, где $R_2 \times (1-s)/s$ механическая нагрузка на электродвигатель.

Параметры R_2 и X_2 являются характеристиками ротора. R_2 соответствует тепловым потерям ротора, когда электродвигатель нагружен.

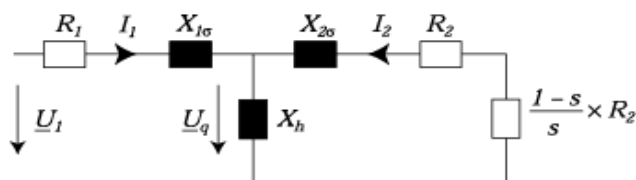


Рис. 1.15. Эквивалентная схема электродвигателя под нагрузкой

Когда электродвигатель не имеет нагрузки, скольжение s близко к нулю. Это означает, что параметр $R_2 \times (1 - s)/s$ возрастает.

Поэтому практически никакой ток в роторе протекать не может. В идеале данную ситуацию можно отразить, если из эквивалентной схемы удалить активное сопротивление, представляющее механическую нагрузку.

Когда электродвигатель нагружен, скольжение увеличивается, уменьшая произведение $R_2 \times (1 - s)/s$.

С увеличением нагрузки ток ротора I_2 также возрастает.

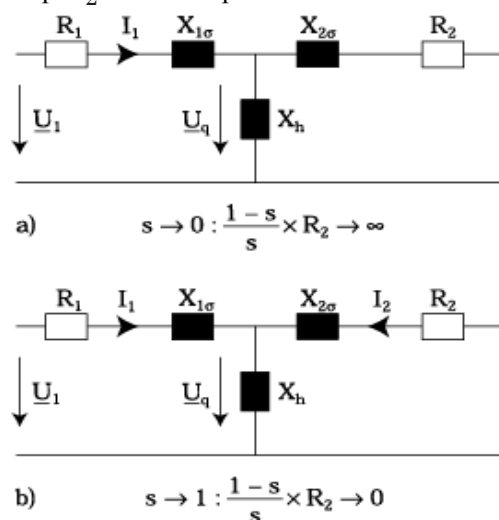


Рис. 1.16. Эквивалентная схема на холостом ходу (a) и с заторможенным ротором (b)

Таким образом, эквивалентная схема позволяет отразить работу асинхронных электродвигателей и во многих случаях может использоваться для описания их режимов.

Существует опасность, что индуктированное напряжение ($\underline{U}_q$) будет ошибочно принято за напряжение на клеммах электродвигателя. Это объясняется тем, что эквивалентная схема упрощена для большей наглядности представления различных состояний. Однако следует помнить, что индуктированное напряжение приближается к напряжению на клеммах только при ненагруженном двигателе.

Если нагрузка возрастает, ток I_2 , и, следовательно, ток I_1 увеличиваются, и приходится учитывать падение напряжения. Это особенно важно, если электродвигатель управляется преобразователем частоты.

Диапазон скорости

Скорость n электродвигателя зависит от скорости вращающегося поля и может быть представлена следующим образом:

$$s = (n_0 - n) / n_0, \text{ где } n = (1 - s) \times f / p$$

Таким образом, скорость электродвигателя можно регулировать путем изменения:

- числа пар полюсов p электродвигателя (например, у двигателей с переключением полюсов)
- скольжения электродвигателя (например, у двигателей с контактными кольцами)
- частоты f напряжения питания электродвигателя.



Рис. 1.17 Различные возможности изменения скорости электродвигателя

Изменение числа полюсов

Скорость вращающегося поля определяется числом пар полюсов статора. При частоте питающей сети 50 Гц скорость вращающегося поля в случае 2-полюсного электродвигателя равна 3000 об/мин, а в случае 4-полюсного – 1500 об/мин.

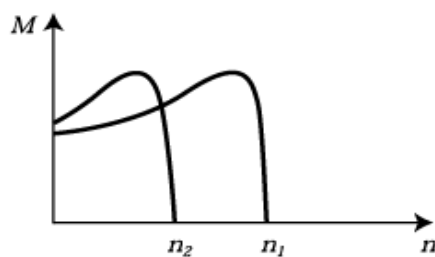


Рис. 1.18 Характеристики крутящего момента электродвигателя с переключением полюсов

Двигатели могут изготавливаться с двумя разными числами пар полюсов. Это достигается с помощью специальной укладки обмоток статора в пазы либо в виде обмотки Даландера, либо в виде двух отдельных обмоток. В электродвигателе с несколькими полюсами типы обмоток комбинируются. Скорость изменяется путем переключения обмоток статора для изменения числа пар его полюсов. При переключении с малого числа пар полюсов (когда создается высокая скорость) на большее фактическая скорость электродвигателя резко меняется – например, с 1500 на 750 об/мин. Если переключение происходит быстро, электродвигатель проходит через генераторный режим, при этом создается большая нагрузка и на двигатель, и на механические компоненты.

Управление скольжением

С помощью скольжения скоростью электродвигателя можно управлять двумя разными способами: изменением напряжения питания статора или путем подключения к ротору.

Изменение напряжения статора

Скорость асинхронных электродвигателей можно регулировать путем изменения напряжения питания электродвигателя без изменения частоты (например, с помощью устройства плавного пуска). Это возможно потому, что крутящий момент электродвигателя уменьшается пропорционально квадрату напряжения.

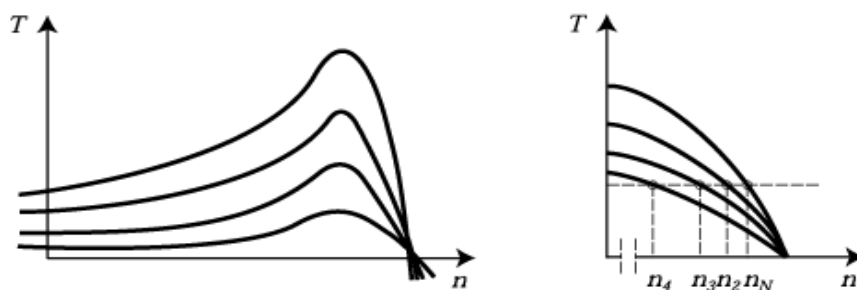


Рис. 1,19

Характеристики крутящего момента в функции напряжения статора (управление скольжением)

Как видно из характеристики крутящего момента, точки устойчивого режима можно получить только в рабочем диапазоне ($n_k < n < n_0$). В случае электродвигателя с контактными кольцами устойчивые рабочие точки можно получить и в диапазоне разгона ($0 < n < n_k$), для чего в обмотки двигателя следует включить резисторы.

Управление ротором

Имеется два способа доступа к ротору: либо в цепь ротора включают активное сопротивление, либо цепь ротора подключают к другим электрическим машинам или выпрямительным цепям по каскадной схеме.

Следовательно, управление ротором возможно только в случае электродвигателей с контактными кольцами, поскольку только конструкция с контактными кольцами обеспечивает доступ к обмоткам ротора.

Изменение сопротивления резисторов ротора

Скорость электродвигателя можно регулировать путем подключения контактных колец к резисторам и увеличения потерь мощности в роторе, что приводит к увеличению скольжения и снижению скорости электродвигателя.

Если в цепи ротора включены резисторы, изменяются характеристики крутящего момента электродвигателя.

Как показано на рис. 1.20, опрокидывающий момент сохраняет свою величину. В случае одной и той же нагрузки разные установки дают разные скорости, так что предварительно устанавливаемая скорость зависит от нагрузки. Если нагрузка двигателя снижается, скорость возрастает, приближаясь к синхронной скорости.

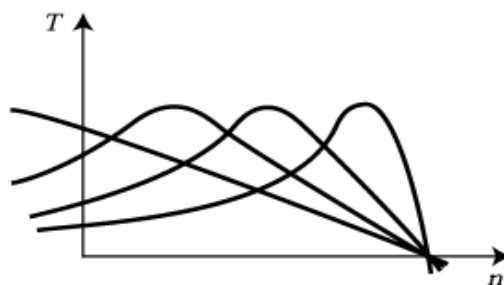


Рис. 1.20 Характеристики крутящего момента при изменении сопротивления ротора

Резисторы являются регулируемы, при этом важно не превышать их допустимую рабочую температуру.

Каскадное включение

Вместо резисторов цепь ротора можно подключить через контактные кольца к машинам постоянного тока или управляемым выпрямительным схемам.

Машины постоянного тока обеспечивают подачу в цепь ротора электродвигателя регулируемого напряжения, что дает возможность влиять на скорость и намагничивание ротора. Этот способ используется, главным образом, на электрифицированных железных дорогах.

Вместо машин постоянного тока могут использоваться управляемые выпрямительные схемы. В этом случае область применения двигателей сводится к их использованию совместно с насосами, вентиляторами и т.п.

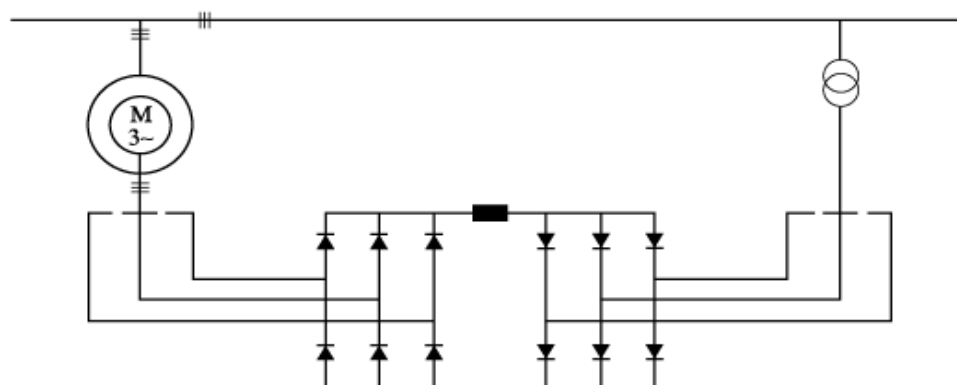


Рис. 1.21 Типовая каскадная схема

Частотное регулирование

Путем изменения частоты питающего напряжения скорость электродвигателя можно регулировать без дополнительных потерь. Вместе с частотой изменяется скорость вращения магнитного поля. Скорость электродвигателя изменяется пропорционально скорости вращающегося поля. Чтобы сохранить крутящий момент, необходимо одновременно с изменением частоты изменять напряжение электродвигателя.

Для заданной нагрузки справедливы выражения:

$$T = (P \times 9550) / n = (\eta \times \sqrt{3} \times U \times I \times \cos \varphi \times 9550) / (f \times 60 / p) = k \times (U/f) \times I$$

$$T \sim (U/f) \times I$$

При постоянном отношении напряжения питания электродвигателя к его частоте намагничивание в номинальном рабочем режиме электродвигателя также постоянно.

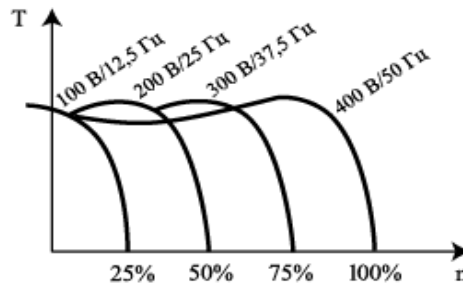


Рис. 1.22 Характеристики крутящего момента при управлении изменением отношения напряжение/частота

Однако намагничивание не будет идеальным в двух случаях: при пуске и на очень низких частотах, где требуется дополнительное намагничивание, а также при работе с изменяющимися нагрузками, где должна быть предусмотрена возможность изменения намагничивания в соответствии с нагрузкой.

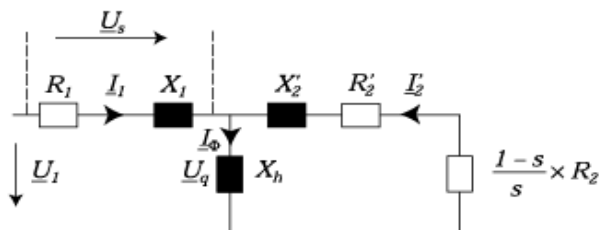


Рис. 1.23 Эквивалентная схема электродвигателя

Дополнительное пусковое намагничивание

Рассмотрим зависимость падения напряжения $\underline{U}_s$ от индуцированного напряжения $\underline{U}_q$.

Напряжение на клеммах: $\underline{U}_1 = \underline{U}_s + \underline{U}_q = \underline{U}_{R1} + \underline{U}_{X1} + \underline{U}_q$

Реактивное сопротивление статора: $X_1 = 2 \times \pi \times f \times L$

Электродвигатель рассчитан на использование со своими номинальными значениями. Например, при $U_1 = 400$ В и $f = 50$ Гц намагничивающее напряжение $\underline{U}_q$ двигателя может быть равно 370 В. В этом случае электродвигатель имеет оптимальное намагничивание.

Отношение напряжения к частоте: $400/50 = 8$ [В]/[Гц]

Если частота снижается до 2,5 Гц, напряжение должно стать равным 20 В, поскольку на этой пониженной частоте реактивное сопротивление статора X_1 также уменьшается. Падение напряжения определяется только сопротивлением R_1 и не оказывает никакого влияния на результирующее падение напряжения в статоре. Сопротивление R_1 приблизительно соответствует номинальным значениям (около 20 В), поскольку ток электродвигателя определяется нагрузкой.

Теперь напряжение на клеммах соответствует падению напряжения на резисторе статора R_1 .

Напряжение для намагничивания электродвигателя отсутствует, и он не способен развивать вращающий момент на низких частотах, если отношение напряжения к частоте поддерживается постоянным во всем диапазоне. Поэтому необходимо компенсировать падение напряжения во время пуска и на низких частотах.

Намагничивание, зависящее от нагрузки

После того как проведена адаптация электродвигателя с дополнительным намагничиванием на низких частотах и во время пуска, при работе с малой нагрузкой будет происходить избыточное намагничивание. В этих условиях ток статора I_1 будет уменьшаться, а индуцированное напряжение $\underline{U}_q$ – возрастать.

Электродвигатель будет потреблять повышенный реактивный ток и излишне нагреваться. Таким образом, намагничивание зависит от напряжения на электродвигателе, автоматически изменяясь в зависимости от нагрузок электродвигателя.

Для обеспечения оптимального намагничивания электродвигателя необходимо принимать во внимание частоту и изменяющуюся нагрузку.

Технические характеристики электродвигателя

Все электродвигатели имеют шильдик, который содержит все основные данные двигателя, а дополнительные сведения обычно приводятся в каталоге на электродвигатель.

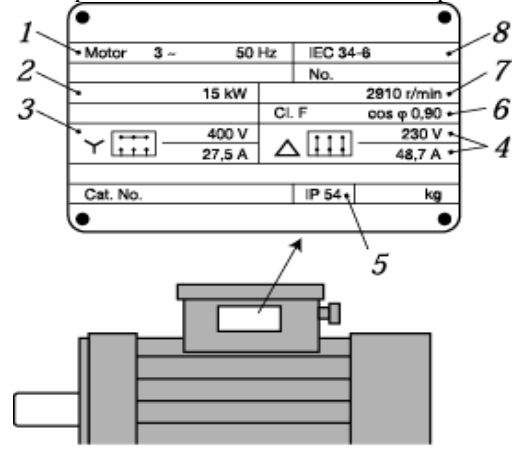


Рис. 1.24 Шильдик электродвигателя

Пример

Шильдик 2-полюсного электродвигателя мощностью 15 кВт может содержать следующие сведения:

- 1. Электродвигатель имеет три фазы и предназначен для питания от сети частотой 50 Гц.
- 2. Номинальная выходная мощность составляет 15 кВт, т.е. электродвигатель способен развивать на валу мощность не менее 15 кВт, если он подключен к сети питания в соответствии с указаниями. Номинальная мощность асинхронного электродвигателя указывается в стандарте. Это дает возможность пользователю выбирать различные электродвигатели для разных нагрузок. Стандартные серии имеют следующие уровни выходной мощности:

кВт	0,06	0,09	0,12	0,18	0,25	0,37	0,55	0,75	1,10	1,50	2,20	3,00
кВт	4,00	5,50	7,50	11,0	15,0	18,5	22,0	30,0	37,0	45,0	55,0	75,0

Таблица 1.02. Ряд выходных мощностей электродвигателей

Лошадиная сила (л.с.) в настоящее время не является широко распространенной единицей измерения. Ее можно перевести в киловатты следующим образом: 1 л.с. = 0,736 кВт.

3-4. Обмотки статора могут быть включены по схеме «звезда» или «треугольник». Если напряжение сети равно 400 В, обмотки должны быть соединены звездой. Тогда ток каждой фазы электродвигателя будет равен 27,5 А. Если напряжение сети равно 230 В, обмотки должны быть соединены треугольником. Тогда ток каждой фазы электродвигателя будет равен 48,7 А.

При пуске, когда ток в 4-10 раз превышает номинальный, возможна перегрузка питающей сети. Это заставило энергетические компании издать нормативы, предписывающие уменьшать пусковой ток крупных электродвигателей. Это может быть обеспечено, например, пуском электродвигателя по схеме «звезда» с его последующим переключением на схему «треугольник».

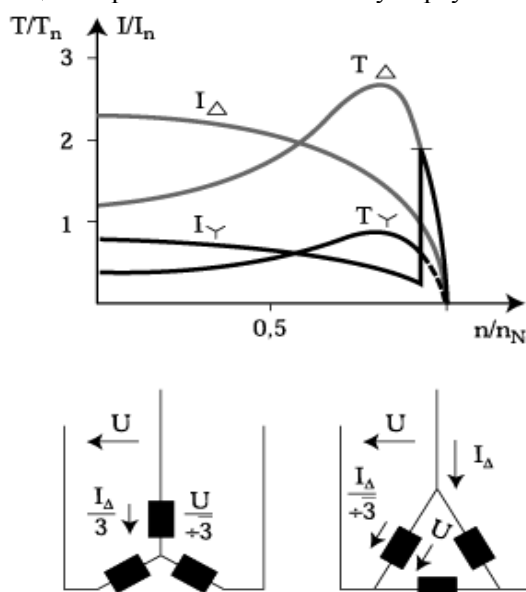


Рис. 1.25 Крутящий момент и ток электродвигателя, включенного в звезду (Y) и треугольник (Δ)

При включении по схеме звезды мощность и крутящий момент снижаются до одной трети, и электродвигатель нельзя запускать при полной нагрузке.

Электродвигатель, рассчитанный на соединение звездой, будет перегружаться, если не будет переключен на схему звезды при работе с полной нагрузкой.

5. Степень защиты электродвигателя указывает, насколько его корпус защищает от проникновения жидкостей и посторонних предметов.

На рис. 1.26 приведены обозначения, которые используются в международном стандарте IEC 34-5. Защита обозначается буквами IP (международная защита) и двумя цифрами. Цифры служат для определения уровня защиты от прикосновения и от посторонних предметов (первая цифра) и от жидкости (вторая цифра). Если требуется, могут вводиться дополнительные цифры. Код IP строится следующим образом:



Также следует иметь в виду:

- Если цифра не определена, она может быть заменена буквой “X”.
- Добавочные и/или дополнительные буквы могут быть удалены без их замены чем-либо еще.
- Если требуется более одной дополнительной буквы, должен соблюдаться алфавитный порядок.

Цифра	Первая цифра		Вторая цифра
	Защита от прикосновения	Защита от посторонних предметов	Защита от воды
0	Нет защиты	Нет защиты	Нет защиты
1	Защита от прикосновения тыльной стороной руки	Защита от твердых посторонних предметов диаметром 50 мм	Защита от воды, падающей вертикально
2	Защита от прикосновения пальцами	Защита от твердых предметов диаметром 12,5 мм	Защита от воды, падающей наклонно
3	Защита от прикосновения инструментом	Защита от твердых посторонних предметов диаметром 2,5 мм	Защита от водяных брызг, падающих под углом 60°
4	Защита от прикосновения провода	Защита от твердых посторонних предметов диаметром 1,0 мм	Защита от водяных брызг всех направлений
5	Защита от прикосновения провода	Защита от пыли	Защита от струй воды
6	Защита от прикосновения провода	Защита от пыли	Защита от сильных струй воды
7	–	–	Защита при временном погружении в воду
8	–	–	Защита постоянном погружении в воду

Рис. 1.26 Степени защиты электродвигателей в соответствии с IEC 34-5

Добавочная буква (не обязательная) указывает, что люди защищены от доступа к опасным компонентам.

- Тыльная сторона руки Буква А
- Палец Буква В
- Инструмент Буква С
- Провод Буква D

Дополнительная буква (не обязательная) указывает, что работающая установка защищена и что предусмотрена особая дополнительная информация:

- Устройства высокого напряжения Буква Н
- Гидравлические испытания во время работы Буква М
- Гидравлические испытания в неподвижном состоянии Буква S
- Погодные условия Буква W

Если работающая установка защищена от пыли (первая цифра 5), проникновение пыли, предотвращается не полностью; однако допускается проникновение ограниченных количеств пыли, и устройство будет продолжать работу без срабатывания защиты.

Защита от воды нормируется до цифры 6; это означает, что должны выполняться требования, относящиеся ко всем младшим цифрам. Работающее устройство, которое имеет обозначение IPX7 (временное погружение) или IPX8 (постоянное погружение), не обязательно должно отвечать требованиям, касающимся защиты от водяных струй (IPX5) или сильных водяных струй (IPX6). Если выполняются оба требования, функциональному блоку должно даваться двойное обозначение, охватывающее оба требования, т.е. IPX5/IPX7.

Пример: IP 65 означает, что электродвигатель защищен от прикосновений и непроницаем для пыли и водяных струй.

6. Номинальный ток I_s , который потребляет электродвигатель, называют полным током, и его можно разделить на две составляющие: активный ток I_w и реактивный ток I_B . $\cos \varphi$ показывает, какую долю составляет активный ток в процентах от тока электродвигателя при работе в номинальном режиме. Активный ток создает выходную мощность на валу, а реактивный указывает, какая мощность требуется для создания магнитного поля в электродвигателе. Когда магнитное поле впоследствии снимается, мощность намагничивания возвращается в питающую сеть.

Слово “реактивный” означает, что ток течет по проводникам в обе стороны без создания выходной мощности на валу.

Полный входной ток из сети в электродвигатель нельзя определить простым суммированием активного и реактивного токов, поскольку эти токи смещены во времени. Величина такого смещения зависит от частоты питающей сети. На частоте 50 Гц взаимное смещение токов составляет 5 миллисекунд. Поэтому требуется их геометрическое сложение.

$$I_s = \sqrt{I_w^2 + I_B^2}$$

Токи образуют катеты прямоугольного треугольника, гипотенуза которого равна квадратному корню из суммы квадратов катетов (по теореме Пифагора).

φ – угол между полным и активным токами, а $\cos \varphi$ – отношение величин этих токов:

$$\cos \varphi = I_W / I_S$$

Величину $\cos \varphi$ можно также представить как отношение активной выходной мощности P к полной выходной мощности S :

$$\cos \varphi = P / S$$

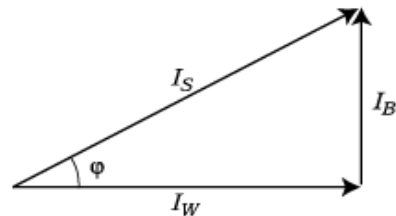


Рис. 1.27 Связь между полным, реактивным и активным токами

Термин “полная мощность” означает, что мощность создается только частью полного тока, а именно активным током I_W .

7. Номинальная скорость электродвигателя – это его скорость при номинальном напряжении, номинальной частоте и номинальной нагрузке.
8. Электродвигатели рассчитаны на различные типы охлаждения. Обычно способ охлаждения указывается в соответствии с международным стандартом IEC 34-6.

На рис. 1.28 приведены обозначения этого стандарта, при этом IC означает охлаждение по международным нормам.

IC01 Самовентиляция Электродвигатель охлаждается изнутри непосредственно окружающим воздухом		IC17 Внешняя вентиляция Электродвигатель со встроенным вентилятором для охлаждения входящим воздухом	
IC06 Внешняя вентиляция Электродвигатель для раздельного охлаждения входящим воздухом		IC37 Внешняя вентиляция Электродвигатель для раздельного охлаждения входящим и выходящим воздухом	

Рис. 1.28 Охлаждение электродвигателя в соответствии со стандартом IEC 34-6

Выбор электродвигателя должен определяться его применением и типом монтажа.

Международный стандарт IEC 34-7 указывает тип монтажа электродвигателя с помощью двух букв IM (монтаж по международным нормам) и четырех цифр. Некоторые из наиболее распространенных конструкций приведены на рис. 1.29.

По техническим характеристикам, приведенным на шильдике электродвигателя, можно вычислить его другие параметры, например номинальный крутящий момент электродвигателя можно вычислить по следующей формуле:

$$T = P \times 9550 / n = 15 \times 9550 / 2910 = 49 \text{ Нм}$$

Машины с торцевыми пластинами, горизонтальная конструкция							
Монтаж				Пояснение			
Рис.	Обозначение согласно стандарту			Торцевая пластина	Статор (корпус)	Общая конструкция	Крепление или монтаж
	DIN 42 950	DIN IEC 34, часть 7					
		Код I	Код II				
	B3	1MB 3	IM 1001	2 торцевые пластины	С опорами	—	Монтаж на основании
	B3/B5	1MB 35	IM 2001	2 торцевые пластины	С опорами	Фланцевое крепление	Монтаж на основании с помощью дополнительного фланца
	B3/B 14	1MB 34	IM 2101	2 торцевые пластины	С опорами	Фланцевое крепление	Монтаж основания с помощью дополнительного фланца
	B5	1MB 5	IM 3001	2 торцевые пластины	Без опор	Фланцевое крепление	Фланцевый монтаж
	B6	1MB 6	IM 1051	2 торцевые пластины	С опорами	Монтаж B3, торцевые пластины повернуты на 90°	Крепление к стене, опоры слева (вид со стороны привода)

Рис. 1.29 Монтаж электродвигателя в соответствии со стандартом IEC 34.7

Коэффициент полезного действия (кпд) η определяется как отношение номинальной мощности к входной электрической мощности:

$$\eta = P / (\sqrt{3} \times U \times I \times \cos \varphi) = 15000 / (\sqrt{3} \times 380 \times 29 \times 0.9) = 0.87$$

Поскольку на шильдике приведены значения номинальной скорости и частоты, можно вычислить скольжение электродвигателя. Эти два параметра указывают, что электродвигатель является 2-полюсным и имеет синхронную скорость 3000 об/мин.

Тогда скорость скольжения (n_s) равна $3000 - 2910 = 90$ об/мин.

Скольжение обычно указывается в процентах:

$$s = n_s / n_0 = 90 / 3000 = 0.03 = 3 \%$$

Конечно, в каталоге электродвигателей содержатся некоторые данные с шильдика. Но кроме этого, имеются и другие данные:

Тип	Выходная мощность кВт	Номинальный рабочий режим				I_a / I	Т Нм	T_a / T	T_{max} / T	Момент инерции кгм	Вес кг
		Скорость об/мин	КПД %	$\cos \varphi$	Ток при 380 В						
160 МА	11	2900	86	0,87	25	6,2	36	2,3	2,6	0,055	76
160 М	15	2910	88	0,90	29	6,2	49	1,8	2,0	0,055	85
160 L	18,5	2930	88	0,90	33	6,2	60	2,8	3,0	0,056	96

Рис. 1.30 Каталог электродвигателей содержит дополнительные данные

Выходную мощность на валу, скорость, $\cos \varphi$ и ток электродвигателя можно увидеть на шильдике.

Кпд и крутящий момент можно вычислить на основе данных с шильдика.

Кроме того, каталог электродвигателей сообщает, что пусковой ток I_a электродвигателя мощностью 15 кВт в 6,2 больше номинального тока I_N . $I_a = 29 \times 6,2 = 180$ А.

Указывается, что пусковой момент электродвигателя (T_a) в 1,8 раза больше номинального крутящего момента: $T_a = 1,8 \times 49 = 88$ Нм. Для такого пускового момента требуется пусковой ток 180 А. Максимальный крутящий момент электродвигателя – опрокидывающий момент (T_k) – вдвое больше номинального крутящего момента:

$$T_k = 2 \times 49 = 98 \text{ Нм.}$$

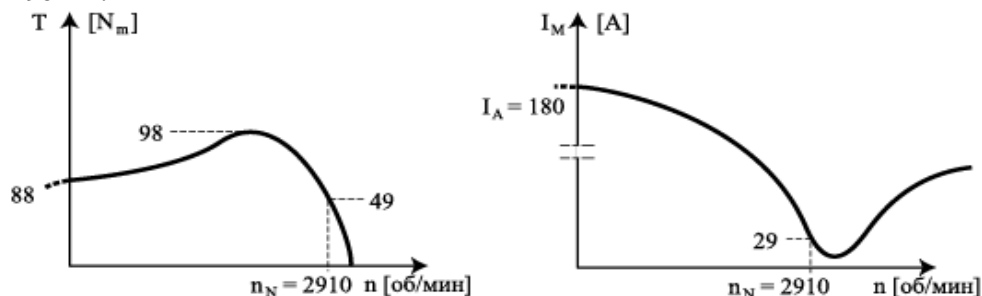


Рис. 1.31 Крутящий момент и ток электродвигателя

И, наконец, на шильдике электродвигателя указаны его момент инерции и вес. Момент инерции используется для вычисления крутящего момента при разгоне. Вес может иметь значение для транспортировки и монтажа.

Некоторые изготовители электродвигателей не публикуют момент инерции и вместо него используют инерционный эффект WR^2 . Эту величину можно пересчитать следующим образом:

$$J = WR^2 / (4 \times g)$$

g – ускорение силы тяжести

Единица измерения инерционного эффекта WR^2 – $[\text{Нм}^2]$

Единица измерения момента инерции J – $[\text{кгм}^2]$

Типы нагрузок

Если крутящий момент на валу электродвигателя равен моменту, создаваемому нагрузкой, двигатель работает устойчиво. В таких случаях крутящий момент и скорость постоянны.

Характеристики электродвигателя устанавливаются как зависимость между скоростью и крутящим моментом или выходной мощностью. Характеристики крутящего момента уже были рассмотрены. Характеристики машины можно разделить на четыре группы.

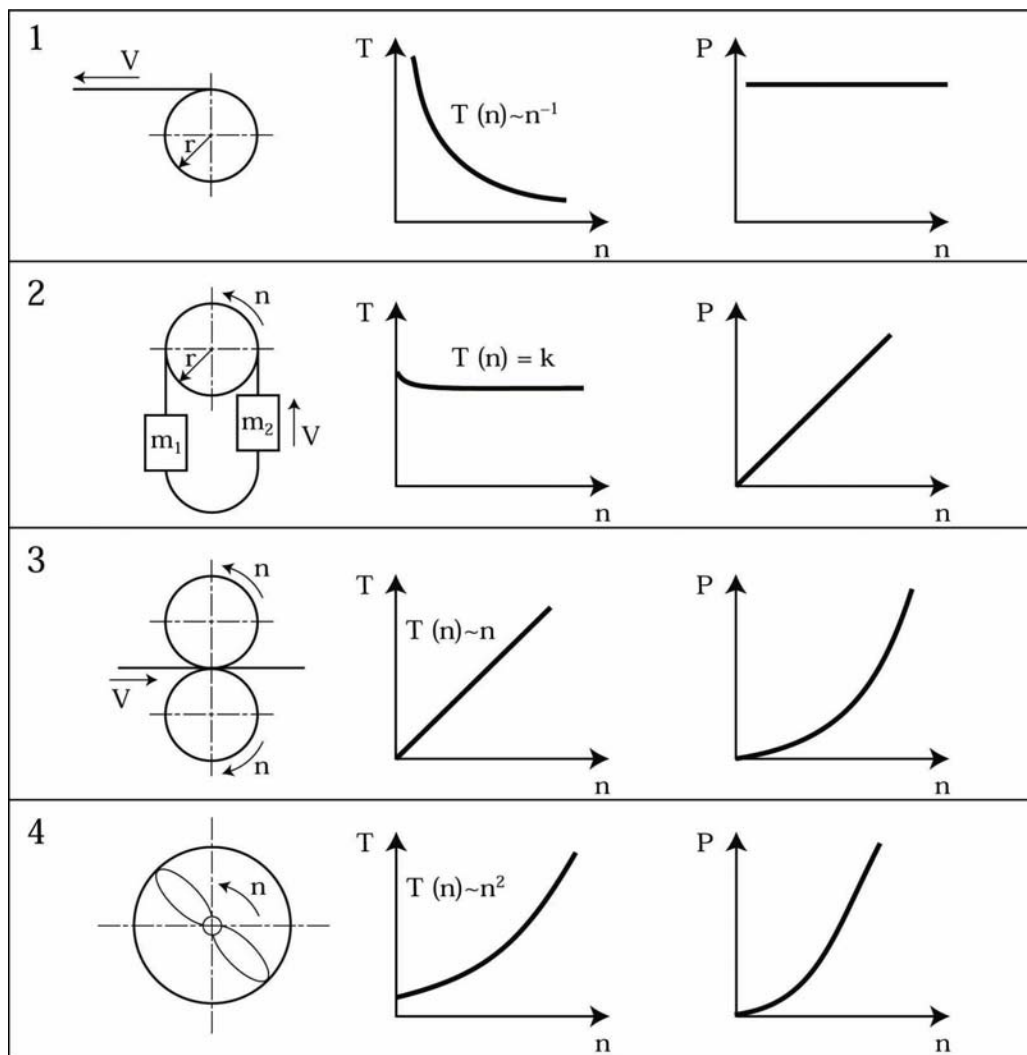


Рис. 1.32 Типовые нагрузочные характеристики

К группе 1 относятся машины для намотки материала с натяжением. Эта группа включает, например, фанерострогальные и металлообрабатывающие станки.

Группа 2 включает ленточные транспортеры, краны, поршневые насосы, а также металлообрабатывающие станки.

К группе 3 относятся такие машины, как прокатные станы, гладильные машины и прочие обрабатывающие установки.

Группа 4 содержит машины, использующие центробежные силы, – центрифуги, центробежные насосы и вентиляторы.

Устойчивое состояние имеет место при равенстве моментов электродвигателя и машины (рис. 1.33).

Кривые пересекаются в точке В.

Если электродвигатель подбирается для привода данной машины, точка пересечения должна быть как можно ближе к точке N, характеризующей номинальные данные электродвигателя.

Во всем диапазоне – от неподвижного состояния и до точки пересечения – должен существовать избыточный крутящий момент. В противном случае работа становится неустойчивой, а стационарное состояние может измениться, если скорость будет слишком малой. Одной из причин этого является необходимость избыточного крутящего момента для разгона.

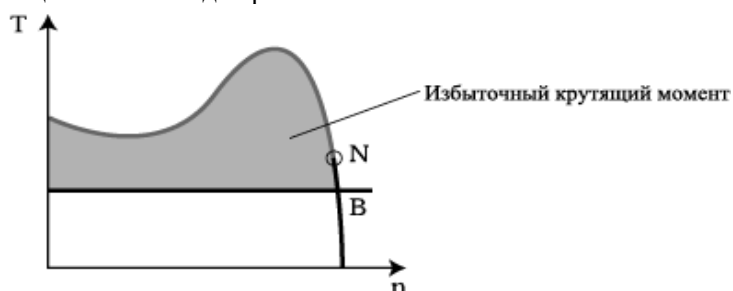


Рис. 1.33 Электродвигатель нуждается в избыточном крутящем моменте для разгона

В частности, для машин групп 1 и 2 необходимо принимать во внимание пусковые условия. Нагрузки этих типов могут иметь начальный пусковой момент, который совпадает по величине с пусковым моментом электродвигателя. Если пусковой момент нагрузки превышает пусковой момент электродвигателя, последний не сможет запуститься.

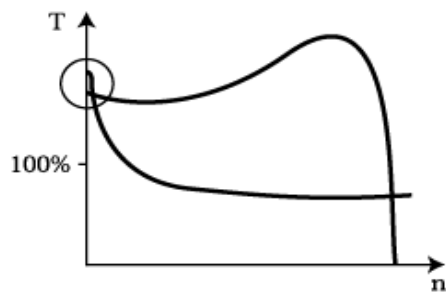


Рис. 1.34 Начальный режим может требовать чрезвычайно большого крутящего момента

Синхронные электродвигатели

И синхронные, и асинхронные электродвигатели имеют одинаковую конструкцию статора. Ротор синхронного электродвигателя (называемый также "индукторным колесом") имеет явно выраженные магнитные полюса и может содержать либо постоянные магниты (у маломощных двигателей), либо электромагниты.

Ротор содержит одну или несколько пар полюсов и поэтому может использоваться в электродвигателях низкой скорости. Синхронный двигатель не может запускаться с помощью только питающей сети. Это объясняется инерционностью ротора и высокой скоростью вращающегося поля.

Вследствие этого ротор необходимо разогнать до скорости вращающегося поля. В случае мощных электродвигателей это обычно производится с помощью вспомогательного двигателя или преобразователя частоты.

Маломощные электродвигатели обычно запускаются с помощью пусковых обмоток (демпферных обмоток), с которыми электродвигатель работает как устройство с короткозамкнутым ротором.

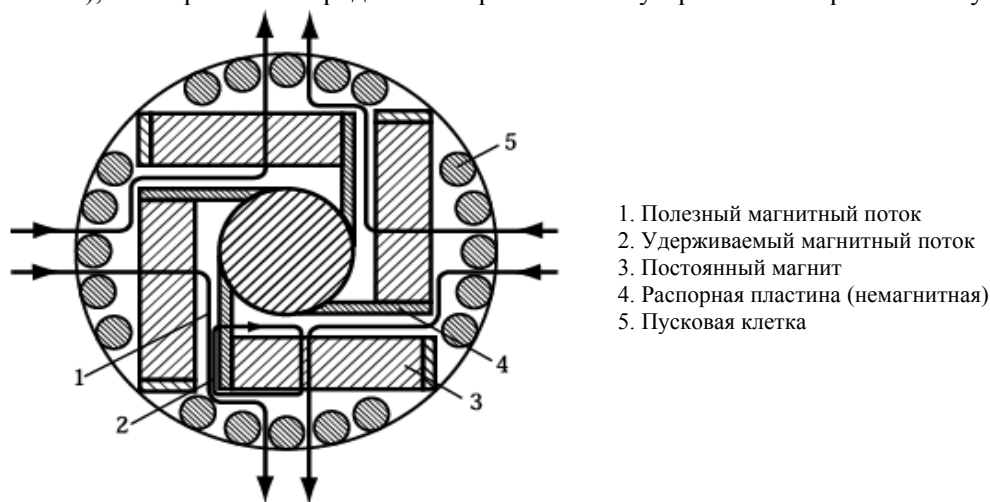


Рис. 1.35 (Роторы синхронных электродвигателей: с постоянными магнитами)

После запуска электродвигатель вращается синхронно с вращающимся полем. Если электродвигатель нагружается, расстояние между полюсами ротора и полюсами вращающегося поля увеличивается. Ротор отстает от вращающегося поля на нагрузочный угол (α) и, следовательно, отстает от своего положения на холостом ходу (рис. 1.35).

Синхронные электродвигатели имеют постоянную скорость, не зависящую от нагрузки.

Электродвигатель не рассчитан на нагрузку, превышающую пусковую мощность между ротором и магнитным полем.

Если нагрузка превышает пусковую мощность, синхронизм прерывается, и электродвигатель останавливается.

Синхронные электродвигатели используются, например, при параллельной работе, когда требуется синхронизация нескольких механически независимых устройств.

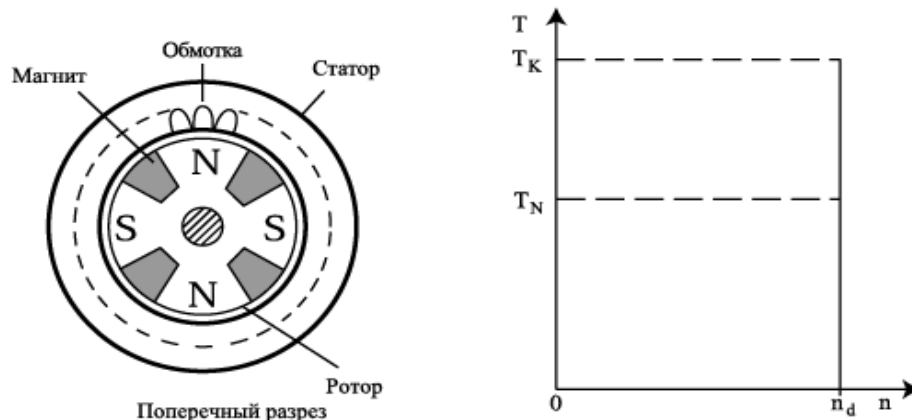


Рис. 1.36 Ротор с явновыраженными полюсами и характеристики крутящего момента

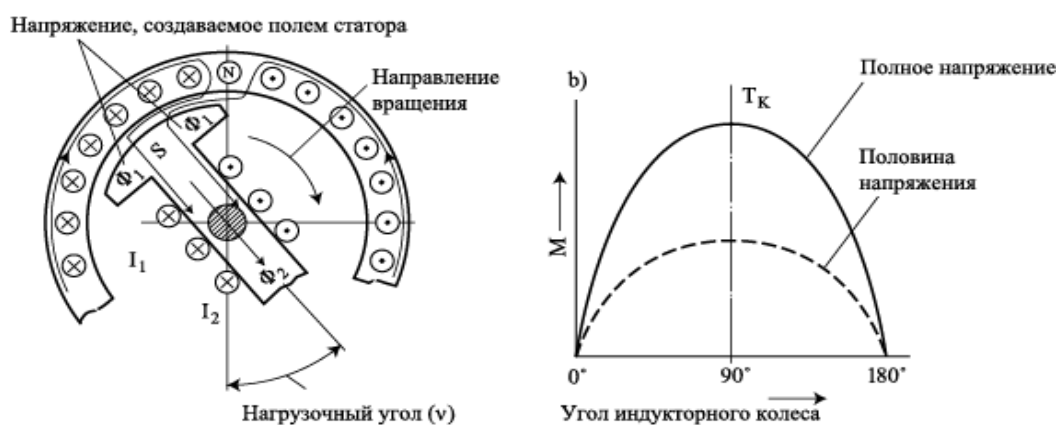


Рис. 1.37 Нагрузочный угол и рабочий крутящий момент в функции угла ротора

Реактивный электродвигатель

Трехфазные реактивные электродвигатели переменного тока развивают скорость подобно обычным трехфазным асинхронным электродвигателям с короткозамкнутым ротором, но после этого становятся синхронными. Поскольку у реактивных электродвигателей ротор имеет простую короткозамкнутую обмотку, они прочны, надежны, не требуют технического обслуживания, не создают радиопомех и сравнительно дешевы. Недостатком этих электродвигателей является то, что они требуют высокой реактивной мощности индуктивного характера и имеют невысокий КПД; поэтому реактивные электродвигатели, используемые в промышленности, обычно имеют выходную мощность не более 15 кВт.

Конструкция

Статор трехфазного реактивного электродвигателя переменного тока не отличается от статора обычного трехфазного асинхронного электродвигателя переменного тока с короткозамкнутым ротором.

Он имеет простую короткозамкнутую обмотку. Однако ротор реактивного синхронного электродвигателя имеет такое же число явно выраженных полюсов, что и его статор. Полюса изготавливаются путем вырезания отверстий по окружности набора металлических пластин ротора или подобной пластинчатой структуры.



Рис. 1.38а Ротор реактивного электродвигателя

Благодаря полюсным отверстиям, которые могут быть заполнены тем же материалом, что и у короткозамкнутой обмотки ротора, на окружности ротора возникает изменяющееся магнитное сопротивление, при этом сопротивление в области полюса наименьшее, а между полюсами – наибольшее.

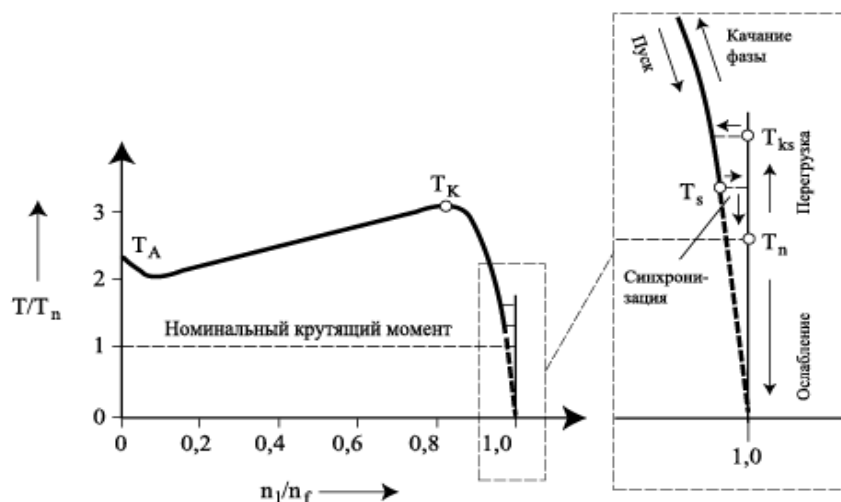


Рис. 1.38b Кривая крутящего момента реактивного электродвигателя

При подключении к источнику трехфазного переменного тока реактивные электродвигатели – точно так же, как и электродвигатели с короткозамкнутым ротором, – развивают крутящий момент и разгоняются почти до синхронной скорости при условии, что во время всего разгона крутящий момент электродвигателя превышает нагрузочный момент. Пусковой ток обычно несколько больше, а пусковой крутящий момент немного меньше, чем у сопоставимых электродвигателей с короткозамкнутым ротором, что объясняется более широким воздушным зазором в области полюсных пазов. Когда ротор практически достигает скорости вращающегося поля, магнитная связь вращающегося поля статора и полюсов ротора приводит к возникновению синхронизирующего момента (реактивного), который вводит электродвигатель в синхронный режим. После такого процесса синхронизации электродвигатель работает на синхронизированной скорости несмотря на спадающую характеристику ротора.

Синхронизированный реактивный электродвигатель работает, в основном, так же, как и синхронный электродвигатель, и его ротор вращается синхронно со скоростью вращающегося поля статора. Таким же образом, как движется полюс вращающегося поля статора, влияя на полюса ротора, в реактивном синхронном электродвигателе магнитный поток вращающегося поля статора старается воздействовать на ротор в области явно выраженных полюсов. Малый воздушный зазор в этих точках обуславливает меньшее магнитное сопротивление в области полюсных пазов. Поскольку магнитному потоку не приходится преодолевать повышенное магнитное сопротивление в области полюсных пазов, возникает синхронный крутящий момент, который сохраняется под нагрузкой.

Вследствие снижения генерации постоянного тока в роторе, синхронный момент реактивного электродвигателя значительно меньше, чем у сопоставимого синхронного двигателя.

Когда синхронизация завершена, рабочие характеристики реактивных электродвигателей становятся подобными характеристикам стандартных синхронных электродвигателей. Ротор вращается со скоростью вращающегося поля статора, которая зависит от частоты сети и числа пар полюсов.

Нагрузочный угол определяет, насколько полюса явнополюсного ротора отстают от вращающегося поля статора. Если электродвигатель перегружен, возникает качание фазы, и он работает как асинхронный двигатель со скоростью, зависящей от нагрузки (рис. 1.38b). Когда нагрузочный момент становится меньше синхронизирующего момента, электродвигатель снова синхронизируется. Если же электродвигатель получает нагрузку, превышающую асинхронный опрокидывающий момент, он останавливается.

Вследствие увеличенного воздушного зазора в области полюсных пазов на окружности ротора, реактивные электродвигатели имеют сравнительно большое рассеяние, что ведет к повышенному потреблению реактивной мощности индуктивного характера и к ее соответствующему разделению. Результатом этого является низкий коэффициент мощности (от 0,4 до 0,5 в номинальном режиме).

При расчете приводов с реактивными электродвигателями необходимо принимать во внимание данную потребность в реактивной мощности.

Трехфазные реактивные синхронные электродвигатели переменного тока используются главным образом в многооперационных применениях, где необходимо, чтобы скорости по отдельным осям были с большой точностью одинаковы, и где использование одного электродвигателя с механической передачей на каждую ось было бы затруднительным и слишком дорогим.

Примерами таких применений могут служить приводы для прядильных машин, насосов и конвейерных систем.

2. Преобразователи частоты

С конца 1960-х годов преобразователи частоты изменились коренным образом, в основном, как результат разработки микропроцессорных и полупроводниковых технологий, а также благодаря снижению их стоимости.

Однако основополагающие принципы, заложенные в преобразователях частоты, остались прежними. В состав преобразователей частоты входят четыре основных элемента:

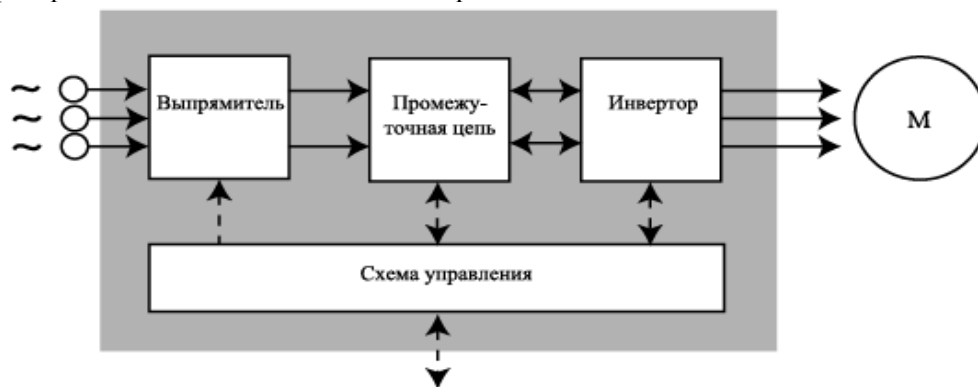


Рис. 2.01. Блок-схема преобразователя частоты

1. Выпрямитель формирует пульсирующее напряжение постоянного тока при его подключении к одно/трехфазной питающей электросети переменного тока. Выпрямители бывают двух основных типов – управляемые и неуправляемые.
2. Промежуточная цепь одного из трех типов:
 - а) преобразующая напряжение выпрямителя в постоянный ток.
 - б) стабилизирующая или сглаживающая пульсирующее напряжение постоянного тока и подающая его на инвертор.
 - в) преобразующая неизменное напряжение постоянного тока выпрямителя в изменяющееся напряжение переменного тока.
- 3 Инвертор, который формирует частоту напряжения электродвигателя. Некоторые инверторы могут также конвертировать неизменное напряжение постоянного тока в изменяющееся напряжение переменного тока.

4. Электронная схема управления, которая посылает сигналы в выпрямитель, промежуточную цепь и инвертор и получает сигналы от данных элементов. Построение управляемых элементов зависит от конструкции конкретного преобразователя частоты (см. рис. 2.02).

Общим для всех преобразователей частоты является то, что все цепи управления управляют полупроводниковыми элементами инвертера. Преобразователи частоты различаются по режиму коммутации, используемому для регулирования напряжения питания электродвигателя.

На рис. 2.02, где показаны различные принципы построения/ управления преобразователя, используются следующие обозначения:

1 – управляемый выпрямитель,

2 – неуправляемый выпрямитель,

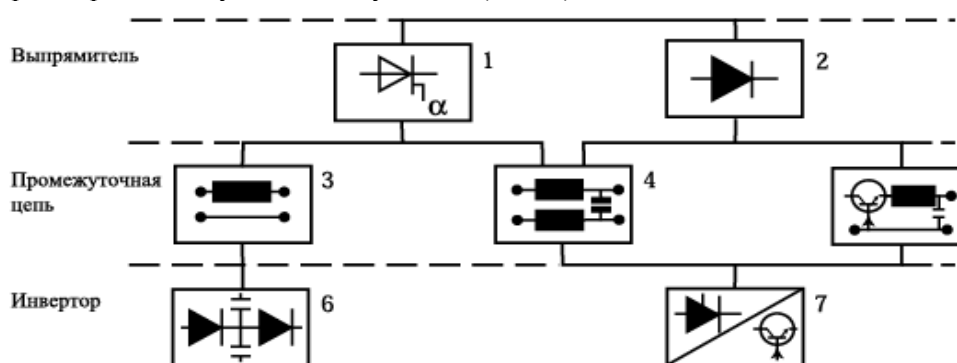
3 – промежуточная цепь изменяющегося постоянного тока,

4 – промежуточная цепь неизменного напряжения постоянного тока

5 – промежуточная цепь изменяющегося постоянного тока,

6 – инвертор с амплитудно-импульсной модуляцией (АИМ)

7 – инвертор с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ)



Инвертор тока (ИТ)

(1+3+6)

Преобразователь с амплитудно-импульсной модуляцией (АИМ)

(1+4+7) (2+5+7)

Преобразователь с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ/VVCplus)

(2+4+7)

Рис. 2.02. Различные принципы построения/управления преобразователями частоты

Для полноты следует упомянуть прямые преобразователи, которые не имеют промежуточной цепи. Такие преобразователи используются в мегаваттном диапазоне мощности для формирования низкочастотного питающего напряжения непосредственно из сети частотой 50 Гц, при этом их максимальная выходная частота составляет около 30 Гц.

Выпрямитель

Питающее напряжение является трехфазным или однофазным напряжением переменного тока с фиксированной частотой (например, $3 \times 400 \text{ В/50 Гц}$ или $1 \times 240 \text{ В/50 Гц}$); характеристики этих напряжений иллюстрируются приведенным ниже рисунком.

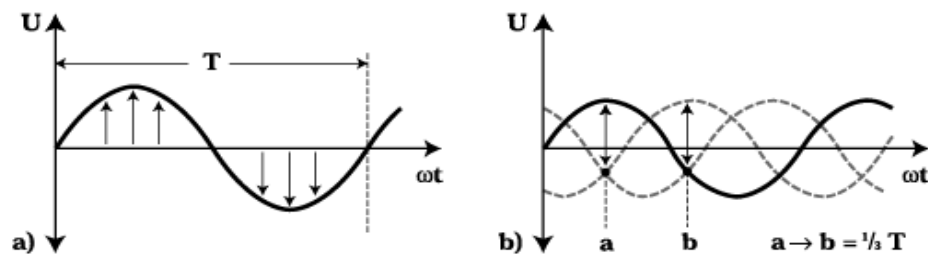


Рис. 2.03. Одно- и трехфазное напряжение переменного тока

На рисунке все три фазы смещены между собой по времени, фазное напряжение постоянно изменяет направление, а частота указывает число периодов в секунду. Частота 50 Гц означает, что на секунду приходится 50 периодов ($50 \times T$), т.е. один период длится 20 миллисекунд.

Выпрямитель преобразователя частоты строится либо на диодах, либо на тиристорах, либо на их комбинации. Выпрямитель, построенный на диодах, является неуправляемым, а на тиристорах – управляемым. Если используются и диоды, и тиристоры, выпрямитель является полупроводящим.

Неуправляемые выпрямители

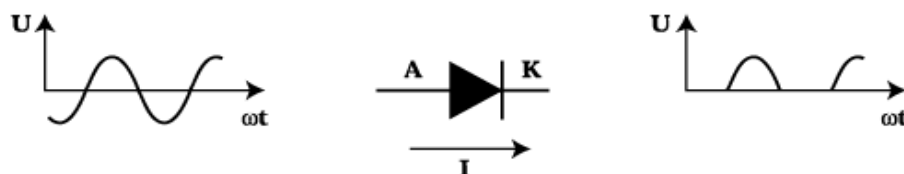


Рис. 2.04 Режим работы диода.

Диоды позволяют току протекать только в одном направлении: от анода (А) к катоду (К). Как и в случае некоторых других полупроводниковых приборов, величину тока диода регулировать невозможно. Напряжение переменного тока преобразуется диодом в пульсирующее напряжение постоянного тока. Если неуправляемый трехфазный выпрямитель питается трехфазным напряжением переменного тока, то и в этом случае напряжение постоянного тока будет пульсировать.

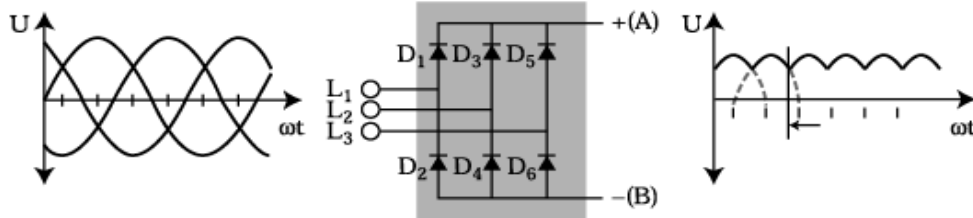


Рис. 2.05 Неуправляемый выпрямитель

На рис. 2.05 показан неуправляемый трехфазный выпрямитель, содержащий две группы диодов. Одна группа состоит из диодов D_1 , D_3 и D_5 . Другая группа состоит из диодов D_2 , D_4 и D_6 . Каждый диод проводит ток в течение трети времени периода (120°). В обеих группах диоды проводят ток в определенной последовательности. Периоды, в течение которых обе группы работают, смещены между собой на $1/6$ времени периода T (60°).

Диоды $D_{1,3,5}$ открыты (проводят), когда к ним приложено положительное напряжение. Если напряжение фазы L_1 достигает положительного пикового значения, то диод D_1 открыт и клемма А получает напряжение фазы L_1 . На два других диода будут действовать обратные напряжения величиной U_{L1-2} и U_{L1-3} .

То же происходит и в группе диодов $D_{2,4,6}$. В этом случае клемма В получает отрицательное фазное напряжение. Если в данный момент фаза L_3 достигает предельного отрицательного значения, диод D_6 открыт (проводит). На оба других диода действуют обратные напряжения величиной U_{L3-1} и U_{L3-2} .

Выходное напряжение неуправляемого выпрямителя равно разности напряжений этих двух диодных групп. Среднее значение пульсирующего напряжения постоянного тока равно $1,35 \times$ напряжение сети.

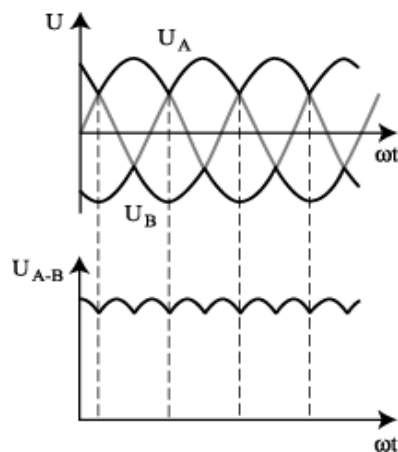


Рис. 2.06 Выходное напряжение неуправляемого трехфазного выпрямителя

Управляемые выпрямители

В управляемых выпрямителях диоды заменены тиристорами. Подобно диоду тиристор пропускает ток только в одном направлении – от анода (А) к катоду (К). Однако в противоположность диоду тиристор имеет третий электрод, называемый "затвором" (G). Чтобы тиристор открылся, на затвор должен быть подан сигнал. Если через тиристор течет ток, тиристор будет пропускать его до тех пор, пока ток не станет равным нулю.

Ток не может быть прерван подачей сигнала на затвор. Тиристоры используются как в выпрямителях, так и в инверторах.

На затвор тиристора подается управляющий сигнал α , который характеризуется задержкой, выражаемой в градусах. Эти градусы указывают запаздывание между моментом перехода напряжения через нуль и временем, когда тиристор открыт.

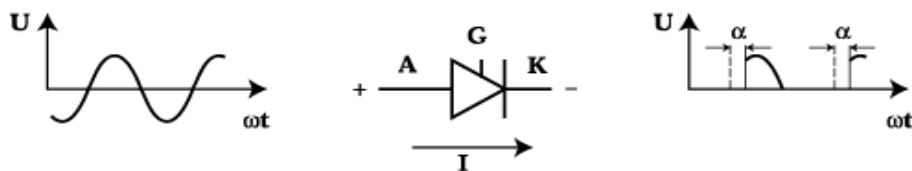


Рис. 2.07 Режим работы тиристора

Если угол α находится в пределах от 0° до 90° , то тиристорная схема используется в качестве выпрямителя, а если в пределах от 90° до 300° – то в качестве инвертора.

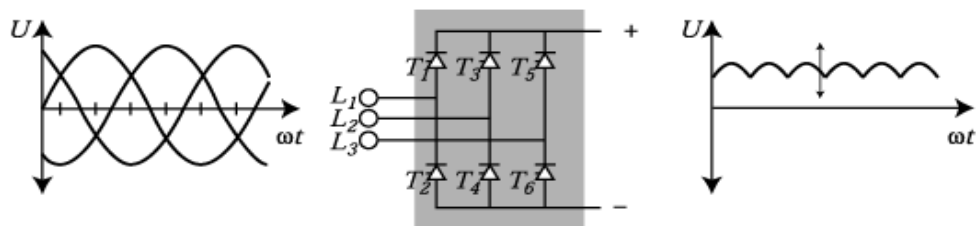


Рис. 2.08 Управляемый трехфазный выпрямитель

Управляемый выпрямитель в своей основе не отличается от неуправляемого за исключением того, что тиристор управляется сигналом α и начинает проводить с момента, когда начинает проводить обычный диод, до момента, который находится на 30° позже точки перехода напряжения через нуль. Регулирование значения α позволяет изменять величину выпрямленного напряжения. Управляемый выпрямитель формирует постоянное напряжение, среднее значение которого равно $1,35 \times \text{напряжение сети} \times \cos \alpha$.

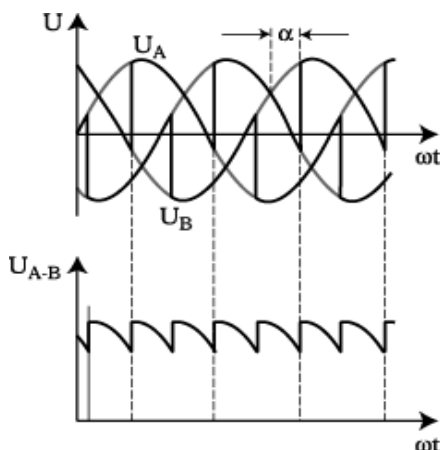


Рис. 2.09 Выходное напряжение управляемого трехфазного выпрямителя

По сравнению с неуправляемым выпрямителем управляемый имеет более значительные потери и вносит более высокие помехи в сеть питания, поскольку при более коротком времени пропускания тиристоры выпрямитель отбирает от сети больший реактивный ток. Преимуществом управляемых выпрямителей является их способность возвращать энергию в питающую сеть.

Промежуточная цепь

Промежуточную цепь можно рассматривать как хранилище, из которого электродвигатель может получать энергию через инвертор. В зависимости от выпрямителя и инвертора, возможны три принципа построения промежуточной цепи.

Инверторы – источники тока (I-преобразователи)

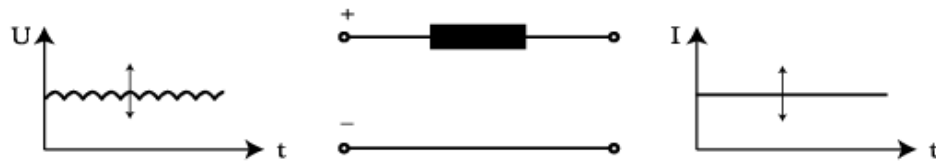


Рис. 2.10 Промежуточная цепь изменяющегося постоянного тока

В случае инверторов – источников тока промежуточная цепь содержит катушку большой индуктивности и сопрягается только с управляемым выпрямителем. Катушка индуктивности преобразует изменяющееся напряжение выпрямителя в изменяющийся постоянный ток. Величину напряжения электродвигателя определяет нагрузка.

Инверторы – источники напряжения (U-преобразователи)

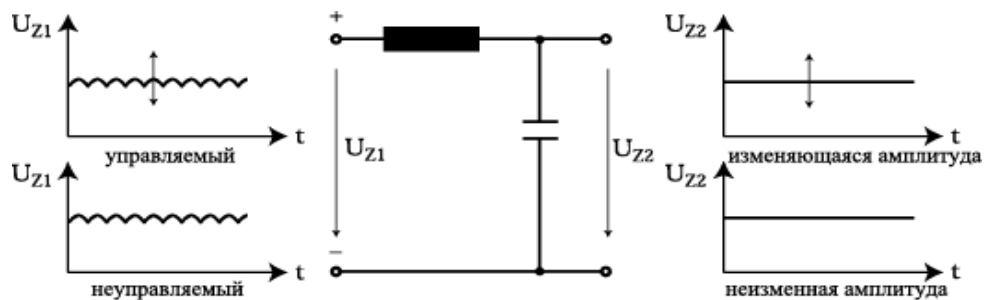


Рис. 2.11 Промежуточная цепь постоянного напряжения

В случае инверторов – источников напряжения промежуточная цепь представляет собой фильтр, содержащий конденсатор, и может сопрягаться с выпрямителем любого из двух типов. Фильтр сглаживает пульсирующее постоянное напряжение (U_{Z1}) выпрямителя.

В управляемом выпрямителе напряжение на данной частоте постоянно и подается на инвертор в качестве истинного постоянного напряжения (U_{Z2}) с изменяющейся амплитудой.

В неуправляемых выпрямителях напряжение на входе инвертора представляет собой постоянное напряжение с неизменной амплитудой.

Промежуточная цепь изменяющегося постоянного напряжения

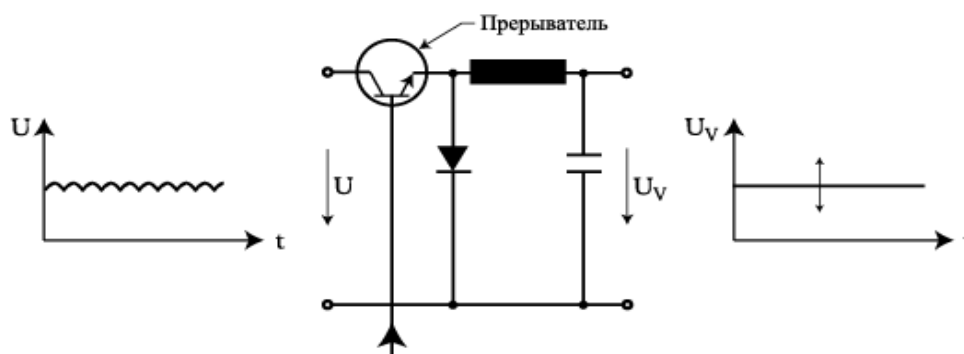


Рис. 2.12 Промежуточная цепь изменяющегося напряжения

В промежуточных цепях изменяющегося постоянного напряжения можно перед фильтром включить прерыватель, как это показано на рис. 2.12.

Прерыватель содержит транзистор, который действует как переключатель, включая и выключая напряжение выпрямителя. Система регулирования управляет прерывателем путем сравнения изменяющегося напряжения после фильтра (U_v) с входным сигналом. Если существует разность, соотношение регулируется путем изменения времени, в течение которого транзистор открыт, и времени, когда он закрыт. Тем самым изменяется эффективное значение и величина постоянного напряжения, что может быть выражено формулой

$$U_v = U \times t_{on} / (t_{on} + t_{off})$$

Когда транзистор прерывателя размыкает цепь тока, катушка индуктивности фильтра делает напряжение на транзисторе бесконечно большим. Чтобы избежать этого прерыватель защищен быстропереключающимся диодом. Когда транзистор открывается и закрывается, как показано на рис. 2.13, напряжение будет наибольшим в режиме 2.

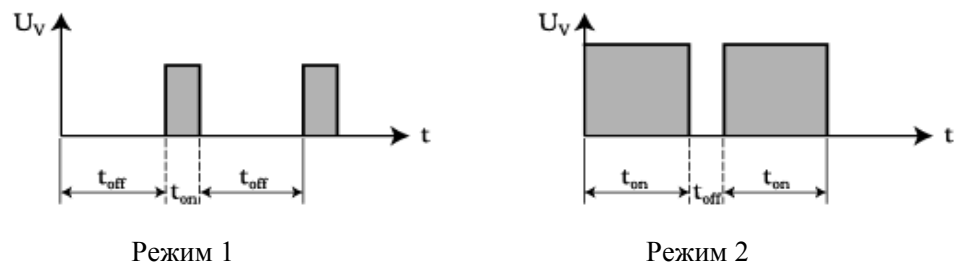


Рис. 2.13 Транзистор-прерыватель управляет напряжением промежуточной цепи

Фильтр промежуточной цепи сглаживает прямоугольное напряжение после прерывателя. Конденсатор и катушка индуктивности фильтра поддерживают постоянство напряжения на данной частоте.

В зависимости от построения промежуточная цепь может также выполнять дополнительные функции, в число которых входят:

- развязка выпрямителя от инвертора
- уменьшение содержания гармоник
- накопление энергии с целью ограничения скачков прерывистой нагрузки.

Инвертор

Инвертор – последнее звено в преобразователе частоты перед электродвигателем и место, где происходит окончательная адаптация выходного напряжения.

Преобразователь частоты обеспечивает штатные рабочие условия во всем диапазоне регулирования путем адаптации выходного напряжения к режиму нагрузки. Это позволяет поддерживать оптимальное намагничивание электродвигателя.

Из промежуточной цепи инвертор получает

- изменяющийся постоянный ток,
- изменяющееся напряжение постоянного тока или
- неизменное напряжение постоянного тока.

Благодаря инвертору, в каждом из этих случаях на электродвигатель подается изменяющаяся величина. Другими словами, в инверторе всегда создается нужная частота напряжения, подаваемого на электродвигатель. Если ток или напряжение являются изменяющимися, инвертор создает только нужную частоту. Если напряжение неизменно, инвертор создает для электродвигателя как нужную частоту, так и нужное напряжение.

Даже если инверторы работают различным образом, их основная структура всегда одинакова. Основными элементами инверторов являются управляемые полупроводниковые приборы, включенные попарно в трех ветвях.

В настоящее время тиристоры в большинстве случаев заменены высокочастотными транзисторами, которые способны открываться и закрываться очень быстро. Частота коммутации обычно находится в пределах от 300 Гц до 20 кГц и зависит от используемых полупроводниковых приборов.

Полупроводниковые приборы в инверторе открываются и закрываются сигналами, формируемыми схемой управления. Сигналы могут формироваться несколькими различными способами.

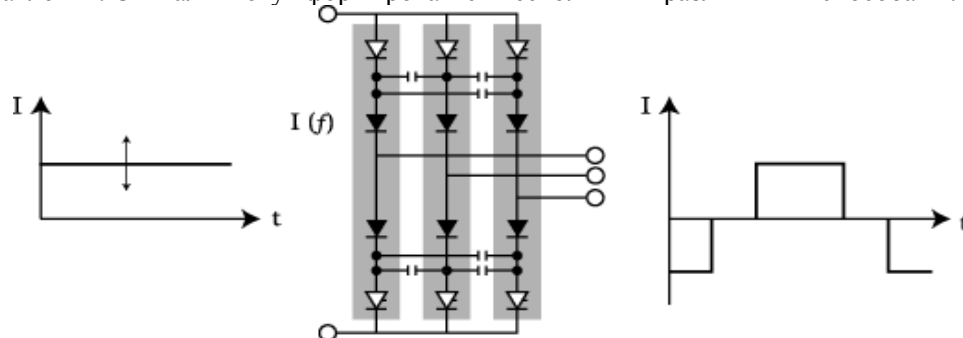


Рис. 2.14 Обычный инвертор для тока промежуточной цепи изменяющегося напряжения.

Обычные инверторы, коммутирующие, главным образом, ток промежуточной цепи изменяющегося напряжения, содержат шесть тиристоров и шесть конденсаторов.

Конденсаторы позволяют тиристорам открываться и закрываться таким образом, что ток в фазных обмотках сдвигается на 120 градусов и должен быть адаптирован к типоразмеру электродвигателя. Когда на клеммы электродвигателя периодически подается ток в последовательности U-V, V-W, W-U, U-V..., возникает прерывистое вращающееся магнитное поле требуемой частоты. Даже если ток электродвигателя при этом имеет почти прямоугольную форму, напряжение электродвигателя будет практически синусоидальным. Однако при включении или выключении тока всегда возникают броски напряжения.

Конденсаторы отделяются от нагрузочного тока электродвигателя диодами.

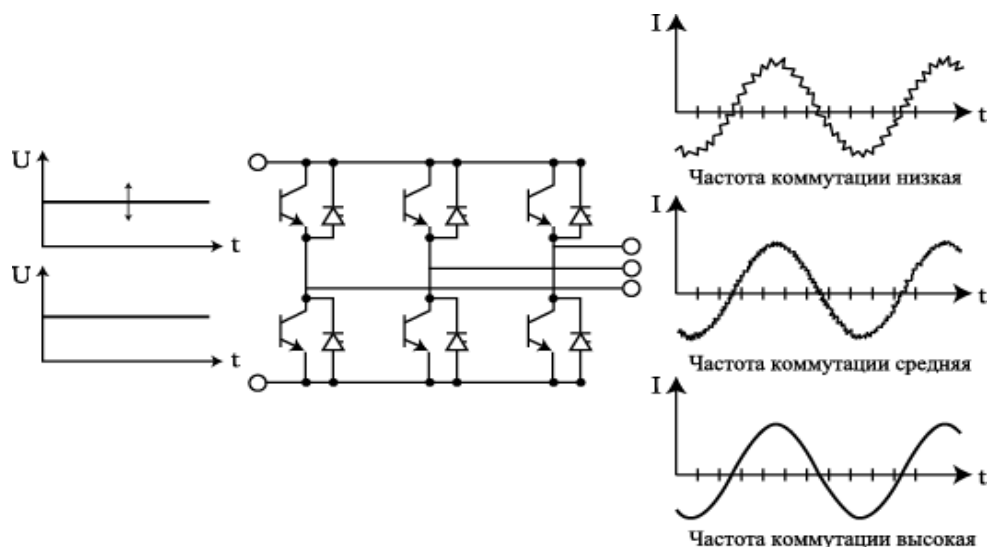


Рис. 2.15 Инвертор для изменяющегося или неизменного напряжения промежуточной цепи и зависимость выходного тока от частоты коммутации инвертора

Инверторы с изменяющимся или неизменным напряжением промежуточной цепи содержат шесть коммутационных элементов и вне зависимости от вида используемых полупроводниковых приборов работают почти одинаково. Схема управления открывает и закрывает полупроводниковые приборы с помощью нескольких различных способов модуляции, изменяя тем самым выходную частоту преобразователя частоты.

Первый способ предназначен для изменяющегося напряжения или тока в промежуточной цепи.

Интервалы, в течение которых отдельные полупроводниковые приборы открыты, расположены в последовательности, используемой для получения требуемой выходной частоты.

Эта последовательность коммутации полупроводниковых приборов управляется величиной изменяющегося напряжения или тока промежуточной цепи. Благодаря использованию генератора колебаний, управляемого напряжением, частота всегда отслеживает амплитуду напряжения. Такой вид управления инвертором называется амплитудно-импульсной модуляцией (АИМ).

Для фиксированного напряжения промежуточной цепи используется другой основной способ.

Напряжение электродвигателя становится изменяющимся благодаря подаче напряжения промежуточной цепи на обмотки электродвигателя в течение более длинных или более коротких интервалов времени.

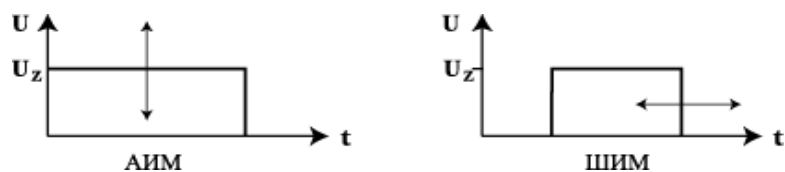


Рис. 2.16 Модуляция амплитуды и длительности импульсов

Частота изменяется путем изменения импульсов напряжения вдоль оси времени – положительно в течение одного полупериода и отрицательно – в течение другого.

Поскольку при этом способе происходит изменение длительности (ширины) импульсов напряжения, его называют широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). ШИМ-модуляция (и связанные с ней способы, например синусоидально-управляемая ШИМ) является наиболее распространенным способом управления инвертора.

При ШИМ-модуляции схема управления определяет моменты коммутации полупроводниковых приборов при пересечении пилообразного напряжения и наложенного синусоидального опорного напряжения (синусоидально-управляемая ШИМ). Другими перспективными способами ШИМ-модуляции являются модифицированные методы широтно-импульсной модуляции, такие как VVC и VVC^{plus}, разработанные корпорацией Danfoss.

Эти два способа описываются ниже, начиная со стр. 82.

Транзисторы

Поскольку транзисторы могут коммутироваться с высокими скоростями, электромагнитные помехи, возникающие при "импульсном" намагничивании электродвигателя, уменьшаются.

Другим преимуществом высокой частоты коммутации является гибкость модуляции выходного напряжения преобразователя частоты, что позволяет вырабатывать синусоидальный ток электродвигателя, в то время как схема управления должна просто открывать и закрывать транзисторы инвертора.

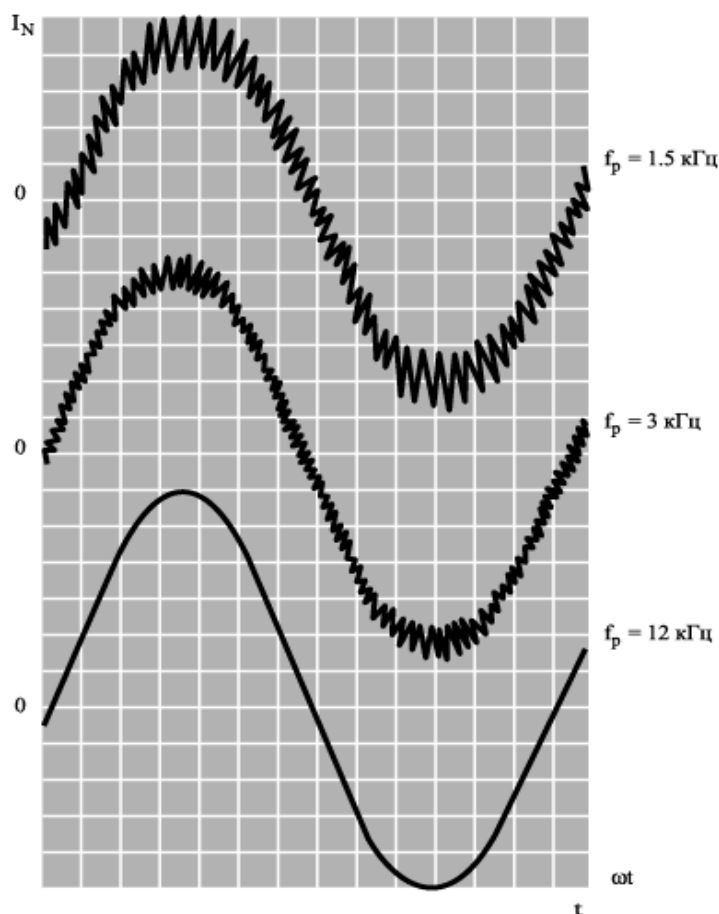


Рис. 2.17 Влияние частоты коммутации на ток электродвигателя

Частота коммутации инвертора – это «палка о двух концах», поскольку высокие частоты могут привести к нагреву электродвигателя и появлению больших пиковых напряжений. Чем выше частота коммутации, тем выше потери.

С другой стороны, низкая частота коммутации может привести к сильному акустическому шуму.

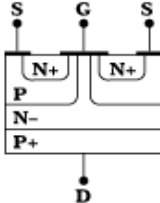
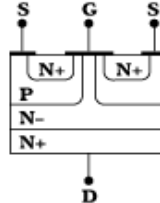
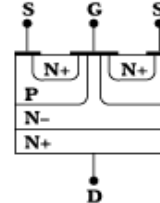
Высокочастотные транзисторы можно разделить на три основные группы:

- Биполярные транзисторы (LTR)
- Униполярные полевые МОП-транзисторы (MOS-FET)
- Биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT)

В настоящее время наиболее широко используются транзисторы IGBT, поскольку в них управляющие свойства транзисторов MOS-FET сочетаются с выходными свойствами транзисторов LTR; кроме того, они имеют надлежащий диапазон мощностей, подходящую проводимость и частоту коммутации, что позволяет значительно упростить управление современными преобразователями частоты.

В случае транзисторов IGBT как элементы инвертора, так и средства управления инвертором помещаются в опрессованный модуль, называемый “интеллектуальным силовым модулем” (IPM).

В приведенной ниже таблице указаны основные различия между транзисторами MOS-FET, IGBT и LTR.

Свойства	Полупроводниковый прибор	MOS-FET	IGBT	LTR
Обозначение на схеме				
Конструкция				
Проводимость Электропроводность Потери		Низкая Высокие	Высокая Незначительные	Высокая Незначительные
Условия запираания Верхний предел		Низкий	Высокий	Средний
Условия коммутации Время отпираания Время запираания Потери		Короткое Короткое Незначительные	Среднее Среднее Средние	Среднее Малое Большие
Условия управления Мощность Сигнал управления		Низкая Напряжение	Низкая Напряжение	Высокая Ток
<i>Рис. 2.18 Сравнение силовых транзисторов</i>				

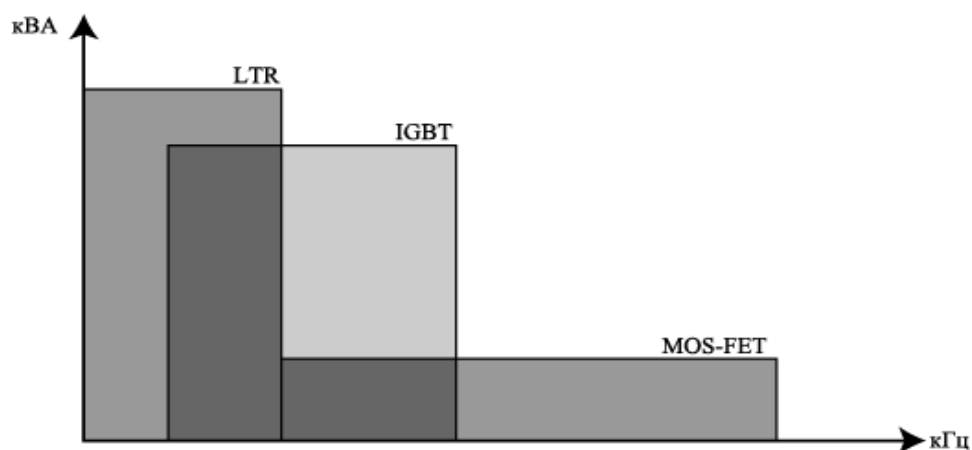


Рис. 2.19 Диапазон мощности и частоты силовых транзисторов

Амплитудно-импульсная модуляция (АИМ)

Амплитудно-импульсная модуляция используется для преобразователей частоты с изменяющимся напряжением промежуточной цепи.

В преобразователях частоты с неуправляемыми выпрямителями амплитуда выходного напряжения формируется прерывателем промежуточной цепи, а если выпрямитель является управляемым, амплитуда получается непосредственно.

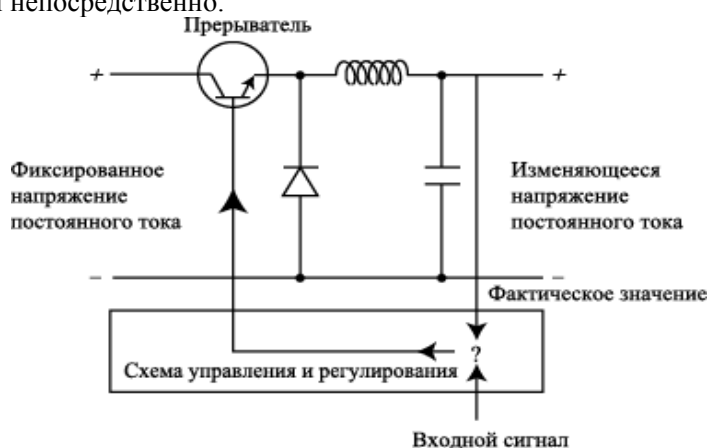


Рис. 2.20 Формирование напряжения в преобразователях частоты с прерывателем в промежуточной цепи

Транзистор (прерыватель) на рис. 2.20 отпирается или запирается схемой управления и регулирования. Значения времени коммутации зависит от номинального значения (входного сигнала) и измеренного сигнала напряжения (фактического значения). Фактическое значение измеряется на конденсаторе.

Катушка индуктивности и конденсатор действуют как фильтр, который сглаживает пульсации напряжения. Пик напряжения зависит от времени открывания транзистора, и если номинальное и фактическое значения различаются между собой, прерыватель работает до тех пор, пока не будет достигнут требуемый уровень напряжения.

Регулирование частоты

Частота выходного напряжения изменяется инвертором в течение периода, при этом полупроводниковые коммутационные устройства срабатывают в течение периода много раз.

Длительность периода можно регулировать двумя способами:

1. непосредственно входным сигналом или
2. с помощью изменяющегося постоянного напряжения, которое пропорционально входному сигналу.

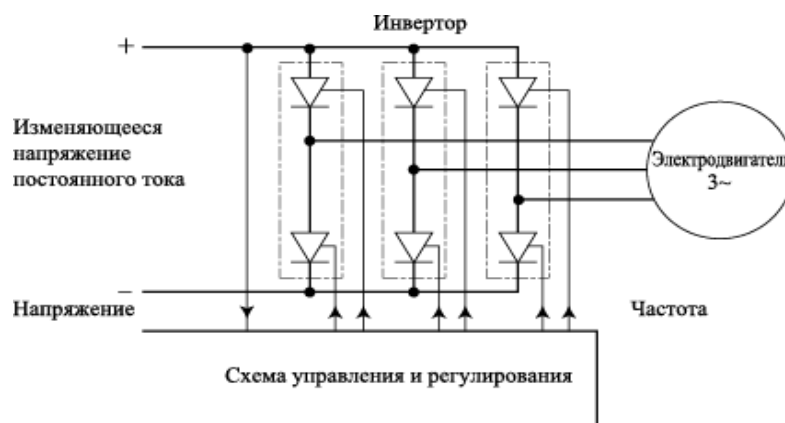


Рис. 2.21а Регулирование частоты с помощью напряжения промежуточной цепи

Широтно-импульсная модуляция (ШИМ)

Широтно-импульсная модуляция является наиболее распространенным способом формирования трехфазного напряжения с соответствующей частотой.

При широтно-импульсной модуляции полное напряжение промежуточной цепи ($\approx \sqrt{2} \times U_{\text{mains}}$) включается и выключается силовыми электронными элементами. Частота повторения ШИМ-импульсов между моментами включения и выключения является переменной и позволяет осуществлять регулировку напряжения.

Имеются три основных варианта задания режимов коммутации в инверторе с управлением посредством широтно-импульсной модуляции.

1. Синусоидально-управляемая ШИМ
2. Синхронная ШИМ
3. Асинхронная ШИМ

Каждая ветвь трехфазного ШИМ-инвертора может иметь два различных состояния (включено и выключено).

Три переключателя образуют восемь возможных коммутационных комбинаций (2^3), и, следовательно, восемь цифровых векторов напряжения на выходе инвертора или на обмотке статора подключенного электродвигателя. Как показано на рис. 2.21b, эти векторы 100, 110, 010, 011, 001, 101 находятся в углах описанного шестиугольника, используя в качестве нулевых векторы 000 и 111.

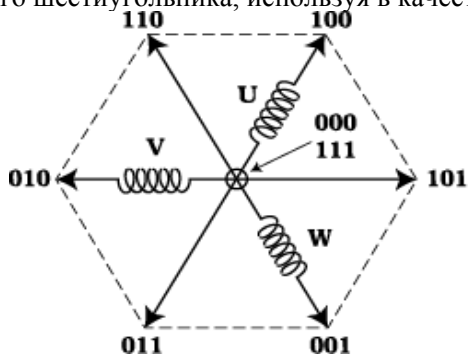


Рис. 2.21b

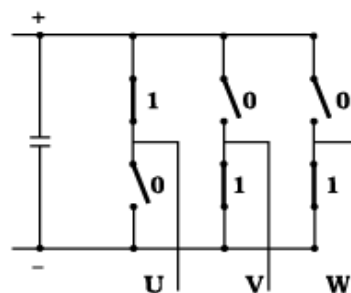


Рис. 2.21c

В случае коммутационных комбинаций 000 и 111 создается один и тот же потенциал на всех трех выходных клеммах инвертора – либо положительный, либо отрицательный относительно промежуточной цепи (см. рис. 2.21c). Для электродвигателя это означает эффект, близкий к короткому замыканию клемм; к обмоткам электродвигателя также приложено напряжение 0 В.

Синусоидально-управляемая ШИМ

При синусоидально-управляемой ШИМ для управления каждым инверторным выходом используется синусоидальное опорное напряжение (U_s). Длительность периода синусоидального напряжения соответствует требуемой основной частоте выходного напряжения. На три опорных напряжения накладывается пилообразное напряжение (U_Δ) (см. рис. 2.22).

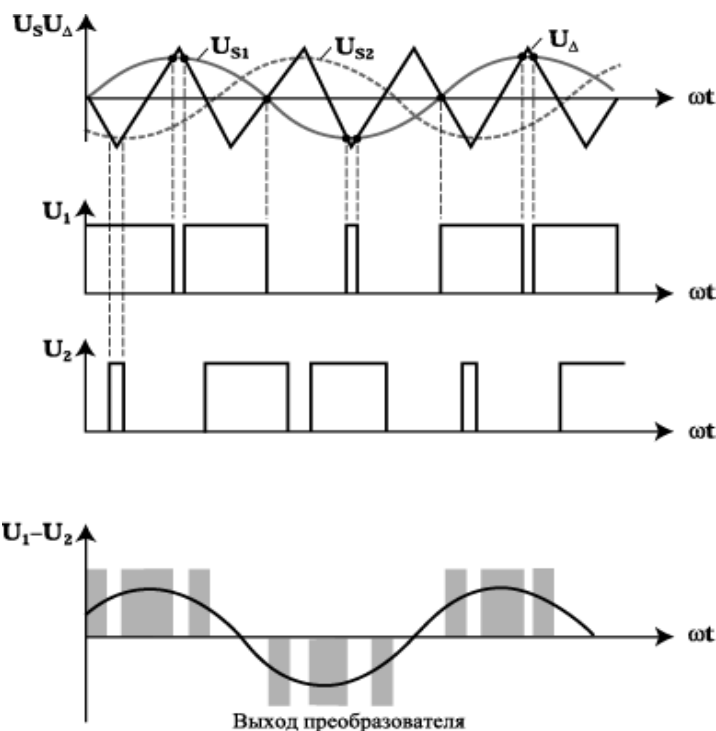


Рис. 2.22 Принцип действия синусоидально-управляемой ШИМ (с двумя опорными напряжениями)

При пересечении пилообразного напряжения и синусоидальных опорных напряжений полупроводниковые приборы инверторов либо открываются, либо закрываются. Пересечения определяются электронными элементами платы управления. Если пилообразное напряжения больше синусоидального, то при уменьшении пилообразного напряжения выходные импульсы изменяются от положительного значения до отрицательного (или от отрицательного до положительного), так что выходное напряжение преобразователя частоты определяется напряжением промежуточной цепи.

Выходное напряжение изменяется с помощью отношения между длительностью открытого и закрытого состояния, причем для получения требуемого напряжения это отношение можно менять. Таким образом, амплитуда отрицательных и положительных импульсов напряжения всегда соответствует половине напряжения промежуточной цепи.

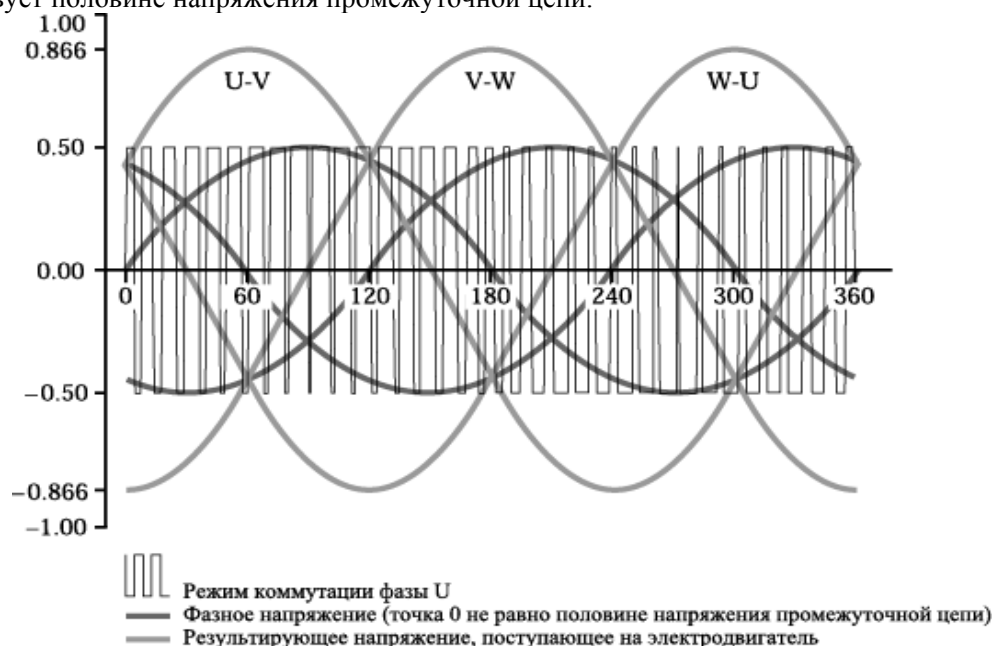


Рис. 2.23 Выходное напряжение синусоидально-управляемой ШИМ

При низких частотах статора время в закрытом состоянии увеличивается и может оказаться настолько большим, что окажется невозможным поддерживать частоту пилообразного напряжения. Это увеличивает период отсутствия напряжения, и электродвигатель будет работать неравномерно. Чтобы избежать этого, на низких частотах можно удвоить частоту пилообразного напряжения.

Фазное напряжение на выходных клеммах преобразователя частоты соответствует половине напряжения промежуточной цепи, деленной на $\sqrt{2}$, т.е. равно половине напряжения питающей сети. Линейное напряжение на выходных клеммах в $\sqrt{3}$ больше фазного напряжения, т.е. равно напряжению питающей сети, умноженному на 0,866.

Инвертор с ШИМ-управлением, который работает исключительно с модуляцией опорным синусоидальным напряжением, может подавать напряжение, равное 86,6 % номинального напряжения (см. рис. 2.23).

При использовании чисто синусоидальной модуляции выходное напряжение преобразователя частоты не может достигнуть напряжения электродвигателя, поскольку выходное напряжение также будет меньше на 13 %.

Однако требуемое дополнительное напряжение можно получить путем уменьшения числа импульсов, когда частота превышает примерно 45 Гц, но этот способ имеет некоторые недостатки. В частности, он вызывает ступенчатое изменение напряжения, что приводит к неустойчивой работе электродвигателя. Если число импульсов уменьшается, возрастают высшие гармоники на выходе преобразователя частоты, что увеличивает потери в электродвигателе.

Иной способ решения данной проблемы связан с использованием других опорных напряжений вместо трех синусоидальных. Эти напряжения могут быть любой формы (например, трапециевидальной или ступенчатой).

Например, одно общее опорное напряжение использует третью гармонику синусоидального опорного напряжения. Получить такой режим коммутации полупроводниковых приборов инвертора, который увеличит выходное напряжение преобразователя частоты, можно путем увеличения амплитуды синусоидального опорного напряжения на 15,5 % и добавления к нему третьей гармоники.

Синхронная ШИМ

Основная трудность использования метода синусоидально-управляемой ШИМ заключается в необходимости определения оптимальных значений времени коммутации и угла для напряжения в течение заданного периода. Эти значения времени коммутации должны устанавливаться таким образом, чтобы допускать только минимум высших гармоник. Такой режим коммутации сохраняется только в течение заданного (ограниченного) диапазона частот. Работа за пределами этого диапазона требует использования другого метода коммутации.

Применение синусоидально-управляемой ШИМ необходимо для оптимизации использования напряжения и минимизации спектра гармоник. Если частота повторения (т.е. частота пилообразного напряжения) становится очень высокой по сравнению с частотой опорного сигнала, эти два сигнала могут действовать асинхронно по отношению друг к другу. При отношениях частот около 10 и ниже будут появляться паразитные гармоники, в связи с чем потребуется синхронизация этих двух сигналов. Такую синхронизацию можно наблюдать в результате так называемого "переключения передачи", которое пригодно для трехфазных приводов переменного тока с низкими динамическими свойствами, где напряжение и частоту можно изменять медленно (обычное V/f -управление).

Асинхронная ШИМ

Необходимость ориентации на поле и обеспечения быстрого действия системы в отношении крутящего момента и регулирования скорости трехфазных приводов переменного тока (включая сервоприводы) требует ступенчатого изменения амплитуды и угла напряжения инвертора. Использование режима коммутации "обычной" или "синхронной" ШИМ не позволяет производить ступенчатое изменение амплитуды и угла напряжения инвертора.

Одним из способов выполнения этого требования является асинхронная ШИМ, при которой вместо синхронизации модуляции выходного напряжения с выходной частотой, как это обычно делается для уменьшения гармоник в электродвигателе, производится модуляция цикла векторного регулирования напряжения, что приводит к асинхронной связи с выходной частотой.

Существуют два основных варианта асинхронной ШИМ:

- SFAVM (Stator Flow-oriented Asynchronous Vector Modulation = асинхронная векторная модуляция, ориентированная на магнитный поток статора)
- 60° AVM (Asynchronous Vector Modulation = асинхронная векторная модуляция).

SFAVM

SFAVM – пространственно-векторный способ модуляции, который позволяет случайным образом, но скачкообразно изменять напряжение, амплитуду и угол инвертора в течение времени коммутации.

Этим достигаются повышенные динамические свойства.

Главной целью применения такой модуляции является оптимизация магнитного потока статора с помощью напряжения статора с одновременным уменьшением пульсаций крутящего момента, поскольку отклонение угла зависит от последовательности коммутации и может вызвать увеличение пульсаций момента. Поэтому последовательность коммутации должна вычисляться таким образом, чтобы свести к минимуму отклонение угла вектора. Переключение между векторами напряжения основано на вычислении желательной траектории магнитного потока в статоре электродвигателя, которая, в свою очередь, определяет крутящий момент воздушного зазора.

Недостатком прежних, обычных ШИМ-систем питания были отклонения амплитуды вектора магнитного потока статора и угла магнитного потока. Эти отклонения неблагоприятно влияли на вращающееся поле (крутящий момент) в воздушном зазоре электродвигателя и вызывали пульсацию крутящего момента. Влияние отклонения амплитуды пренебрежимо мало и может быть дополнительно уменьшено путем увеличения частоты коммутации.

Формирование напряжения электродвигателя

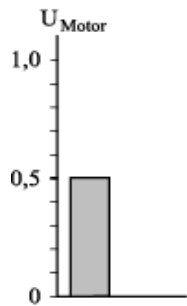
Стабильная работа соответствует регулированию вектора напряжения машины $U_{\text{от}}$ таким образом, чтобы он описывал окружность (см. рис. 2.24).

Вектор напряжения характеризуется величиной напряжения электродвигателя и скорости вращения, что соответствует рабочей частоте в рассматриваемый момент времени. Напряжение электродвигателя формируется путем создания средних значений с помощью коротких импульсов из соседних векторов.

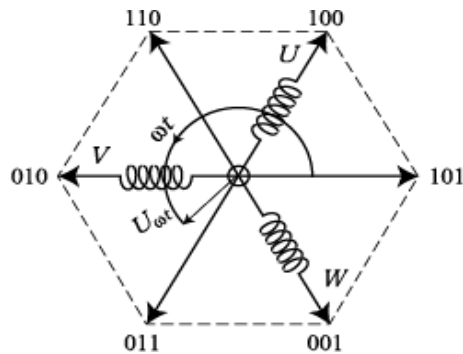
Способ SFAVM, разработанный корпорацией Danfoss, наряду с прочими обладает следующими свойствами:

- Вектор напряжения можно регулировать по амплитуде и фазе без отклонения от установленного задания.
- Последовательность коммутации всегда начинается с 000 или 111. Это позволяет вектору напряжения иметь три режима коммутации.
- Среднее значение вектора напряжения получается с помощью коротких импульсов соседних векторов, а также нулевых векторов 000 и 111.

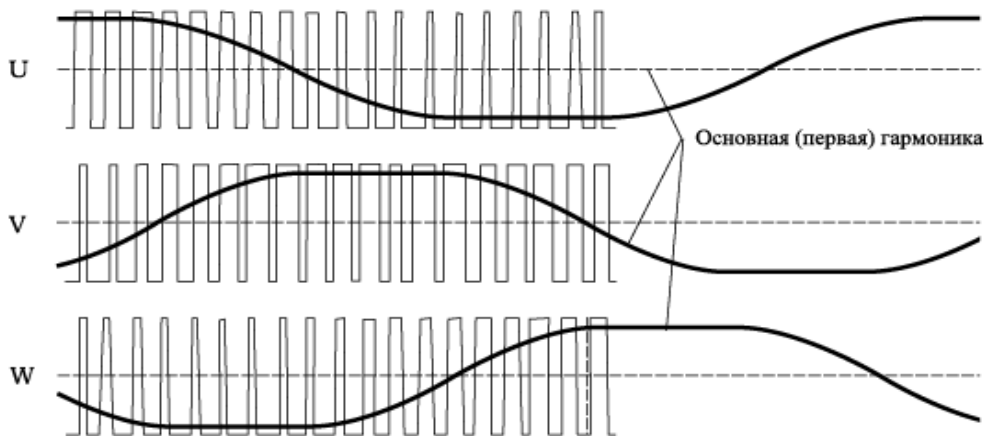
Подробнее формирование напряжения электродвигателя поясняется последующими примерами, которые представлены на рис. 2.24 и 2.25.



a) Заданное выходное напряжение (50 % номинального)



b) Последующее формирование идеального вектора напряжения U_{ax} с помощью ШИМ между соседними регулируемыми векторами напряжения



c) Временная последовательность сигналов управления для трех фаз инвертора – U, V, W

Рис. 2.24 Мгновенное изображение ШИМ-модуляции крутящего момента, основанной на пространственной векторной модуляции (SFAVM), для напряжения электродвигателя, равного 50 % номинального значения

Заданное опорное значение ($U_{\text{от}}$) на рис. 2.24а составляет 50 %. Выходное напряжение формируется с помощью коротких импульсов соседнего вектора – в данном случае 011 и 001, а также 000 и 111 – в виде среднего значения (рис. 2.24б).

На рис. 2.25 показано формирование напряжения электродвигателя, равного 100 % номинального значения.

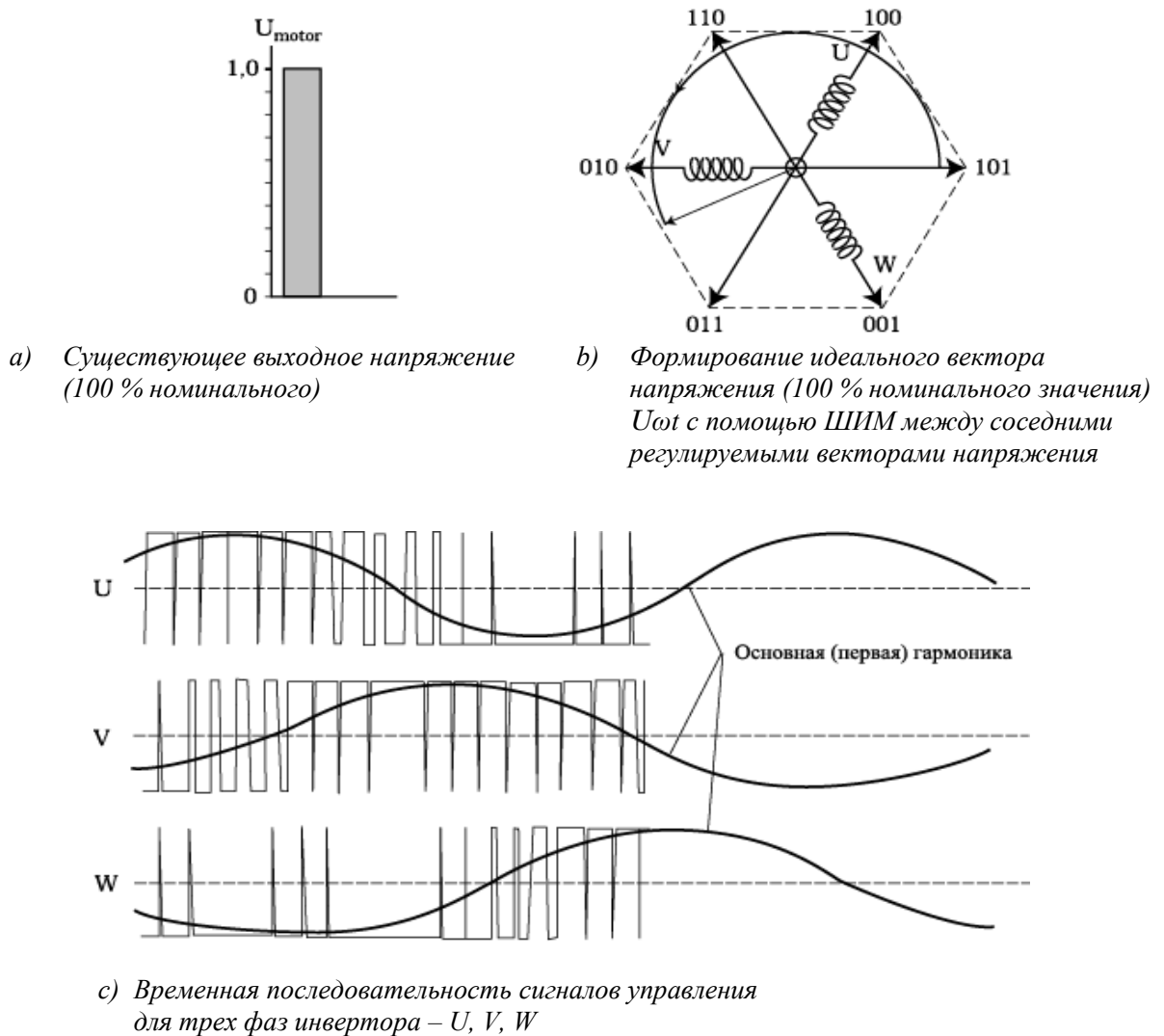


Рис. 2.25 Мгновенное изображение ШИМ-модуляции крутящего момента, основанной на пространственной векторной модуляции (SFVPM), для напряжения, равного 100 % номинального значения

Модуляция SFVPM создает связь между системой управления и силовой схемой инвертора. Модуляция является синхронной относительно управляющей частоты органов управления (см. раздел, посвященный VVCplus) и асинхронной по отношению к основной частоте напряжения электродвигателя.

Синхронизация между управлением и модуляцией является достоинством для средств управления высокой мощности (регулирование вектора напряжения, вектора магнитного потока), поскольку система регулирования вектора напряжения способна управлять непосредственно и без ограничений (можно регулировать амплитуду, угол и угловую скорость).

Чтобы резко сократить расчетное время работы в режиме "он-лайн", в таблице указываются значения напряжения для различных углов. На рис. 2.26 представлена выдержка из таблицы векторной модуляции для метода SFAVM, а также выходное напряжение (на электродвигатель).

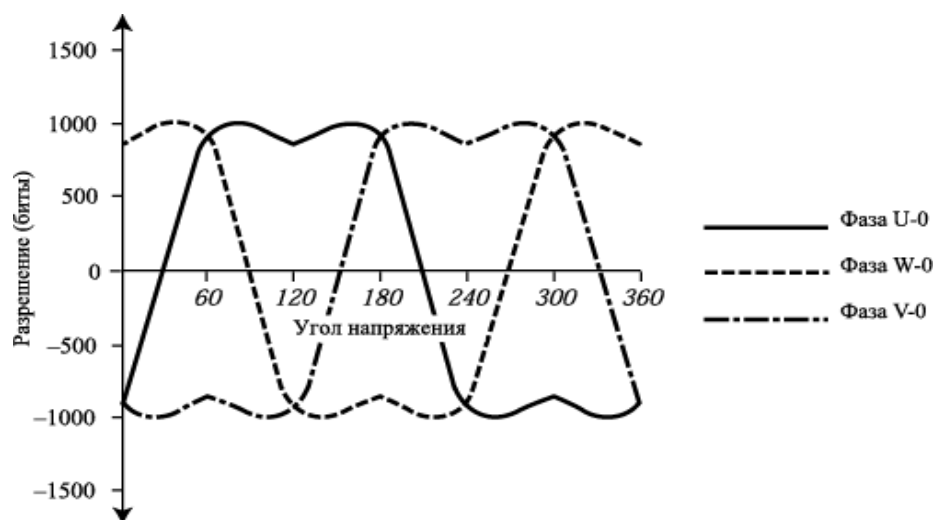


Рис. 2.26 Выходные характеристики, указанные в таблице векторной модуляции (SFAVM)

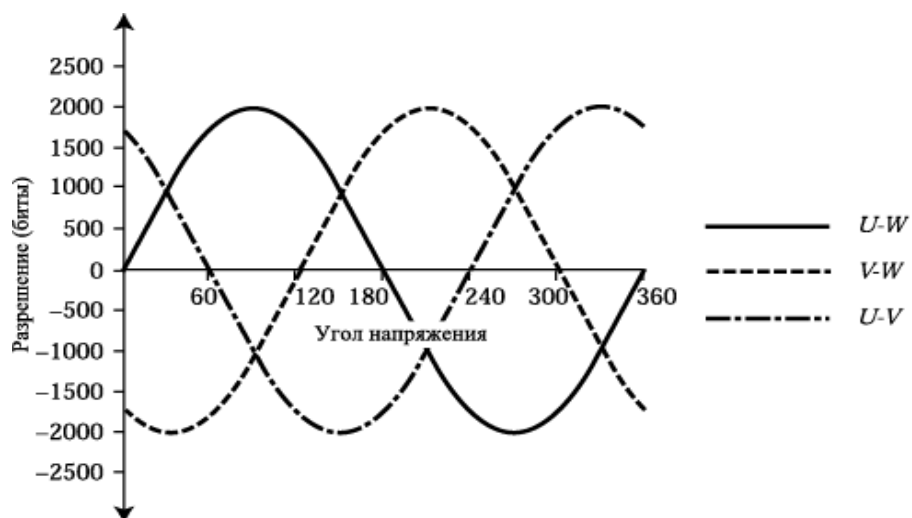


Рис. 2.27 Выходное напряжение (электродвигатель) – (между фазами)

60° AVM

Если вместо режима модуляции SFAVM используется режим 60° AVM (асинхронная векторная модуляция), векторы напряжения можно определить следующим образом:

- В течение периода коммутации используется только один нулевой вектор (000 или 111).
- Последовательность коммутации не всегда начинается с нулевого вектора (000 или 111).
- В течение шестой части периода (60°) инвертор не включает одну фазу. Состояние коммутации сохраняется (0 или 1). В двух остальных фазах коммутация происходит обычным образом.

На рис. 2.28a/b приводится сравнение последовательности коммутации в режимах 60° AVM и SFAVM для короткого интервала (а) и для нескольких периодов.

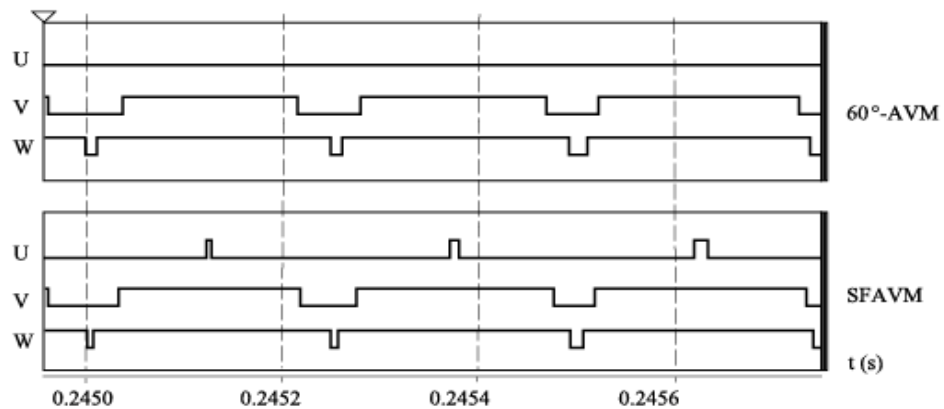


Рис. 2.28a Последовательность коммутации в режимах 60° AVM и SFAVM для нескольких интервалов по 60°

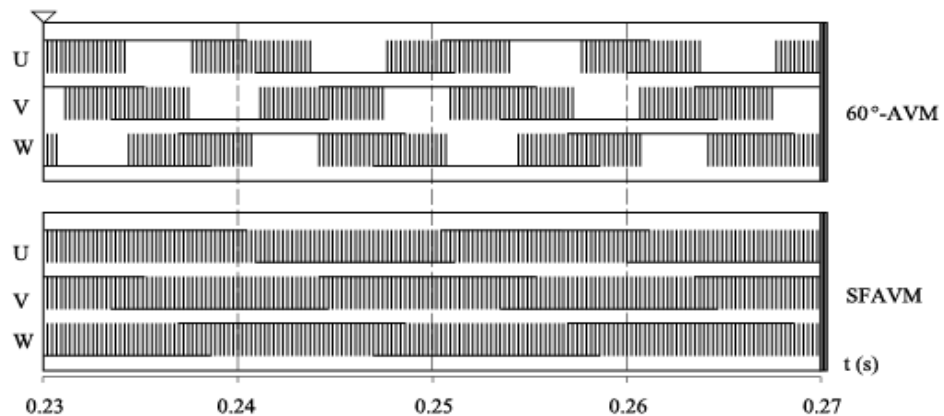


Рис. 2.28b Последовательность коммутации в режимах 60° AVM и SFAVM для нескольких периодов

Схема управления

Схема управления, или плата управления – четвертый главный элемент преобразователя частоты, который предназначен для решения четырех важных задач:

- Управление полупроводниковыми элементами преобразователя частоты.
- Обмен данными между преобразователями частоты и периферийными устройствами.
- Сбор данных и формирование сообщений о неисправностях.
- Выполнение функций защиты преобразователя частоты и электродвигателя.

Микропроцессоры увеличили быстродействие схемы управления, существенно расширили область применения приводов и уменьшили количество необходимых вычислений.

Микропроцессор встраивается в преобразователь частоты и всегда способен определять оптимальную импульсную комбинацию для каждого рабочего состояния.

Схема управления для АИМ-преобразователя частоты

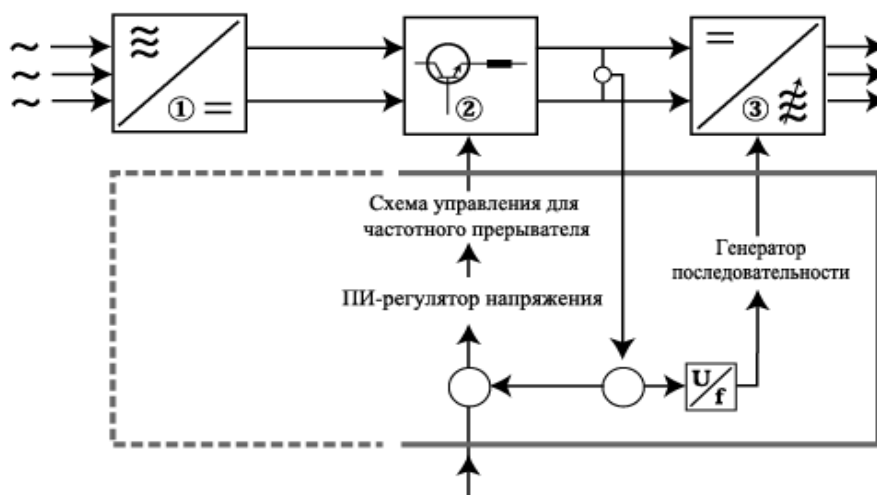


Рис. 2.29 Принцип действия схемы управления для промежуточной цепи, управляемой прерывателем

На рис. 2.29 показан преобразователь частоты с АИМ-управлением и прерывателем промежуточной цепи. Схема управления управляет преобразователем (2) и инвертором (3).

Управление производится по мгновенному значению напряжения промежуточной цепи. Напряжение промежуточной цепи управляет схемой, которая действует как счетчик адреса в памяти для хранения данных. Память хранит выходные последовательности для импульсной комбинации инвертора. Когда напряжение промежуточной цепи увеличивается, счет происходит быстрее, последовательность заканчивается скорее, а выходная частота возрастает.

Что касается управления прерывателем, то напряжение промежуточной цепи сначала сравнивается с номинальным значением опорного сигнала – сигнала напряжения. Ожидается, что этот сигнал напряжения дает правильные значения выходного напряжения и частоты. Если изменяют опорный сигнал и сигнал промежуточной цепи, ПИ-регулятор информирует схему о том, что необходимо изменить время цикла. Это вызывает подстройку напряжения промежуточной цепи по опорному сигналу.

Обычным методом модуляции для управления преобразователем частоты является амплитудно-импульсная модуляция (АИМ). Широтно-импульсная модуляция (ШИМ) является более современным методом, и на последующих страницах подробно описывается, как корпорация Danfoss использует данный метод для получения особых преимуществ.

Принцип управления, разработанный корпорацией Danfoss

На рис. 2.30 показан принцип управления инверторами Danfoss.

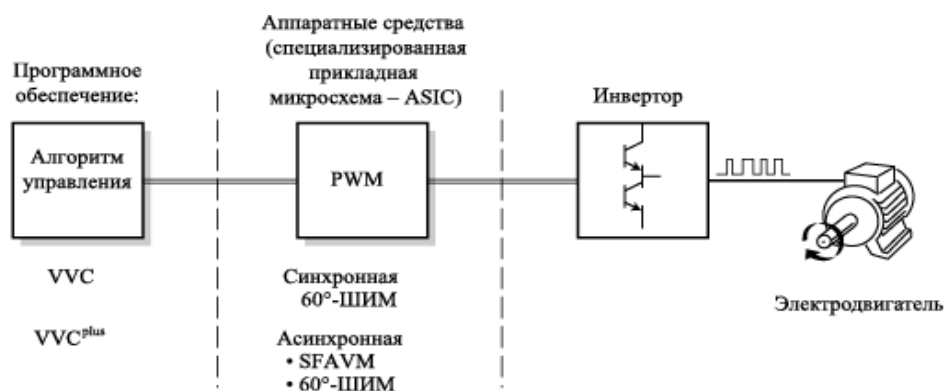


Рис. 2.30 Принципы управления, используемые корпорацией Danfoss

Для вычисления ШИМ-коммутации инвертора используется специальный алгоритм управления, который принимает форму векторного регулирования напряжения VVC (Voltage Vector Control) для преобразователей частоты – источников напряжения.

Система VVC регулирует амплитуду и частоту вектора напряжения путем компенсации нагрузки и скольжения. Угол вектора напряжения определяется относительно установленной частоты электродвигателя (опорной), а также частоты коммутации. Этим обеспечивается:

- полное номинальное напряжение электродвигателя при номинальной частоте (так что нет необходимости снижать мощность)
- диапазон регулирования скорости: 1:25 без обратной связи
- точность скорости: ± 1 % номинальной скорости без обратной связи
- стойкость к изменениям нагрузки

Новейшим усовершенствованием метода VVC является метод VVCplus, с помощью которого непосредственно регулируются амплитуда и угол вектора напряжения, а также частота.

Кроме функций VVC, метод VVC^{plus} также обеспечивает:

- улучшение динамических свойств в диапазоне малых скоростей (0-10 Гц)
- улучшенное намагничивание электродвигателя
- диапазон регулирования скорости: 1:100 без обратной связи
- точность скорости: $\pm 0,5$ % номинальной скорости без обратной связи
- активное демпфирование резонанса
- регулирование крутящего момента (без обратной связи)
- работу на предельном токе

Принцип управления VVC

При управлении методом VVC схема управления применяет математическую модель, которая вычисляет оптимальное намагничивание электродвигателя при изменяющихся нагрузках, используя компенсационные параметры.

Процедура 60°-ШИМ, которая реализована на микросхеме ASIC, дополнительно определяет оптимальные значения времени коммутации полупроводниковых приборов (транзисторов IGBT) инвертора.

Значения времени коммутации определяются в том случае, если:

- В течение шестой части периода (60°) численно наибольшая фаза поддерживается при ее положительном или отрицательном потенциале.
- Обе другие фазы изменяются пропорционально, так что результирующее выходное напряжение (между фазами) снова становится синусоидальным и достигает требуемой амплитуды (рис. 2.32).

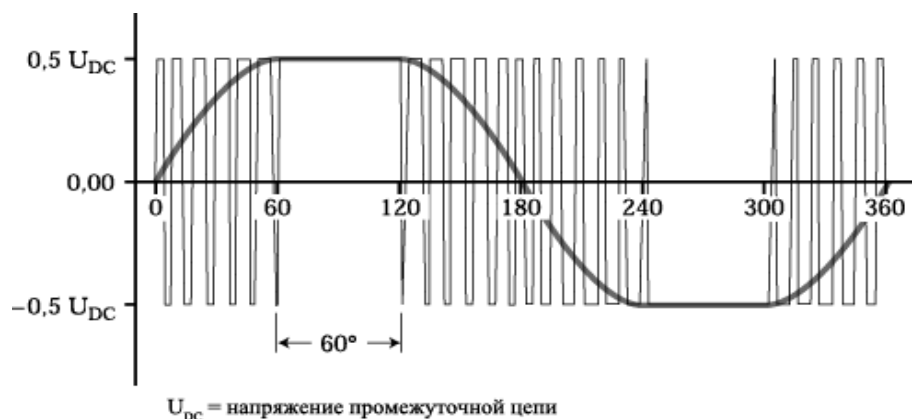


Рис. 2.31 Синхронная 60°-ШИМ (система управления VVC корпорации Danfoss) одной фазы

В противоположность синусоидально-управляемой ШИМ, метод VVC основан на цифровом формировании необходимого выходного напряжения. Благодаря этому, величина выходного напряжения преобразователя частоты достигает номинального значения напряжения питания, ток электродвигателя становится синусоидальным, а электродвигатель работает так же, как и при непосредственном подключении к сети.

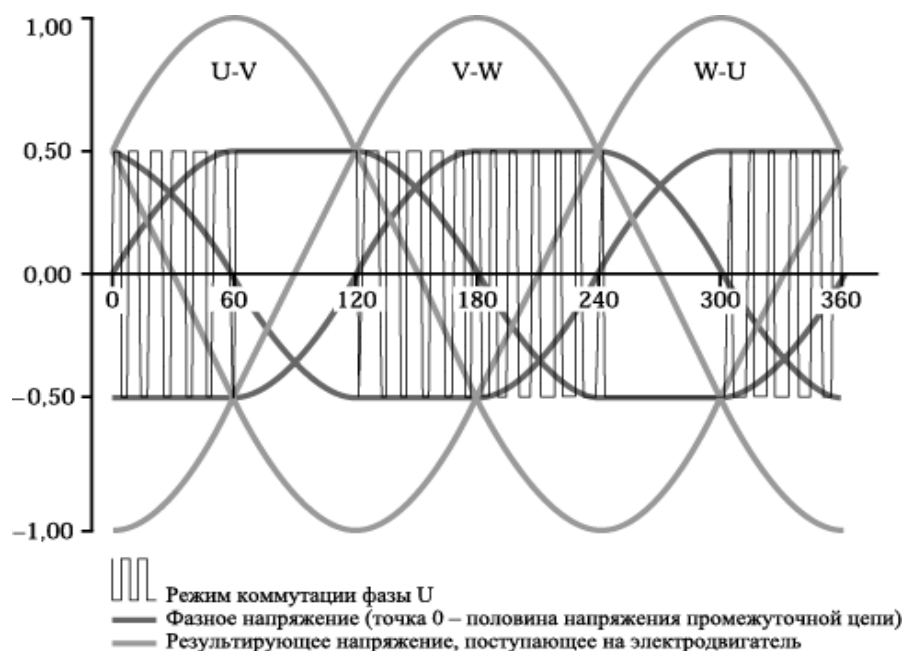


Рис. 2.32 При работе по методу синхронной 60°-ШИМ полное выходное напряжение получается непосредственно

Оптимальное намагничивание электродвигателя достигается потому, что при вычислении оптимального выходного напряжения преобразователь частоты учитывает константы электродвигателя (активное сопротивление и индуктивность статора). Поскольку преобразователь частоты продолжает измерять ток нагрузки, он может регулировать выходное напряжение в соответствии с нагрузкой, так что напряжение электродвигателя адаптируется к типу электродвигателя и следит за режимом нагрузки.

Принцип управления VVC^{plus}

Принцип управления VVC^{plus} использует метод векторной модуляции ШИМ-инверторов – источников неизменного напряжения. Он основан на усовершенствованной модели электродвигателя, которая лучше компенсирует нагрузку и скольжение, поскольку в системе управления имеются и активная, и реактивная составляющие тока, а регулирование угла вектора напряжения существенно улучшает динамические характеристики в диапазоне 0-10 Гц, где стандартные U/F-приводы с ШИМ модуляцией обычно испытывают трудности. Режим коммутации инвертора рассчитывается с использованием принципа SFAVM или 60° AVM, что позволяет добиться очень малого значения пульсирующего крутящего момента в воздушном зазоре (по сравнению с преобразователями частоты, использующими синхронную ШИМ). Пользователь может выбрать предпочтительный для него принцип работы или же позволить инвертору сделать этот выбор автоматически на основе температуры радиатора инвертора. Если температура радиатора ниже 75 °С, для управления используется метод SFAVM, а при температуре выше 75 °С применяется метод 60° AVM. Эти два метода рассматриваются в таблице 2.01.

Выбор	Максимальная частота коммутации инвертора	Свойства
SFAVM	Не более 8 кГц	1. Малые пульсации по сравнению с синхронной 60°-ШИМ (VVC) 2. Нет "переключения передачи"3. Большие коммутационные потери в инверторе
60° AVM	Не более 14 кГц	1. Пониженные коммутационные потери в инверторе (на 1/3 по сравнению с SFAVM) 2. Малые пульсации крутящего момента по сравнению с синхронной 60°-ШИМ (VVC) 3. Относительно большие пульсации крутящего момента по сравнению с SFAVM

Таблица 2.01. Сравнение методов SFAVM и 60° AVM

Принцип управления поясняется с помощью эквивалентной схемы (рис. 2.33) и базовой схемы управления (рис. 2.34). Необходимо иметь в виду, что при отсутствии нагрузки ток в роторе отсутствует ($i_\omega = 0$), а это означает, что напряжение в режиме холостого хода можно выразить следующей формулой:

$$\underline{U} = \underline{U}_L = (R_s + j\omega_s L_s) \times i_s$$

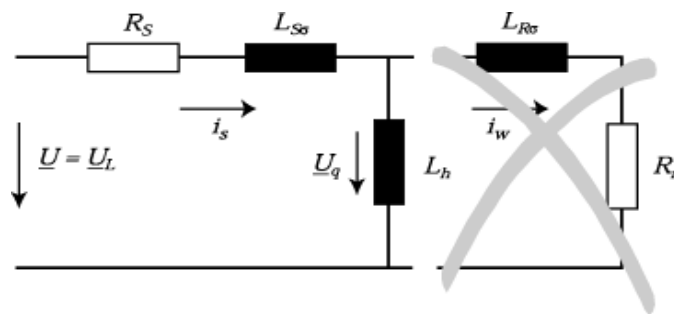


Рис. 2.33а Эквивалентная схема трехфазного электродвигателя переменного тока (не нагруженного)

Здесь:

R_s – активное сопротивление статора

i_s – ток намагничивания электродвигателя

$L_{S\sigma}$ – индуктивность рассеяния статора

L_h – основная индуктивность

$L_S (=L_{S\sigma} + L_h)$ – индуктивность статора и

$\omega_s (=2\pi f_s)$ – угловая скорость вращающегося магнитного поля.

Напряжение холостого хода ($\underline{U}_L$) определяется с помощью параметров электродвигателя (номинальных значений напряжения, тока, частоты, скорости).

Под нагрузкой в роторе протекает активный ток (i_w). Для обеспечения протекания этого тока на двигатель подается дополнительное напряжение ($\underline{U}_{Comp}$).

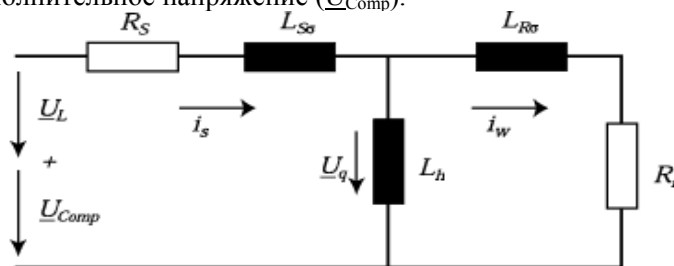


Рис. 2.33б Эквивалентная схема трехфазных электродвигателей переменного тока (нагруженных)

Дополнительное напряжение $\underline{U}_{Comp}$ определяется с использованием тока холостого хода и активного тока, также как и диапазона скоростей (низкая или высокая скорость). Значение напряжения и диапазон скоростей определяются по параметрам электродвигателя.

f	частота (внутренняя)
f_s	установленная опорная частота
Δf	расчетная частота скольжения
I_{SX}	реактивные составляющие тока (расчетные)
I_{SY}	активные составляющие тока (расчетные)
I_{SX0}, I_{SY0}	токи холостого хода по осям x и y (расчетные)
I_u, I_v, I_w	токи фаз U, V и W (измеренные)
R_s	активное сопротивление статора
R_r	активное сопротивление ротора
θ	угол векторов напряжения
θ_0	значение угла θ на холостом ходу
$\Delta\theta$	часть угла θ , зависящая от нагрузки (компенсация)
T_C	температура проводника тепла / радиатора

U_{dc}	напряжение промежуточной цепи постоянного тока
$\underline{U}_L$	вектор напряжения холостого хода
$\underline{U}_S$	вектор напряжения статора
U_{Comp}	напряжение компенсации, зависящее от нагрузки
U	напряжение питания электродвигателя
X_h	реактивное сопротивление
X_1	реактивное сопротивление утечки статора
X_2	реактивное сопротивление утечки ротора
ω_s	частота статора
L_S	индуктивность статора
L_{Ss}	индуктивность рассеяния статора
L_{Rs}	индуктивность рассеяния ротора
i_S	фазный ток электродвигателя (полный ток)
i_W	активный ток (электродвигателя)

Расшифровка обозначений на рис. 2.33 (стр. 87) и рис. 2.34 (стр. 89)

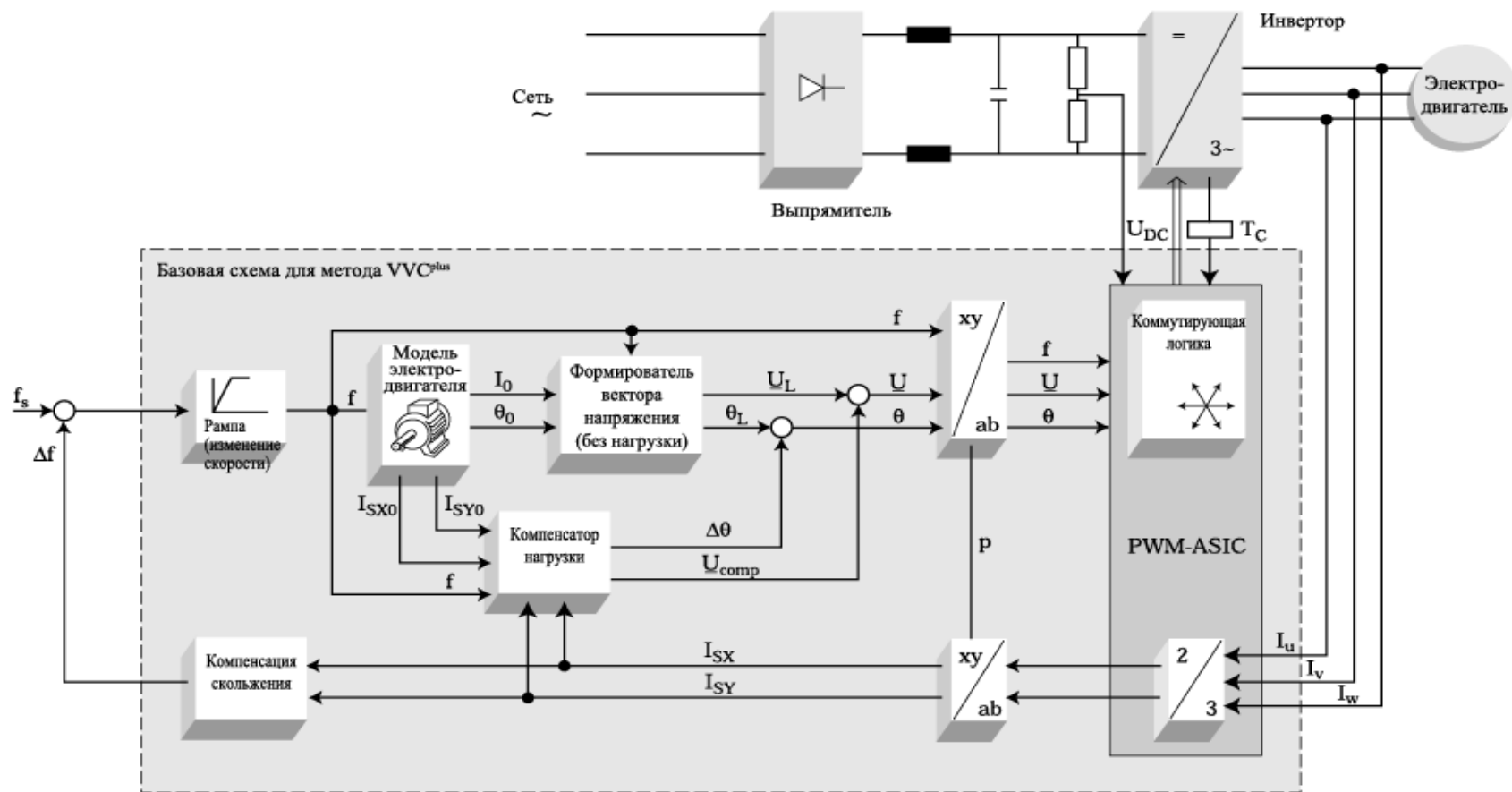


Рис. 2.34 Базовая схема управления по методу VVC^{plus}

Как показано на рис. 2.34, модель электродвигателя вычисляет номинальные параметры холостого хода (токи и углы) для компенсатора нагрузки (I_{sx0} , I_{sy0}) и формирователя вектора напряжения (I_o , θ_o). Знание фактических параметров холостого хода позволяет гораздо точнее определить нагрузочный момент на валу электродвигателя.

Формирователь вектора напряжения вычисляет вектор напряжения холостого хода (U_L) и угол (θ_L) вектора этого напряжения, исходя из частоты статора, тока холостого хода, сопротивления и индуктивности статора (см. рис. 2.33а). Результирующая амплитуда вектора напряжения представляет собой составную величину, к которой прибавлено начальное напряжение и напряжение компенсации нагрузки. Угол θ_L вектора напряжения – это сумма четырех составляющих, который является абсолютной величиной, определяющей угловое положение вектора напряжения.

Поскольку разрешающая способность по выходной частоте определяется разрешением составляющих угла вектора напряжения (θ) и частоты статора (F), то эти параметры представлены в виде 32-битовых значений. Одна из составляющих угла θ – угол холостого хода – включена для того, чтобы улучшить регулирование угла вектора напряжения во время разгона на малой скорости. Этим достигается хорошее регулирование угла тока, поскольку только ток при крутящем моменте будет иметь амплитуду, которая соответствует фактической нагрузке. При отсутствии этой составляющей – угла холостого хода – вектор тока стремился бы возрасть и чрезмерно намагничивать электродвигатель без создания крутящего момента.

Измеренные токи электродвигателя (I_u , I_v и I_w) используются для вычисления реактивной (I_{sx}) и активной (I_{sy}) составляющих тока.

На основе вычисленных фактических токов и значений вектора напряжения компенсатор нагрузки определяет крутящий момент в воздушном зазоре и рассчитывает, какое дополнительное напряжение (U_{Comp}) требуется для поддержания номинального значения уровня магнитного поля. Производится коррекция ожидаемого углового отклонения ($\Delta\theta$), обусловленного нагрузкой на валу электродвигателя. Вектор выходного напряжения представляется в полярных координатах (p). Это допускает непосредственную перемодуляцию и упрощает связь с микросхемой ШИМ.

Регулирование вектора напряжения весьма полезно на малых скоростях, где можно путем надлежащего регулирования угла вектора напряжения существенно улучшить динамические характеристики по сравнению с методом V/f -регулирования. Кроме того, достигаются устойчивые рабочие характеристики статора, поскольку система управления может вычислять нагрузочный крутящий момент по векторным значениям напряжения и тока лучше, чем в случае использования для этого скалярных сигналов (амплитудных значений).

Управление по полю (векторное управление)

Векторное управление может быть организовано несколькими способами. Основным различием способов являются критерии, которые используются при вычислении значений активного тока, тока намагничивания (магнитного потока) и крутящего момента.

При сравнении между собой двигателей постоянного тока и трехфазных асинхронных двигателей (рис. 2.35) выявляются определенные проблемы. На постоянном токе параметры, которые важны для создания крутящего момента, – магнитный поток (Φ) и ток якоря – фиксированы по отношению к размеру и расположению фазы и определяются ориентацией обмоток возбуждения и положением угольных щеток (рис. 2.35a).

В двигателе постоянного тока ток якоря и ток, создающий магнитный поток, расположены под прямым углом друг к другу и их значения не очень велики. В асинхронном электродвигателе положение магнитного потока (Φ) и тока ротора (I_1) зависит от нагрузки. Кроме того, в противоположность двигателю постоянного тока, фазовые углы и ток не могут быть непосредственно определены по размеру статора.

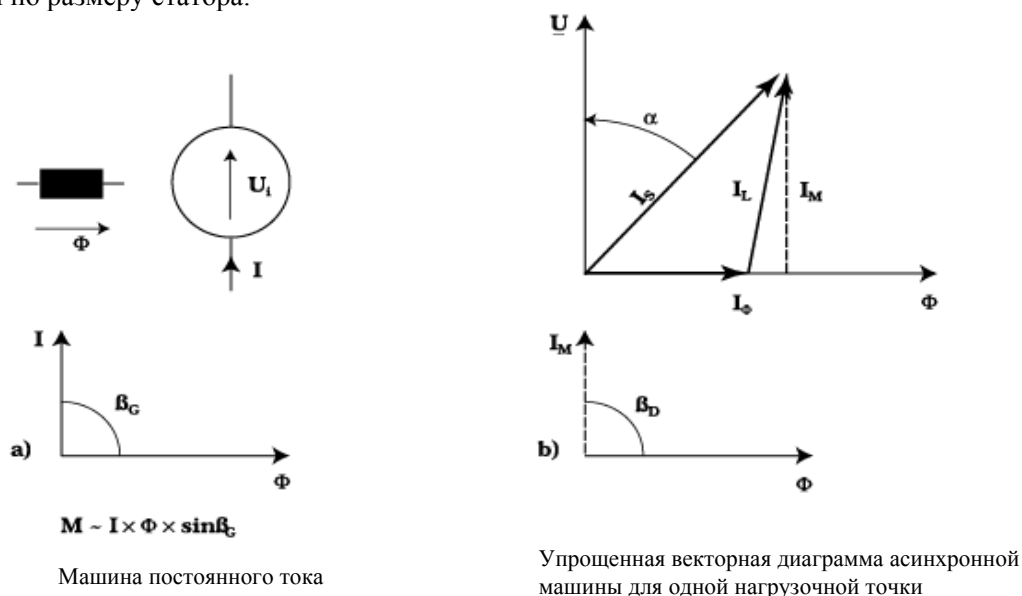


Рис. 2.35. Сравнение машины постоянного тока и асинхронной машины переменного тока

Однако с помощью математической модели можно вычислить крутящий момент по зависимости между магнитным потоком и током статора.

Из измеренного тока статора (I_S) выделяется составляющая (I_W), которая создает крутящий момент с магнитным потоком (Φ) при прямых углах между двумя этими переменными (I_B). Тем самым создается магнитный поток электродвигателя (рис. 2.36).

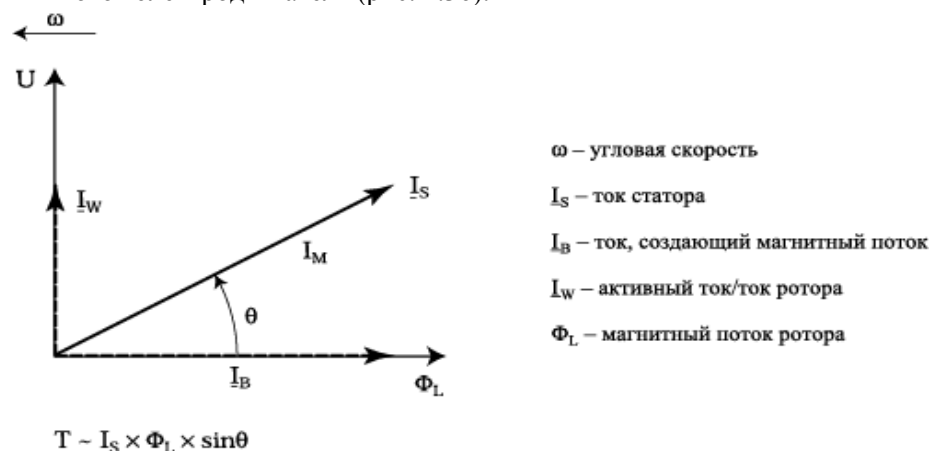


Рис. 2.36. Расчет составляющих тока для регулирования по полю

С помощью этих двух составляющих тока можно независимо влиять на крутящий момент и магнитный поток. Однако ввиду определенной сложности вычислений на основе динамической модели электродвигателя, такие вычисления рентабельны только в цифровых приводах. Поскольку по такому методу регулирование возбуждения, которое не зависит от нагрузки, отделено от регулирования крутящего момента, то можно динамически управлять асинхронным двигателем так же, как и двигателем постоянного тока – при условии, что имеется сигнал обратной связи. Этот способ управления трехфазным двигателем переменного тока обладает следующими преимуществами:

- хорошая реакция на изменения нагрузки
- точное регулирование мощности
- полный крутящий момент при нулевой скорости
- рабочие характеристики сравнимы с характеристиками приводов постоянного тока.

Регулирование V/f-характеристик и вектора магнитного потока

В последние годы разработаны системы регулирования скорости трехфазных двигателей переменного тока на основе двух разных принципов управления:

нормального V/f-регулирования, или СКАЛЯРНОГО управления, и регулирования вектора магнитного потока.

Оба метода имеют свои преимущества, зависящие от конкретных требований к рабочим характеристикам привода (динамике) и точности.

Регулирование V/f-характеристик имеет ограниченный диапазон регулирования скорости (приблизительно 1:20), и на малой скорости требуется другой принцип регулирования (компенсация).

При использовании этого метода относительно просто адаптировать преобразователь частоты к электродвигателю, причем регулирование невосприимчиво к мгновенным изменениям нагрузки во всем диапазоне скоростей.

В приводах с регулированием магнитного потока преобразователь частоты должен точно конфигурироваться под электродвигатель, что требует детального знания его параметров. Также необходимы дополнительные компоненты для получения сигнала обратной связи.

Некоторые преимущества этого типа управления:

- быстрая реакция на изменения скорости и широкий диапазон скоростей
- лучшая динамическая реакция на изменения направления
- обеспечивается единый принцип управления во всем диапазоне скоростей.

Для пользователя оптимальным решением было бы сочетание наилучших свойств обоих принципов.

Очевидно, что одновременно необходимы и такое свойство, как устойчивость к ступенчатой нагрузке/разгрузке во всем диапазоне скоростей, что обычно является сильной стороной V/f-регулирования, и быстрая реакция на изменения задания скорости (как при управлении по полю).

Принцип управления VVC^{plus} , разработанный корпорацией Danfoss, объединяет в себе устойчивость V/f-регулирования с улучшенными динамическими характеристиками методов управления по полю и устанавливает новые стандарты для приводов с регулированием скорости.

Компенсация скольжения по методу VVC^{plus}

Независимо от фактического момента нагрузки, напряженность магнитного поля электродвигателя и скорость вращения его вала поддерживаются такими, чтобы обеспечить значение, соответствующее уставке скорости. Это осуществляется с помощью двух корректирующих функций: компенсацией скольжения и компенсатором нагрузки.

При компенсации скольжения к сигналу скорости добавляется расчетная частота скольжения (Δf), что позволяет поддерживать требуемую опорную частоту (рис. 2.31). Повышение частоты статора ограничивается временем разгона (рампой), определяемым пользователем. Расчетное значение скольжения получается из вычисленного нагрузочного момента и фактической напряженности магнитного поля, т.е. также принимается во внимание и ослабление магнитного поля.

На рис. 2.37 иллюстрируется статический режим системы управления и зависимости крутящего момента от скорости.

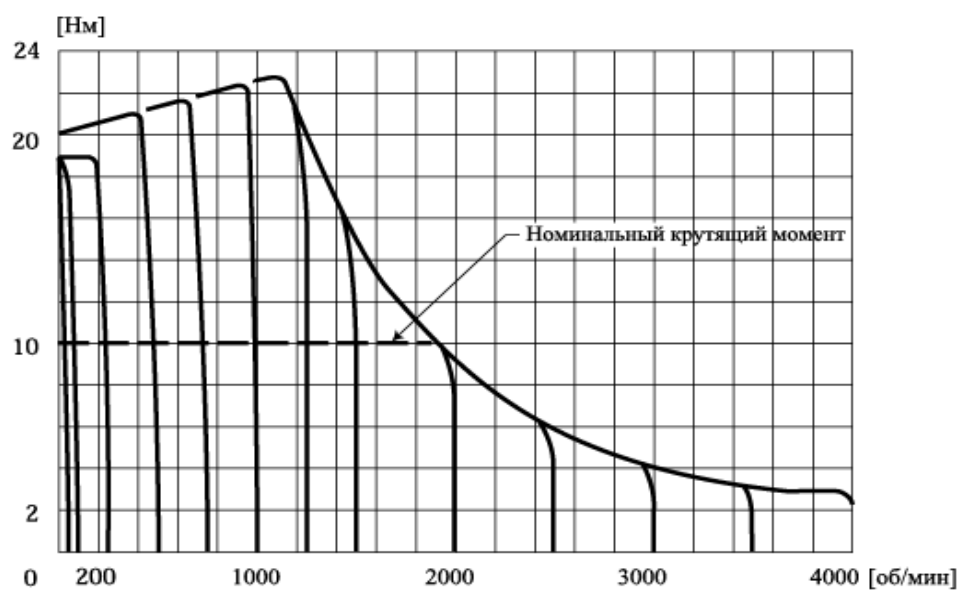


Рис. 2.37. Зависимости крутящего момента от скорости (номинальный момент составляет 10 Нм)

Автоматическая адаптация двигателя (ААД)

Функции автоматической настройки упрощают монтаж и ввод в эксплуатацию путем оптимизации подстройки привода под электродвигатель.

Чтобы оценить отклонения электрических параметров, связанных с монтажом, измеряют активное сопротивление и индуктивность статора. Затем необходимо во время работы проверить правильность подключения электродвигателя, чтобы убедиться в достоверности данных.

Проще говоря, автоматическая адаптация двигателя, который при этом неподвижен, устраняет необходимость проведения длительной ручной компенсации двигателя и делает привод удобным в работе и простым при вводе в эксплуатацию. Кроме того, благодаря правильной автоматической настройке параметров, достигается оптимальный коэффициент полезного действия электродвигателя, гарантируя повышенные эксплуатационные характеристики и тем самым – экономию средств.

Новейшие методы ААД позволяют измерять фактические значения активного сопротивления и индуктивности статора для использования в статической модели двигателя, что существенно повышает точность подстройки под двигатель. Важно, что параметры электродвигателя измеряются без вращения его вала, так что не приходится отсоединять привод от двигателя. Эта особенность выгодна заказчику, поскольку во время ввода в эксплуатацию новой установки механические работы выполняются в первую очередь, и последующее отсоединение привода на этапе электрического пуска является дорогим и непопулярным вариантом.

Автоматическая оптимизация энергопотребления (АОЭ)

Энергосбережение – важная задача современной промышленности. Во многих областях, где применяются приводы, работающие с разными нагрузочными циклами, можно сэкономить электроэнергию, затрачиваемую на работу с небольшими нагрузками, посредством уменьшения напряжения магнитного поля.

Во многих приводах, особенно используемых с квадратичными нагрузками (например, вентиляторах и центробежных насосах), могут также устанавливаться особые V/F-характеристики, увеличивающие энергосбережение.

Существует процедура, которая автоматически оптимизирует энергопотребление при данной фактической нагрузке и адаптирует задание скорости, которое создает напряженность магнитного поля, соответствующую фактической нагрузке. В качестве компромисса между оптимальным энергосбережением и минимальным крутящим моментом при заторможенном роторе (опрокидывающим моментом), необходимым для реальных применений, принят нижний предел. Настройки целиком основаны на данных, которыми располагает система управления, т. е. эти функции не требуют дополнительной регулировки параметров. В противоположность режиму с обычным регулированием скорости при номинальной напряженности магнитного поля, энергосбережение предотвращает потери в электродвигателе, и тем самым, экономит электроэнергию. Для приводов малой и средней мощности режим энергосбережения, при работе с небольшими нагрузками, позволяет экономить от 3 до 5 % от номинальной мощности. Важным побочным эффектом и дополнительным достоинством является то, что при малых нагрузках электродвигатель работает почти бесшумно даже при низких и средних частотах коммутации.

Работа на предельном токе

ШИМ-преобразователи частоты, являющиеся источниками напряжения и использующие простое регулирование V/f -характеристик, обычно не способны "плавно" работать на предельном токе. Напряжение (и, следовательно, частота) сначала уменьшается до тех пор, пока не будет достигнут предел по току. Как только этот предел достигнут, преобразователь частоты снова стремится дойти до установленного задания скорости (напряжение и частота снова увеличиваются). В результате происходит увеличение или уменьшение скорости, и это может привести к излишней нагрузке, в частности, на механические компоненты системы, что способно отрицательно повлиять на качество изделия.

Возможно внезапное отключение защитой в следующих случаях:

- при использовании внутренней ramпы скорости с целью уменьшения или увеличения напряжения или частоты или
- если снижается нагрузка.

Современные ШИМ-преобразователи частоты используют внутренние ramпы скорости для определения рабочей точки, в которой не превышает установленный предел по току, после чего привод плавно, «ведет» электродвигатель к этой рабочей точке. Пользователю посылается сигнал предупреждения о достижении предельного тока. Защита не отключит преобразователь частоты, если будет найдена надлежащая частота.

Защитные функции

Метод регулирования VVCplus предусматривает схему защиты, которая способствует созданию надежной интеллектуальной системы питания с одновременной минимизацией расходов на защиту преобразователя частоты и электродвигателя. Это достигается путем применения стратегии цифровой защиты, основанной на повторном использовании сигналов, необходимых для системы управления, и применении скоростной цифровой обработки сигналов (микросхема ASIC) вместо пассивных силовых компонентов (например, катушек индуктивности переменного тока).

Инвертор защищен от всех отказов за исключением коротких замыканий в ветвях, когда могут использоваться надлежащие средства управления простым и соответствующим образом разработанный клапан-формирователь. Каждый транзистор IGBT гальванически изолирован от напряжения питания и сигнала управления с помощью трансформаторов управления клапан-формирователем.

Сигналы тока и температуры передаются в микросхему ASIC через аналого-цифровой преобразователь или компаратор. Функция "контроль неисправностей" на микросхеме ASIC обрабатывает сигналы таким образом, чтобы выполнять соответствующую функцию защиты (ток, ступени 1 и 2, рис. 2.38). Чтобы ограничить размер микросхемы ASIC, контроль неисправностей проводится на втором уровне в микропроцессоре (ток, ступени 3 и 4, рис. 2.38).

Максимальная токовая защита

На рис. 2.38 показано, как значения тока определяют значения "времени фильтрации" (времени до защитного отключения преобразователя частоты). Порог срабатывания и "время фильтрации" можно регулировать таким образом, чтобы обеспечить максимальную невосприимчивость к помехам для отдельного ключевого элемента инвертора (стойкость транзистора IGBT к превышениям тока).

Помехой в этом случае будет как собственно помеха, так и короткие перегрузки, такие как включение инвертора при длинных кабелях электродвигателя. Чтобы увеличить помехоустойчивость инвертора, было добавлено второе "время фильтрации".

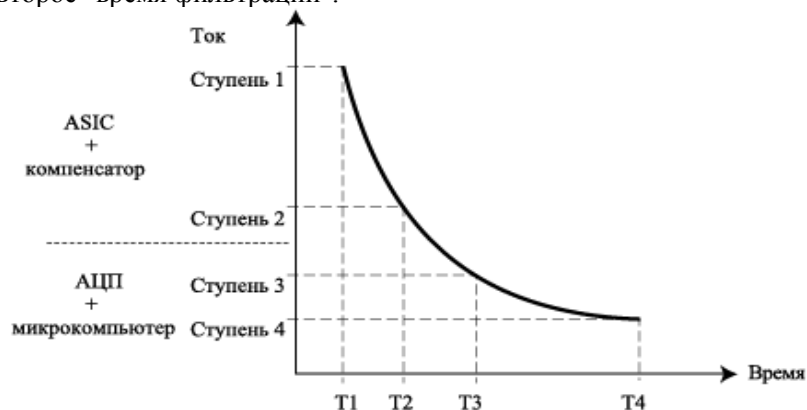


Рис. 2.38. Этапы максимальной токовой защиты

"Время фильтрации" определяет, на какой частоте и как часто инвертор успешно включается, прежде чем будет окончательно заблокирован (уровень тока 1). Пользователь устанавливает время фильтрации T_4 и уровень тока 4.

Пример

По причинам, зависящим от конкретной машины, 4-полюсному электродвигателю мощностью 1,5 кВт разрешается потреблять ток 4 А в течение 5 секунд. Это означает, что $T_4 = 5$ секунд. Уровень 4 тока составляет 4 А.

Остальное определяется системой управления и предельным током аппаратных средств преобразователя частоты.

Такая схема максимальной токовой защиты, которая использует повышенную стойкость транзисторов IGBT нового поколения, обеспечивает высокую надежность инвертора без применения дополнительных пассивных компонентов, таких как катушки индуктивности в цепи электродвигателя.

Защита от перегрева

Производится непосредственное измерение температуры радиатора T_C (рис. 2.34) и вычисляются потери инвертора ($P_{loss,WR}$) в предположении, что температура радиатора определяется окружающей температурой, условиями охлаждения и потерями инвертора и что IGBT-транзисторы инвертора снабжены ограничивающими элементами.

Используя совместно измеренные значения T_C и $P_{loss,WR}$, можно оптимально настроить привод на фактические рабочие условия. Обычно приходится выбирать частоту коммутации и выходной ток в зависимости от условий охлаждения, напряжения питающей сети и окружающей температуры.

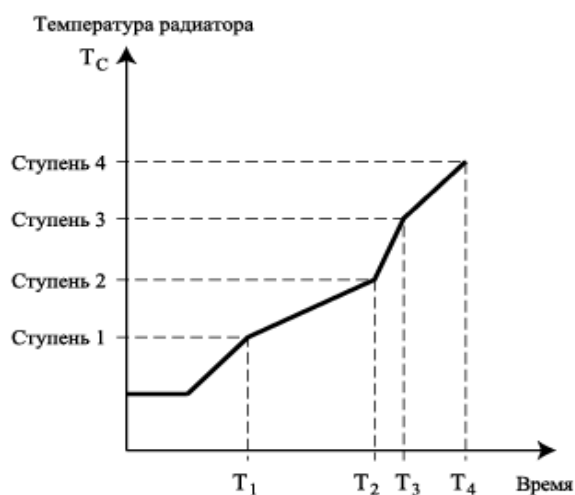


Рис. 2.39. Уровни перегрева

На рис. 2.39 представлен пример, как используется сигнал температуры, предоставляющий пользователю время, чтобы предотвратить отказ путем правильного включения вентилятора преобразователя частоты.

В момент времени T_1 происходит уменьшение частоты инвертора; уровень шумов (помех) возрастает, и подается сигнал предупреждения в качестве индикации обратной связи. В момент времени T_2 снижается выходное напряжение, ограничивается максимальный крутящий момент и подается дополнительный сигнал. В момент времени T_3 достигается предварительно установленный минимальный ток и подается третье предупреждение. Теперь пользователь имеет выбор: либо остановить управляемый электродвигатель, либо оставить его в работающем состоянии с риском, что в момент времени T_4 он будет окончательно остановлен.

Такая схема защиты с контролем неисправностей позволяет эффективно использовать инверторный модуль и обеспечивает надежную и "отказоустойчивую" работу привода. Кроме того, пользователь может предварительно программировать реакцию преобразователей частоты на данный тип неисправности.

Краткое описание микрочипа

Микрочип состоит из трех основных блоков, каждый из которых решает особую задачу.



Рис. 2.40. Принципиальная схема микрокомпьютера

Микропроцессор управляет чипом, и если получает надлежащую последовательность команд (программ), может выполнять ряд функций в памяти компьютера, а также управлять другими устройствами чипа.

В качестве памяти компьютера часто используется СППЗУ (стираемое программируемое постоянное запоминающее устройство).

СППЗУ сохраняет содержимое памяти, если выключается напряжение питания микросхемы, причем информация в СППЗУ может программироваться и стираться с помощью ультрафиолетовых лучей, что позволяет использовать данное устройство многократно. В противоположность СППЗУ, устройства ППЗУ не являются стираемыми и могут программироваться только один раз.

ОЗУ (оперативное запоминающее устройство) – память, из которой микропроцессор получает данные и в которой хранит их. ОЗУ теряет информацию в случае выключения напряжения питания, а при последующем включении содержимое памяти не восстанавливается.

Третье устройство – устройство ввода-вывода – содержит входы и выходы, которые необходимы микропроцессору для обеспечения функций связи. Это могут быть соединения с панелями управления, принтерами или иным электронным оборудованием.

Шина представляет собой совокупность проводов, которые присоединяют отдельные блоки к микропроцессору. Шина данных передает информацию между блоками, адресная шина сигнализирует о том, куда должны посылааться данные, а шина управления контролирует правильность последовательности передачи.

Вычислительные устройства для преобразователей частоты

Кроме постоянных запоминающих устройств (ПЗУ), ОЗУ и блоков ввода-вывода преобразователей частоты, чипы также содержат ряд дополнительных устройств, в том числе ЭСППЗУ (электрически стираемое программируемое ПЗУ), которые дают возможность пользователю программировать вычислительный модуль. ЭСППЗУ можно программировать или перепрограммировать с помощью электрических сигналов, что позволяет программировать преобразователь частоты (конструктивные данные) и запоминать специальные задачи.

Наряду с указанным, чип преобразователя частоты может содержать специализированную прикладную интегральную микросхему (ASIC). Это интегральная коммутационная микросхема, у которой некоторые функции определены изготовителями полупроводникового прибора, а остальные можно программировать на выполнение конкретных задач, определяемых изготовителем преобразователя частоты, таких как принцип управления.

Входы и выходы платы управления

Необходимость конкретных входов и выходов зависит от установки, в которой используется преобразователь частоты.

В автоматических установках преобразователи частоты должны получать как аналоговые, так и цифровые сигналы управления. Аналоговые сигналы могут принимать любые значения в определенном диапазоне. Цифровые сигналы могут принимать два значения (0 или 1).



Рис. 2.41. Типовой чип преобразователя частоты



Рис. 2.42. Аналоговый (a) и цифровой (b) сигналы

Для сигналов управления стандарт отсутствует. Однако некоторые аналоговые сигналы – например, 0-10 В или 0/4-20 мА – стали фактически стандартными. Поскольку в случае цифрового сигнала используются полупроводниковые приборы, то цифровой выход должен получать некоторый минимальный ток, обеспечивающий "надежность" сигнала. Обычный диапазон для сигнала: 20-30 В и 10-500 мА.

Цифровые выходы программируемого логического контроллера (ПЛК) согласуются с цифровыми входами преобразователя частоты. Допустимые напряжения должны составлять минимум 10-30 В при токе не менее 10 мА при напряжении 10 В. Таким образом, внутреннее сопротивление сигнальных входов может быть не более 2 кОм.

Связь

Для обмена данными между цифровыми преобразователями частоты и периферийными устройствами могут использоваться три основных интерфейса (рис. 2.43):

- обычный управляющий терминал для цифровых и аналоговых входов и выходов,
- панель управления с дисплеями и клавиатурой,
- последовательный интерфейс для сервисных работ, диагностики и функций управления.

В зависимости от применения средства связи могут дополняться интеллектуальным последовательным интерфейсом для высокопроизводительной шины (такой как PROFIBUS). Это может быть реализовано в виде независимой группы устройств, которые могут содержать собственный вспомогательный микропроцессор и периферийные устройства (например, двухпортовое ОЗУ).



Рис. 2.43. Базовая комплектация средств связи (преобразователя частоты)

Панель управления с дисплеем и клавиатурой может встраиваться почти в каждый цифровой преобразователь частоты. В управляющем терминале минимальное количество кабелей всегда равно числу соединений плюс 1, т.е. количество кабелей зависит от выполняемых задач и числа терминалов. Отдельные терминалы, конечно, могут программироваться для разных задач.

Дисплей позволяет контролировать преобразователь частоты, что может быть полезно для диагностики неисправностей, таких как обрыв проводов и отсутствие сигнала управления.

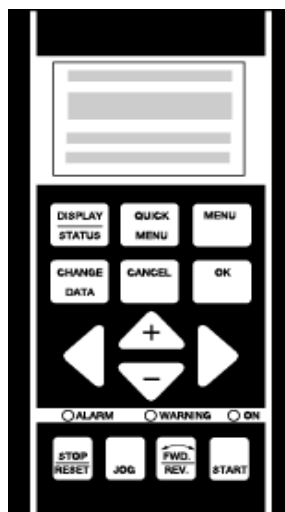


Рис. 2.44. Блок местного локального управления преобразователем частоты

В технологическом процессе преобразователь частоты рассматривается как активный компонент и может либо иметь обратную связь, либо не иметь таковой: управление с замкнутым контуром (регулирование) или управление с разомкнутым контуром.

Система управления с разомкнутым контуром может работать с использованием простого потенциометра, а системы управления с замкнутым контуром обычно бывают более сложными и требуют обратной связи и управления с помощью уставки.

Программируемые логические контроллеры

Программируемые логические контроллеры (ПЛК) способны подавать как сигналы управления (скоростью), так и команды (пуска, останова, реверса).

Одним из главных достоинств ПЛК является способность считывать и непрерывно получать выходные сигналы, формируемые преобразователем частоты, такие как сигналы тока и частоты электродвигателя. Это – серьезное усовершенствование по сравнению с применением простого индикаторного прибора.

Система ПЛК содержит три основных элемента:

- центральное устройство
- входной и выходной модули,
- программирующее устройство.

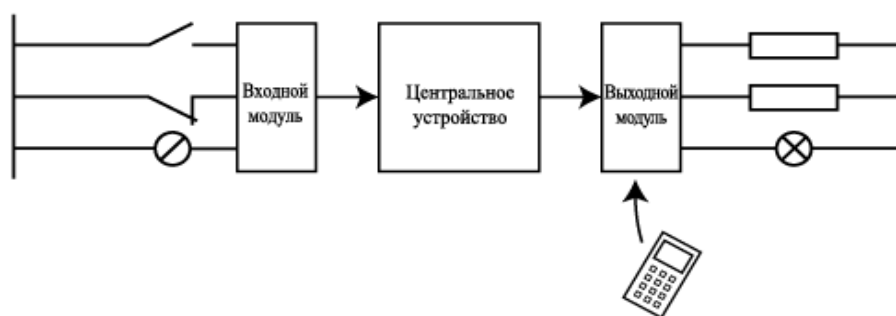


Рис. 2.45. Блок-схема ПЛК

Программирующее устройство формирует программу для управляющего устройства, и эта программа выполняется центральным устройством, которое сортирует входные сигналы и формирует выходные сигналы. Центральное устройство способно работать только с цифровыми сигналами, которые могут принимать только два значения (24 В and 0 В), при этом сигнал с более высоким напряжением соответствует “1” или “ВКЛ”, а с более низким – “0” или “ВЫКЛ”.

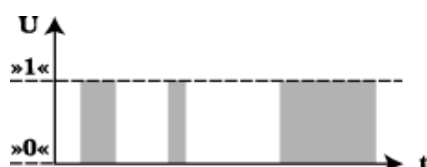


Рис. 2.46. Цифровой сигнал может означать "ВКЛ" или "ВЫКЛ" в течение коротких или длительных интервалов времени

Обычно преобразователь частоты и ПЛК соединяются одним из двух способов – либо непосредственно, либо с помощью последовательной связи. При непосредственной связи входы и выходы ПЛК присоединяются по одному к выходам и входам преобразователя частоты с помощью отдельных кабелей. Следовательно, входы и выходы ПЛК заменяют отдельные компоненты, такие как потенциометры, управляющие контакты и индикаторные приборы.

Последовательная связь

При последовательной связи сигналы передаются по парам проводов.

В течение периода t_1 - t_2 передается информация А., в течение периода t_2 - t_3 – информация В и т. д. Такой тип передачи информации называется последовательной связью (рис. 2-47).

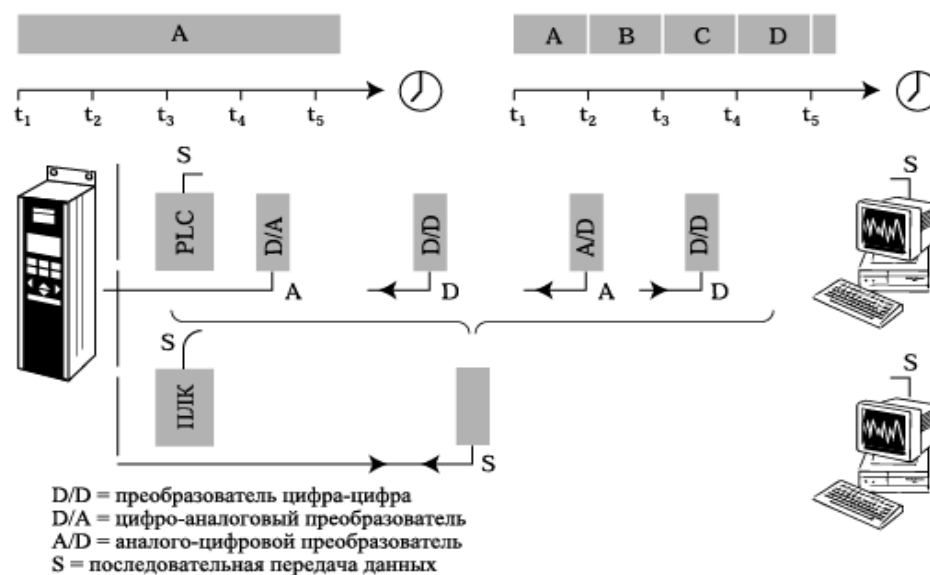


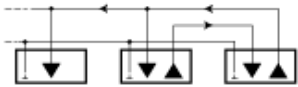
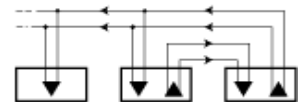
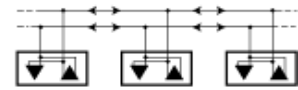
Рис. 2.47. Последовательная связь гарантирует быструю передачу сигналов и отличается простотой монтажа

Существуют три основных способа последовательной связи, при этом решающими факторами для выбора способа являются число устройств, которым необходимо осуществлять связь между собой, и быстродействие.

Можно использовать либо большое число проводов для передачи и приема информации между устройствами системы, либо два провода. В двухпроводных системах или несколько приемников могут быть подключены к одному передатчику (S), или все подключенные устройства могут производить и прием, и передачу. Последнюю из описанных конфигураций называют шиной. Чтобы устройства могли связываться между собой по шине и принимать последовательный сигнал, все они должны иметь одинаковый уровень сигнала.

Кроме того, чтобы приемник был способен понимать посланную информацию, устройства должны иметь одинаковую структуру сигнала (протокол). Структура и сочетание сигналов охватываются несколькими стандартами.

Общий уровень сигналов не обязательно имеет определенную величину. Поэтому программное обеспечение устройств должно согласовываться таким образом, чтобы можно было определить общий уровень сигнала.

Метод	Стандарт (применение)	Число устройств / групп проводов	Макс. расстояние, м	Число проводов	Уровень сигнала
	RS 232 (прямая связь)	1 передатчик, 1 приемник	15	Дуплекс: Не менее 3 плюс число сигналов состояния	Не менее +/-5 В Не более +/-15 В
	RS 423 (прямая связь)	1 передатчик, 10 приемников	1200	Дуплекс: Не менее 3 плюс число сигналов состояния	Не менее +/- 3,6 В Не более +/-6 В
	RS 422 (прямая связь)	1 передатчик, 10 приемников	1200	Дуплекс: 4	Не менее +/-2 В
	RS 485 (шина)	32 передатчика, 32 приемника	1200	Полудуплекс: 2	Не менее +/-1,5 В
▲: Передатчик ▼: Приемник					
Рис. 2.48. Стандарты для систем последовательной связи					

RS 232 – наиболее широко распространенный стандарт. Его использование ограничивается короткими расстояниями и низкими скоростями передачи.

Поэтому стандарт RS 232 применяется в тех случаях, когда сигналы передаются изредка. Это может быть, например, при связи с терминалами и принтерами.

В стандартах RS 422 и 423 устранены недостатки стандарта RS 232 в отношении расстояния и скорости, и поэтому его часто используют с ПЛК при автоматизации технологических процессов, где передача сигналов происходит более постоянно.

RS 485 – единственный стандарт, который допускает подключение большого числа устройств и управление ими, а также допускает связь между несколькими устройствами по общей паре проводов.

Этот тип соединения требует только двух проводов, чтобы устройства могли поочередно посылать и принимать данные с помощью шины.

Для связи между ПЛК/ПК и преобразователем частоты могут использоваться сигналы трех типов:

- сигналы управления (скорость, пуск/останов/реверс)
- сигналы состояния (ток двигателя, частота двигателя, достигнутая частота)
- аварийные сигналы (остановился электродвигатель, перегрев).



Рис. 2.49. Три типа сигналов между ПЛК и преобразователем частоты

Преобразователь частоты получает сигналы управления от ПЛК, после чего управляет электродвигателем. Он также посылает сигналы на ПЛК и предоставляет информацию о действии сигналов управления на двигатель/процесс. Если преобразователь частоты останавливается вследствие аномальных рабочих условий, на ПЛК посылаются аварийные сигналы.

Стандарт RS 485 допускает соединение систем управления процессами, имеющих разные структуры.. Например, он позволяет монтировать ПЛК в панель управления, откуда может управлять несколькими преобразователями частоты или иными удаленными устройствами, находящимися в других панелях управления.

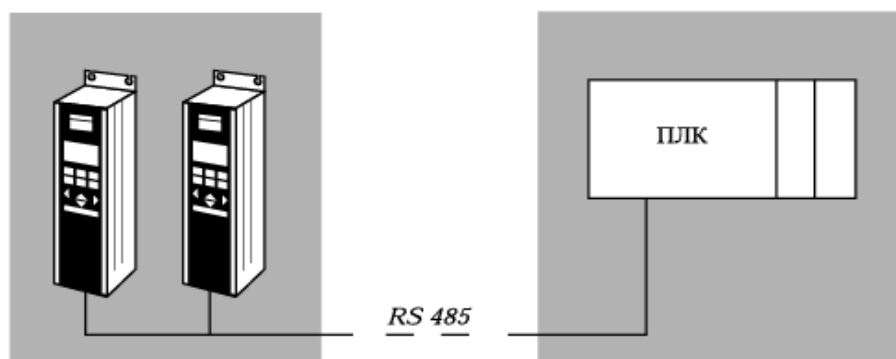


Рис. 2.50. Шина позволяет создавать различные комбинации

При переходе с аналоговой техники на цифровую последовательные интерфейсы все чаще используются для преобразователей частоты с целью:

- тестирования оборудования
- ввода в эксплуатацию
- обслуживания
- автоматизации управления
- отображения информации и контроля
- обеспечения универсальности.

Для обмена данными между преобразователем частоты и ПЛК или ПК через последовательный интерфейс требуется некоторый протокол. Протокол определяет как максимальную длину сообщения (телеграммы), так и позиции отдельных элементов данных в информационной цепочке.

Кроме того, протокол предоставляет следующие функции:

- выбор (адрес) используемого компонента
- необходимые данные о компоненте (например, номинальные значения тока/напряжения)
- передачу данных отдельным компонентам (например, номинальных значений, предельных значений тока/частот)
- передачу данных всем устройствам (ЦИРКУЛЯРНАЯ РАССЫЛКА), что разрешает такие функции, как синхронный пуск/останов, когда не требуется сигнал обратной связи от этих устройств.

Большинство поставщиков промышленного оборудования используют собственный протокол, что может создать проблемы для пользователя, которому придется разрабатывать драйвер для его ПК или ПЛК, чтобы тот мог осуществлять функции связи. Кроме того, пользователь не сможет подключить оборудование разных поставщиков к одному последовательному каналу связи, поскольку такие устройства не способны использовать общую структуру данных и могут работать с разными скоростями.

Общепринятые протоколы связи

Однако крупные изготовители сотрудничают в деле разработки универсальной открытой периферийной системы (fieldbus), по которой может осуществляться связь все промышленное оборудование вне зависимости от изготовителя. Одной из наиболее полно оснащенных и хорошо зарекомендовавших себя периферийных систем для всех изделий, включая приводы, является система PROFIBUS.

Другие шины:

- Modbus +
- Interbus-S
- Device Net
- Lonworks.

Система Profibus имеет три различные модификации, разработанные для разных применений:

Протокол FMS (Fieldbus Message Service = обмен данными по шине Fieldbus)

Это универсальное решение для предоставления каналов связи. Благодаря высокой гибкости, система FMS способна обеспечивать связь по множеству каналов со средней скоростью передачи данных. Протокол FMS используется в таких областях, как текстильная промышленность, эксплуатация зданий и приводы, технологии, использующие исполнительные устройства и датчики, а также низковольтное коммутационное оборудование.

Протокол DP (Decentral Peripherals = децентрализованные периферийные устройства)

Протокол DP, который оптимизирован в отношении скорости, широко используется для связи между автоматическими системами и децентрализованными периферийными устройствами. Он пригоден для использования взамен дорогостоящей параллельной передачи сигналов с помощью напряжения 24 В и передачи измеренных значений сигналами 20 мА и применяется главным образом на быстродействующих автоматизированных технологических установках.

Протокол PA (Process Automation = автоматизация технологических процессов)

PROFIBUS-PA – это вариант протокола PROFIBUS для использования при автоматизации технологических процессов. В протоколе PROFIBUS-PA используется внутренне безопасный метод, изложенный в стандарте IEC 1158-2, и допускается дистанционное питание обслуживаемых устройств по сигнальной шине.

3. Преобразователи частоты и трехфазные электродвигатели переменного тока

Крутящий момент (T), развиваемый асинхронными электродвигателями, обычно определяется по формуле $T \sim \Phi \times I_L$, где I_L – ток ротора и Φ магнитный поток в воздушном зазоре машины.

Для оптимизации крутящего момента электродвигателя магнитный поток в воздушном зазоре машины ($\Phi \sim V/f$) должен оставаться постоянным. Это означает, что при изменении частоты сети (f), должно пропорционально измениться и сетевое напряжение (V) (рис. 3.01).

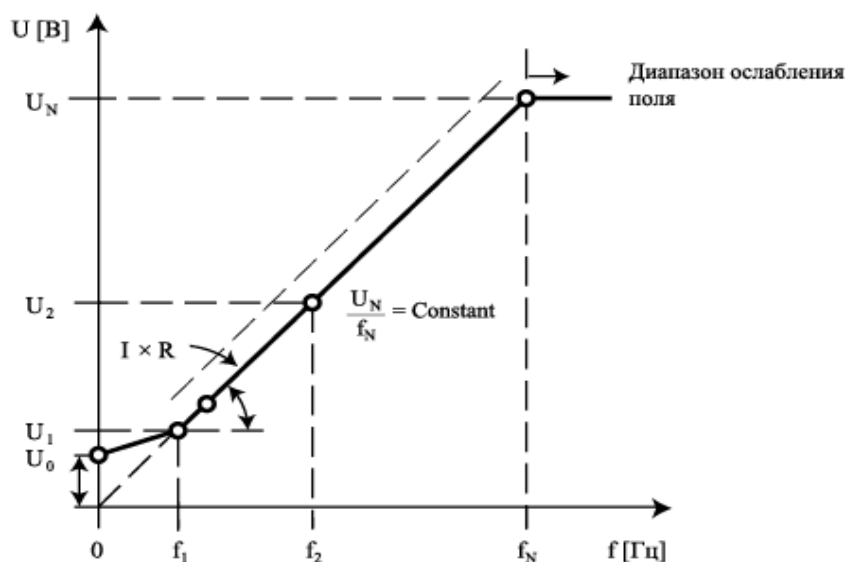


Рис. 3.01 Характеристика управления V/f

В случае тяжелых запусков (шнековые транспортеры) и оптимизированного момента опрокидывания необходимо дополнительное (пусковое) напряжение (V_0). При нагружении в диапазоне малых скоростей ($f < 10$ Гц) происходит явное падение напряжения на активном сопротивлении обмотки статора (особенно в маломощных электродвигателях), что приводит к характерному ослаблению магнитного потока в воздушном зазоре (Φ).

Пример

Электродвигатель 1,1 кВт, 3×400 В/50 Гц с сопротивлением статора (одной фазы) около 8 Ом потребляет при номинальной нагрузке ток 3 А.

В этом случае падение напряжения на сопротивлении статора составит $8 \text{ Ом} \times 3 \text{ А} = 24 \text{ В}$. Изготовитель электродвигателя гарантирует, что в номинальном режиме это падение напряжения компенсируется.

Идеальным для регулирования характеристик V/f является величина 40 В на частоте 5 Гц. Если к электродвигателю приложена номинальная нагрузка, то он будет потреблять ток 3 А и, следовательно, падение напряжения составит 24 В. Существенно, что при этом напряжении на намагничивание остается только 16 В, т.е. электродвигатель недомогнитчен и развивает пониженный крутящий момент.

Следовательно, чтобы сохранить магнитный поток машины, падение напряжения необходимо компенсировать. Простейшие способы компенсации:

- увеличение выходного напряжения в диапазоне пониженных скоростей с помощью регулирования без обратной связи
- стабилизация выходного напряжения с помощью активных составляющих выходного тока преобразователя.

Такую компенсацию обычно называют $I \times R$ -компенсацией, форсированием, повышением крутящего момента или – в компании Danfoss – пусковой компенсацией.

Этот тип регулирования имеет ограничения: трудно измерить помехи при сильном изменении нагрузки (например, на приводах с рабочими колебаниями сопротивления обмоток до 25 % между их горячим и холодным состоянием). Увеличение напряжения может привести к разным результатам. При отсутствии нагрузки это может вести к насыщению магнитного потока электродвигателя, а в нагруженном состоянии – к уменьшению главного магнитного потока. В случае насыщения будет протекать большой реактивный ток, который вызывает нагревание электродвигателя. При наличии нагрузки электродвигатель будет развивать пониженный крутящий момент из-за ослабления главного потока и может остановиться.

Рабочие условия электродвигателя

Компенсация

Достаточно сложно было подстроить первые преобразователи частоты к двигателю, поскольку такие компенсационные функции, как "пусковое напряжение", "пуск" и "компенсация скольжения" были сложны для понимания.

Однако в настоящее время современные преобразователи частоты автоматически регулируют эти компенсационные параметры на основе номинальных значений частоты, напряжения и тока электродвигателя. Эти компенсационные настройки обычно можно изменять вручную.

Компенсационные параметры, зависящие и не зависящие от нагрузки

Компенсационные параметры обеспечивают оптимальное намагничивание и, тем самым, максимальный крутящий момент как во время пуска, так и постоянно – от малой скорости до полной номинальной скорости электродвигателя. Выходное напряжение получает приращение, которое эффективно преодолевает влияние активного сопротивления обмоток электродвигателя на низких частотах. Дополнительное напряжение (пусковая компенсация и компенсация скольжения), зависящее от нагрузки, определяется путем измерения тока (активного тока). Дополнительное напряжение (пусковое напряжение), не зависящее от нагрузки, обеспечивает оптимальный момент опрокидывания в диапазоне малых скоростей.

Электродвигатель, мощность которого гораздо меньше, чем у двигателя рекомендуемого типоразмера, может потребовать дополнительного напряжения, регулируемого вручную, для создания момента трогания или обеспечения оптимального намагничивания в диапазоне малых скоростей.

Если один преобразователь частоты управляет несколькими электродвигателями (параллельная работа), компенсацию, зависящую от нагрузки, использовать нельзя.

При использовании преобразователей частоты последнего поколения компенсация осуществляется самим преобразователем частоты автоматически (при стандартном применении).

Компенсация скольжения

Скольжение асинхронного электродвигателя зависит от нагрузки и составляет около 5 % от номинальной скорости. Это означает, что для двухполюсного электродвигателя скольжение равно 150 об/мин.

Однако, если бы преобразователь частоты управлял электродвигателем на скорости 300 об/мин (10 % от номинальной скорости), скольжение составило бы 50 %.

Если преобразователь частоты должен управлять электродвигателем на скорости, равной 5 % от номинальной, то электродвигатель не справится с нагрузкой. Такая зависимость от нагрузки нежелательна, и преобразователь частоты способен полностью компенсировать скольжение путем эффективного контроля активного тока в выходных фазах преобразователя частоты.

Тогда преобразователь частоты компенсирует скольжение путем увеличения частоты. Это называется активной компенсацией скольжения.

Характеристики крутящего момента электродвигателя

Предел по току

Если преобразователь частоты способен подавать ток, во много раз превышающий номинальный ток электродвигателя, характеристики крутящего момента электродвигателя будут иметь вид, показанный на рис. 1.22 (стр. 33).

Столь большие токи могут повредить как электродвигатель, так и силовые электронные компоненты преобразователя частоты, и они (токи) не требуются для нормальной работы двигателя. Поэтому преобразователь частоты косвенно ограничивает ток электродвигателя путем уменьшения выходного напряжения и, следовательно, частоты. Предел по току является переменной величиной и гарантирует, что ток электродвигателя не будет длительное время превышать номинальное значение. Поскольку преобразователь частоты регулирует скорость электродвигателя независимо от нагрузки, можно устанавливать различные предельные значения в номинальном рабочем диапазоне электродвигателя.

Характеристики крутящего момента электродвигателя соответствуют номинальным значениям для нескольких типов преобразователей частоты. Однако, целесообразно, чтобы преобразователь частоты допускал крутящий момент до 160 % номинального момента в течение более коротких или более длительных интервалов времени. Также обычно допускается, чтобы электродвигатель, управляемый преобразователем частоты, работал в сверхсинхронном диапазоне до скорости, составляющей около 200 % номинальной.

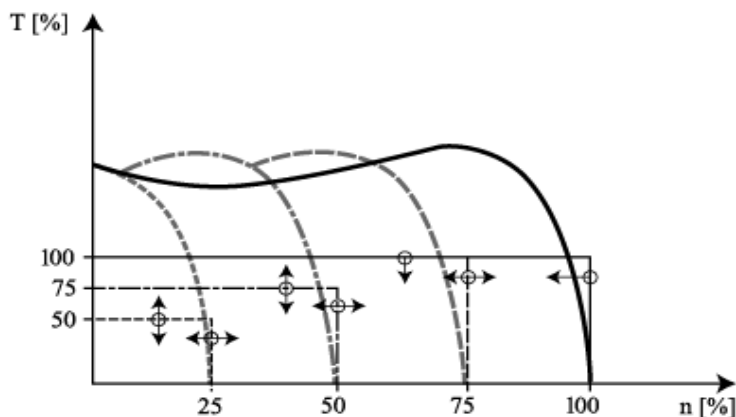


Рис. 3.02

Моментные характеристики электродвигателя, работающего от преобразователя частоты, могут иметь форму прямоугольника. Возможна настройка характеристик крутящего момента электродвигателя, управляемого преобразователем частоты, в "прямоугольниках".

Преобразователь частоты не способен подавать напряжение, больше напряжения питающей сети, что приводит к снижению отношения напряжение-частота при превышении номинальной скорости. Происходит ослабление магнитного поля, и крутящий момент, развиваемый электродвигателем, падает пропорционально $1/n$.

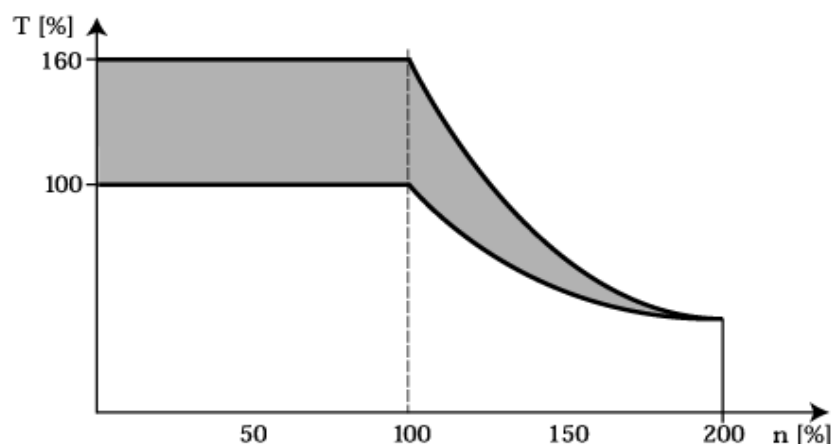


Рис. 3.03 Крутящий момент и перегрузочный крутящий момент электродвигателя

Максимальный выходной ток преобразователя частоты остается неизменным. Это позволяет работать с постоянной мощностью до скорости, равной 200 % номинальной.

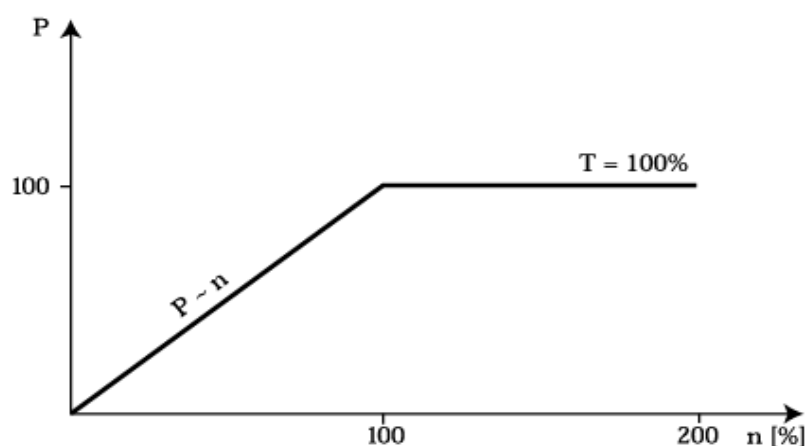


Рис. 3.04 Рабочая характеристика электродвигателя

Скорость электродвигателя может задаваться тремя различными путями: в оборотах в минуту [об/мин], в герцах [Гц] или в процентах номинальной скорости электродвигателя [%]. Эталоном всегда является скорость электродвигателя при номинальной частоте.

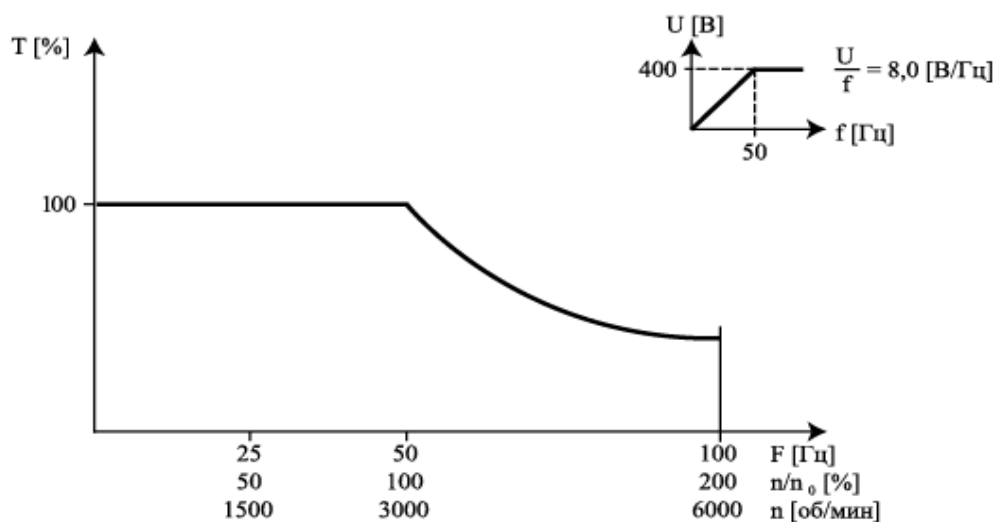


Рис. 3.05 Индикация скорости (здесь – для 2-полюсного электродвигателя)

Изменение отношения напряжение-частота влияет на характеристики крутящего момента. На приведенном ниже рисунке показаны характеристики крутящего момента при уменьшении отношения напряжение-частота до 6,7 [В/Гц].

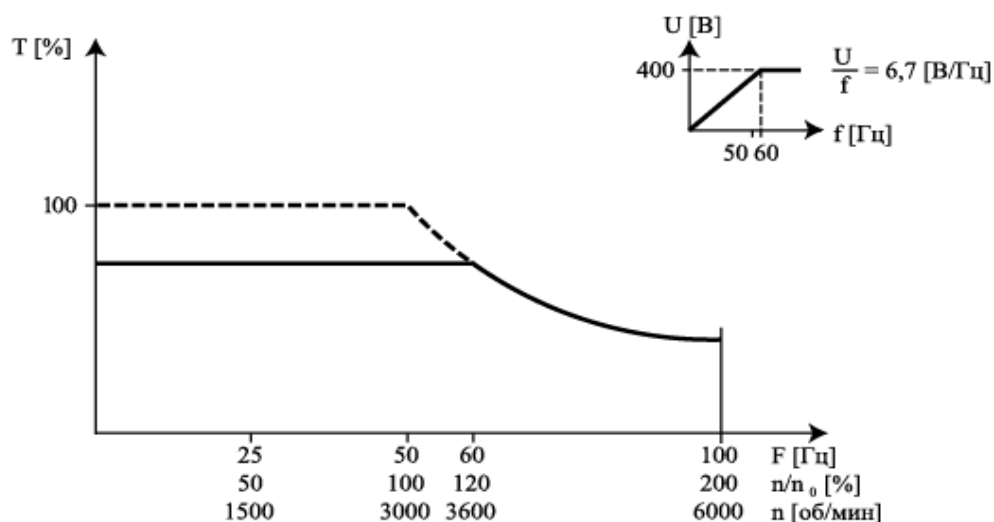


Рис. 3.06 Крутящий момент при установке различных значений отношения V/f

Возможности современных цифровых преобразователей частоты

Последние достижения в области силовой электроники, микропроцессорной техники и интегральных микросхем оказали сильное влияние на технологию приводов, особенно благодаря разработке цифровых приводов с более высокими скоростями обработки данных и повышенной точностью.

Другие преимущества цифрового управления приводом:

- улучшенная повторяемость и повышенная стабильность параметров управления
- более простое измерение параметров
- гибкость функций для конкретных применений
- более точное управление в более широком диапазоне.

Прежние аналоговые приводы настраивались с помощью потенциометра или пассивных компонентов, что могло приводить к нестабильности параметров и температуры. Кроме того, в случае цифрового управления можно хранить все параметры управления в ЭСППЗУ (EEPROM). Микропроцессор позволяет легко реализовывать такие функции, как запрещение управления, переключение набора данных и т. п. В преобразователе частоты могут храниться даже полные рабочие программы (управления процессом) и логическая информация, связанная с приводом. Это сделало современные приводы переменного тока пригодными для применения в широком диапазоне частот и с высокими динамическими свойствами, ранее обеспечиваемыми только преобразователями постоянного тока.

Это способствует к переходу от принципа управления при помощи V/f - характеристик на управление по полю, или векторному управлению.

Выбор преобразователя частоты

При определении характеристик преобразователя частоты для заданной нагрузки первым шагом является рассмотрение нагрузочных характеристик. Существуют четыре различных способа расчета требуемых выходных параметров, при этом выбор способа зависит от характеристик электродвигателя.

Нагрузочные характеристики

Прежде чем определить типоразмер преобразователя частоты, необходимо провести различие между двумя наиболее широко используемыми нагрузочными характеристиками (см. рис. 1.32 на стр. 44). Нагрузочные характеристики различаются между собой следующим образом:

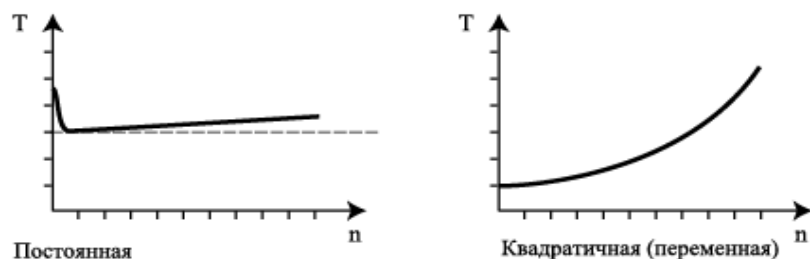


Рис. 3.07 Постоянный и квадратичный нагрузочный момент

- Когда скорость центробежных насосов и вентиляторов увеличивается, потребляемая мощность возрастает в третьей степени ($P = n^3$).
- Обычный рабочий диапазон центробежных насосов и вентиляторов лежит в пределах скоростей от 50 до 90 %. Коэффициент нагрузки возрастает пропорционально квадрату скорости, т. е. приблизительно от 30 до 80 %.

Оба эти фактора проявляются в характеристиках крутящего момента электродвигателя, управляемого преобразователем частоты.

На рис 3.08 и 3.09 показаны характеристики крутящего момента для двух типоразмеров преобразователей частоты, один из них (рис. 3.09) имеет меньший диапазон мощности, чем другой. Для обеих характеристик крутящего момента были заданы одинаковые нагрузочные характеристики центробежного насоса.

На рис. 3.08 весь рабочий диапазон насоса (0-100 %) находится в пределах номинальных значений параметров двигателя. Поскольку обычный рабочий диапазон насоса находится в пределах 30-80 %, можно выбрать преобразователь частоты с меньшей выходной мощностью.

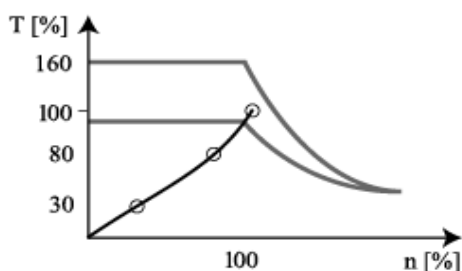


Рис. 3.08
Преобразователь частоты большой мощности

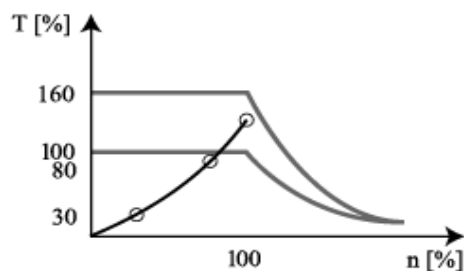


Рис. 3.09
Преобразователь частоты малой мощности

Если нагрузочный момент постоянен, электродвигатель должен быть способен развивать крутящий момент, превышающий нагрузочный момент, поскольку избыточный крутящий момент используется для разгона.

Для разгона и обеспечения высокого начального момента, например в случае привода ленточных транспортеров, достаточен кратковременный перегрузочный момент, составляющий 60 % от момента, развиваемого преобразователем частоты. Перегрузочный крутящий момент также обеспечивает системе способность преодолевать внезапные увеличения нагрузки.

Преобразователь частоты, который не допускает никакого перегрузочного момента, должен выбираться таким образом, чтобы ускоряющий крутящий момент (T_B) находился в пределах номинального крутящего момента.

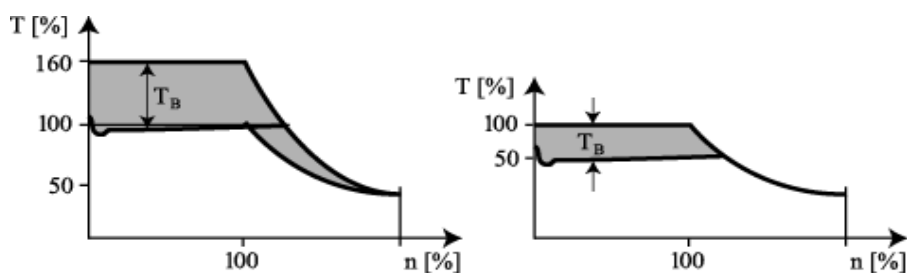


Рис. 3.10 Перегрузочный крутящий момент используется для разгона

При определении нагрузочных характеристик рассматриваются четыре разных набора технических характеристик электродвигателя, позволяющие принять решения относительно выбора типоразмера преобразователя частоты по мощности.

1. Преобразователь частоты можно выбрать быстро и точно на основе значения тока I_M , который потребляет электродвигатель. Если электродвигатель загружается не полностью, его ток может быть измерен при работе аналогичной системы с полной нагрузкой.

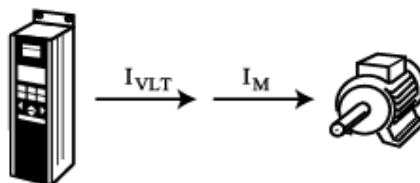


Рис. 3.11 Выбор преобразователя частоты на основе номинального тока

Пример. Электродвигатель 7,5 kW, 3 x 400 В потребляет ток 14,73 А.

Что касается технических данных преобразователя частоты, то выбирается такой преобразователь, у которого длительный максимальный выходной ток больше или равен 14,73 А при постоянной или квадратичной характеристике крутящего момента.

Примечание

Если преобразователь частоты выбирается на основе мощности (способы 2-4), необходимо сравнить расчетную мощность и мощность, указанную в технических данных преобразователя частоты, при одном и том же напряжении. Если преобразователь частоты рассчитывается на основе тока (способ 1), этого не требуется, поскольку выходной ток преобразователя частоты влияет на другие данные.

2. Преобразователь частоты можно выбирать на основе полной мощности S_M , потребляемой электродвигателем и полной мощности, подаваемой преобразователем частоты.

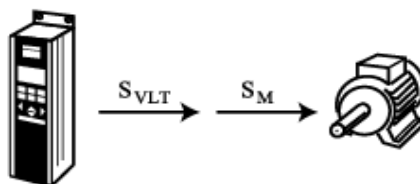


Рис. 3.12 Выбор преобразователя частоты на основе полной мощности

Пример. Электродвигатель 7,5 kW, 3 x 400 В потребляет ток 14,73 А.

$$S_M = U \times I \times \sqrt{3} / 1000 = 400 \times 14,73 \times \sqrt{3} / 1000 = 10,2 \text{ кВА}$$

Что касается технических данных преобразователя частоты, то выбирается такой преобразователь частоты, у которого длительная максимальная выходная мощность больше или равна 10,2 кВА при постоянной или квадратичной характеристике крутящего момента.

3. Преобразователь частоты можно также выбирать по мощности P_M , вырабатываемой электродвигателем. Однако данный способ является не точным, поскольку $\cos \varphi$ и коэффициент полезного действия η изменяются с нагрузкой.



Рис. 3.13 Выбор преобразователя частоты по выходной мощности на валу

Пример

Электродвигатель мощностью 3 кВт, имеющий $\cos \varphi = 0,80$ и $\eta = 0,81$, потребляет мощность $S_m = P_M / (\eta \times \cos \varphi) = 3,0 / (0,80 \times 0,81) = 4,6$ кВА

Что касается технических данных преобразователя частоты, то выбирается такой преобразователь, у которого длительная максимальная выходная мощность больше или равна 4,6 кВА при постоянной или квадратичной характеристике крутящего момента.

4. На практике номинальная мощность большинства преобразователей частоты соответствует стандартной серии асинхронных электродвигателей. Поэтому преобразователи частоты часто выбирают исходя именно из этого соображения, что, однако, может привести к неточному определению их характеристик, особенно если электродвигатель не нагружается полностью.

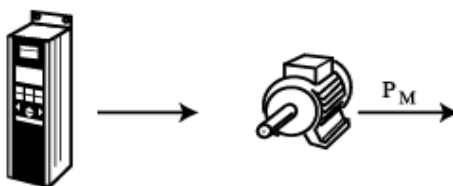


Рис. 3.14 Выбор преобразователя частоты на основе стандартной серии электродвигателей

Распределение тока в преобразователе частоты ($\cos \varphi$ электродвигателя)

Ток для намагничивания электродвигателя подается конденсатором, находящимся в промежуточной цепи преобразователя частоты. Ток намагничивания представляет собой реактивный ток, который протекает между конденсатором и электродвигателем (рис. 3.15).

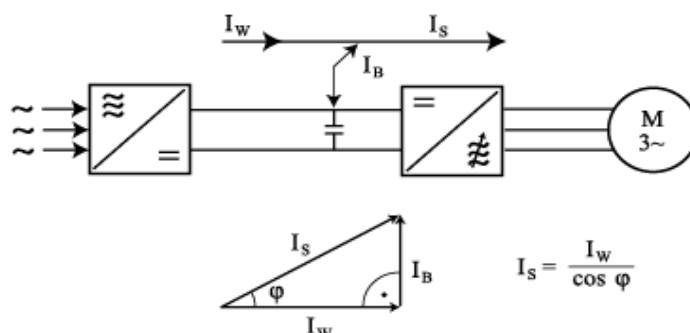


Рис. 3.15 Токи в преобразователе частоты

Из сети поступает только активный ток (I_w). Именно поэтому выходной ток преобразователя частоты всегда больше входного тока. Кроме активного тока из сети потребляется ток I_{loss} (ток потерь).

Пример

При отсутствии нагрузки ток 4-полюсного электродвигателя мощностью 1,1 кВт равен 1,6 А. Выходной ток подключенного преобразователя частоты составляет около 1,6 А, а входной ток при работе без нагрузки почти равен нулю.

Изготовители электродвигателей обычно указывают $\cos \varphi$ электродвигателя при номинальном токе. При меньшем значении $\cos \varphi$ (например, в случае реактивного синхронного электродвигателя) номинальный ток электродвигателя при одинаковых значениях мощности и напряжения будет больше, как видно из следующего уравнения:

$$I_s = I_w / \cos \varphi$$

Если преобразователь частоты выбирается по номинальному току электродвигателя (способ 1), то снижения номинального крутящего момента электродвигателя не происходит.

Конденсатор, подключенный к клеммам электродвигателя для компенсации реактивного тока, необходимо удалить. Ввиду высокой частоты коммутации преобразователя частоты конденсатор ведет себя как короткозамкнутая цепь и вызывает существенное увеличение тока электродвигателя. Преобразователь воспримет это как замыкание на землю или короткое замыкание и отключится.

Управление скоростью электродвигателя

Выходная частота преобразователя частоты и, следовательно, скорость электродвигателя управляются одним или несколькими сигналами (0-10 В, 4-20 мА или импульсами напряжения). Когда подается сигнал на увеличение скорости, скорость электродвигателя возрастает, и вертикальная часть характеристик крутящего момента электродвигателя сдвигается вправо (рис. 3.16).



Рис. 3.16 Зависимость между управляющим сигналом и характеристиками крутящего момента электродвигателя

Если нагрузочный момент меньше, чем номинальный крутящий момент электродвигателя, скорость достигнет требуемого значения. Как показано на рис. 3.17, нагрузочные характеристики пересекаются с характеристиками крутящего момента электродвигателя в вертикальной части (в точке А). Если пересечение происходит в горизонтальной части (точка В), скорость электродвигателя не может длительное время превышать соответствующее значение. Преобразователь частоты допускает превышение предельного тока короткого замыкания без отключения (точка С), но продолжительность превышения обязательно должна быть ограничена по времени.

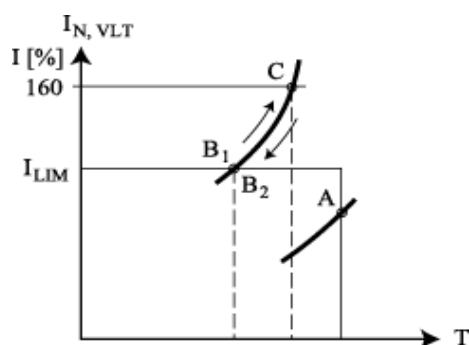


Рис. 3.17 Ток электродвигателя может в течение короткого времени превышать предел по току

Рампы разгона и торможения

Характеристика (рампа) разгона показывает темп, с которым происходит увеличение скорости вращения, и задается в виде времени разгона t_{acc} . Эти ramпы базируются, главным образом, на номинальной частоте электродвигателя, например, рампа разгона 5 с означает, что преобразователю частоты потребуется 5 секунд для перехода от нулевой до номинальной частоты электродвигателя ($f_n = 50$ Гц).



Рис. 3.18 Время разгона и торможения

Рампа торможения показывает, насколько быстро снижается скорость. Она задается в виде времени торможения t_{dec} .

Возможен непосредственный переход от разгона к торможению, поскольку электродвигатель всегда отслеживает выходную частоту инвертора.

Если известен момент инерции вала электродвигателя, можно вычислить оптимальные значения времени разгона и торможения.

$$t_{acc} = J \times (n_2 - n_1) / [(T_{acc} - T_{fric}) \times 9,55]$$

$$t_{dec} = J \times (n_2 - n_1) / [(T_{dec} + T_{fric}) \times 9,55]$$

J – момент инерции вала электродвигателя.

T_{fric} – момент трения системы.

T_{acc} – избыточный (перегрузочный) момент, используемый для разгона.

T_{dec} – тормозящий момент (момент торможения), который возникает при уменьшении задания скорости.

n_1 и n_2 – скорости вращения на частотах f_1 и f_2 .

Если преобразователь частоты допускает кратковременный перегрузочный момент, то моменты разгона и торможения устанавливаются равными номинальному крутящему моменту электродвигателя T . На практике время разгона и время торможения обычно одинаковы.

Пример

$$J = 0,042 \text{ кгм}^2 \quad n_1 = 500 \text{ об/мин} \quad n_2 = 1000 \text{ об/мин}$$

$$T_{fric} = 0,05 \times M_N \quad T_N = 27 \text{ Нм}$$

$$t_{acc} = J \times n_2 - n_1 / (T_{acc} - T_{fric}) \times 9,55 = 0,042 \times 1000 - 500 / (27,0 - (0,05 \times 27,0)) \times 9,55 = 0,1 \text{ [с]}$$

Динамическое торможение

Когда сигнал задания скорости снижается, электродвигатель ведет себя как генератор и тормозит. Замедление при торможении зависит от величины нагрузки электродвигателя.

Электродвигатели, подключенные непосредственно к сети, отдают мощность торможения обратно в сеть.

Если электродвигатель работает от преобразователя частоты, энергия торможения сохраняется в промежуточной цепи преобразователя частоты. Если мощность, выделяемая при торможении, велика и преобразователь частоты не может рассеять ее за счет собственной конструкции, напряжение промежуточной цепи возрастает.

Напряжение промежуточной цепи может расти до тех пор, пока преобразователь частоты не будет отключен средствами защиты, и иногда к промежуточной цепи приходится подключать нагрузку в виде тормозного модуля и внешнего резистора для поглощения мощности торможения.

Использование тормозного модуля и тормозного резистора позволяет осуществлять быстрое торможение при больших нагрузках. Однако, при этом возникают проблемы, связанные с нагревом. Другим решением является использование блока рекуперативного торможения. Такие блоки применяются для преобразователей частоты с неуправляемым выпрямителем и возвращают энергию торможения в питающую сеть.

В преобразователях частоты с управляемыми выпрямителями мощность торможения может возвращаться в сеть (см. рис. 3.19) с помощью, например, инвертора, подключенного к выпрямителю встречно-параллельно.



Рис. 3.19.
Включение тормозного модуля
и тормозного резистора

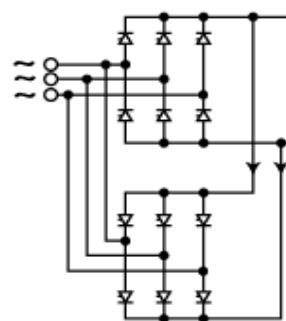


Рис. 3.20.
Инвертор, включенный встречно-
параллельно

Другой способ торможения электродвигателя – торможение постоянным током. Для создания магнитного поля в статоре используется напряжение постоянного тока, подаваемое между двумя фазами электродвигателя. Поскольку энергия торможения остается в электродвигателе и возможен перегрев, торможение постоянным током рекомендуется использовать в диапазоне низких скоростей, чтобы не превышать номинальный ток электродвигателя. Обычно торможение постоянным током ограничивается во времени.

Реверс

Направление вращения асинхронных электродвигателей определяется порядком следования фаз питающего напряжения.

Если поменять местами две фазы, направление вращения электродвигателя изменится, и он будет вращаться в противоположном направлении.

Большинство электродвигателей сконструировано таким образом, чтобы заставить вал двигателя вращаться по часовой стрелке, если соединение выполнено следующим образом:

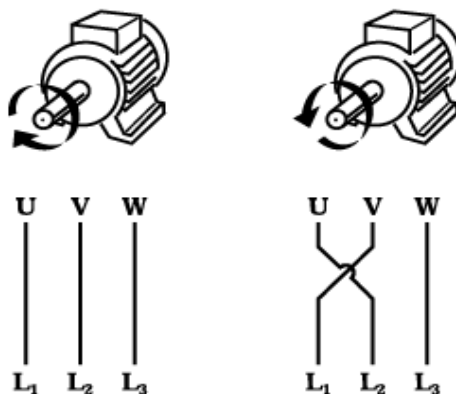


Рис. 3.21. Направление вращения электродвигателя изменяется путем изменения порядка следования фаз

Этому же правилу отвечает и порядок следования фаз на выходных клеммах большинства преобразователей частоты.

Преобразователь частоты может осуществлять реверс электродвигателя путем изменения порядка следования фаз с помощью электроники. Реверс производится либо путем задания отрицательной скорости, либо цифровым входным сигналом. Если при первоначальном вводе в эксплуатацию требуется, чтобы электродвигатель имел определенное направление вращения, необходимо знать заводскую настройку преобразователя частоты по умолчанию.

Поскольку преобразователь частоты ограничивает ток электродвигателя номинальным значением, двигатель, управляемый преобразователем частоты, можно реверсировать чаще, чем двигатель, подключенный непосредственно к сети.

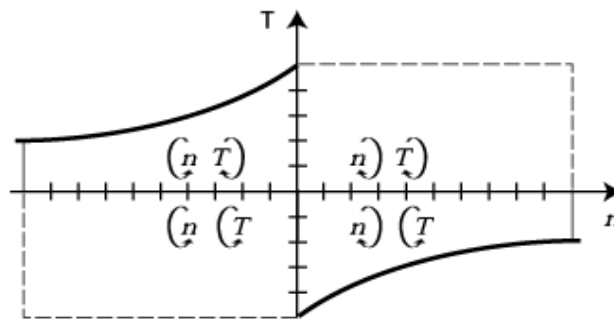


Рис. 3.22. Тормозной момент преобразователя частоты во время реверса

Рампы

Все преобразователи частоты имеют функции изменения скорости (рампы) для обеспечения плавной работы. Эти рампы можно изменять, и благодаря им задание скорости можно увеличивать или уменьшать в определенном интервале.

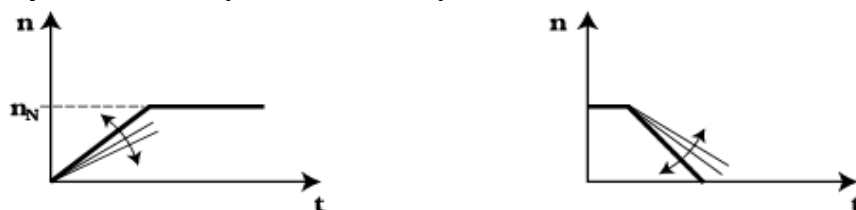


Рис. 3.23. Регулируемое время разгона и торможения

Угол наклона характеристики разгона/торможения (длительность разгона/торможения) можно установить таким малым, что в некоторых ситуациях электродвигатель не сможет отработать задание (не сможет разогнать/затормозить двигатель за заданное время).

Это приводит к увеличению тока электродвигателя до тех пор, пока не будет достигнут предел по току. В случае малого времени замедления (t_a) напряжение промежуточной цепи способно возрасти до такого уровня, что схема защиты преобразователя частоты остановит преобразователь.

Оптимальное время изменения скорости можно вычислить по приведенным ниже формулам.

$$t_a = J \times n / (T_N - T_{\text{fric}}) \times 9,55$$

$$t_{-a} = J \times n / (T_N + T_{\text{fric}}) \times 9,55$$

t_a – время увеличения скорости

t_{-a} – время уменьшения скорости

n – число оборотов

T_N – номинальный крутящий момент электродвигателя

T_{fric} – момент трения

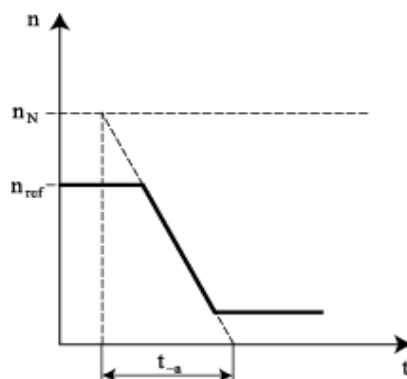


Рис. 3.24. Установка времени изменения скорости

Время разгона/торможения обычно выбирается исходя из номинальной скорости электродвигателя.

Текущий контроль

Преобразователи частоты могут контролировать регулируемый процесс и вмешиваться в него при неисправности.

Такой контроль может быть разделен на три вида в зависимости от объекта: контроль технологической установки, контроль электродвигателя и контроль преобразователя частоты.

Контроль установки основан на контроле выходной частоты, выходного тока и крутящего момента электродвигателя. На основании этих параметров можно устанавливать несколько пределов, превышение которых воздействует на функцию управления. Этими пределами могут быть допустимая наименьшая скорость электродвигателя (минимальная частота), допустимый наибольший ток (предел по току) или допустимый наибольший крутящий момент электродвигателя (предельный крутящий момент).

Преобразователь частоты может быть запрограммирован, например, на подачу предупреждающего сигнала, уменьшение скорости электродвигателя или останов последнего в случае выхода его скорости за установленные пределы.

Пример

В установках, использующих для соединения электродвигателя с остальной частью системы клиновой ремень, преобразователь частоты может программироваться на контроль состояния этого ремня.

Поскольку в случае разрыва ремня выходная частота будет увеличиваться быстрее, чем определяется заданной рампой, в таких ситуациях можно использовать эту частоту для подачи предупреждения или останова электродвигателя.

Контроль электродвигателя можно производить с помощью преобразователя частоты путем мониторинга тепловой модели электродвигателя или путем подключения к электродвигателю термистора. Преобразователь частоты может предотвращать перегрузку электродвигателя, действуя подобно термореле. В вычислениях, производимых преобразователем частоты, участвует и выходная частота. Это гарантирует, что электродвигатель не будет перегружаться на малых скоростях из-за ухудшения внутренней вентиляции. Современные преобразователи частоты также способны защищать электродвигатели с принудительной вентиляцией, если ток становится слишком большим.

Контроль преобразователя частоты традиционно производится таким образом, что в случае перегрузки по току преобразователь отключается. Некоторые преобразователи допускают кратковременную перегрузку по току. Микропроцессор в преобразователе частоты способен одновременно учитывать значение тока электродвигателя и время его приложения, что обеспечивает возможность оптимального использования преобразователя частоты без перегрузки.

Нагрузка и нагрев электродвигателя

Когда электродвигатель подключен к преобразователю частоты, необходимо поддерживать его правильную температуру, на которую влияют два фактора:

- Если скорость уменьшается, уменьшается и объем охлаждающего воздуха.
- В случае несинусоидального тока электродвигателя в двигателе выделяется больше тепла.

На малых скоростях вентилятор электродвигателя не способен подавать достаточно воздуха для охлаждения. Эта проблема возникает, если нагрузочный момент постоянен во всем диапазоне регулирования. Недостаточный уровень охлаждения определяет уровень крутящего момента, допустимый при нагрузках в продолжительном режиме работы. Если электродвигатель работает непрерывно при номинальном моменте на скорости, которая меньше половины номинальной скорости, двигателю требуется дополнительное/принудительное охлаждение (заштрихованные участки на рис. 3.25).

Другой вариант – уменьшение коэффициента нагрузки электродвигателя путем выбора более мощного электродвигателя. Однако, не следует выбирать слишком мощный электродвигатель для данного преобразователя частоты.

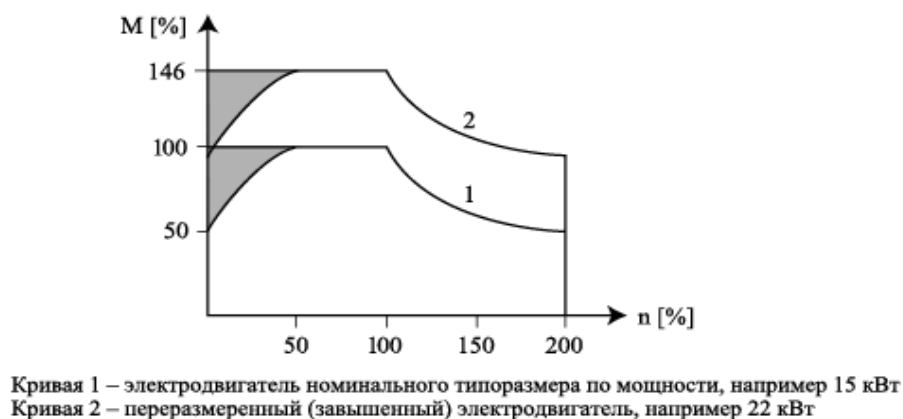


Рис. 3.25. Потребность в дополнительной вентиляции для электродвигателя номинальной мощности и для переразмеренного электродвигателя (завышенного по мощности)

Если ток электродвигателя имеет несинусоидальную форму, электродвигатель нельзя все время подвергать полной нагрузке, поскольку в нем будут протекать токи гармонических составляющих, которые повышают его температуру. Количество выделяемого тепла определяется амплитудами токов гармонических составляющих.

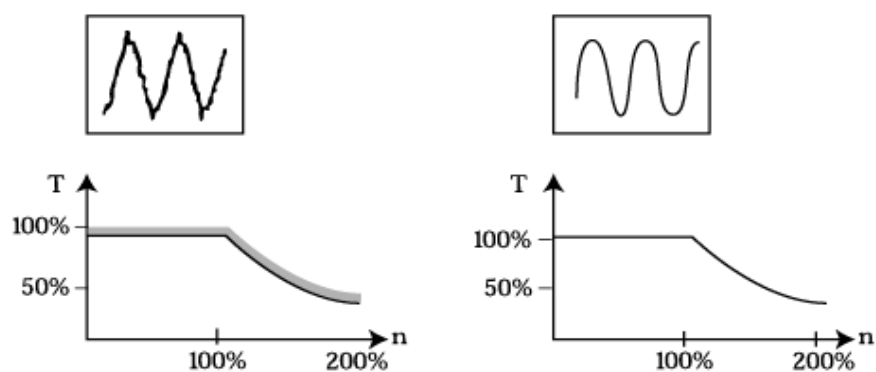


Рис. 3.26. Несинусоидальный ток приводит к перегреву двигателя

Коэффициент полезного действия

Коэффициент полезного действия (*КПД*) η устройства определяется как отношение выходной мощности P_2 к входной P_1 .

$$\eta = P_2 / P_1$$

Разность мощностей P_1 и P_2 – это мощность потерь P_v , т. е. мощность, которая рассеивается в устройстве в виде тепла.

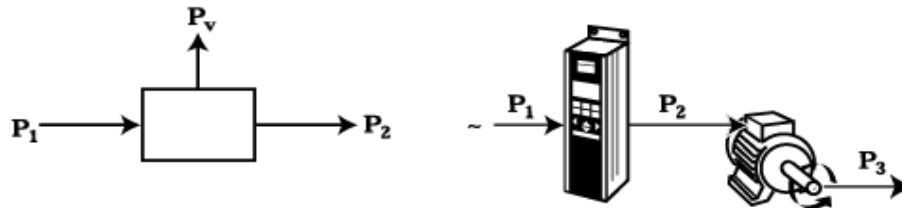


Рис. 3.27. Выходная мощность, входная мощность и коэффициенты полезного действия

Кпд можно вычислить отдельно для преобразователя частоты, отдельно для электродвигателя и совместно для преобразователя частоты и электродвигателя (коэффициент полезного действия системы).

КПД преобразователя частоты: P_2 / P_1

КПД электродвигателя: P_3 / P_2

КПД системы: P_3 / P_1

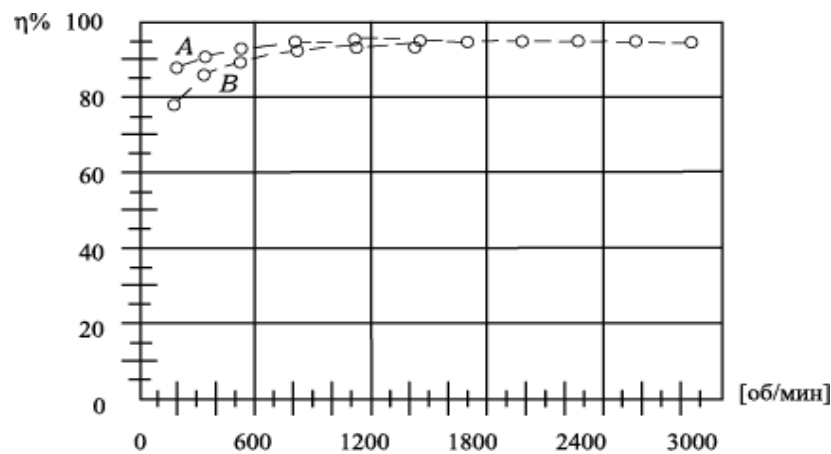


Рис. 3.28. КПД преобразователя частоты при 100-% (A) и 25-% (B) нагрузке

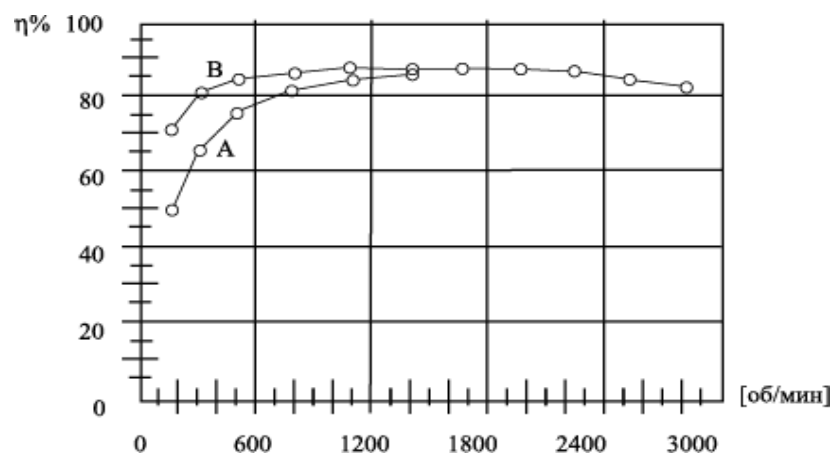


Рис. 3.29. КПД типового электродвигателя при 100-% (А) и 25-% (В) нагрузке

Графики показывают, что КПД электродвигателя оказывает существенное влияние на кпд системы. КПД преобразователя частоты имеет большую величину во всем диапазоне регулирования, как при высоких, так и при низких уровнях нагрузки. Также легко видеть, что наименьшее значение коэффициенты полезного действия имеют на малых скоростях. Однако это не означает, что общие потери на малых скоростях являются наибольшими.

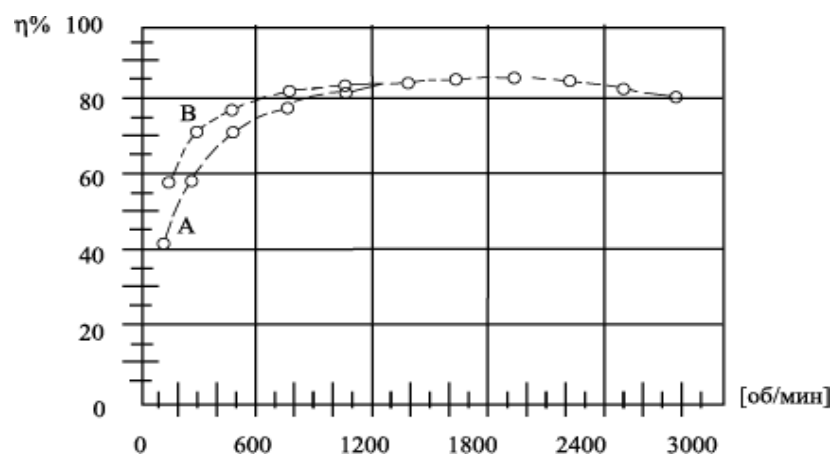


Рис. 3.30. КПД преобразователя частоты и электродвигателя (2-полюсного) при 100-% (А) и 25-% (В) нагрузке

Примеры из рис. 3.30:

1. $n = 800 \text{ об/мин}$
 $P_3 = 9628 \text{ Вт}$
 $\eta = 77,3 \%$
 $P_1 = P_3 / \eta = 12455,4 \text{ Вт}$
 $P_v = P_1 - P_3 = 2827,4 \text{ Вт}$

2. $n = 500 \text{ об/мин}$
 $P_3 = 1500 \text{ Вт}$
 $\eta = 70 \%$
 $P_1 = P_3 / \eta = 2143 \text{ Вт}$
 $P_v = P_1 - P_3 = 643 \text{ Вт}$

Высокие значения *КПД* преобразователей частоты обеспечивают следующие преимущества:

- Чем выше *КПД*, тем меньше тепловые потери, которые приходится отводить из установки. Это существенно, если преобразователь частоты встраивается в панель управления.
- Чем меньше тепловые потери в полупроводниковых приборах и катушках индуктивности преобразователя частоты, тем больше их срок службы.
- Чем выше *КПД*, тем меньше энергопотребление.

4. Защита и безопасность

На основании норм и правил, которые применимы к данной установке, может возникнуть необходимость в установке аварийного выключателя около электродвигателя. Установка должна производиться таким образом, чтобы и электродвигатель, и преобразователь частоты не повреждались и были, по возможности, независимы от частоты коммутации.

Необходима гальваническая развязка между управляющей частью и силовой частью преобразователя частоты. В противном случае кабели управления могут оказаться под таким же напряжением относительно земли, как и питающая сеть, так что прикосание к кабелям управления может привести к смертельному исходу или, в лучшем случае, к повреждению оборудования.

Указания по гальванической развязке содержатся в европейском стандарте EN 50178. Тип защиты, предусматриваемый для преобразователей частоты, обеспечивает защиту от травм при касании. Класс защиты IP 20 предусматривает полное ограждение токоведущих частей. Класс защиты IP 54 означает применение брызгозащищенного корпуса.

Дополнительный перегрев может привести к возгоранию преобразователя частоты. Поэтому необходимо предусмотреть внутренний термодатчик, отключающий напряжение питания в случае отказа системы охлаждения.

В некоторых случаях электродвигатель, подключенный к преобразователю частоты, может перезапуститься без предупреждения. Это может произойти, если, например, в преобразователе частоты активизированы элементы временной функции или контролируются температурные пределы.

Дополнительная защита

Дополнительная защита помогает избежать опасных напряжений на корпусе. Для преобразователя частоты дополнительная защита требуется всегда. Режим защиты должен оцениваться на вероятностной основе с учетом местных условий и правил. Различаются следующие типы защиты: подключение к нулевой точке, заземление и защитные реле.

Заземление (система TN)

Может предусматриваться защитный провод между клеммой заземления и нулевым проводником в силовом кабеле установки. Этот тип дополнительной защиты часто используется в промышленных сетях и на коммунальных объектах, которые снабжены проводом заземления. Если установка не была подключена к нулевой точке, то возможность использования этого метода будет зависеть от условий подключения, и может возникнуть необходимость обращения к поставщику преобразователя частоты.

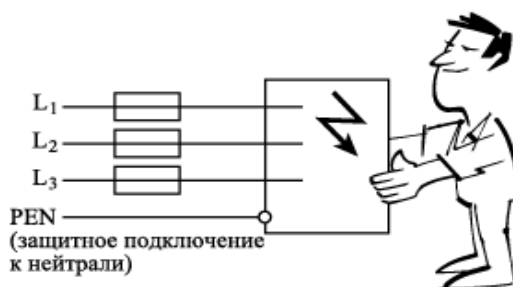


Рис. 4.01. Подключение к нулевой точке (система TN)

Заземление (система TT)

Также может быть предусмотрен защитный провод между клеммой заземления и эквипотенциальной шиной. Однако, для применения этого метода необходимо, чтобы импеданс эквипотенциальной точки был достаточно низким. Благодаря применению компонентов, снижающих помехи, преобразователь частоты будет иметь ток утечки, и именно поэтому заземление должно иметь низкий импеданс. Стандарт EN 50178/5.3.2.1 содержит следующие требования.

Если ток утечки превышает 3,5 мА, сечение защитного провода должно быть не менее 10 мм² или устройство следует заземлять с помощью двух отдельных защитных проводов, которые должны соответствовать требованиям стандарта IEC 364-5-543. Это часто называют усиленным заземлением.

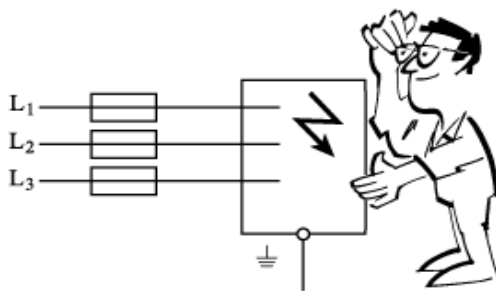


Рис. 4.02. Подключение к нулевой точке (система TT)

Защитные реле

Дополнительная защита производится с помощью защитных реле двух типов. Первый тип – защитное реле тока, второй – защитное реле напряжения.

В большинстве установок возможно использование дополнительной защиты в виде защитных реле напряжения (FV-реле). Защита достигается путем включения обмотки реле в защитный провод между клеммой заземления преобразователя частоты и потенциалом земли. Аварийное напряжение вызывает срабатывание реле и отключение питающего напряжения преобразователя частоты.

Защитные реле напряжения могут с успехом использоваться в тех случаях, когда подключение к нулевому проводу не допускается или нельзя соединять с землей систему заземления. Возможность применения таких реле зависит от норм и правил, которые устанавливаются компаниями, осуществляющими электроснабжение.

При определенных условиях допускается защита преобразователей частоты с использованием устройства защитного отключения (УЗО).

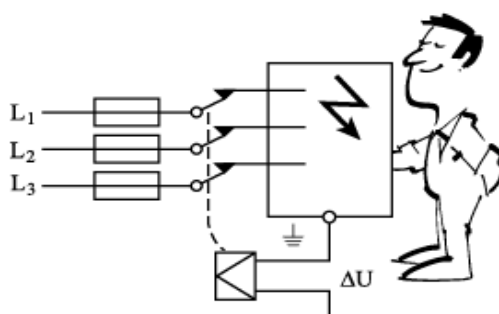


Рис. 4.03. Защитные реле напряжения

При использовании УЗО все кабели к преобразователю частоты подключаются через суммирующий трансформатор тока, который измеряет сумму токов в кабелях с целью проверки ее на равенство нулю. В противном случае во вторичной обмотке трансформатора наводится ток, который размыкает контакты реле и отключает питание преобразователя частоты. В обычных УЗО используется принцип индукции, который действует исключительно в случае переменного напряжения. Согласно стандарту EN 50178, преобразователи частоты с 6-пульсными входными мостовыми выпрямителями могут допускать протекание медленно изменяющегося постоянного тока в случае утечки. Наилучшим вариантом является возможность измерения постоянного тока на входе преобразователя частоты.

Согласно стандарту EN 50178, медленно изменяющиеся постоянные токи могут возникать в том случае, если замыкания происходят в преобразователях частоты с трехфазными выпрямителями. В качестве дополнительной защиты здесь может использоваться УЗО типа В, указанное в стандарте IEC 755. На практике это означает, что реле должно быть маркировано следующим символом:



Если используются реле защиты от токов короткого замыкания, не рассчитанные на работу в цепях постоянного тока, то для защиты от тока короткого замыкания можно включить перед преобразователем частоты разделительный трансформатор.

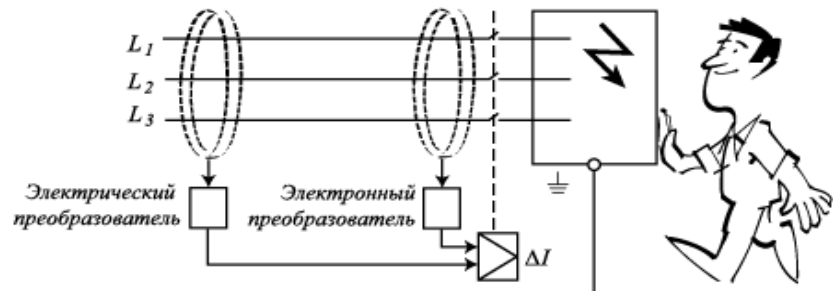


Рис. 4.04. Реле защиты от токов утечек всех типов.

Небольшие по величине токи утечки создаются компонентами фильтров ВЧ-помех. По отдельности фильтры ВЧ-помех обычно создают токи утечки, равные лишь нескольким миллиамперам и не вызывающие срабатывания защиты. Если же, однако, используется несколько очень мощных фильтров, это может привести к срабатыванию реле УЗО.

	Переменные токи утечки
	Пульсирующий постоянный полупериодный ток (положительные и отрицательные полуволны)
	Полупериодные токи с наклоном кривой Угол наклона 90 / 135 эл. градусов
	Полупериодный ток с наложением медленно изменяющихся постоянных токов утечки величиной 6 мА
	Медленно изменяющиеся постоянные токи утечки
Рис. 4.05. Изображения и описания токов утечки	

Электромагнитная совместимость

Электромагнитные помехи – нежелательные электрические явления, которые возникают в устройстве и излучаются устройством или неблагоприятно влияют на само устройство.

Электромагнитные явления могут иметь природный характер или создаваться в результате человеческой деятельности.

К электромагнитным помехам природного характера относятся атмосферные помехи, например молния. Другим природным источником является магнитное поле, которое окружает весь земной шар и защищает нас от мощного космического излучения. Хотя атмосферные помехи устранить нельзя, их влияние на электрические устройства и установки может быть уменьшено.

Помехи, не являющиеся природными, считаются рукотворными электромагнитными явлениями и возникают при любом использовании электроэнергии. Такие помехи могут распространяться по воздуху или по электрическим проводам. Примерами могут служить помехи от выключателей освещения или от систем зажигания, влияющие на радиоприемники и телевизоры. Кроме того, при кратковременных отключениях напряжения могут останавливаться часы и плохо работать персональные компьютеры.



Рис. 4.06. Электромагнитные явления

Электростатический разряд также может привести к пробоям в электронных ключах и даже к пожарам и оказать воздействие на людей, растения и животных.

Международным термином для ВЧ-помех является ЭМС (электромагнитная совместимость). Это способность устройства противостоять электрическим помехам и самому не излучать помехи в окружающую среду.

В 1989 г. в Европе была принята директива по ЭМС, и в настоящее время европейские стандарты по ЭМС делятся на три группы, представленные ниже.

Основные стандарты

Эти стандарты ориентированы на явления. Они описывают необходимое испытательное оборудование и методы измерений.

Общие стандарты

Эти стандарты ориентированы на условия эксплуатации. Существуют стандарты, касающиеся оборудования для жилищно-бытовой сферы, офисов, легкой промышленности, обрабатывающей промышленности и для специальных применений.

Стандарты на изделия

Эти стандарты касаются особых требований к данным группам изделий в отношении методики измерений и оценки. Устанавливаются точные испытательные уровни и предельные значения. Эти стандарты обладают приоритетом по отношению к общим стандартам.

Если электрическое или электронное устройство подпадает под европейское законодательство, оно должен быть в установленное время представлено в соответствующие организации и признано ими. Это осуществляется в форме Декларации Европейского Союза о соответствии и с помощью маркировки символом СЕ. Декларация Европейского Союза о соответствии выдается в качестве удостоверения на серию устройств, а символ СЕ наносится на устройство, упаковку и инструкцию по эксплуатации. Символ СЕ адресуется соответствующим европейским властям и подтверждает, что надлежащие нормы и правила были соблюдены.

Теперь изделия, которые в соответствии с директивой по ЭМС требуют CE-маркировки, должны иметь на себе символ CE.



Рис. 4.0. Знак соответствия требованиям Европейского Союза

Если электрическое устройство работает в диапазоне напряжений от 50 до 1000 В переменного тока или от 75 до 1500 В постоянного тока, то оно должно также соответствовать директиве по низковольтному оборудованию. Эта директива вступила в силу в 1997 г. и касается опасностей, связанных с электрооборудованием, для людей, домашних животных и имущества.

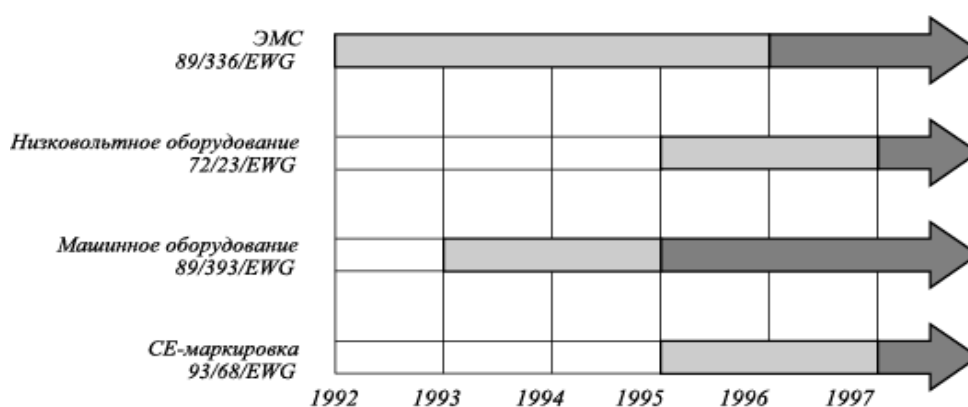


Рис. 4.08. Сроки вступления в силу CE-маркировки

Распространение помех

Излучаемая помеха (распространяющаяся помеха) – электромагнитная энергия (или величина помехи), исходящая из устройства, а помехоустойчивость – способность устройства противостоять помехам или подавлять их.

Помехи, поступающие из преобразователя частоты, представляют собой помехи питающей электросети в диапазоне низких частот, распространяющиеся по кабелям как проводные помехи, и помехи, излучаемые в окружающую среду на высоких частотах (от 10 кГц до 1 ГГц).

Типы электрической связи

Электрические цепи могут быть связаны между собой с помощью гальванической, емкостной или индуктивной связи. Гальваническая связь может возникать, когда две электрические цепи имеют общий электрический импеданс.

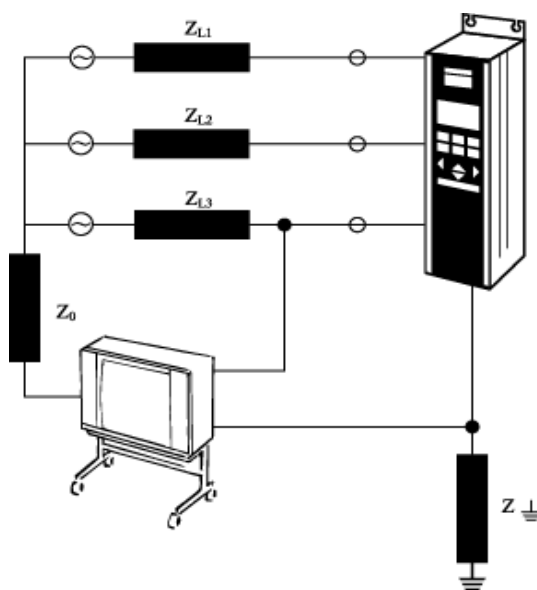


Рис. 4.09. Гальваническая связь

Преобразователи частоты и иные электрические устройства, работающие в системе, соединяются между собой с помощью проводников и имеют одинаковый потенциал заземления. Эта связь приводит к появлению на двух совместно используемых импедансах Z_{L3} и Z_0 напряжения помех, зависящего от соотношения импедансов.

Емкостная связь возникает, если две электрические цепи имеют общую базу заземления. Обычно это происходит там, где кабель электродвигателя проложен слишком близко от других кабелей. Емкостной ток помехи зависит от частоты сигнала в кабеле электродвигателя, соответствующего напряжения и расстояния до других кабелей. Сравнительно высокая частота коммутации современных преобразователей частоты, с которой генерируется выходное напряжение, снижает емкостное сопротивление кабеля электродвигателя и тем самым вызывает появление емкостных (паразитных) токов.

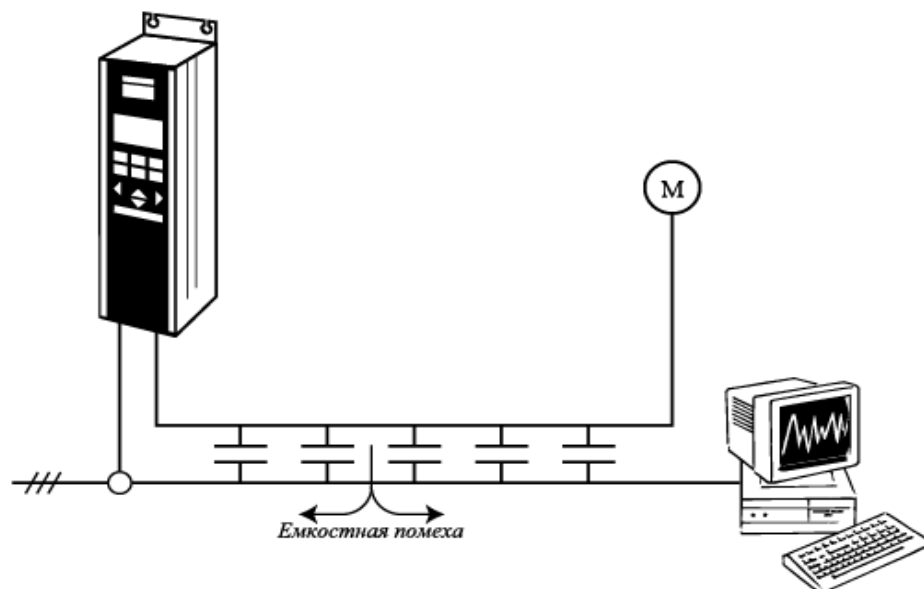


Рис. 4.10. Емкостная связь

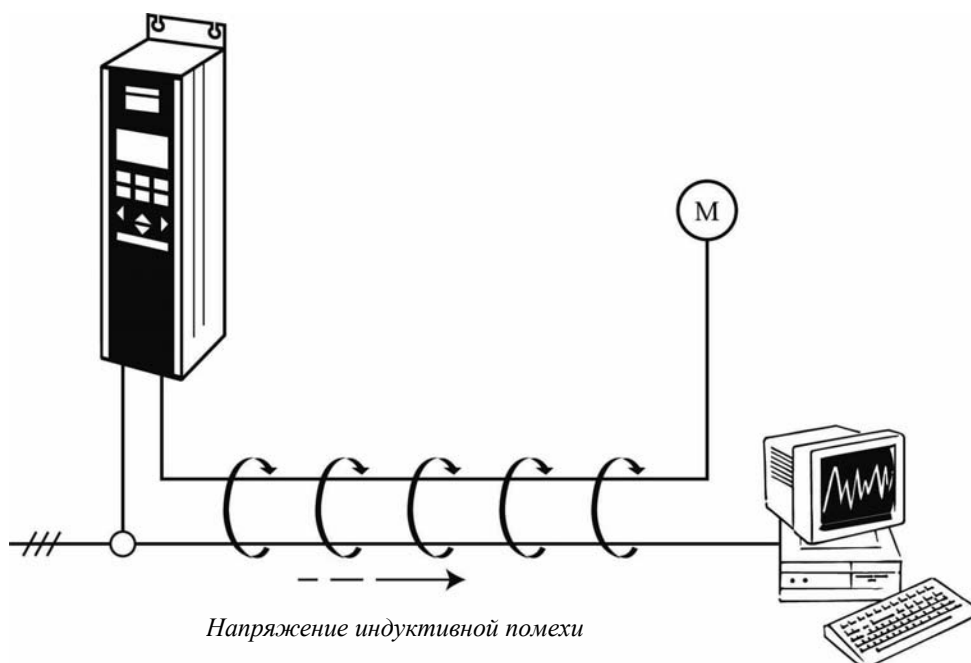


Рис. 4.11. Индуктивная связь

Индуктивная связь возникает, если магнитное поле вокруг проводника с током наводит напряжение на другом проводе. Наведенное напряжение переменного тока зависит от интенсивности магнитного поля, а также от силы тока в кабеле электродвигателя, частоты и расстояния между кабелями.

Электромагнитные воздействия на электрические кабели

Электрические помехи могут распространяться по кабелям сетевого питания. На синусоиду питающего напряжения частотой 50 Гц накладываются более высокие частоты. Происходит искажение чисто синусоидальной кривой.

Помехи сети питания

Помехи от устройств, потребляющих электроэнергию, вызывают искажение напряжения питания. Это искажение создается высокочастотными составляющими тока, потребляемого входными цепями инверторов и других полупроводниковых приборов ввиду их нелинейных характеристик. В других устройствах, подключенных к тому же самому сетевому источнику питания, помеха создает дополнительную нагрузку. Это выражается в более высоком значении потребляемого тока и возникновении шума в установках.

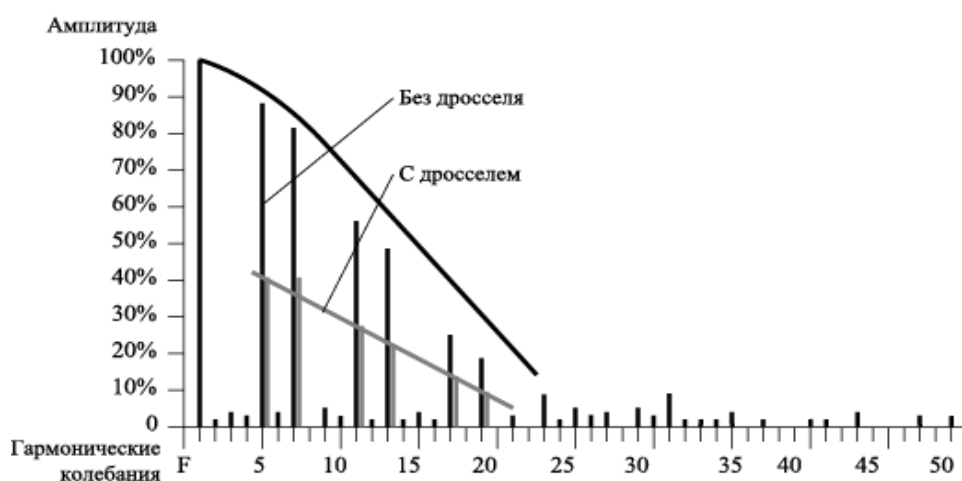


Рис. 4.12. Ослабление гармоник тока путем установки дросселей постоянного тока в преобразователи частоты VLT 5000

Выпрямитель преобразователя частоты создает пульсирующее напряжение постоянного тока. При каждом пике напряжения происходит заряд конденсатора в промежуточной цепи постоянного тока. Во время этого заряда возникают входные токи со сравнительно большой амплитудой. Ввиду такой несинусоидальной нагрузки импульсной формы происходит искажение синусоиды напряжения питания, причем степень искажения зависит как от токовой нагрузки, так и от импеданса сети. Максимально допустимые искажения указаны в стандарте EN 61000-3-2 для коммунальных сетей питания и в стандарте EN 61000-3-4 – для коммунальных низковольтных систем. Помехи сети питания представляют собой высокочастотные составляющие в виде так называемых гармоник основной частоты питающего напряжения. Общее содержание гармоник называется суммарным коэффициентом гармоник (THD).

$$\text{THD} [\%] = \sqrt{(U_3)^2 + (U_5)^2 + \dots + (U_N)^2} / U_1$$

Максимально допустимая величина отдельных гармоник питающей сети указана в таблице 1 стандарта EN 61000-3-2. Помеху сети питания можно уменьшить путем ограничения амплитуды импульсных токов. На практике, в промежуточную цепь или на вход преобразователя частоты встраивают дроссели. Часто преобразователи частоты поставляются без дросселей. Дроссели можно заказать отдельно и установить позднее. Уровни гармоник сетевого напряжения, которые способен выдержать преобразователь частоты, указаны в стандарте EN 60146-1-1 (общие требования для силовых полупроводниковых преобразователей).

Переходные напряжения / перенапряжение

В питающей электросети как в промышленной, так и в жилой сферах могут появляться переходные напряжения – броски напряжения в пределах нескольких тысяч вольт.

Они возникают при вкл./выкл. больших нагрузок к/от сети питания или как следствие использования устройств компенсации реактивной мощности. Например, в случае ударов молнии непосредственно в кабели питания возникают большие броски напряжения, которые вызывают повреждение линий на протяжении 20 км. В случае воздушных линий передач возможно схлестывание изоляторов с другими проводниками.

Появление переходных напряжений вызывают также короткие замыкания и защитные отключения сетевого питания. Большие броски напряжения могут также возникать под воздействием электромагнитной индукции в параллельно проложенных кабелях.

Форма этих переходных напряжений и мощность, которую они содержат, рассматриваются в стандартах EN 61000-4-1 и VDE 0160.

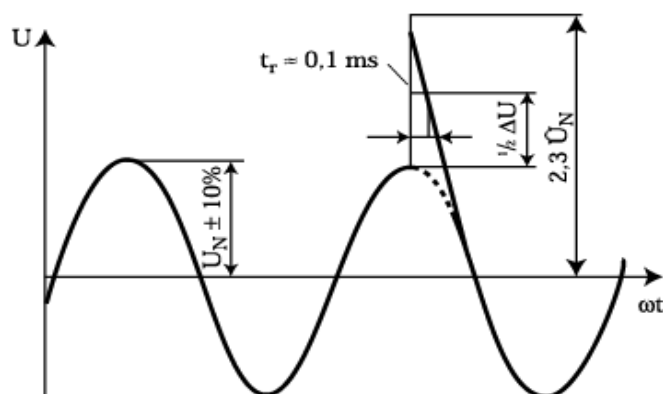


Рис. 4.13. Переходные напряжения сети согласно стандарту VDE 0160 (с декабря 1990 г.)

Компания Danfoss руководствуется требованиями стандарта VDE 0160 (версия 2), хотя он больше не действует. Причиной является то, что этот более строгий стандарт содержит очень жесткие условия, воздействию которых часто подвергаются преобразователи частоты.

Пагубное влияние переходных напряжений и перенапряжений можно уменьшить несколькими способами. Для борьбы с переходными напряжениями и перенапряжениями могут применяться воздушные подавители и разрядники. В электронных устройствах для подавления перенапряжений часто используются нелинейные резисторы (варисторы). В сигнальном диапазоне защита может обеспечиваться с помощью стабилитрона.

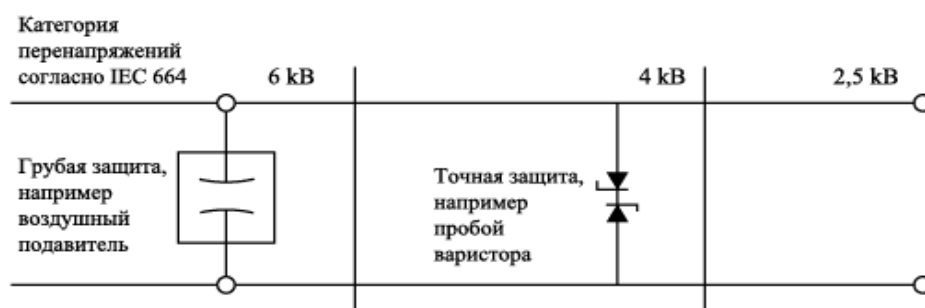


Рис. 4.14. Защита от переходных и пере- напряжений

Радиопомехи

Любое напряжение и ток, формы которых отклоняются от синусоидальной, содержат составляющие с повышенными частотами. Амплитуды на этих частотах зависят от скорости изменения процесса. При замыкании или размыкании контактного механизма ток изменяется очень быстро, и регистрируется крутой фронт тока. Это сказывается и на напряжении. С помощью радиоприемника это явление можно услышать как потрескивание. В данном случае обычно считается, что отдельный импульс шума не является помехой. Однако, поскольку полупроводниковые приборы в составе преобразователя частоты переключаются в диапазоне килогерц с крутыми фронтами коммутации, то создаются и излучаются постоянные высокочастотные помехи.

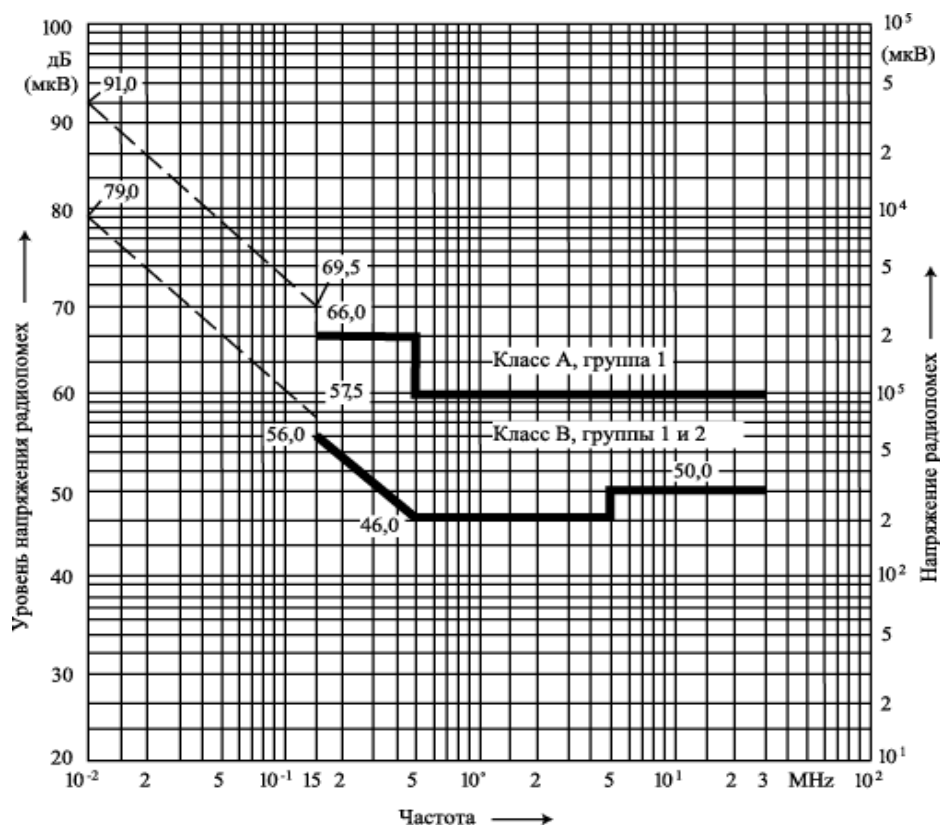


Рис. 4.15. Средние пороговые значения ВЧ-помех согласно EN 55011

Радиопомехи (RFI) определяются как электрические колебания с частотами в диапазоне от 10 кГц до гигагерц.

На величину этих помех влияет ряд факторов:

- импеданс сетевого источника питания,
- частота коммутации инвертора,
- механическая настройка преобразователя частоты,
- частота выходного напряжения, подаваемого на электродвигатель,
- используемые методы подавления помех,
- длина и тип кабеля электродвигателя.

ВЧ-помехи, распространяемые кондуктивным путем или излучением, ограничиваются стандартами EN в Европе и стандартами IEC во всем мире.

Предельные значения и методы измерения ВЧ-помех от промышленных, научных и медицинских высокочастотных установок (ISM-установок), которые до недавнего времени также содержали преобразователи частоты, подпадают под действие стандарта EN 55011. Предельные значения для помех от бытовых электроприборов охватываются стандартом EN 55014. В настоящее время преобразователи частоты подпадают под действие стандарта на изделия EN 61800-3.

Высокочастотные помехи из сети можно эффективно уменьшать только с помощью фильтра, содержащего катушки индуктивности и конденсаторы. Не все преобразователи частоты поступают укомплектованными фильтром ВЧ-помех, и в этом случае фильтр должен устанавливаться позднее: фильтр класса А – для промышленных установок и фильтр класса В – для бытового электрооборудования.



Рис. 4.16. Преобразователи частоты и меры подавления ВЧ-помех

На кабеле от преобразователя частоты к подключенному электродвигателю ВЧ-помехи могут подавляться с помощью фильтров или путем использования экранированных / бронированных кабелей. В этой связи высокая частота коммутации инвертора означает:

- что конденсаторы должны быть рассчитаны на повышенные токи,
- что катушки индуктивности фильтра должны выбираться с запасом.

Экранированные / бронированные кабели

Для уменьшения ВЧ-помех часто используются экранированные / бронированные кабели. Эффект экранирования указывается в децибелах (дБ) как ослабление, вызываемое экраном, или как импеданс связи. Ослабление, вызываемое экраном, должно быть как можно больше (обычно порядка 30 дБ), в то время как импеданс связи должен быть как можно меньше.

Чтобы экранирование от ВЧ-помех было действительно эффективным, экран должен заземляться на концах как со стороны преобразователя частоты, так и со стороны электродвигателя, и не должен иметь разрывов между этими точками. На практике, если экран разрывается, то разрыв должен шунтироваться звеном с низким сопротивлением. Необходим хороший контакт между экраном и потенциалом земли, поскольку плохое соединение ослабляет эффект экранирования и тем самым ухудшает подавление помех. Следует иметь в виду, что в случае заземления в нескольких местах по проводнику заземления будет протекать уравнивающий ток. Поэтому сигнальные кабели должны заземляться только на одном конце. Поскольку эти сигнальные кабели работают с очень слабыми сигналами, подключение к экрану будет оказывать возмущающее действие.

Когда приобретается и монтируется преобразователь частоты, необходимо рассмотреть, как и в какой степени должна подавляться ВЧ-помеха, при этом в технической документации следует указывать класс ВЧ-помех, которому должен соответствовать преобразователь частоты. Кроме того, не всегда ясно, встроен ли фильтр или его следует приобрести и установить отдельно, и для какой длины кабеля электродвигателя он пригоден.

Экранированные /бронированные кабели электродвигателя и управления часто бывают необходимы, а если должно обеспечиваться соответствие заданному классу защиты от помех, то их применение рекомендуется.

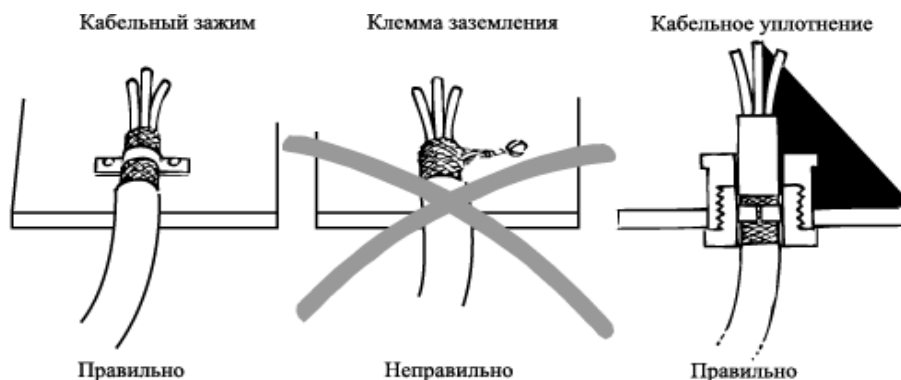


Рис. 4.17. Монтаж экрана для обеспечения требований ЭМС

Оборудование для компенсации коэффициента мощности (PFC)

Данные устройства встраиваются в сети, если требуется компенсировать разность фаз между напряжением и током ($\cos \varphi$). Подобная ситуация возникает, когда от сети питается много устройств, потребляющих индуктивный ток, например электродвигателей или коммутаторов для ламп.

Преобразователь частоты не создает никакой разности фаз: его $\cos \varphi$ приблизительно равен единице.

На высоких частотах конденсаторы системы PFC имеют пониженное внутреннее сопротивление. Если в сетевом напряжении остаются высокочастотные составляющие (гармоники), входной ток устройства PFC будет возрастать, конденсаторы будут нагреваться и подвергаться повышенной нагрузке.

Высокочастотные составляющие из сети могут подавляться путем установки дросселя либо со стороны сети, либо в цепи постоянного тока. Дроссели цепи постоянного тока также препятствуют возникновению резонанса между индуктивностью устройств, потребляющих ток, и емкостью устройства компенсации коэффициента мощности. Необходимо иметь в виду, что высокая частота обладает меньшим эффектом втягивания, поэтому в универсальных системах управления и трансформаторах звуковой частоты требуется подавляющий фильтр.

Подключения дроссельных компенсирующих устройств могут потребовать нормы и правила, устанавливаемые местными компаниями, которые осуществляют электроснабжение.

Выбор преобразователя частоты для приводов с переменной скоростью

Выбор преобразователя частоты для приводов с переменной скоростью требует немалого опыта. Если такого опыта нет, полезно посетить какое-либо образцовое предприятие аналогичного профиля, побывать на специализированных выставках или торговых ярмарках. Ниже приводится краткий перечень факторов, которые следует принимать во внимание.

1. Характеристики управляемой машины

- требуемые характеристики установки/машины
- характеристики крутящего момента, опрокидывающий момент, крутящий момент при разгоне
- диапазон регулирования скорости, охлаждение
- потребляемая мощность преобразователя и электродвигателя
- рабочие квадранты
- компенсация скольжения (динамическая)
- необходимое время разгона и замедления
- необходимое время торможения, время работы тормоза
- прямые приводы, редукторы, компоненты передаточного механизма, момент инерции массы
- синхронизация с другими приводами
- время работы, органы управления
- связь с компьютером, интерфейсы, отображение информации
- конструкция и тип защиты
- возможность встраивания в преобразователь частоты децентрализованного интеллектуального управления

2. Характеристики условий эксплуатации

- высота установки над уровнем моря, температура окружающей среды
- требования к охлаждению, дополнительные средства охлаждения
- условия окружающей среды, в том числе влажность, наличие воды, грязи, пыли, газов
- особые требования, например, для горной и химической промышленности, судостроения, пищевой промышленности
- акустический шум

3. Питающая электросеть

- напряжение сети, колебания напряжения
- рабочие характеристики сети
- колебания частоты сети
- помехи питающей сети
- защита от коротких замыканий и перенапряжений
- отключение сети

4. Техническое обслуживание, эксплуатация, персонал

- обучение и инструктаж операторов
- техническое обслуживание
- запасные части / запасные устройства

5. Финансовые факторы

- затраты на приобретение (компонентов)
- требования к размещению, встроенный монтаж, конструкция
- затраты на монтаж
- ввод системы в эксплуатацию
- затраты на наладку
- эксплуатационные расходы
- коэффициент полезного действия системы (преобразователя частоты и машины)
- требования к реактивной мощности и компенсации нагрузки, создаваемой гармоническими составляющими
- срок службы изделия

6. Мероприятия по защите операторов / преобразователя / электродвигателя

- гальваническая развязка в соответствии с правилами PELV
- отключение фазы
- переключение на выходе преобразователя
- защита от замыканий на землю и от коротких замыканий
- катушки индуктивности в электродвигателе для уменьшения времени нарастания напряжения
- электронный контроль перегрева и подключения термисторов

7. Стандарты / нормативные документы

- национальные стандарты DIN, BS, UL, CSA, VDE, европейские стандарты EN
- международные стандарты IEC, CE и др.

8. Экологические факторы

- возможность утилизации изделия
- особенности изготовления
- вопросы энергосбережения

С помощью такого контрольного перечня можно выбрать преобразователь частоты, который отвечает большинству требований в стандартном варианте, но необходимо дополнительно проверить:

- имеет ли преобразователь сетевые дроссели или дроссели в промежуточной цепи для существенного подавления сетевых помех
- входит ли в стандартную комплектацию фильтр ВЧ-помех или его следует приобретать отдельно
- приходится ли ухудшать параметры электродвигателя при использовании преобразователя частоты
- имеет ли преобразователь собственную защиту от замыканий на землю и коротких замыканий
- правильно ли реагирует преобразователь в аварийной ситуации.

Приложение I. Общие принципы механики

Прямолинейное движение

Что касается прямолинейного движения, то тело остается в покое или движется прямолинейно до тех пор, пока на него не будет действовать какая-либо сила.

Силу F можно представить как произведение массы тела на изменение скорости тела за единицу времени. Изменение скорости во времени также называют ускорением « a ».

$F = m \times a$	Масса:	« m »	единица измерения: [кг]
	Ускорение:	« a »	единица измерения: [м / с ²]
	Сила:	« F »	единица измерения: [Н]

Чтобы поддерживать постоянное движение тела, на него должна непрерывно воздействовать некоторая сила: в противном случае силы, которые действуют в направлении, противоположном направлению движения, такие как трение и сила тяжести, приведут к замедлению и остановке.

Вращательное движение

В случае вращательного движения тело можно заставить вращаться или изменить направление вращения, если воздействовать на него моментом относительно центра масс. Подобно силе, момент рассматривается через его действие. Момент представляет собой произведение момента инерции тела на изменение скорости тела за единицу времени, т.е. углового ускорения α .

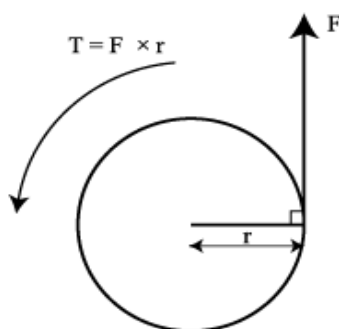


Рис. AI.01

$$T = J \times \alpha$$

Угловая скорость:

Угловое ускорение:

Момент инерции:

$\omega = 2 \pi n / 60$; n измеряется в [об./мин]

ω ; единица измерения: [рад/с]

$\alpha = d\omega / dt$; единица измерения: [рад/с²]

J ; единица измерения: [кг м²]

Подобно массе, момент инерции уменьшает ускорение.
его положение в пространстве относительно оси вращения.

Момент инерции зависит от массы тела и

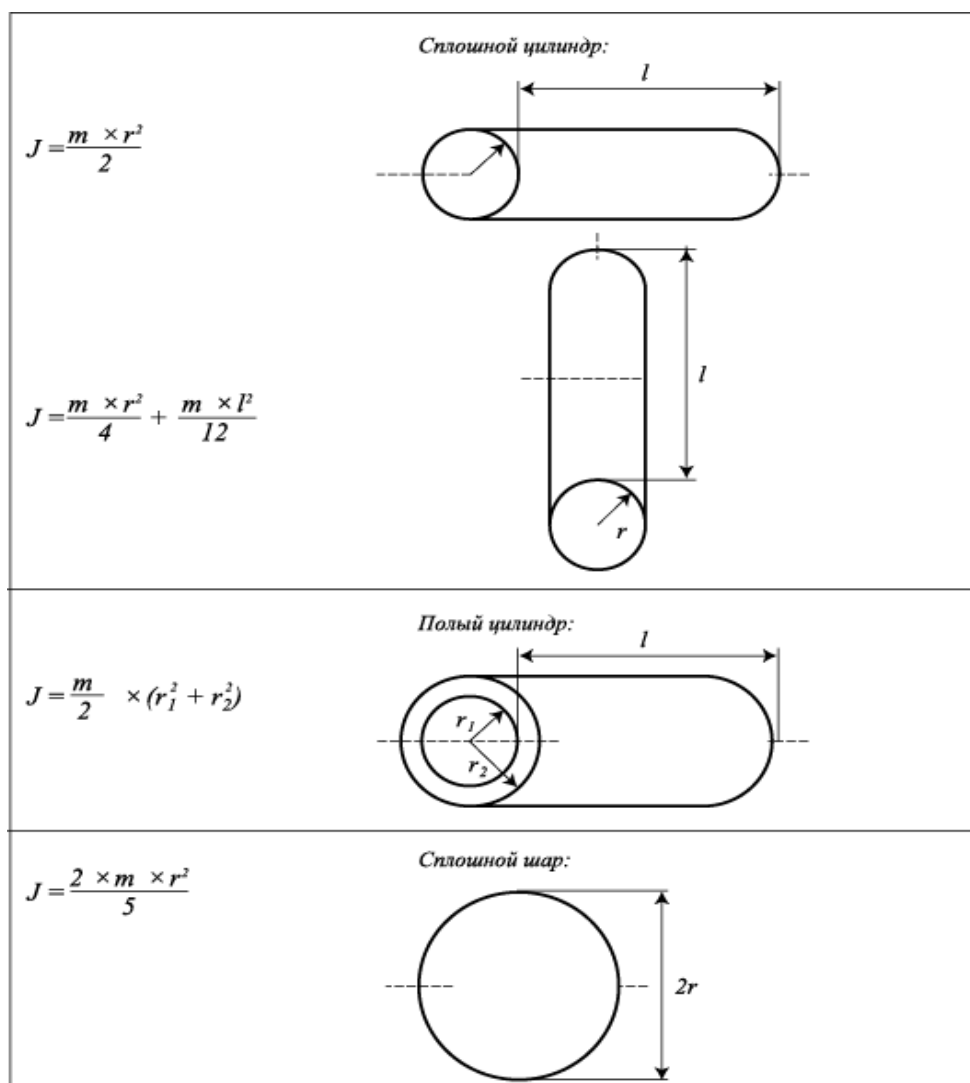


Рис. А1.02. Вычисление моментов инерции разных тел

Если требуется вычислить момент и ускорение системы, целесообразно сосредоточить все массы и силы инерции в одном моменте инерции на валу электродвигателя.

$$J = J_1 + J_2 \times (\omega_2 / \omega_1)^2 + J_3 \times (\omega_3 / \omega_1)^2 + \dots$$

J_1 :	собственный момент инерции электродвигателя и т. п.
J_2, J_3 :	моменты инерции элементов системы
ω_1 :	угловая скорость электродвигателя и т. п.
ω_2, ω_3 :	угловые скорости элементов системы

Работа и мощность

Работа, выполняемая электродвигателем при прямолинейном движении, может быть вычислена как произведение силы в направлении движения “F” на расстояние “s”, на которое переместилось тело.

$$W = F \times s$$

Длина перемещения: s	единицы измерения: [м]
Работа: W	единицы измерения: [Н × м]

При вращательном движении работа вычисляется как произведение вращающего момента T на угловое перемещение (φ).

Один оборот = $2 \times \pi$ [рад].

$$W = T \times \varphi$$

Угловое перемещение: φ	единицы измерения: рад
1 оборот = $2 \times \pi$	[рад].

Работа, производимая транспортным устройством, возрастает со временем, поэтому максимального значения не существует, и следовательно, нет установленной цифры, используемой при вычислении. Мощность P – это работа, произведенная за единицу времени, и эта величина не имеет максимального значения. В случае прямолинейного движения мощность вычисляется как произведение силы в направлении движения на длину перемещения за единицу времени, т.е. на скорость «v».

$$P = F \times V$$

единица измерения: [Вт]

Что касается вращательного движения, то мощность можно также вычислить как произведение вращающего момента на длину перемещения за единицу времени, т. е. на угловую скорость ω.

$$P = T \times \omega$$

единица измерения: [Вт]

Приложение II.

Элементы теории переменного тока

В английском языке аббревиатура «АС» означает переменный ток и может быть заменено символом «~». Этот ток изменяется как по величине (амплитуде), так и по направлению.

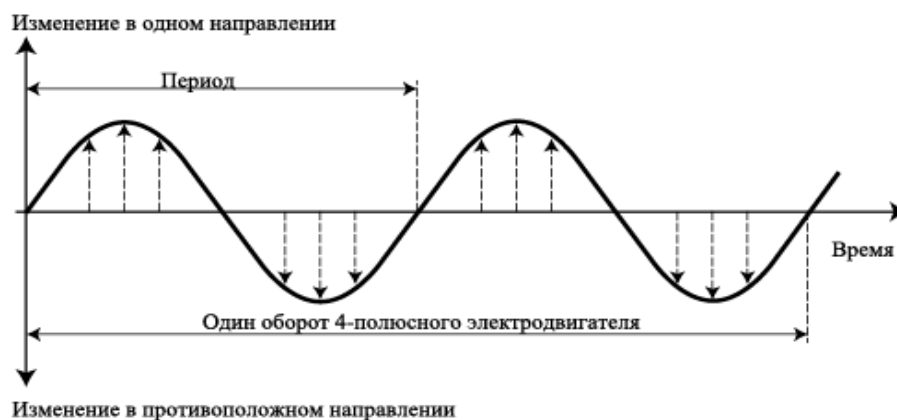


Рис. АII.01. Различные значения переменного тока

Число периодов в секунду называется частотой и указывается в герцах. 1 Гц = одному периоду в секунду. Длительность одного периода, или просто период, вычисляется по формуле $T = 1/f$. При частоте 50 Гц период равен 0,02 секунды.

В противоположность постоянным току и напряжению, которые характеризуются только направлением (положительным или отрицательным), переменные ток и напряжение изменяют свой знак во времени.

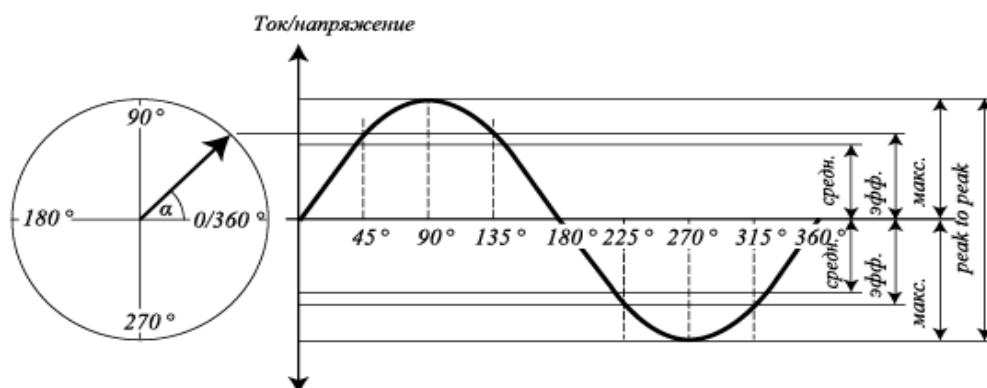


Рис. АII.02. Переменные ток и напряжение



Рис. АII.03. Направление вращения вектора – против часовой стрелки

Обычно используется эффективное значение. Переменный ток силой в 1 А вызывает в данном резисторе выделение такого же количества тепла, как и постоянный ток силой в 1 А.

В случае переменных токов и напряжений очень удобно использовать векторы. Они поясняют связь между током, напряжением и временем. Вектор характеризуется длиной и направлением вращения. Положительное направление вращения – против часовой стрелки.

Когда вектор совершает полный оборот от своей начальной точки, конец вектора описывает угол 360° .

Время одного оборота совпадает с периодом синусоиды. Скорость вектора за секунду называется угловой скоростью и обозначается греческой буквой ω . $\omega = 2 \times \pi \times f$.

Нагрузки переменного тока бывают трех типов.

Если нагрузка содержит обмотки со стальным сердечником, как в электродвигателях, то она является в основном индуктивной. В этом случае ток по времени отстает от напряжения.

Нагрузка может быть емкостной. Тогда ток по времени будет опережать напряжение. В случае чисто активной (резистивной) нагрузки сдвиг по времени между током и напряжением отсутствует. Сдвиг между напряжением и током называется фазовым углом (углом сдвига фаз) и обозначается греческой буквой Φ . Перемножая соответствующие значения тока и напряжения, можно получить значения мощности для трех типов нагрузок.

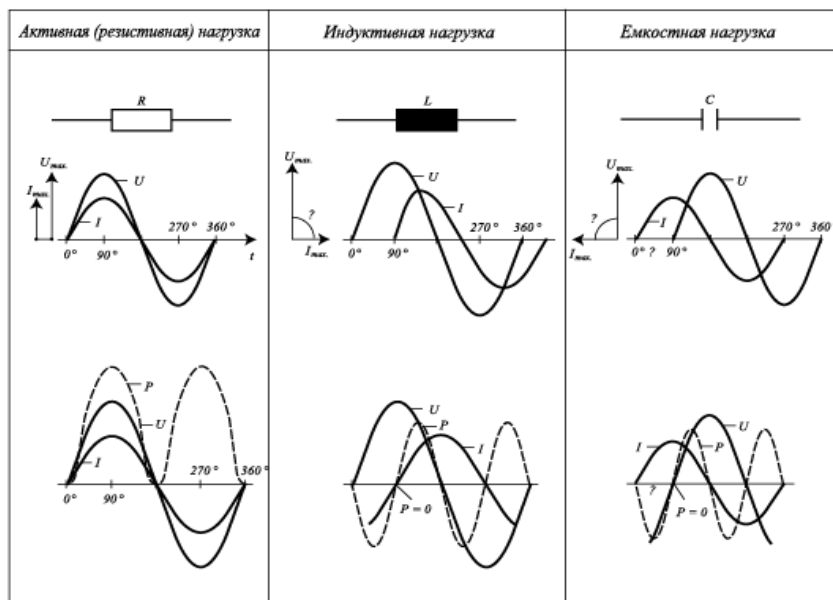


Рис. АП.04. Ток, напряжение и мощность под нагрузкой

«Чистые» типы нагрузок являются только теоретическими характеристиками при описании цепей переменного тока. Нагрузка бывает либо индуктивной, либо емкостной.

Коэффициент мощности

Коэффициент мощности λ определяется как отношение активной мощности к полной.

Часто этот коэффициент обозначают как $\cos \varphi$; однако $\cos \varphi$ определяется только для синусоидальных токов и напряжений.

В случае нелинейных нагрузок, таких как преобразователь частоты, ток нагрузки не будет синусоидальным. Поэтому необходимо отличать $\cos \varphi$ от коэффициента мощности.

$$\lambda = P / I \times U = I_w / I$$

P – активная мощность, I_w – активный ток, I и U – эффективные значения.

φ – фазовый угол между током и напряжением. Таким образом, в случае чисто синусоидальных тока и напряжения $\cos \varphi$ соответствует зависимости между активной и полной мощностью.

	Обозначение	Обычное выражение	Ед. изм.
Мощность	$P =$	$U \times I \times \cos \varphi = S \cos \varphi$	Вт или кВт
	$Q =$	$U \times I \times \sin \varphi = S \sin \varphi$	ВАр или кВАр
	$S =$	$U \times I = P / \cos \varphi = Q / \sin \varphi$	ВА или кВА
Напряжение	$U =$	$P / I \times \cos \varphi = Q / I \times \sin \varphi = S / I$	В
Ток	$I_s =$	$P / U \times \cos \varphi = Q / U \times \sin \varphi = S / U$	А
	$I_w =$	$P / U = S \times \cos \varphi / U$	А
	$I_b =$	$Q / I = S \times \sin \varphi / I$	А
Фазовый сдвиг	$\cos \varphi =$	$P / U \times I = P / S$	Нет ед. изм.
	$\sin \varphi =$	$Q / U \times I = Q / S$	Нет ед. изм.
Рис. АП.05			

Трехфазный переменный ток

В трехфазных системах напряжения сдвинуты между собой на угол в 120° . Три фазы обычно изображают в одной системе координат.

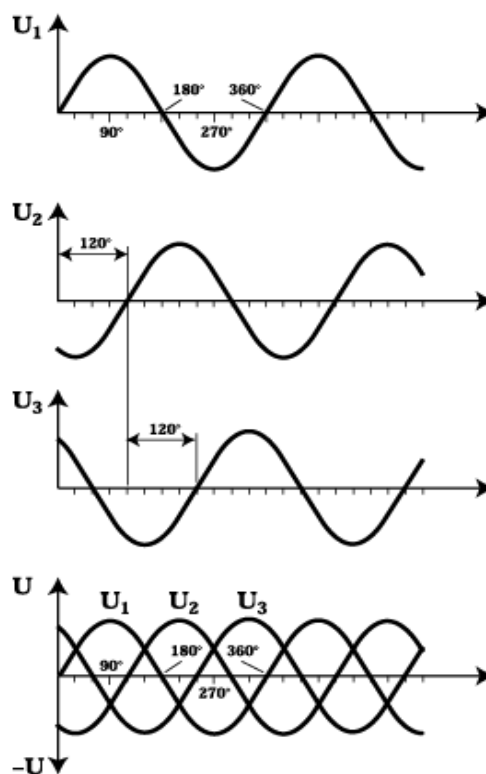


Рис. АП.06. Трехфазное напряжение переменного тока состоит из трех отдельных напряжений переменного тока, сдвинутых по времени

Напряжение между фазным и нулевым проводами называют фазным напряжением U_f , а напряжение между двумя фазами – сетевым (линейным) напряжением U_N .
Отношение U_N к U_f равно $\sqrt{3}$.

Соединение звездой или треугольником

Когда трехфазная сеть питания подается на электродвигатель, являющийся нагрузкой, обмотки электродвигателя соединяются по схеме звезды или треугольника.

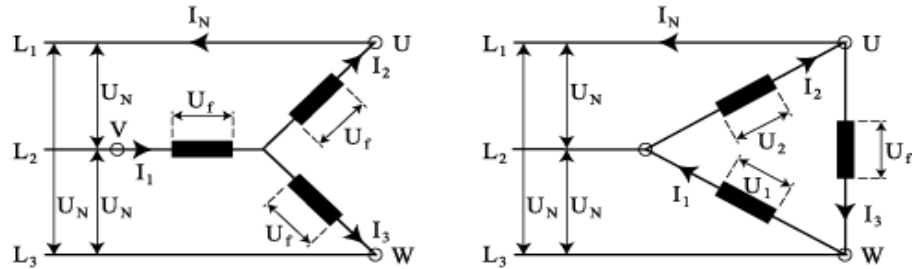


Рис. АП.01. Фазные и линейные параметры цепи при соединении в звезду и треугольник

В схеме звезды каждая фаза подключена к одному концу одной из обмоток электродвигателя, в то время как другие концы обмоток соединены между собой (нейтраль звезды). Напряжения на отдельных обмотках равны:

$$U_f = U_1 = U_2 = U_3 = U_N / \sqrt{3}$$

Соотношение для токов: $I_1 = I_2 = I_3 = I_N$

В схеме треугольника обмотки электродвигателя соединены последовательно. Каждая точка соединения обмоток подключена к фазе.

Напряжения на отдельных обмотках равны:

$$U_N = U_1 = U_2 = U_3$$

Соотношение для токов: $I_1 = I_2 = I_3 = I_N / \sqrt{3}$

Приложение III. Сокращения и обозначения

ASIC	Прикладная интегральная микросхема	SFAVM	Stator Flux-orientated Asynchronous Vector Modulation = асинхронная векторная модуляция с оптимизацией магнитного потока статора
CSI	Инвертор тока		
d	Расстояние		
DDC	Прямое цифровое управление	S_M	Полная мощность (электродвигателя)
f	Частота	t_{acc}	Время разгона
F	Сила	t_{dec}	Время торможения
g	Сила тяжести	t_{off}	Время, в течение которого транзистор выключен
HP	Мощность в лошадиных силах	t_{on}	Время, в течение которого транзистор включен
I_1	Ток статора	T	Крутящий момент
I_B	Реактивный ток/ток, создающий магнитный поток	T_a	Пусковой крутящий момент
I_L	Ток ротора	T_{acc}	Крутящий момент при разгоне
I_M, I_S	Ток электродвигателя (полный ток)	T_{dec}	Тормозной момент
I_N	Номинальный ток	T_k	Опрокидывающий крутящий момент, момент опрокидывания
I_W	Ток, создающий крутящий момент/активный ток	T_N	Номинальный крутящий момент
I_ϕ	Ток намагничивания	U	Напряжение
IC	Коммутационные интегральные микросхемы	U_q	напряжение намагничивания
J	Момент инерции	U_s	Падение напряжения (в статоре)
L	Индуктивность	VVC	Векторное регулирование напряжения
n	Скорость	W	Работа
n_n	Номинальная скорость (вращения)	WK^2	Эффект маховика
n_o	Синхронная скорость	X_h	Реактивное сопротивление
n_s	Скольжение	X_L	Реактивное сопротивление
p	Число пар полюсов	F	Главный поток, поток статора
P	Мощность/активная мощность	Φ	Главный поток, поток статора
P_1	Входная мощность (электрическая)	Φ_L	Поток ротора
P_2	Выходная мощность (механическая)	η	Коэффициент полезного действия электродвигателя
P_V	Потери мощности	ω	Угловая скорость
PLC	Программируемый логический контроллер		
r	Радиус		
R_{FE}	Активное сопротивление		
s	Скольжение		
S	Полная мощность		

Литература

Дополнительная литература:

P. Thogersen, M. Tønnes,
U. Jæger, S.E. Nielsen:
*»New High Performance Vector
Controlled AC-Drive with
Automatic Energy Optimizer«*
6th European Conference on
Power Electronics and
Applications; Sept. 1995
S. Anderson og K. Jørgensen:
»Vekselstrømsmaskiner, -anlæg«
Polyteknisk forlag, 1985

P.F. Brosch:
»Frequenzumformer«,
Verlag moderne industrie, 1989

P.F. Brosch:
»Moderne Stromrichterantriebe«
Vogel Buchverlag 1992

ELFO:
»El-faglsere«
Elinstallatørernes Lands-
forening, 1993

R. Fisher:
»Elektrische Maschinen«
Carl Hanser Verlag, 1986

W. Gilson:
*»Drehzahlgeregelte Drehstrom-
antriebe«*

VDE-Verlag, 1983
E.v. Holstein-Rathlou:
»Stærkstrømselektroteknik«
J. Jørgensen & Co. Bogtrykkeri,
1939

K. Jark og A.H. Axelsen:
»Elektroteknik«

H. Hagerup, 1966

Thomas Kibsgard:

»EL Ståbi«

Teknisk Forlag A/S, 1988

U. Krabbe:

»Strømrettere«

Danmarks Tekniske Højskole,
1982

W. Norbøll:

»Elektricitetslære«

P. Haase & Sønns Forlag, 1952

Sprecher + Schuh AG:

»Schiitz-Steuerungen«

Sprecher + Schuh AG, 1982

J. Nedtwig, M. Lutz:

»WEKA Praxis Handbuch«

Weka Fachverlag für technische
Führungskräfte, 1996

H.R. Schmeer:

»EMV96«

VDE-Verlag, 1996