

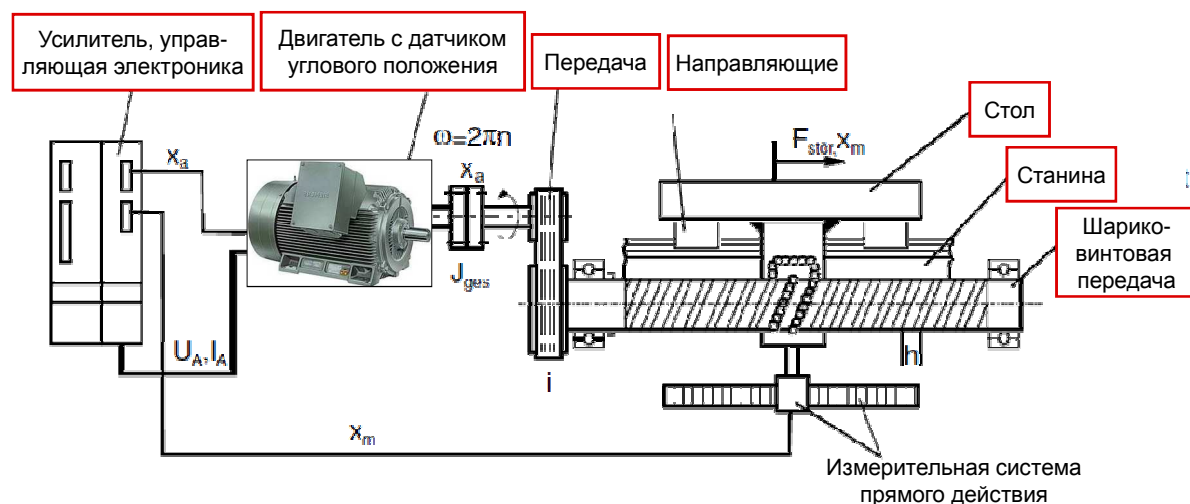
## **Лекция №10**

# **Металлообрабатывающие станки**

Электродвигатели и частотные преобразователи

## Содержание

- 1 Типы двигателей
- 2 Типы преобразователей
- 3 Заключение



Источник: Siemens

**Рис. 10-1: Схема оси подачи**

С начала 70-х годов прошлого века постоянно расширяется использование в станкостроении микроэлектроники и микрокомпьютеров. Интенсивное развитие средств автоматизации металлообрабатывающих станков повышает их точность и производительность, расширяет их функциональность.

Одной из важнейших задач металлообрабатывающих станков и промышленных роботов является точное перемещение функциональных компонентов по заданной траектории. Например, металлообрабатывающие станки должны осуществлять точные относительные перемещения инструмента и заготовки, а промышленные роботы – точное выполнение монтажных операций или операций по нанесению покрытий.

Перемещаемые компоненты - ползуны, столы или манипуляторы роботов, приводятся в движение непосредственно от двигателя или через механические передачи. В качестве приводов используются, как правило, высокودинамичные синхронные серводвигатели. К применяемым механическим передачам относятся, среди прочих, передачи винт-гайка, зубчатое колесо – зубчатая рейка. Точное определение положения поступательно перемещаемых компонентов, а также угловое положение поворотных столов или осей роботов, осуществляется с помощью прецизионных измерительных систем. С их помощью фиксируются отклонения от заданного положения, которые затем передаются в контур регулирования. Последний работает на основе управляющего алгоритма, посылающего управляющие сигналы на блоки управления двигателем, которые генерируют соответствующий управляющий ток для создания крутящего момента двигателя. При расчете управляющих сигналов в алгоритме учитывается допустимое минимальное отклонение действительного положения от заданного. Для обеспечения безошибочного функционирования системы необходимо обеспечить взаимодействие различных технических систем.

- Механические системы. Включают структурные компоненты станка, такие как столы, колонны, направляющие, а также коробки скоростей, обеспечивающие кинематическую передачу рабочих усилий и реализацию формообразующих движений.

- Информационные системы. Обеспечивают функционирование программного обеспечения для осуществления контроля и управления положением функциональных компонентов.

- Электронные и компьютерные системы. Предоставляют техническую базу для использования информационных систем.

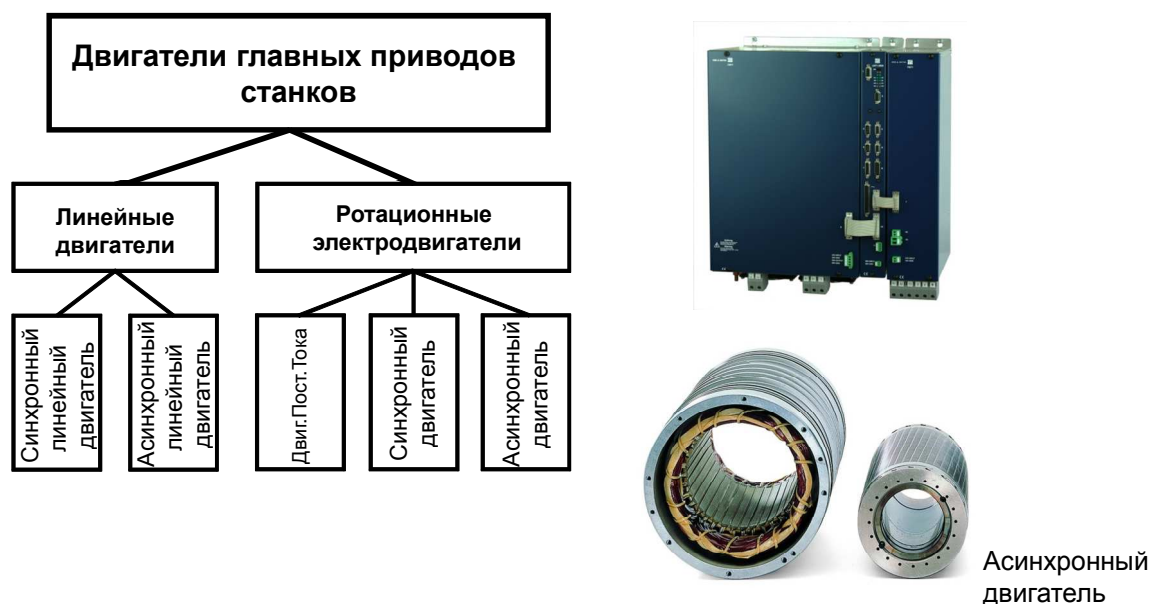
- Электрические системы и усилители. Реализуются в соответствии с электрическими схемами оборудования и обеспечивают электропитание источников движения.

Вышеназванные технические системы объединяются общим понятием - мехатронные системы, содержащие в себе механические и электронные составляющие и использующие преимущества их комбинированного использования.

Разработка мехатронных систем автоматизации, включающая детальную проработку функциональности отдельных компонентов, а также разделение необходимых функций по отдельным дисциплинам, требует от специалистов подготовки, далеко выходящей за рамки классического машиностроения.

На Рис. 10-1 представлена схема реализации движения подачи рабочего стола обрабатывающего центра. Движение от двигателя передается через муфту и зубчатый ремень на ходовой винт. Ходовая гайка качения трансформирует вращательное движение ходового винта в поступательное движение рабочего стола. Угловое положение ротора двигателя контролируется с помощью датчика углового положения. Положение рабочего стола может определяться опосредованно через угловое положение ротора двигателя, если известно передаточное отношение привода (передаточное отношение  $i$  ременной передачи и шаг ходового винта  $h$ ). Применение цифровых усилителей в системах приводов позволяет рассчитать скорость вращения двигателя на основе сигнала положения, что позволяет отказаться от применения тахогенератора.

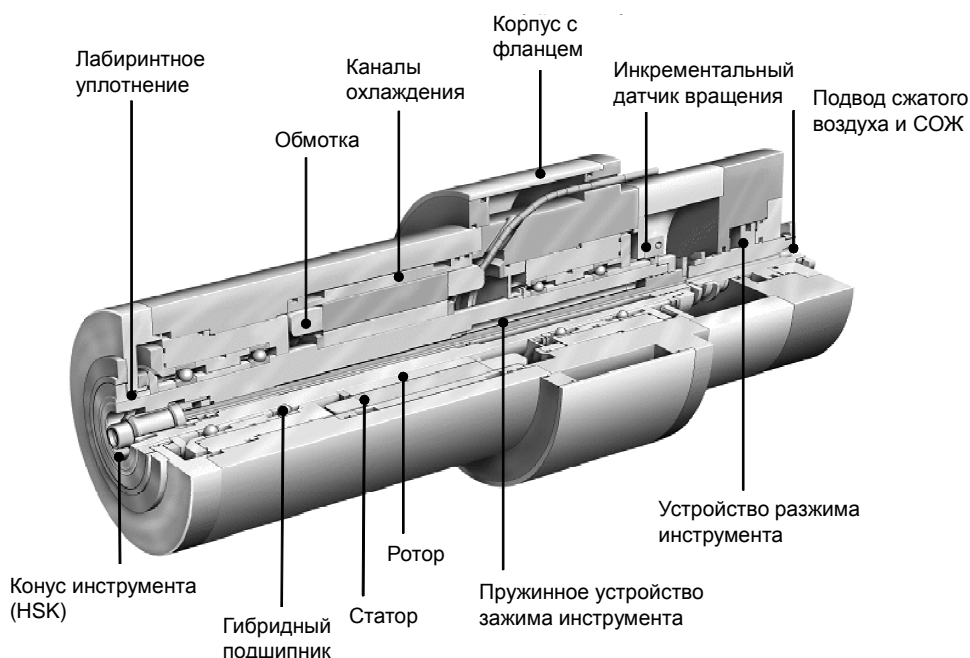
Положение рабочего стола может также определяться с помощью прямой измерительной системы. Данное решение позволяет повысить точность перемещения, так как присутствующие в приводе трение, люфт, деформация и геометрические ошибки компонентов привода регистрируются измерительной системой. Сигнал положения, выдаваемый непосредственной измерительной системой, обозначается  $x_m$ , а рассчитанный на основе углового положения двигателя -  $x_a$ . Для реализации управления положением перемещаемых компонентов металлообрабатывающих станков в настоящее время применяются, как правило, либо прямые, либо опосредованные системы измерения положения.



Источник: SIEB & MEYER

**Рис. 10-2: Виды двигателей главных приводов станков**

В современных металлообрабатывающих станках приводы движения подачи реализуются, как правило, с помощью электродвигателей. Существуют конструктивные исполнения электродвигателей с различной мощностью, крутящим моментом и максимальной частотой вращения. На Рис. 10-2 представлены различные конструктивные варианты применяемых в станкостроении электродвигателей. Во всем диапазоне скоростей, от наименьших допустимых скоростей подачи до ускоренных перемещений, регулирование перемещения осуществляется непосредственно блоком управления двигателем. Применение коробки скоростей во многих случаях не является необходимым, что значительно упрощает конструкцию приводов станков. Ротационные электродвигатели подразделяются на двигатели постоянного тока, синхронные, асинхронные и шаговые. Линейные двигатели представляют собой развертку ротационных двигателей, и позволяют реализовать поступательное перемещение без применения механических передач для трансформации движения. Основными требованиями к двигателям являются высокие динамические свойства, т.е. невысокая масса ротора, низкая инертность, высокое ускорение, плавность хода, особенно при наименьших допустимых частотах врезания и скоростях подачи.



**Рис. 10-3: Мотор-шпиндель с асинхронным двигателем**

Альтернативным конструктивным решением для реализации главного привода шпинделя является применение шпиндель-моторов. В данной конструкции электродвигатель расположен в корпусе шпинделя между передними и задними опорами. Как правило, применяются асинхронные двигатели переменного тока. Ротор двигателя напрессовывается непосредственно на вал шпинделя (Рис. 10-3). Для снижения температурных деформаций статор двигателя снабжен системой каналов для водяного охлаждения. К преимуществам шпиндель-моторов, в сравнении с конвенциональными конструкциями, в которых привод шпинделя осуществляется через ременную или зубчатую передачу, относятся:

- высокая торсионная жесткость привода, достигаемая за счет отсутствия промежуточных механических компонентов, характеризующихся конечной жесткостью и наличием люфта;
- компактность конструкции двигателя;
- высокая плавность и точность хода шпинделя, в особенности на низких частотах вращения.
- частота вращения и угловое положение двигателя контролируются датчиком с эталонным зубчатым колесом.

Стандартные сегодня конструкции шпиндель-моторов позволяют реализовать, в зависимости от диаметра шпинделя, частоты вращения более  $20.000 \text{ мин}^{-1}$  и максимальные крутящие моменты до  $750 \text{ Нм}$ . Особое внимание уделяют при этом нагреву ротора в процессе эксплуатации. Вихревые токи в роторе двигателя вызывают нагрев вала шпинделя, подшипников и корпуса шпинделя, ведущий к температурным деформациям компонентов узла и оказывающим негативное воздействие на точность обработки, а также на долговечность подшипников. Поскольку между статором и ротором присутствует воздушный зазор, вырабатываемое при работе шпинделя тепло только частично абсорбируется охлаждающей системой в корпусе шпинделя. Это обуславливает необходимость тщательного выбора рабочих режимов, а также применения специальных технических решений для снижения тепловыделения шпиндельного узла.

	Главные приводы	Приводы подачи	Вспомогательные приводы
	Фрезерные и токарные шпиндели Приводы прессов	Приводы подач x, y, z, A, B, C	Насосы для СОЖ, вентиляторы, манипуляторы
Частота вращения	0 – 40 000 мин <sup>-1</sup>	0 - 6000 мин <sup>-1</sup>	-
Область регулирования частоты вращения	> 1 : 500 000	> 1 : 500 000	постоянная
Мощность	до 150 кВт (S1)	до 20 кВт	низкая
Крутящий момент	20 – 4800 Нм	5 - 100 Нм	низкий
Динамика	5 - 500 мс До номинальной частоты вращения	5 - 50 мс До номинальной частоты вращения	низкая

Рис. 10-4: Требования к электроприводам металлорежущих станков

Разделяют приводы главного и вспомогательных движений. Главный привод должен иметь необходимую мощность для реализации процесса резания, а вспомогательные приводы - обеспечивать установочные движения компонентов станка для получения необходимой формы детали (Рис. 10-4). В распространенных конструкциях главных и вспомогательных приводов применяются ротационные двигатели переменного тока (синхронные и асинхронные). Приводы подач реализуются также электрическими линейными двигателями, имеющими высокое допустимое ускорение и скорость перемещения. Основное применение данные двигатели находят в высокоскоростных обрабатывающих центрах. Работа вспомогательных устройств, например, для подвода СОЖ, отвода стружки, привода охлаждающей системы осуществляется с помощью асинхронных двигателей.

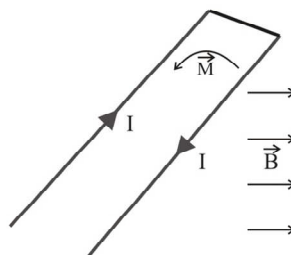
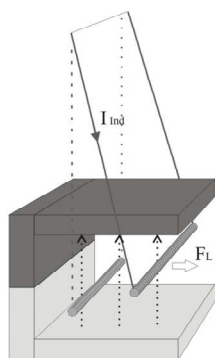
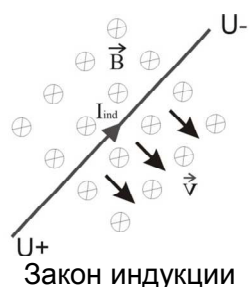
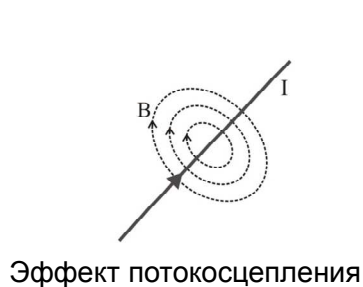


Рис. 10-5: Физический принцип работы электродвигателя

Работа электродвигателей различной конструкции основан на трех физических эффектах.

**Эффект намагничивания.** Вокруг каждого проводника, по которому течет электрический ток, создается магнитное поле. Обмотки индукционной катушки создают гомогенное магнитное поле во внутреннем пространстве катушки. Напряженность поля пропорциональна числу витков катушки. Применение мягких магнитных материалов применяется для концентрации магнитного потока  $\Phi$ , представляющего собой произведение плотности магнитного потока  $B$  и площади сечения сердечника. Также магнитный поток может генерироваться с помощью постоянных магнитов.

**Эффект индуктивного напряжения.** Движение катушки (в случае электродвигателя – вращение) в гомогенном магнитном поле индуцирует напряжение на концах обмотки катушки. При замыкании контура в нем наблюдается электрический ток.

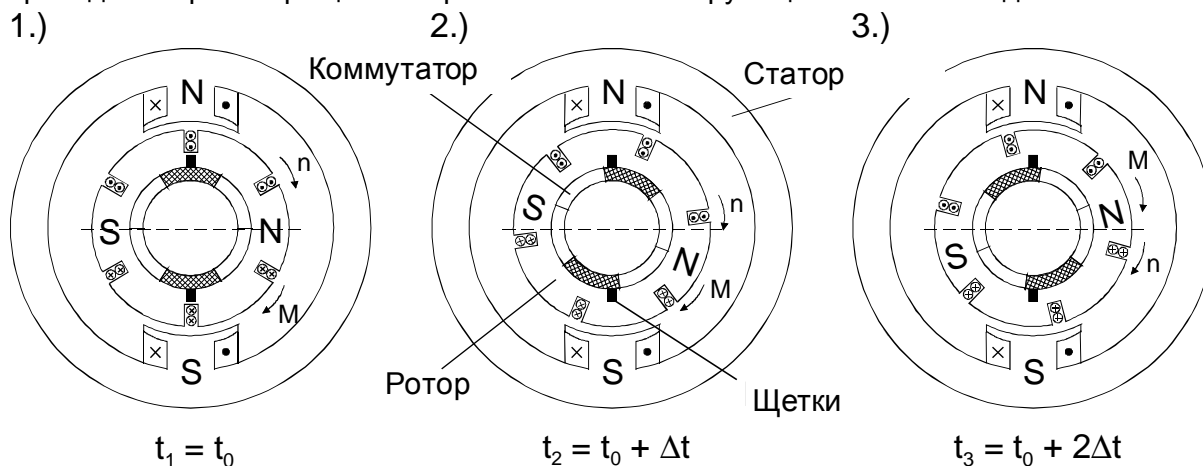
**Закон Лоренца.** На проводник с током в магнитном поле действует некоторая сила. На пару проводников с током действует пара сил, создающая крутящий момент. Также вращательный момент может создаваться путем наложения непосредственных магнитных сил.

В стационарном состоянии электродвигатель должен обеспечивать близкий к постоянному крутящий момент при вращения вала. Конструкции двигателей отличаются друг от друга способом создания магнитного поля, а также изменением относительного пространственного направления сил, действующих на проводники тока в магнитном поле.



**Двигатель постоянного тока**

В корпусе (статоре) двигателя постоянного тока (ДПТ) расположены катушки индуктивности, через которые течет постоянный ток. Катушки генерируют постоянное магнитное поле с неизменной ориентацией, называемое полем возбуждения. Величина магнитного потока  $\Phi$  зависит от тока возбуждения  $I_f$ , проходящего через катушки, что дает возможность управления величиной  $\Phi$ . В конструкции ДПТ с постоянным возбуждением, вместо катушек возбуждения применяются постоянные магниты. В данной конструкции возможность настройки потока  $\Phi$  отсутствует. В якоре двигателя (компонент двигателя, в котором поле возбуждения через воздушный зазор наводит ЭДС, в данном случае – ротор двигателя) выполнены пазы, в которых уложена обмотка. По обмотке якоря течет якорный ток  $I_A$ . Обмотки якоря соединяются с коммутатором, состоящим из изолированных друг от друга медных пластин. Подвод тока  $I_A$  через неподвижные проводники к вращающемуся якору осуществляется через подпружиненные угольные щетки, скользящие по вращаемому коммутатору. В постоянном магнитном поле на расположенные на якоре проводники с током, действуют силы, создающие крутящий момент  $M$  вокруг оси двигателя, который приводит якорь во вращение. При этом величина крутящего момента падает.



**Рис. 10-6: Схема работы двигателя постоянного тока при постоянной частоте вращения**

Коммутатор обеспечивает подвод тока непосредственно к частям обмотки, проходящим зону, отмеченную на Рис. 10-6 штриховкой, в противоположном направлении движения, что позволяет реализовать положительный крутящий момент. Для этого в катушке якоря предусмотрено несколько обмоток, поочередно контактирующих с коммутатором.

Один из вариантов электрической цепи для коммутации отдельных обмоток представлен на Рис. 10-7. На рисунке показаны обмотки двигателя в развертке окружности ротора. Каждый конец обмотки через соответствующие пластины коммутатора последовательно соединяется с соседними щетками. Якорный ток  $I_A$ , подводимый через щетки, разделяется поровну между двумя участками цепи. При вращении коммутатора реализуется последовательное изменение полярности соответствующей пары обмоток за счет контакта соседних пластин коммутатора со щетками. Таким образом достигается равномерное распределение крутящего момента по угловому положению ротора с незначительными колебаниями абсолютной величины.

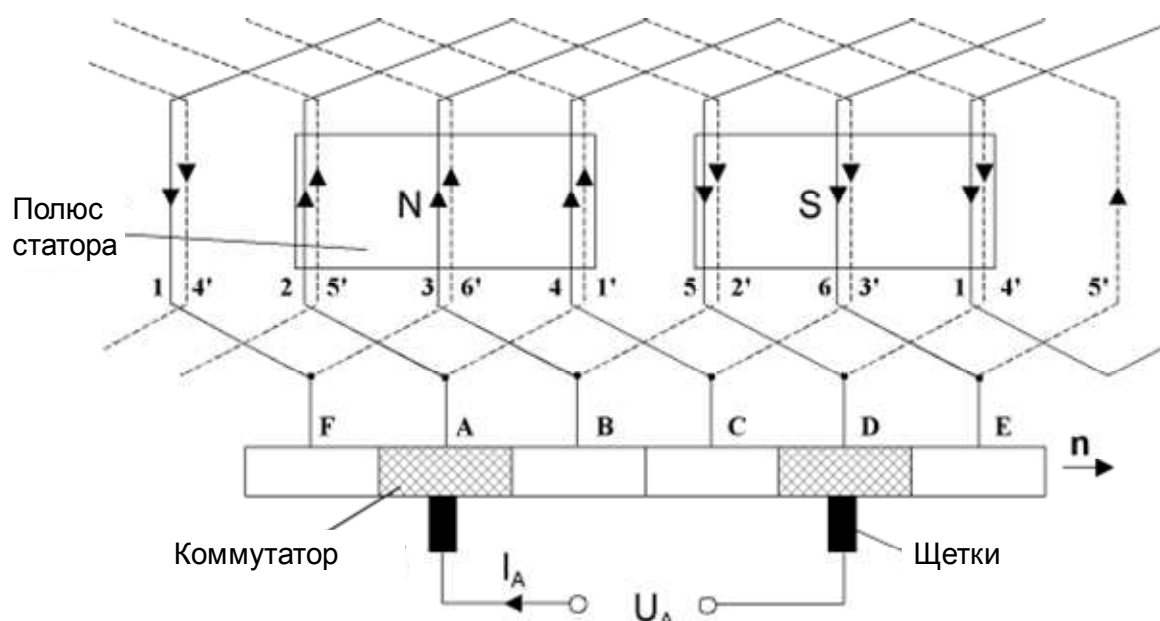


Рис. 10-7 Расположение обмоток в Двигателе Постоянного Тока

При равномерном распределении нескольких катушек в корпусе двигателя достигается поочередное расположение южных и северных полюсов по периметру статора. Количество подключаемых к коммутатору якорных обмоток и щеток должно соответствовать количеству пар полюсов статора. В крупногабаритных двигателях таким образом возможно сократить поперечное сечение сердечника, а следовательно и потери на перемагничивание. В многополюсных двигателях частота токов в роторе соответствует числу пар полюсов, умноженному на частоту вращения  $f = n \cdot p$ . Хотя в проводниках протекает постоянный ток, за счет изменения направления тока в проводниках, изменение силы тока приобретает определенную частоту. Получаемый таким образом переменный ток наводит вихревые токи в роторе (т.е. вызывает электрические потери), во избежание чего тело ротора набирается из изолированных между собой металлических пластин.

Вращение якорной катушки в магнитном поле вызывает возникновение обратной ЭДС индукции  $U_i$  в обмотках якоря, направленной противоположно напряжению на якоре  $U_A$ . В приводах главного движения эксплуатация ДПТ осуществляется исключительно с применением независимых источников напряжения для обмоток возбуждения и якоря. Такие ДПТ называют двигателями с внешним возбуждением. Особым исполнением ДПТ с внешним возбуждением является двигатель с возбуждением постоянными магнитами. В современном станкостроении ДПТ практически не находят применения, так как механическое перенаправление тока и связанный с ним износ ведет к необходимости частого техобслуживания.

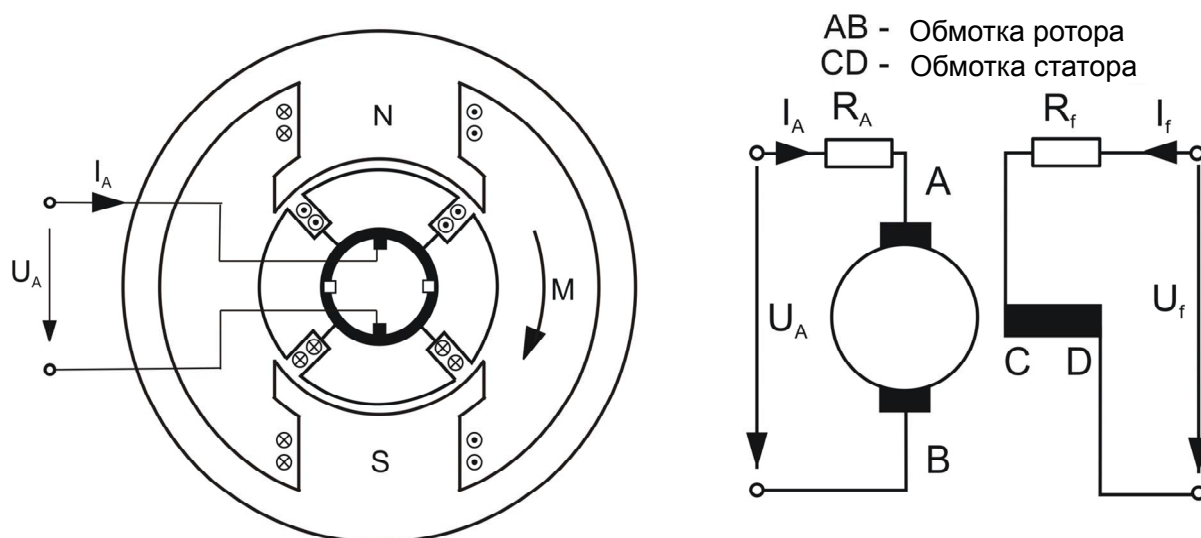


Рис. 10-8: Функциональная схема двигателя постоянного тока (ДПТ)

Для ДПТ с внешним возбуждением справедливы следующие основные уравнения, для вывода которых используется функциональная схема ДПТ на Рис. 10-8:

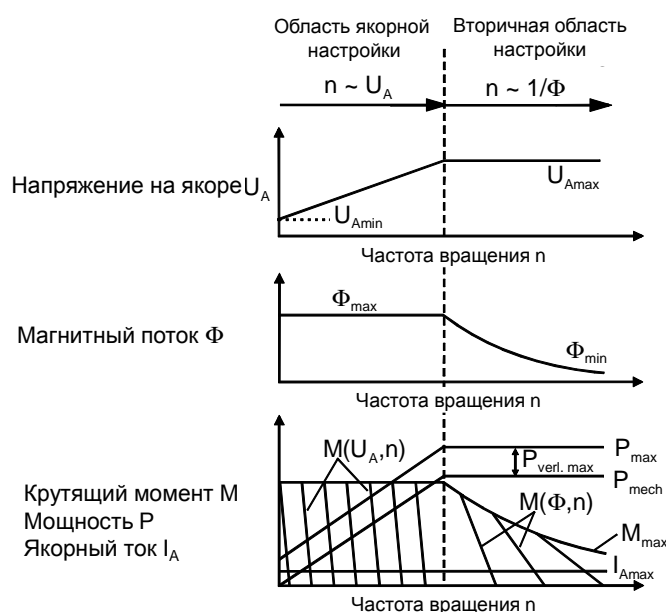
$$U_A = \underbrace{k_1 \cdot \Phi \cdot n}_{U_i} + R_A \cdot I_A \quad (10-1)$$

$$M = \frac{k_1}{2\pi} \cdot \Phi \cdot I_A \quad (10-2)$$

$$U_f = R_f \cdot I_f \quad (10-3)$$

Напряжение на якоре  $U_A$  складывается из противо-ЭДС  $U_i$ , пропорциональной частоте вращения якоря и падения напряжения  $R_A I_A$  на омическом сопротивлении  $R_A$  якорной катушки (уравнение 10.1). Напряжение возбуждения может изменяться только в двигателях с внешним возбуждением. Поток возбуждения  $\Phi$  пропорционален току  $I_f$  в соответствии с токовой характеристикой системы. В нижней части характеристики поведение кривой линейное, в области более высоких значений характеристика выравнивается вследствие насыщения железа в области полюсов статора.

При неизменном напряжении на якоре  $U_A$  и заданном потоке  $\Phi$  при неподвижном двигателе ( $n = 0$ ) наблюдается максимальный ток в якоре  $I_A$  и, соответственно, максимальный крутящий момент. С повышением частоты вращения ток в якоре  $I_A$  падает вследствие действия противо-ЭДС  $U_i$ , так что крутящий момент также снижается. При решении уравнения (10-1) по  $n$  и при замещении  $I_A$  с помощью уравнения (10-2), возможно рассчитать скоростную и моментную характеристику двигателя.

Стандартные значения

$$\frac{U_{Amin}}{U_{Amax}} = \frac{1}{50} \quad \boxed{U_A = k_1 \Phi \cdot n + R_A \cdot I_A}$$

$$\frac{\Phi_{min}}{\Phi_{max}} = \frac{1}{4} \quad \boxed{M = \frac{k_1 \Phi}{2\pi} \cdot I_A}$$

Поведение под нагрузкой

$$n = \frac{U_A}{k_1 \Phi} - \frac{R_A}{k_1 k_2 \Phi^2} M \quad k_2 = \frac{k_1}{2\pi}$$

$$\text{oder } M(n) = \frac{U_A}{R_A} k_2 \Phi - \frac{k_1 k_2 \Phi^2}{R_A} n$$

Граничные значения

$$I_{Amax} = \text{konst.}$$

$$M_{max} = k_2 \Phi I_{Amax}$$

$$P_{max} = P_{mech,max} + P_{verl,max}$$

$$= 2\pi n M_{max} + R_A I_{Amax}^2$$

$$P_{verl,max} = R_A I_{Amax}^2 = \frac{R_A M_{max}^2}{k_2^2 \Phi^2}$$

**Рис. 10-9: Характеристики и уравнения для расчета ДПТ**

$$n(M) = \frac{U_A}{k_1 \cdot \Phi} - \frac{2\pi \cdot R_A}{(k_1 \cdot \Phi)^2} \cdot M \quad (10-4)$$

$$M(n) = \frac{k_1 \cdot \Phi}{2\pi \cdot R_A} \cdot U_A - \frac{(k_1 \cdot \Phi)^2}{2\pi \cdot R_A} \cdot n \quad (10-5)$$

При неизменном  $U_A$  и  $\Phi$  характеристики линейны, а их наклон рассчитывается по следующим формулам.

$$\frac{dn}{dM} = -\frac{2\pi \cdot R_A}{(k_1 \cdot \Phi)^2} \quad \text{или} \quad \frac{dM}{dn} = -\frac{(k_1 \cdot \Phi)^2}{2\pi \cdot R_A} \quad (10-6)$$

**Жесткость скоростной характеристики**

Абсолютная величина наклона  $\left| \frac{dM}{dn} \right|$  обозначается как жесткость скоростной характеристики. Чем больше значение жесткости, тем меньше изменение частоты вращения двигателя вследствие действия нагрузки  $\Delta M$ .

**Мощность**

Мощностной баланс двигателя определяется путем умножения обеих частей уравнения (10-1) на  $I_A$  и замены  $k_1 \cdot \Phi \cdot I_A$  на  $2\pi \cdot M$  в соответствии с уравнением (10-2):

Мощность  $P_{el}$ , потребляемая двигателем, складывается из требуемой механической мощности двигателя  $P_{mech}$  и целевой мощности потерь на якоре  $P_{verl,A}$ . В двигателях с внешним возбуждением дополнительно необходимо учитывать потерю мощности на

возбуждение  $P_{verl,f} = R_f \cdot I_f^2$ .

$$\underbrace{U_A \cdot I_A}_{P_{el}} = \underbrace{M \cdot \omega}_{P_{mech}} + \underbrace{R_A \cdot I_A^2}_{P_{verl,A}} \quad (10-7)$$

**Состояние покоя ( $n = 0$ , двигатель остановлен)**

Для случая неподвижного двигателя ( $n = 0$ ) приведенные выше уравнения (10-1), (10-2), и (10-7) значительно упрощаются и приводятся к следующему виду:

$$U_A = R_A \cdot I_A \quad (10-8)$$

$$M = \frac{k_1 \cdot \Phi}{2\pi} \cdot \frac{U_A}{R_A}$$

$$P_{el} = U_A \cdot I_A = R_A \cdot I_A^2 = P_{verl,A}$$

На данном режиме двигатель потребляет максимальный ток  $I_A$ , доступный при напряжении  $U_A$ , и создает наибольший крутящий момент. Поскольку механическая мощность при нулевой частоте вращения равна нулю, вся мощность  $P_{el}$ , потребляемая двигателем, переходит в тепловые потери ( $P_{verl,A}$ ).

**Ограничение величины тока**

Поскольку в режиме остановки двигатель может перегреться, в конструкции двигателя предусмотрен ограничитель силы тока на якоре  $I_A = I_{A,grenz}$ . Кратковременное превышение номинального тока на якоре  $I_{AN}$ , как правило, допустимо, поэтому граничное значение силы тока  $I_{A,grenz}$  может составлять величину, кратную  $I_{AN}$ .

$$M = \frac{k_1 \cdot \Phi}{2\pi} \cdot I_{A,grenz} = \text{const.} \quad \text{для значений } I_{A,soll} > I_{A,grenz}$$

Т.е. для частот вращения меньших частоты коммутации  $n_{UP}$ , справедливо:

$$n_{UP} = \frac{U_A - R_A \cdot I_{A,grenz}}{k_1 \cdot \Phi} \quad (10-9)$$

Таким образом, двигатель выдает постоянный крутящий момент.

**Холостой ход ( $M = 0$ )**

На данном режиме двигатель вращается с частотой холостого хода  $n_0$ .

$$I_A = 0 \quad (10-10)$$

$$n_0 = \frac{U_A}{k_1 \cdot \Phi}$$

$$P_{el} = P_{mech} = P_{A,verl} = 0$$

**Настройка частоты вращения**

В общем случае настройка частоты вращения ДПТ осуществляется в соответствии с уравнением:

$$n = \frac{U_A}{k_1 \cdot \Phi} - \frac{2\pi \cdot R_A}{(k_1 \cdot \Phi)^2} \cdot M$$

Изменение частоты вращения производится через изменение  $U_A$  и  $\Phi$ .  $R_A$  и  $k_1$  являются собственными характеристиками двигателя и рассматриваются как константы. Крутящий момент  $M$  определяется величиной действующей нагрузки.

Для снижения потерь на якоре сила тока на якоре должна быть как можно меньше:

$$P_{verl,A} = R_A \cdot I_A^2$$

По уравнению (10-2):

$$M = \frac{k_1 \cdot \Phi}{2\pi} \cdot I_A$$

При максимальном потоке  $\Phi$  реализация заданного крутящего момента  $M$  возможна при минимальном токе на якоре. Поэтому на практике эксплуатацию двигателя следует осуществлять при максимальном возможном магнитном потоке  $\Phi$ . Максимальная

величина магнитного потока  $\Phi_{\max}$  (как правило,  $\Phi_{\max} = \Phi_N$ ) ограничена магнитными свойствами статора (магнитным насыщением).

В области малых и средних частот вращения  $n$  их величины устанавливаются через напряжение на обмотках якоря  $U_A$ . Величина потока устанавливается на максимальном номинальном уровне  $\Phi = \Phi_N$ . Поскольку допустимое напряжение на обмотке якоря ограничено напряжением пробоя изоляции обмоток и максимальным напряжением источника тока, изменение напряжения на якоре ограничено определенной величиной  $U_{AN}$ . Для каждой величины нагрузки  $M$  существует максимально допустимая частота вращения  $n_{\max,AV}(M)$ :

$$n_{\max,AV} = \frac{U_{AN}}{k_1 \cdot \Phi_N} - \frac{2\pi \cdot R_A}{(k_1 \cdot \Phi_N)^2} \cdot M$$

Здесь под максимально допустимой частотой понимается частота вращения, которую можно установить с помощью изменения напряжения на якоре. Данная область частоты вращения называется «областью якорной настройки».

#### **Первичная и вторичная область настройки скорости вращения ( $k_2 = k_1/2\pi$ )**

В области якорной настройки жесткость скоростной характеристики неизменна.

$$\left| \frac{dM}{dn} \right| = \frac{(k_1 \cdot \Phi_N)^2}{2\pi \cdot R_A}$$

Также постоянен крутящий момент при длительной эксплуатации.

$$M_{\max} = \frac{k_1 \cdot \Phi_N}{2\pi} \cdot I_{AN}$$

#### **Область настройки через параметры магнитного поля**

Реализация частот вращения двигателя, превышающих значение  $n_{\max,AV}$ , при  $U_A = U_{AN}$ , возможно только путем снижения потока  $\Phi$ . На данном режиме двигатель работает в так называемой области ослабленного магнитного поля. Максимально возможный крутящий момент при длительной эксплуатации снижается пропорционально потоку  $\Phi$ :

$$M_{\max} = \frac{k_1 \cdot \Phi}{2\pi} \cdot I_{AN} \sim \Phi$$

В зависимости от частоты вращения, максимальный крутящий момент при длительной эксплуатации составляет:

$$M_{\max}(n) = \frac{U_{AN} \cdot I_{AN} - R_A \cdot I_{AN}^2}{2\pi \cdot n} \sim \frac{1}{n}$$

Жесткость скоростной характеристики двигателя при снижающемся потоке  $\Phi$  также уменьшается:

$$\left| \frac{dM}{dn} \right| = \frac{(k_1 \cdot \Phi)^2}{2\pi \cdot R_A} \sim \Phi^2$$

На практике, максимальная частота вращения двигателя ограничена коммутатором. При высоких скоростях вращения наблюдается искрение на щетках, ведущее к их повышенному износу.

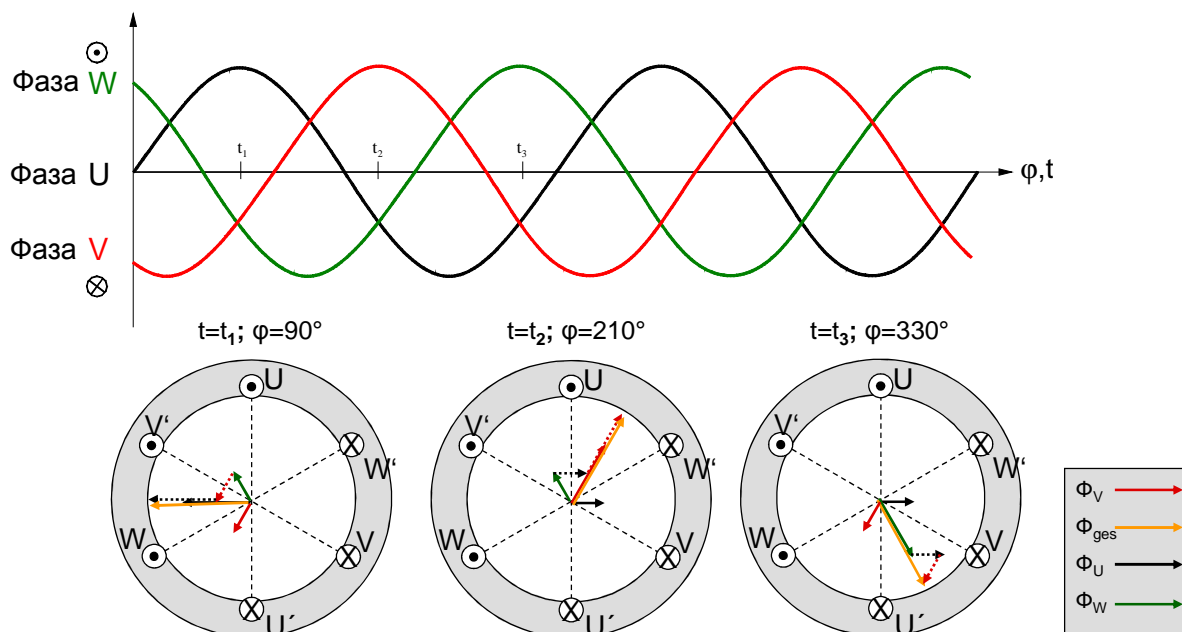


Рис. 10-10: Параметры магнитного поля в трехфазном электродвигателе

ДПТ практически не находят применения в современном машиностроении из-за наличия коммутаторного узла, подверженного интенсивному износу. Гораздо более широкое применение сегодня находят двигатели переменного тока. В основе принципа их работы лежит эффект создания равномерного магнитного поля с помощью трех обмоток, расположенных с угловым шагом  $120^\circ$ , на которые подается синусный переменный ток. Окружная скорость перемещения магнитного поля зависит от частоты напряжения электросети  $UU'$ ,  $VV'$ ,  $WW'$ . Амплитуда магнитного потока пропорциональна силе тока в обмотках (Рис. 10-10).

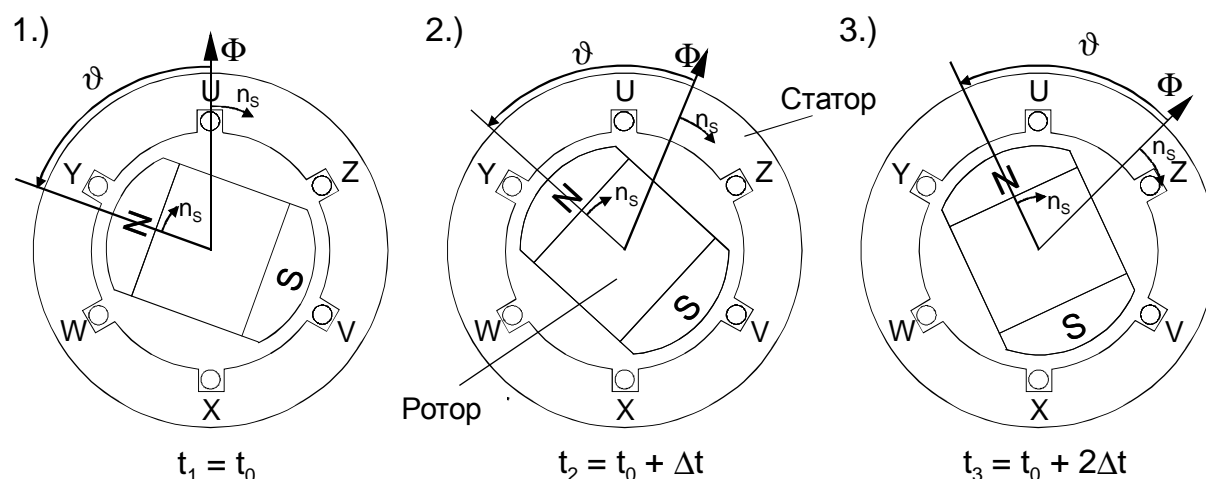


Рис. 10-11: Принцип работы синхронного двигателя при постоянной частоте вращения.

#### Синхронный двигатель переменного тока

В станкостроении синхронные двигатели переменного тока применяются преимущественно в исполнении с возбуждением постоянными магнитами. Принцип работы синхронного двигателя показан на Рис. 10-11. В корпусе расположены обмотки, с помощью которых, при прохождении переменного тока, наводится переменное по времени и ориентации магнитное поле. Зоны наибольшей напряженности поля вращаются по внутренней окружности статора. В зависимости от количества катушек в корпусе двигателя, на роторе устанавливаются одна или несколько пар полюсов. Магнитное поле статора, по аналогии к ДПТ, воздействует на магнитный ротор с определенной силой, создающей крутящий момент на вале двигателя. Ротор следует за магнитным полем статора с так называемой синхронной частотой вращения.

$$n_s = \frac{f}{p} \quad (10-11)$$

В уравнении 10.9 под системой с  $p = 1$  понимается двигатель с тремя фазами обмотки, распределенными по всей окружности статора. При  $p=2$  в системе установлены 6 фаз, причем 6 проводников распределены в полуокружности (центральный угол  $180^\circ$ ), а во второй половине окружности установлен второй комплект обмоток. Соответственно, механическая частота вращения ротора в такой системе уменьшается вдвое.

На роторе синхронного двигателя установлены  $p$  магнитных пар полюсов. Вращение двигателя (с постоянным крутящим моментом) является возможным, если механическая частота вращения  $n$  ротора соответствует частоте вращения магнитного поля статора  $n_s$ .

$$n = n_s$$

В зависимости от снимаемого с двигателя крутящего момента, между пространственным направлением полюса ротора и магнитным полем статора устанавливается угол  $\vartheta$ , называемый углом выбега ротора. Для снимаемого момента справедливо:

$$M = M_K \cdot \sin(\vartheta \cdot p) \quad (10-12)$$

Где  $M_K$ : опрокидывающий момент двигателя.

Это означает, что двигатель может нагружаться крутящим моментом  $0 \leq M_L \leq M_K$ .

Причем при  $M_L = 0$  угол  $\vartheta = 0$ , а при  $M_L = M_K$   $\vartheta = 90^\circ / p$ . Угол  $\vartheta = 0$  может принимать значения от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  вне зависимости от числа полюсов, так как данный угол измеряется между двумя комплексными векторами напряжений. Эти векторы всегда вращаются в диапазоне от  $0^\circ$  до  $360^\circ$ , хотя расположение катушек может занимать сектор окружности корпуса меньше  $360^\circ$ . Только при пространственном рассмотрении число пар полюсов воздействует на изменение угла между направлениями векторов магнитного поля. При наложении крутящего момента  $M > M_K$  двигатель выпадает из шага и останавливается. При подключении к обычной электросети эксплуатация



синхронного двигателя возможна с одной частотой вращения, если пуск двигателя осуществляется с помощью внешнего стартера. Для изменения частоты работы двигателя необходим частотный преобразователь, генерирующий питание статора с настраиваемой частотой. При этом фактическая частота вращения ротора регистрируется с помощью тахогенератора, а частота питающего тока возбуждения устанавливается в соответствии с фактической частотой.

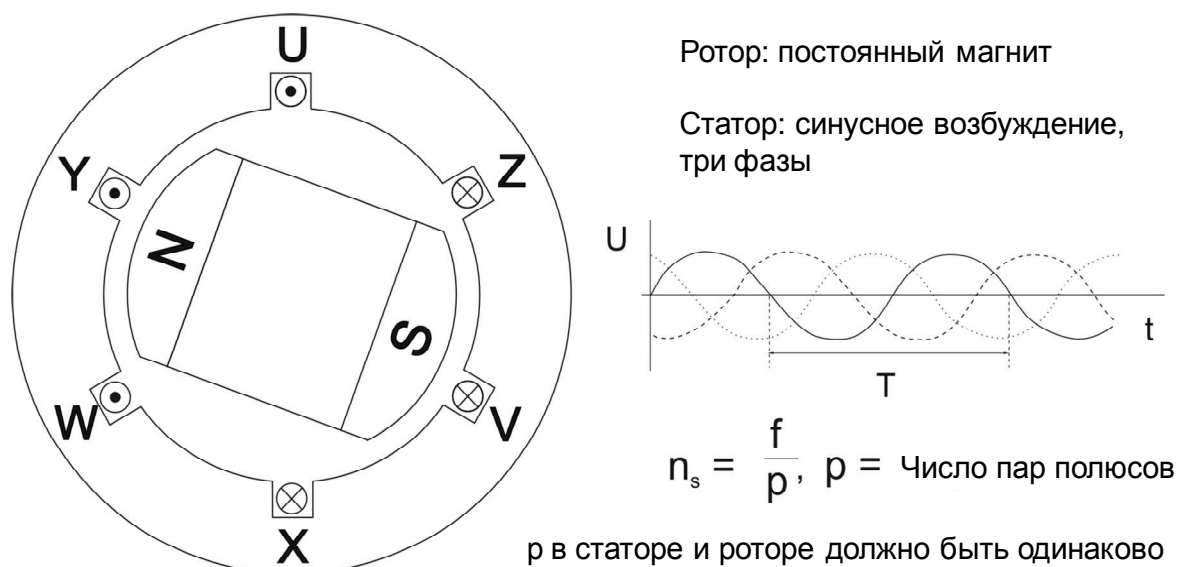
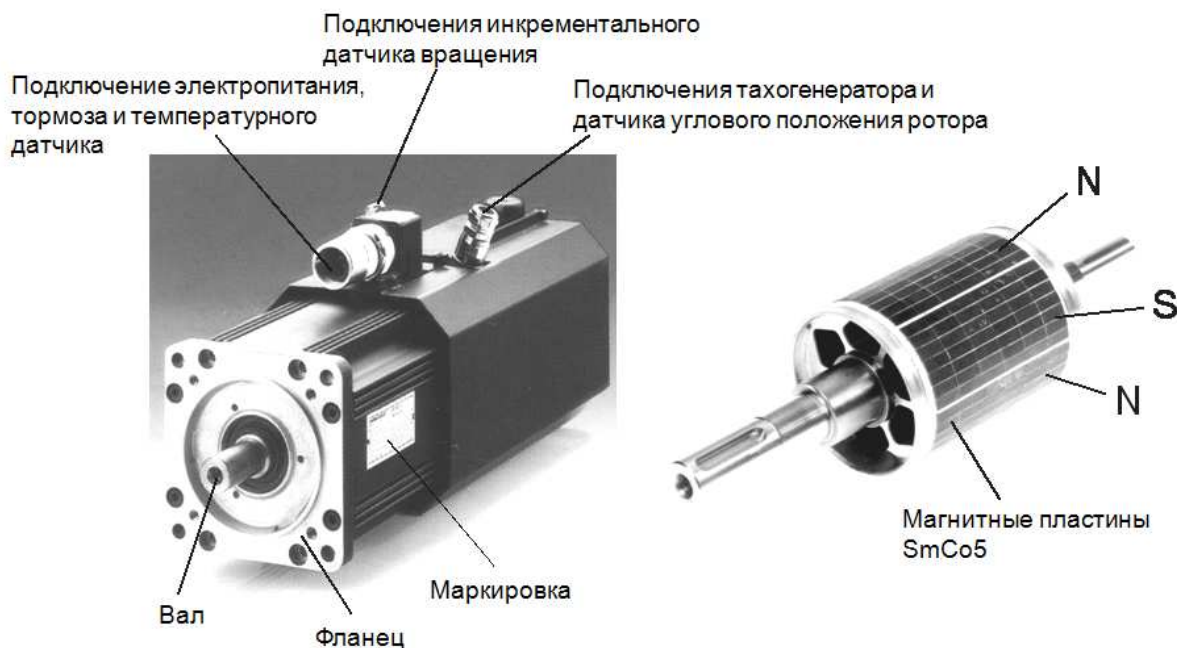


Рис. 10-12: Принцип работы синхронного двигателя при постоянной частоте вращения

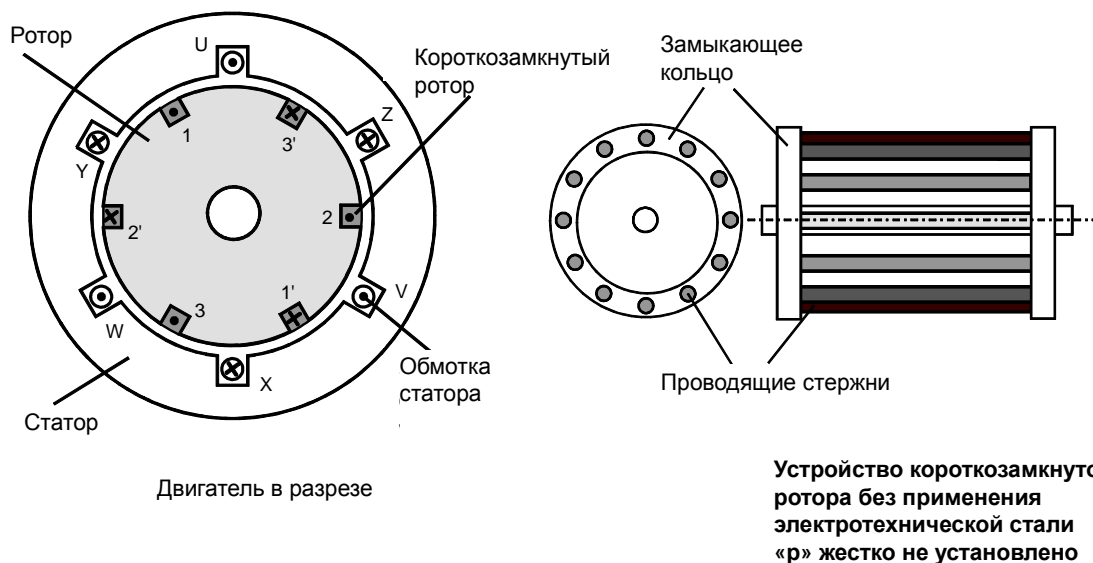
Одним из распространенных видов синхронных электродвигателей с постоянным возбуждением и частотным преобразователем является так называемый «электронно-коммутируемый двигатель постоянного тока» (Рис. 10-12). Последовательное переключение подачи тока на обмотки статора (импульсное или синусное, более плавное) в зависимости от углового положения ротора позволяет поддерживать постоянный прямой угол между полем статора и ротора. Это позволяет управлять токами, создающими крутящий момент, независимо друг от друга. Очевидно, что на выходе блока управления сигналы должны трансформироваться в токи для каждой из трех фаз для соответствующей обмотки. В случае постоянного возбуждения с помощью постоянных магнитов возбуждающий ток устанавливается равным нулю, а создающий крутящий момент ток может настраиваться в зависимости от нагрузки. Характеристики частоты вращения и крутящего момента являются линейными, как у ДПТ. В процессе эксплуатации задается требуемая частота вращения, по величине которой устанавливается требуемый момент. Такая конструкция двигателя не подвержена эффекту опрокидывания. Посредством наложения ограниченного негативного тока, создающего магнитное поле, несмотря на постоянное возбуждение перманентными магнитами, возможно ослабление магнитного поля и повышения частоты вращения, как в ДПТ. Однако в данном виде двигателей дополнительно наводится момент сопротивления, как следствие несимметричности ротора. В итоге общий крутящий момент не падает, а повышается. В зоне полюсов зазор между ротором и статором довольно мал ( $90^\circ$  при  $p=1$ ). Магнитное поле может вызывать отклонения, уменьшающие размер воздушного зазора. Действующие при этом силы называются силами магнитного сопротивления. С помощью этих сил несимметричный ротор автоматически занимает выгодное положение в магнитном поле. В данных положениях полюсы статора и ротора расположены друг напротив друга. Таким образом, в случае ослабления поля, создается дополнительный компонент крутящего момента.



Источник: Indramat Bosch

**Рис. 10-13: Синхронный двигатель. Ротор с тремя парами полюсов**

На Рис. 10-13 представлен синхронный серводвигатель, а также ротор двигателя с тремя парами полюсов. Каждый полюс состоит из шести сегментов, расположенных вдоль оси ротора. Каждый сегмент включает семь пластин, образующих профиль ротора. В качестве постоянного магнита могут применяться алюминий-никель-кобальтовый (AlNiCo), самарий-кобальтовый (SmCo), неодим-железо-борный сплавы (NdFeB), а также ферриты. В данном случае в качестве магнитного материала ротора был применен SmCo<sub>5</sub>. В роторах высокоскоростных двигателей, подверженных значительным центробежным силам, применяется дополнительное ламинирование магнитных пластин для предотвращения их отрыва при вращении. В следующих главах будет показано, что генерируемая источником питания форма переменного тока имеет некоторые отклонения от идеальной синусной волны. Создающиеся таким образом гармонические колебания высшего порядка ведут к возникновению вихревых токов в магнитах и в теле ротора, вызывающих его нагрев. Во избежание перегрева двигателя (повреждения изоляции обмоток статора), в зависимости от класса мощности необходимо применения охлаждения, как правило, водяного. Такие системы охлаждения позволяют наиболее эффективно реализовать отвод тепла, не вызывая нагрева и температурной деформации двигателя, что, в конечном итоге, положительно влияет на точность станка. В высокоскоростных двигателях тело ротора выполняется полым для снижения момента инерции и, соответственно, потерь мощности при частых запусках и остановках двигателя.

**Асинхронный двигатель**

Источник: De Doncker

**Рис. 10-14: Конструкция асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором**

Конструкция корпуса асинхронного двигателя аналогична синхронному двигателю (Рис. 10-14). Переменный ток создает переменное магнитное поле, вращающееся по окружности ротора с синхронной частотой вращения:

$$n_s = \frac{f}{p} \quad (10-13)$$

Обмотки ротора представляют собой замкнутые накоротко металлические стержни. Такая конструкция называется «с короткозамкнутым ротором». Данная конструкция отличается простотой и относительной дешевизной изготовления, способностью воспринимать перегрузки, а также высокой надежностью. Благодаря этому данный вид двигателей находит самое широкое применение в станкостроении. Ротор состоит из листов электротехнической стали (тонкие, изолированные друг от друга листы, спеченные в единую форму), в полостях которого укладываются стержни, замыкаемые накоротко с помощью торцевых колец. Замкнутые стержни играют роль замкнутых накоротко рамок с током.

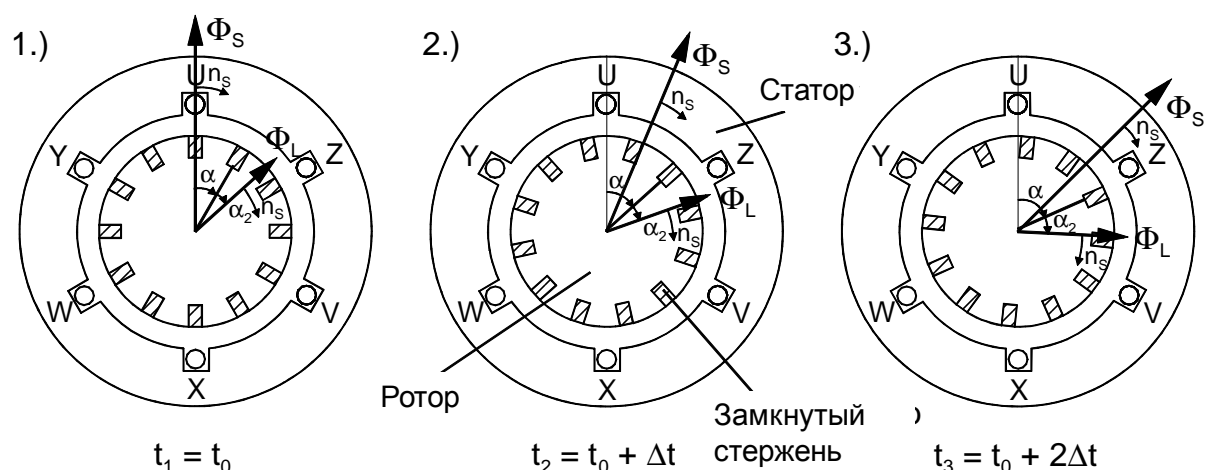


Рис. 10-15: Принцип работы асинхронного двигателя при постоянной частоте вращения

Принцип работы асинхронного двигателя заключается в создании электрических токов в замкнутых накоротко стержнях статора посредством полем возбуждения. Текущий в стержнях ток создает крутящий момент, приводящий ротор двигателя в движение. Ротор вращается с частотой вращения  $n = \alpha = (1 - s) \cdot n_s$ . Частота вращения ротора всегда меньше частоты вращения  $n_s$  поля возбуждения статора, так как при равной частоте вращения в рамке с током ротора перестанет создаваться напряжение и крутящий момент исчезнет. Асинхронные двигатели характеризуются определенным значением проскальзывания:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (10-14)$$

Разность частот вращения магнитного поля и ротора составляет:

$$n_2 = \dot{\alpha}_2 = n_s - n = s \cdot n_s \quad (10-15)$$

Разность частот вращения  $n_2$  совпадает с частотой наводимых в роторе токов, создающих магнитное поле ротора, вращающееся относительно него с частотой  $n_2$ . Относительно корпуса двигателя вращение полей статора и ротора осуществляется синхронно, благодаря чему в двигателе присутствует постоянный крутящий момент.

$$n_s = n_2 + n \quad (10-16)$$

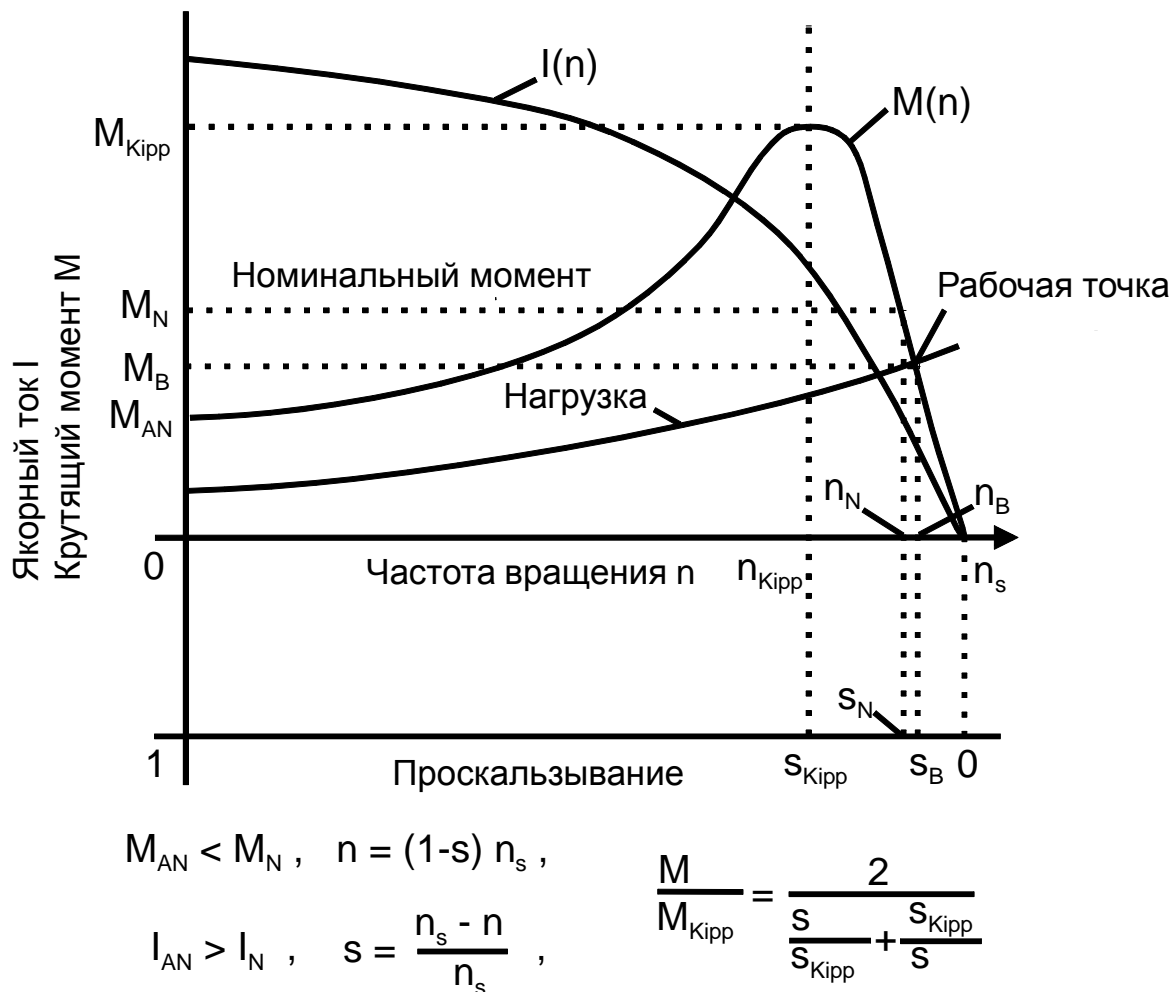


Рис. 10-16: Моментная характеристика асинхронного двигателя

**Крутящий момент и область стабильного функционирования**

Моментная характеристика асинхронного двигателя при работе от стационарной электросети ( $f = \text{const.}$ ) описывается с помощью так называемой формулы Клосса:

$$\frac{M}{M_K} = \frac{2}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}} \quad (10-17)$$

В точке опрокидывания двигатель выдает максимальный крутящий момент  $M_K$ . Данному значению момента соответствует значение проскальзывания, обозначающееся как проскальзывание опрокидывания  $s_K$ . При нагрузке двигателя моментом, превышающим момент опрокидывания  $M_L > M_K$ , двигатель выбивается из шага и останавливается.

Из характеристики крутящего момента  $M(s)$  по величине проскальзывания  $n = (1-s) \cdot n_s$  путем отражения относительно прямой  $s = 0,5$  выводится моментная характеристика по частоте вращения ротора  $M(n)$ . Стабильные условия эксплуатации присутствуют в том случае, когда выполняется условие:

$$\frac{dM_B}{dn} < 0$$

Т.е. эксплуатация должна осуществляться в области скоростей вращения, в которой характеристика ускорения  $M_B(n) = M_M(n) - M_L(n)$  имеет отрицательный наклон. Область стабильной работы расположена между частотой вращения опрокидывания и значением частоты несколько ниже синхронной частоты вращения. Вращение на

частотах меньше  $n_k$  невозможно без дополнительной настройки области рабочих значений частоты вращения.

Для условия:

$$\frac{s}{s_k} \ll 1 \Leftrightarrow \frac{s_k}{s} \gg 1$$

Формула Клосса упрощается и записывается в следующем виде:

$$\frac{M}{M_k} = \frac{2s}{s_k}$$

Для частот вращения выше частоты опрокидывания,  $M(n)$  имеет линейный характер.

Для условия  $\frac{s}{s_k} \gg 1 \Leftrightarrow \frac{s_k}{s} \ll 1$  с учетом  $\frac{M}{M_k} = \frac{2s_k}{s}$  моментная характеристика имеет гиперболическую форму.

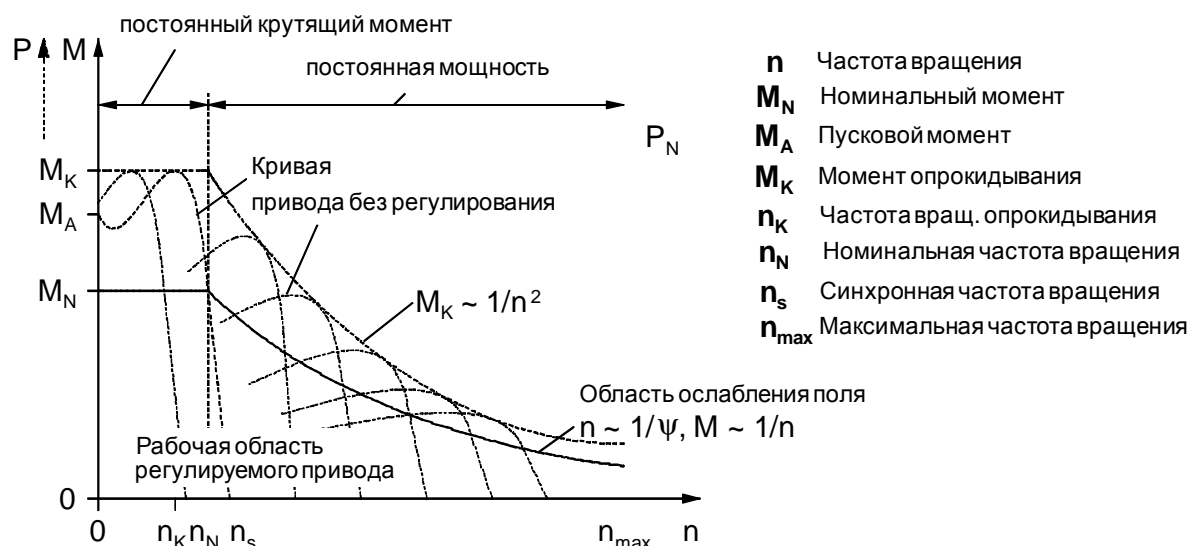
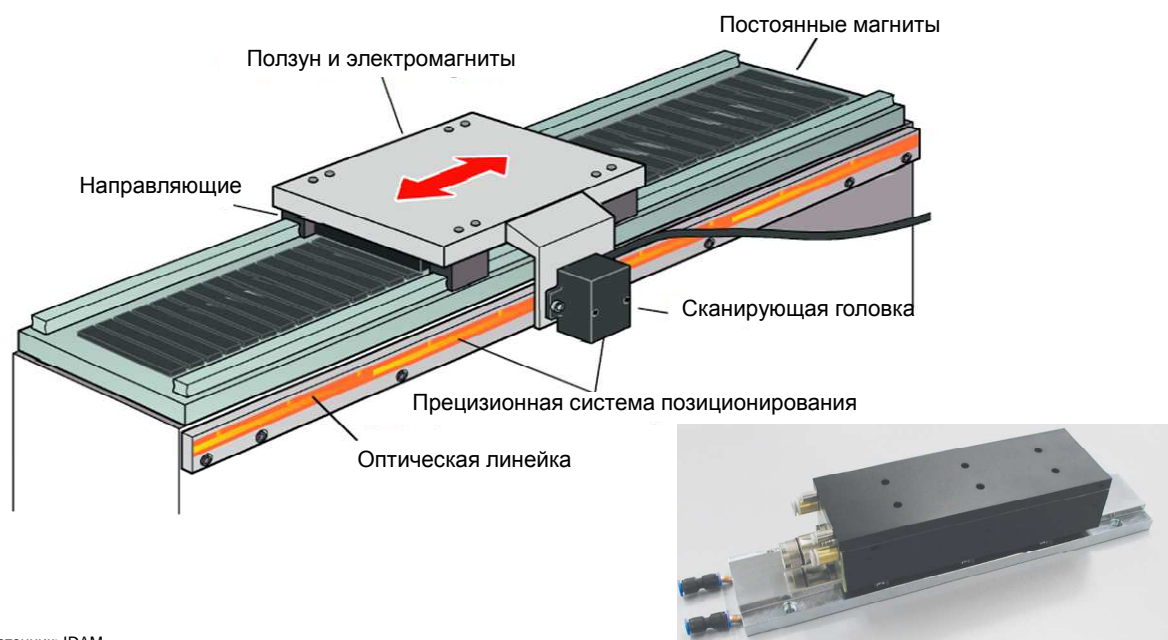


Рис. 10-17: Моментные характеристики при автоматическом управлении двигателем

Для управления асинхронными двигателями требуются более сложные системы автоматического регулирования, чем для синхронных двигателей и ДПТ. Для точного высокоскоростного управления крутящим моментом, т.е. для регулировки двух независимых токов в статоре, необходим контроль величины и углового положения магнитного поля ротора. В синхронном двигателе данные параметры напрямую связаны с угловым положением ротора. В асинхронном двигателе эти параметры необходимо вычислять в зависимости от токов в статоре и частоты вращения ротора. Последние величины могут быть непосредственно измерены в процессе работы двигателя. Вместе с ними для проведения вычислений необходима величина сопротивления и индуктивности ротора. Значения данных величин меняются под действием температуры и эффекта магнитного насыщения.

Управление параметрами магнитного поля позволяет достичь характеристик, сравнимых с характеристикой ДПТ. Моментно-частотная характеристика представляет собой линейную функцию (прямую). В области низких значений асинхронный двигатель не подвержен эффекту опрокидывания, поскольку с помощью системы автоматического управления устраняется проскальзывание опрокидывания. Одним из преимуществ использования асинхронных двигателей является широкая область ослабления поля. В нем допустимо изменение частоты вращения ротора при постоянной мощности. Электропитание с изменяемой частотой позволяет проводить пуск при заданной величине проскальзывания и номинальной величине тока. Это свойство особенно важно при использовании асинхронных двигателей в качестве главных приводов шпинделей металлорежущих станков.



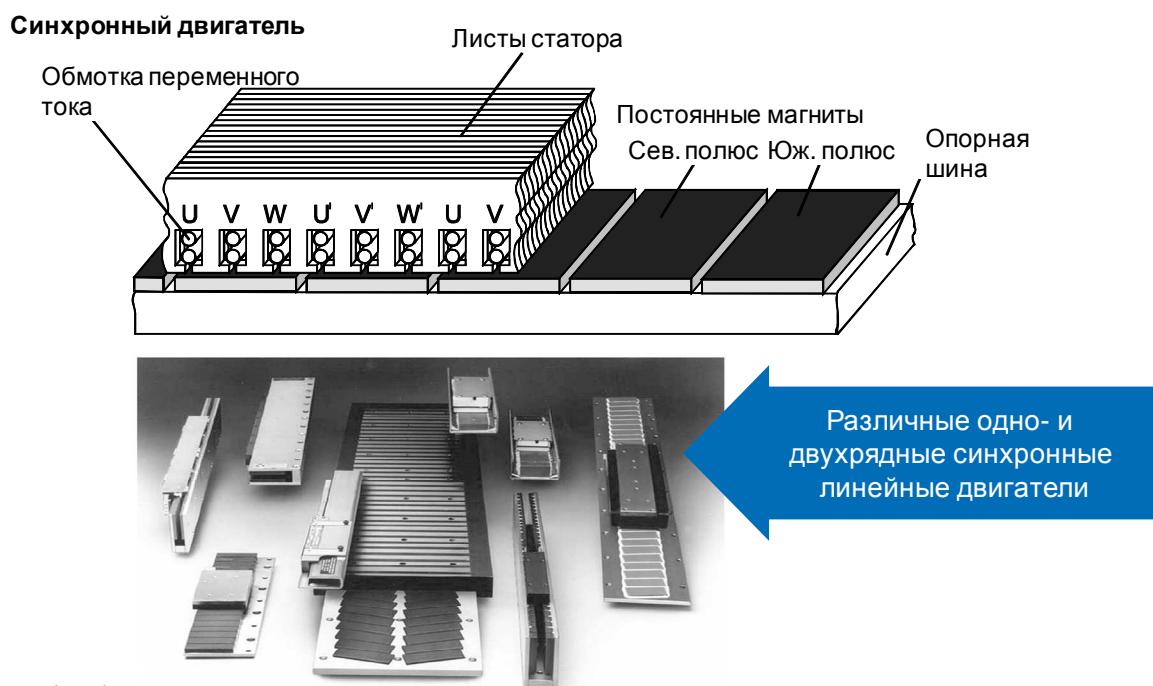
Источник: IDAM

**Рис. 10-18: Линейный привод с интегрированной системой позиционирования**

Линейные двигатели применяют в станкостроении для непосредственной реализации возвратно-поступательных движений. В таких конструкциях не требуется применение механических преобразователей вращательного движения в поступательное, что снижает суммарные потери на трение и позволяет реализовать более высокую динамику перемещений компонентов станка. Линейный двигатель в некотором приближении представляет собой развертку обычного электродвигателя, в которой обе части двигателя (обмотка и магниты) позиционируются друг относительно друга не с помощью корпуса, а посредством установки в структурные компоненты станка. Вырабатываемое вследствие механических потерь тепло отводится непосредственно в структуру станка. Соответственно, установку таких приводов целесообразно осуществлять с применением системы водяного охлаждения для предотвращения температурных деформаций структурных компонентов станка.

Управление двигателем осуществляется с применением датчиков положения, используемых для позиционирования ползунов станка. Таким образом, в мехатронную систему привода входят линейный двигатель, направляющие, структурные компоненты станка и датчик положения. Применение жестко соединенных со структурными компонентами станка оптических шкал позволяет достичь точности позиционирования до нескольких микрон, а также реализовать ускорения, превышающее ускорение свободного падения и скорости перемещения, достигающие нескольких сотен метров в минуту. Оптимальные динамические рабочие параметры достигаются путем тщательной настройки параметров механической, электрической и оптической систем, а также усилителей сигнала, интерполяторов, датчиков положения и систем обработки сигналов.





Источник: Anorad

**Рис. 10-19: Синхронный линейный двигатель в разрезе**

Теоретически, линейные двигатели могут работать по принципу синхронных и асинхронных двигателей, а также ДПТ. Последнее исполнение не оптимально, поскольку для него необходимы механические элементы токоподвода. Перемещаемые части линейного двигателя подразделяются на первичную и вторичную. Первичная часть соответствует статору вращающегося двигателя. В синхронном линейном двигателе вторичная часть - постоянные магниты. Стандартный линейный двигатель характеризуется высокими силами притяжения между первичной и вторичной частями двигателя, достигающими десятикратной величины допустимого усилия подачи. Данные усилия должны восприниматься направляющими, что ведет к повышенному трению и износу компонентов несущей системы. Поскольку размер постоянных магнитов значительно превышает размер рабочего зазора в линейном двигателе, сила подачи зависит не только от силы тока, но и от относительного положения обоих компонентов. Амплитуда волнообразной силы подачи (англ. «cogging») может быть значительно снижена путем наклонного расположения обмотки или расположения пазов для установки магнитов под углом. В направлении подачи величина колебания силы подачи не превышает 5%. Колебание силы оказывает воздействие и на величину поперечной силы. При симметричной конструкции привода величина поперечной силы незначительна. Для управления синхронным двигателем (коммутации) необходимо устройство для распознавания расположения полюсов постоянных магнитов. Для этого могут применяться датчики Холла или абсолютные измерительные системы. Для реализации относительных перемещений первичная или вторичная части линейного двигателя должны иметь достаточную для перемещения длину. Существуют исполнения линейных двигателей с длинным и коротким статором. Двигатель с длинным статором характеризуется пропорциональным длине перемещения увеличением потери мощности. Данная конструкция целесообразна для реализации небольших перемещений. Для высокодинамичных линейных двигателей применяется преимущественно исполнение с коротким статором. Соответственно, конструктивно предусмотренная длина вторичной части двигателя должна быть достаточной для реализации требуемых перемещений, что обуславливает необходимость установки большого числа дорогостоящих постоянных магнитов.

## Содержание

- 1 Типы двигателей
- 2 Типы преобразователей
- 3 Заключение

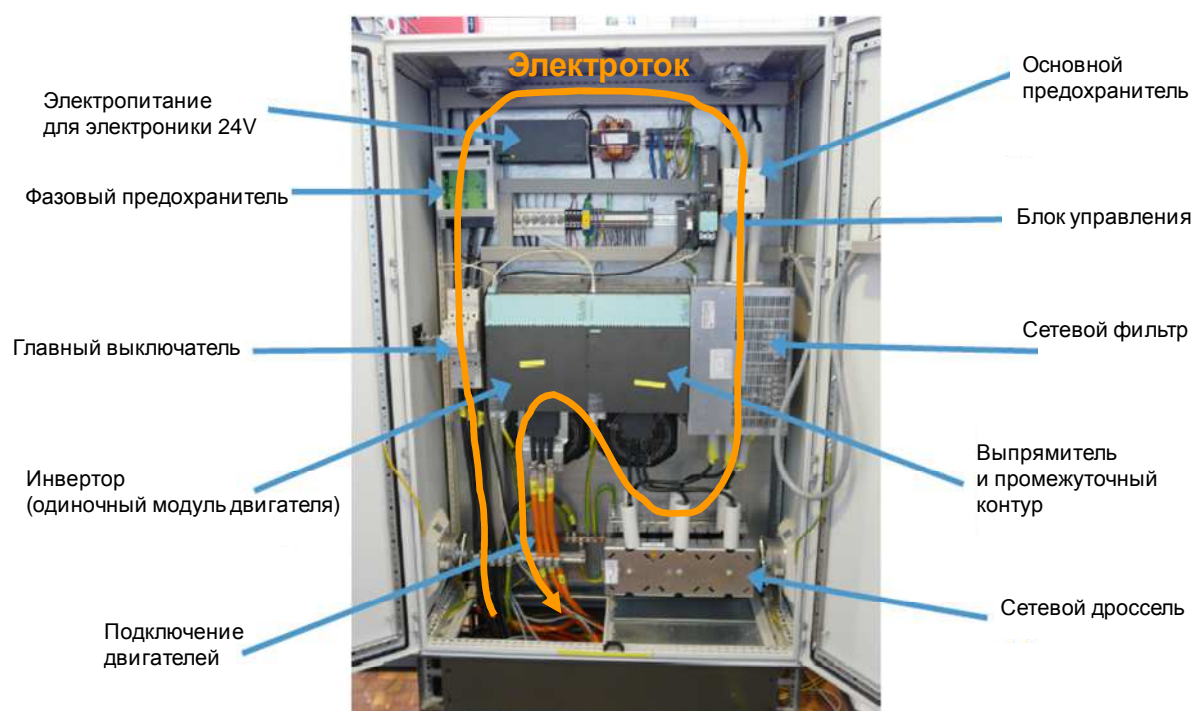


Рис. 10-20: Общий вид электрошкафа с преобразователями

Задачей системы преобразователей является превращение трехфазного напряжения 380 В / 50 Гц, поступающего от центральной электрической сети, в напряжение переменной амплитуды и частоты. При этом необходимо выполнение следующих условий:

- Низкое обратное воздействие на центральную электросеть.
- Возможность обратной отдачи энергии в центральную электросеть.
- $\cos\varphi \approx 1$  (низкие потери, минимальный сдвиг фаз между током и напряжением).
- Питание синусным переменным током.
- Точная аппроксимация идеального напряжения.

Система преобразователей тока включает многочисленные компоненты (Рис. 10-20). К наиболее важным компонентам относятся предохранители и защитные механизмы для центральной сети. В случае сбоя данные компоненты должны произвести быстрое отключение электрошкафа от сети, как для защиты сети, так и самой системы преобразователей.

Работа преобразователя связана с генерацией возмущающих колебаний вследствие работы быстродействующих переключателей. Проникновение таких колебаний в центральную сеть недопустимо. С другой стороны, синусное переменное напряжение из центральной сети не может быть аппроксимировано преобразователем с идеальной точностью. Это ведет к образованию высших гармоник, которые могут частично проникать в центральную сеть. Для предотвращения этого служит сетевой фильтр.

Основная рабочая часть преобразователя, в соответствии с принципом работы, потребляет энергию из центральной сети в форме импульсов малой длительности, но большой амплитуды тока. Без применения специальных сглаживающих устройств нагрузка на сеть была бы чрезмерно высокой (высокая реактивная мощность). Применение сетевого дросселя позволяет накапливать энергию. Магнитная энергия, сохраняемая в дросселе, достаточна для покрытия энергии, потребляемой импульсами, за счет чего достигается снижение обратного воздействия на центральную сеть.

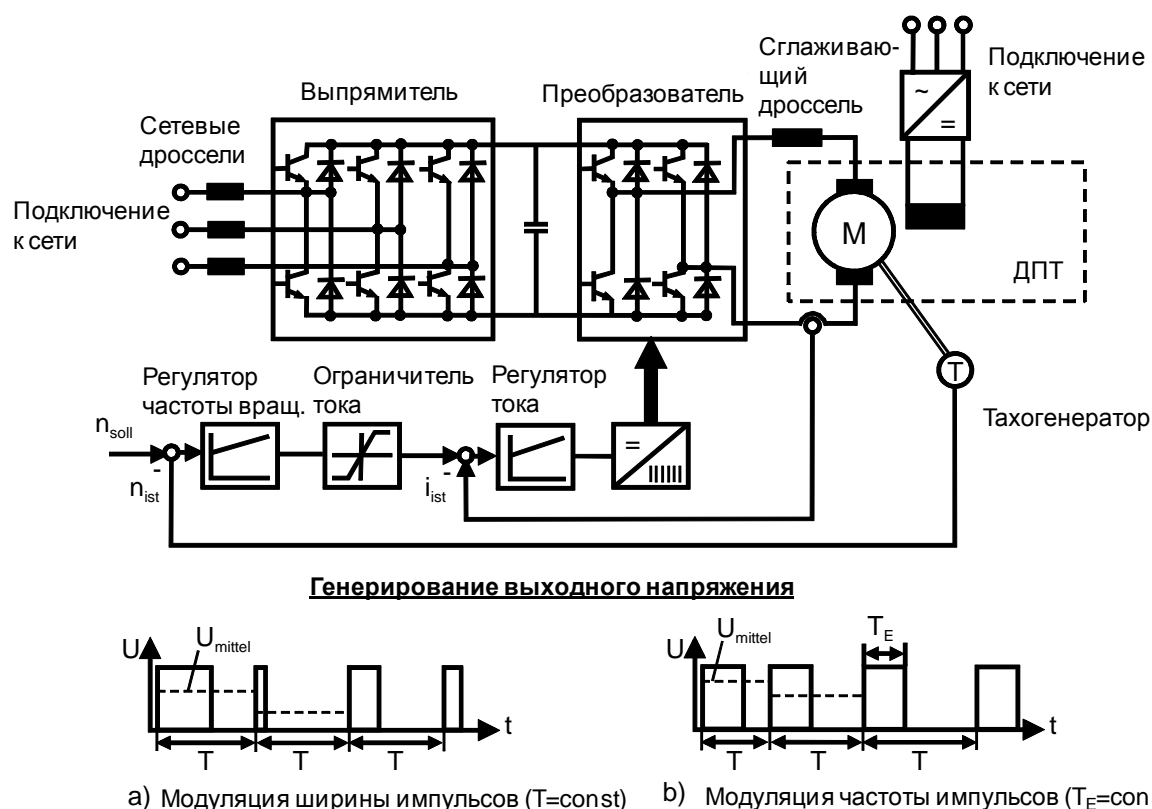


Рис. 10-21: Двигатель постоянного тока с усилителем (с выпрямителем тока и преобразователем частот)

Принцип работы выпрямителей тока и преобразователей частот показан на Рис. 10-21. Постоянное напряжение (так называемое промежуточное напряжение) генерируется с помощью диодных выпрямителей из трехфазного переменного тока центральной электросети. Промежуточное напряжение выпрямляется с помощью промежуточной емкости. Последовательно включенный преобразователь частот распределяет напряжение на соответствующие ветви электрической цепи с помощью силовых транзисторов (GTO, IGBT или Mosfet). На рисунке представлен пример генерирования постоянного напряжения переменной амплитуды и полярности. При включении либо верхнего, либо нижнего транзистора на выходные клеммы подается либо положительное, либо отрицательное промежуточное напряжение. Путем изменения ширины и частоты импульсов (Рис. 10-21, внизу) через преобразователь частот может изменяться среднее значение выходного напряжения. Среднее значение постоянного выходного напряжения управляется посредством изменения отношения времени открытия и затвора. Частота импульсов может достигать 20 кГц. Выпрямление выходного тока осуществляется посредством индуктивности двигателя или с помощью вспомогательных выпрямляющих дросселей.

Измерение частоты вращения двигателя осуществляется с помощью тахогенератора или инкрементального датчика углового положения. Данное значение сравнивается с установочным (идеальным) в блоке автоматического управления. Расхождение требуемого и фактического значений частоты вращения преобразовывается в блоке управления частотой вращения в управляющий сигнал для блока управления силой тока. В зависимости от требуемой величины изменения силы тока, изменяется рабочая частота силовых транзисторов. Закрытый контур регулирования силы тока позволяет компенсировать колебания величины крутящего момента под действием нагрузки еще до того, как они вызовут отклонения частоты вращения двигателя.

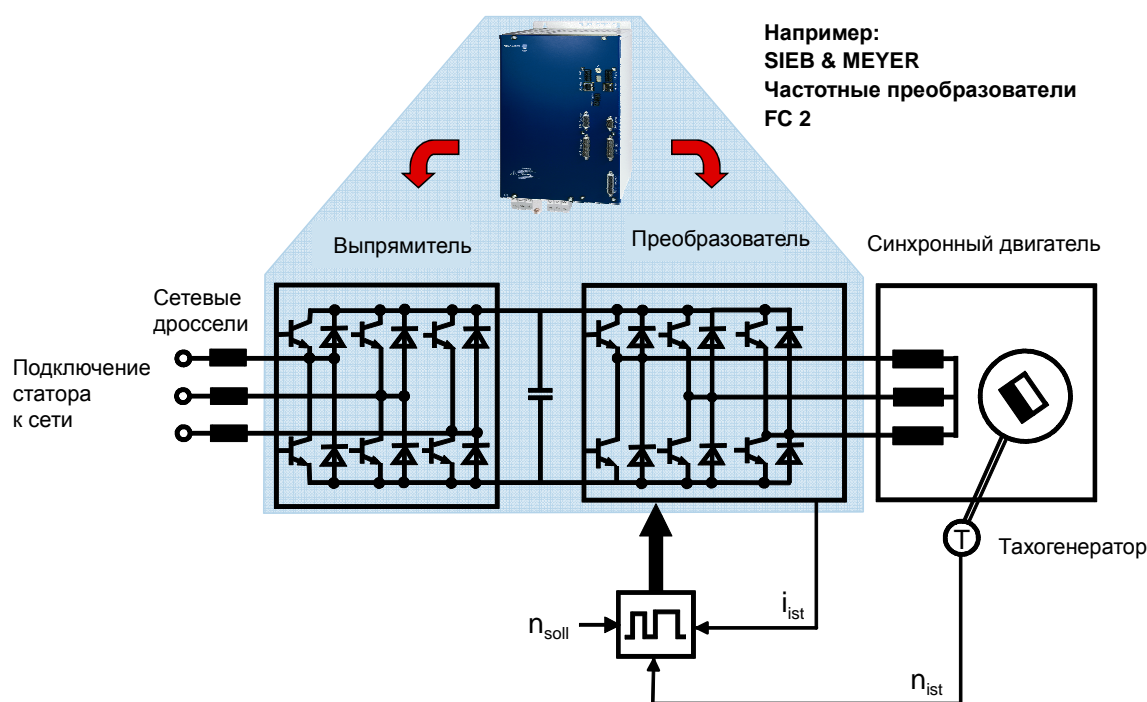


Рис. 10-22: Синхронный двигатель с усилителем (выпрямитель и преобразователь частот)

### Параметр для расчета: качество фазового тока преобразователя

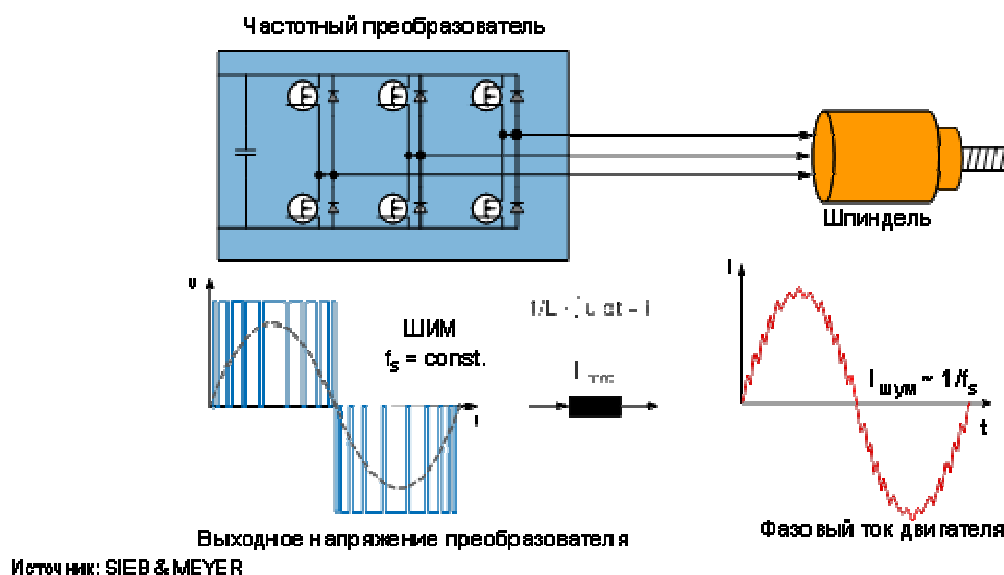


Рис. 10-23: Аппроксимация синусной волны с помощью Широтно-Импульсной Модуляции

Описанный выше способ модуляции импульса напряжения с помощью преобразователя частот позволяет также генерировать постоянное напряжение различной амплитуды. Кроме того, за счет высокого быстродействия частотного преобразователя, возможно генерирование переменного напряжения различной частоты и амплитуды. Конструкция преобразователя при этом должна быть симметрична для трех фаз (Рис. 10-22). Если на силовые транзисторы подаются управляющие сигналы с относительным сдвигом фаз  $120^\circ$  (как показано на Рис. 10-23), то частота и амплитуда выходного трехфазного напряжения может настраиваться в соответствии с параметрами двигателя.

Если двигатель вращается по инерции (торможение, рекуперация), то напряжение, создаваемое в режиме генератора, преобразуется с помощью диодов в

промежуточное напряжение правильной полярности. В последствии напряжение с помощью силовых транзисторов, отдается обратно в центральную электросеть с соответствующей частотой 50 Гц. В данной ситуации выпрямитель играет роль активного элемента (Active Front End - AFE).

Без возврата энергии в центральную сеть промежуточное напряжение при рекуперации могло бы превысить напряжение пробоя системы. Для безопасности в конструкции предусматриваются предохранительные реле (отключение сопротивления при торможении) или рекуперационные сопротивления в промежуточной цепи, превращающие энергию торможения в тепло.

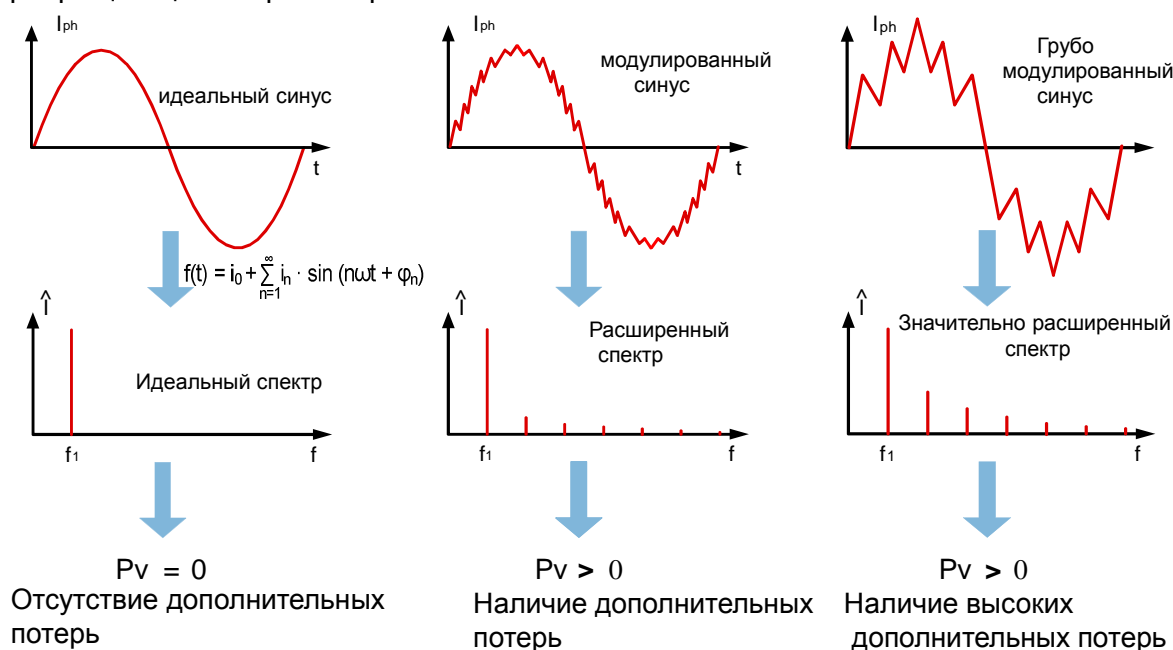


Рис. 10-24: Спектр выходных токов в режиме преобразователя частот

Частота следования импульсов  $1/T$  преобразователя ограничивает точность аппроксимации аналогового идеального сигнала напряжения. Чем выше эта частота, тем ниже погрешность дигитализации аналогового сигнала. С повышением погрешности аппроксимации повышается доля высших гармонических составляющих в сигнале, что негативно влияет на крутящий момент двигателя и может привести к потере момента и негативным воздействиям на центральную электросеть.

В особенности для высокоскоростных электродвигателей отношение основной частоты (число пар полюсов  $\times$  частота вращения) к частоте коммутации может принимать довольно малые значения. В результате аппроксимация синусоидального переменного тока производится с большой погрешностью (Рис. 10-24, справа). В спектральном составе такого сигнала помимо основной частоты присутствуют ярко выраженные гармонические составляющие. Последние не участвуют в создании крутящего момента, а ведут только к повышенным потерям мощности и нагреву двигателя. Для подавления гармонических составляющих в переменном токе необходимо применение преобразователей с высокой частотой следования импульсов или же выходных фильтров с настраиваемой граничной частотой. Высокая частота импульсов ведет к повышенной нагрузке на силовые транзисторы. Величина потерь повышается пропорционально частоте следования импульсов. Применение фильтров связано со значительными затратами на реализацию конструкции, а также характеризуется собственными потерями мощности.

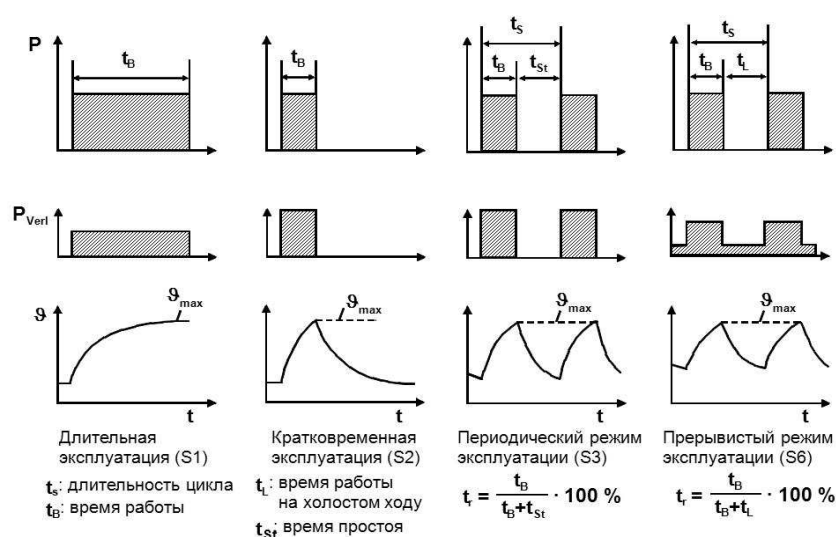


Рис. 10-25: Режимы эксплуатации двигателей по DIN VDE 0530

На Рис. 10-25 представлены типичные режимы эксплуатации электродвигателей главных приводов металлообрабатывающих станков. Кроме режима длительной эксплуатации (S1), при котором двигатель подвергается постоянной нагрузке и находится в состоянии температурного равновесия, различают кратковременный (S2) и периодический режимы эксплуатации (S3, S6). В кратковременном режиме действие нагрузки чередуется с перерывами на охлаждение двигателя. В течение времени нагружения  $t_B$  температура двигателя не может достичь равновесного состояния. Пауза в работе должна иметь длительность, достаточную для охлаждения двигателя до начальной температуры. Для режима S2 допустимое время действия нагрузки задается совместно с допустимой мощностью (например, 40 кВт S2 30 мин). В режиме периодической прерывистой эксплуатации S3 рабочий цикл состоит из времени действия нагрузки  $t_B$  и паузы до начала следующего рабочего цикла  $t_{St}$ . Поскольку рабочий цикл повторяется периодически, равновесной температуры двигатель не достигает ни под нагрузкой, ни в положении покоя. Данный режим характеризуется длительностью цикла  $t_s$ , рассчитываемой как сумма времени действия нагрузки  $t_B$  и длительности паузы  $t_{St}$ , а также как отношение времени действия нагрузки к длительности цикла  $t_r$ , выраженного в процентах.

Вид эксплуатации	S1	S6 – 60%	S6 – 40%	S6 – 25%	S2 – 30 мин
Мощность [кВт]	17	22,4	26,7	33,5	20,7
$t_s$ [мин]	$\infty$	10	10	10	60 (30 мин охлаждение)
$t_B$ [мин]	$\infty$	6	4	2,5	30
$t_s$ Длительность цикла	$t_B$ Время нагрузки				

Рис. 10-26 Пример допустимого времени работы асинхронного двигателя на разных режимах эксплуатации

На Рис. 10-26 показан пример назначения допустимого времени работы асинхронного двигателя на разных режимах (S1, S2, S6). Номинальная мощность двигателя составляет 17 кВт. По данным производителя, характеристики режима S3 приблизительно соответствуют характеристикам режима S6, если вентилятор охлаждения двигателя продолжает работать во время пауз. Типичным примером приводов машин, работающих по режиму S6 являются главные двигатели пресов. Требуемая область допустимых значений частот вращения двигателя определяется, как правило, максимальной и минимальной скоростью резания и диаметром заготовки или инструмента. Кроме номинальной мощности и частоты вращения при выборе двигателя необходимо также учитывать моментную характеристику на разных частотах вращения двигателя.



**1 Типы двигателей****2 Типы преобразователей****3 Заключение**

- Двигатели постоянного тока, асинхронные и синхронные двигатели – это преобразователи электрической и механической энергии. КПД данных систем зависит от качества схем и расчетов и составляет более 90%. Частотные преобразователи генерируют напряжение требуемой амплитуды и частоты для питания вышеназванных систем.
- Двигатель постоянного тока представляет собой самую простую конфигурацию электродвигателей, поскольку создание поля и крутящего момента производится независимо друг от друга. В настоящее время двигатели постоянного тока практически не применяются.
- Преимущественно в современных конструкциях станков применяются синхронные двигатели для приводов подач и асинхронные для главных шпинделей. К преимуществам данных типов относится высокая динамика и способность воспринимать высокие нагрузки.
- Основой для характеристики мощности двигателя является режим длительной эксплуатации S1.