

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Технологическое оборудование»

А. И. Кочергин

Т. В. Василенко

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРИВОДОВ ГЛАВНОГО ДВИЖЕНИЯ СТАНКОВ С ЧПУ

Пособие по курсовому проектированию
для студентов специальностей
1-36 01 01 «Технология машиностроения»,
1-36 01 03 «Технологическое оборудование
машиностроительного производства»

Минск
БНТУ
2020

УДК 621.9.06-8-529- 025.13:378.147.091.313(075.8)

ББК 34.63-5я7

К75

Рецензенты:

А. А. Сметанко, Н. Н. Попок

Кочергин, А. И.

К75 Проектирование приводов главного движения станков с ЧПУ: пособие по курсовому проектированию для студентов специальностей 1-36 01 01 «Технология машиностроения», 1-36 01 03 «Технологическое оборудование машиностроительного производства» / А. И. Кочергин, Т. В. Василенко. – Минск: БНТУ, 2020 – 39 с.
ISBN 978-985-583-085-7.

В пособии описаны приводы, имеющие структуру «электродвигатель-шпиндель», «двигатель-ременная передача-шпиндель», с редуктором, со встроенным электродвигателем, с мотор-шпинделем. Приведены рекомендации по их проектированию.

УДК 621.9.06-8-529- 025.13:378.147.091.313(075.8)

ББК 34.63-5я7

ISBN 978-985-583-085-7

© Кочергин А. И., Василенко Т. В., 2020

© Белорусский национальный
технический университет, 2020

ВВЕДЕНИЕ

В станках с числовым программным управлением применяются приводы главного движения с бесступенчатым регулированием частоты вращения, основой которых являются бесступенчато-регулируемые электродвигатели. В процессе обработки заготовки частота и направление вращения шпинделя изменяются автоматически в соответствии с требованиями технологии. Если при этом вращение шпинделя может быть с периодическими остановками, управляемыми по программе, то он вместе с электродвигателем образует ось «С». Дискретность углового позиционирования шпинделя обычно равна $0,001^\circ$.

Главные приводы, применяемые в станках с ЧПУ, имеют большой диапазон регулирования, что при достаточной мощности обеспечивает широкие технологические возможности станков. Приводы обладают высокой крутильной жёсткостью и точностью углового позиционирования. В то же время тепловые деформации и силовые процессы приводов не должны существенно снижать точность вращения шпинделя. Применение приводов в виде отдельных компактных агрегатов позволяет создавать многофункциональные станки разнообразных компоновок.

1. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИВодОВ ГЛАВНОГО ДВИЖЕНИЯ СТАНКОВ С ЧПУ

Привод главного движения станка с ЧПУ состоит из электродвигателя, механической части и электронной системы управления.

В приводах современных станков применяются асинхронные электродвигатели. Управление ими производится электронной системой, путём изменения напряжения и частоты в обмотке статора. К особо высокоскоростным двигателям ток подаётся без обратной связи в реальном масштабе времени. Во многих приводах имеется обратная связь на основе магнитного или оптического датчика. Это позволяет управлять частотой вращения шпинделя, обеспечивать программируемое позиционирование и ориентацию шпинделя, необходимую для автоматической смены инструмента, а также синхронное нарезание резьбы.

Главные приводы новейших станков с ЧПУ имеют векторное управление, которое не только формирует гармонические токи (напряжения) фаз, но и обеспечивает управление магнитным потоком ротора. При управлении двигателем с датчиком скорости используются данные, полученные при измерении скорости ротора и тока статора или ротора. Векторное управление обеспечивает высокую точность регулирования частоты вращения шпинделя, плавный старт и стабильную скорость вращения двигателя во всём диапазоне частот, поддерживает скорость практически постоянной при изменении нагрузки, снижение потерь на нагрев и намагничивание, повышение КПД двигателя.

2. ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ ДЛЯ ПРИВодОВ ГЛАВНОГО ДВИЖЕНИЯ

В качестве примеров электродвигателей, применяемых в станках с ЧПУ, можно привести изготавливаемые фирмой Siemens (Германия):

– **короткозамкнутые асинхронные частотно-регулируемые двигатели переменного тока IPH7** с воздушным охлаждением, создаваемым осевым вентилятором. Для определения частоты вращения и положения ротора, в двигатель встроены инкрементальный датчик, вырабатывающий 2048 импульсов за один оборот, или абсолютный датчик EnDat. Благодаря им поддерживается ось «С», т. е. шпиндель может использоваться в режимах круговой подачи и деления. Двигатели применяются в токарных, многоцелевых и специальных станках;

– **четырёхполюсные асинхронные двигатели IPH4** с короткозамкнутым ротором с водяным охлаждением, имеющие небольшой момент инерции и вследствие этого высокую предельную частоту вращения. Двигатели рекомендуются для фрезерных станков с большой нагрузкой и противощпинделей токарных станков;

– **асинхронные двигатели IPM4** с полым валом и водяным охлаждением, имеющие большую удельную мощность, малое время разгона и торможения благодаря небольшой инерционности ротора. Полюс вала с отверстием Ø11,5 мм позволяет подавать СОЖ через инструмент в зону резания. Для этого на задней стороне вала имеется отверстие для присоединения резервуара с СОЖ, а на передней – отверстие для присоединения ниппеля. В двигателях имеется встроенная система для определения частоты вращения и положения ротора. Температура охлаждающей среды около 30 °С, расход 6...10 л/мин. Двигатели рекомендуются для компактных многоцелевых и специальных станков;

– **асинхронные двигатели PM6** с полым валом и воздушным охлаждением, обеспечиваемым осевым или радиальным вентилятором, предназначенные для станков с прямым приводом. Двигатели имеют встроенную измерительную систему для определения частоты вращения и положения ротора. Температура двигателя контролируется встроенным в обмотку датчиком;

– **асинхронные встраиваемые двигатели IPH2** с короткозамкнутым ротором и водяным охлаждением. Двигатели изготавли-

ваются в составе двух компонентов: статора и ротора. В обмотке статора имеется датчик температуры. В приводах используется инкрементальная измерительная система для регистрации углов поворота и угловых скоростей шпинделя. В её состав входят магнитное кольцо и считывающая головка с соединительным кабелем. Магнитное кольцо на шпинделе крепится к его буртику винтами или гайкой. Датчик выдаёт 256 импульсов на один оборот с погрешностью ± 72 угловые секунды. Двигатели 1PH2 рекомендуются к использованию в токарных и шлифовальных станках, обеспечивающих повышенную точность обработки.

2.1. Режимы работы двигателей

Номинальным режимом работы электродвигателей, как и других электрических машин, является продолжительный режим *S1* (рис. 2.1, *a*), при котором длительная работа двигателя, при неизменной внешней нагрузке *P*, достаточна для достижения практически постоянной температуры всех его частей. Режиму *S1* соответствует номинальная мощность двигателя, указываемая в его технической характеристике.

Повторно-кратковременный режим *S3* (рис. 2.1, *б*) характеризуется тем, что работа состоит из идентичных циклов, каждый из которых включает время работы t_p при неизменной нагрузке, за которое двигатель не нагревается до установившейся температуры, и короткую паузу t_0 , в течение которой двигатель не охлаждается до температуры окружающей среды. Во время паузы двигатель отключается от сети и потери при пуске не оказывают влияния на температуру его частей. Максимальная продолжительность работы в режиме *S3* принята 20 минут.

Перемежающийся режим *S6* (рис. 2.1, *в*) характеризуется тем, что осуществляется множество идентичных циклов, включающих работу двигателя с постоянной нагрузкой *P* в течение времени t_p и его работу на холостом ходу t_x ; при этом длительность циклов такова, что температура двигателя не достигает установившегося уровня.

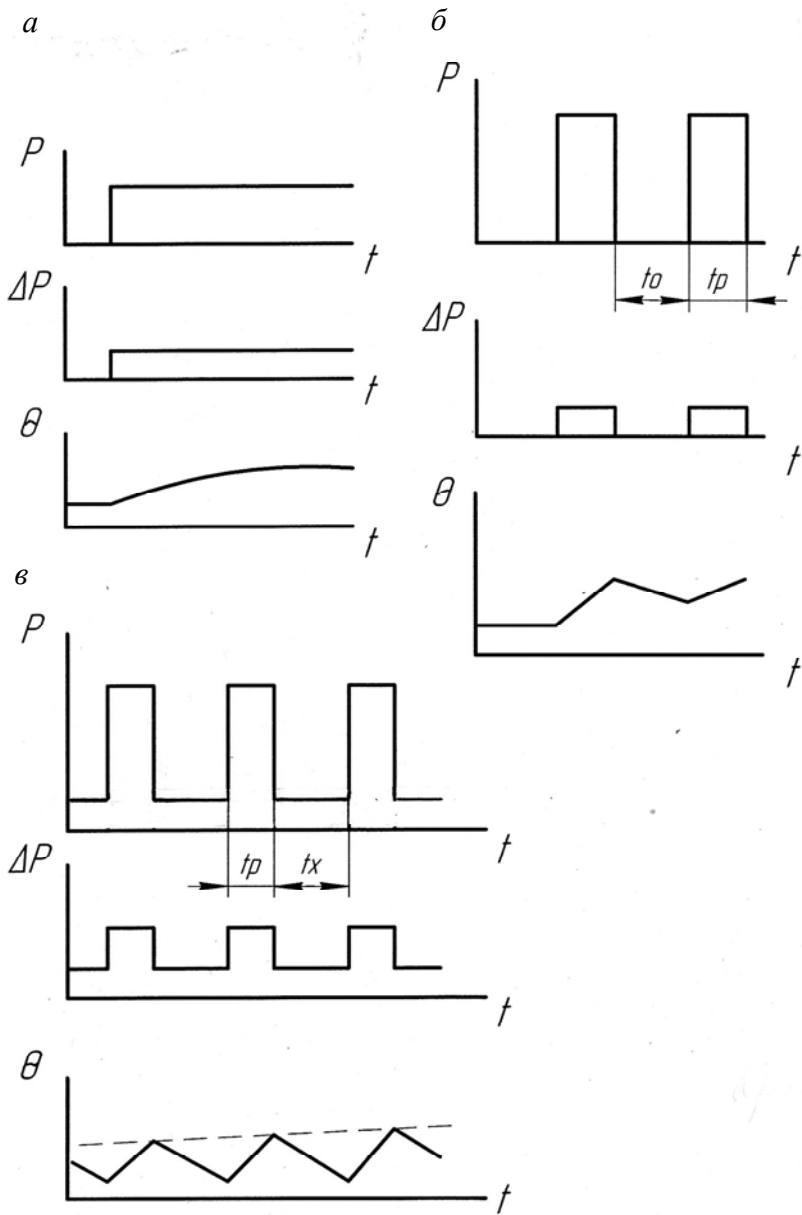


Рис. 2.1. Режимы работы двигателей

2.2. Зоны регулирования и механическая характеристика двигателя

Механическая характеристика двигателя представляет собой совокупность графиков мощности двигателя P и момента M на его валу как функций частоты вращения ротора (рис. 2.2). Характером изменения P и M обусловлены три зоны регулирования двигателя.

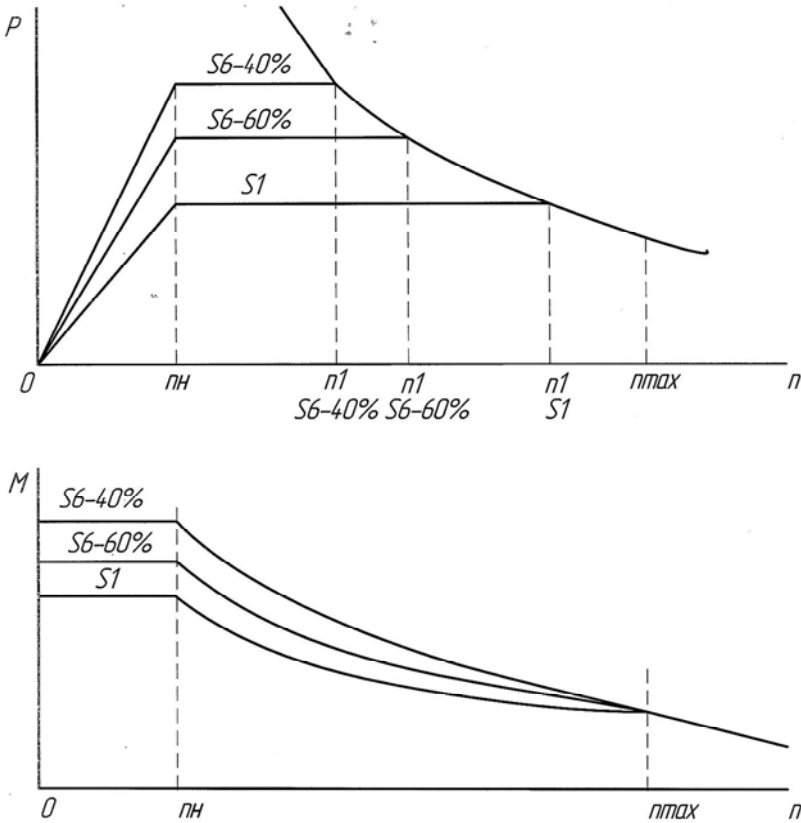


Рис. 2.2. Механические характеристики двигателя

Увеличение частоты вращения от нуля до n_H , называемой номинальной, обеспечивается возрастанием напряжения на статоре при поддержании постоянного проскальзывания.

При этом мощность возрастает пропорционально частоте вращения и становится максимальной при номинальной частоте, а момент на роторе сохраняется постоянным и максимальным. Это первая зона регулирования двигателя.

Во второй зоне (от n_H до n_1) регулирование производится путём уменьшения потока возбуждения за счёт изменения проскальзывания и момента при постоянном напряжении. При этом мощность сохраняется постоянной и максимальной, а момент уменьшается пропорционально частоте вращения.

В третьей зоне регулирования (от n_1 до n_{max}) мощность и момент на валу двигателя снижаются. Работа станка в этой зоне допускается в исключительных случаях.

Перегрузочные способности электродвигателей характеризуются дополнительными графиками мощности и момента для нескольких режимов работы.

Продолжительность перегрузки указывается в виде отношения допустимого времени работы с перегрузкой к общему времени. Приводится для относительной временной перегрузки 60 и 40 %, т. е. для режимов $S6 - 60\%$ и $S6 - 40\%$, а иногда для перегрузки 25 и 16 %. При относительных временных перегрузках 60, 40, 25 и 16 % двигатель развивает мощность в 1,2; 1,4; 1,6 и 1,8 раза больше, по сравнению с мощностью в режиме $S1$.

Наибольшая частота n_1 вращения ротора двигателя в каждом режиме работы различна ($n_1 S6 - 40\%$, $n_1 S6 - 60\%$ и $n_1 S1$ на рис. 2.2). При очень больших частотах допускается только кратковременная работа двигателя.

Диапазон регулирования двигателя во второй зоне, т. е.

$$R_{ДР} = \frac{n_1}{n_H},$$

называется диапазоном регулирования с постоянной мощностью.

Диапазон регулирования двигателя в первой зоне, т. е.

$$R_{ДМ} = \frac{n_H}{n_{min}},$$

производится с постоянным моментом. Частота вращения двигателя n_{min} соответствует наименьшей частоте вращения шпинделя, определяемой по условиям резания.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗКИ НА ПРИВОД

3.1. Исходные данные

Привод главного движения, как и другие узлы станка, разрабатывают после того, как определили перечни обрабатываемых материалов и выполняемых переходов, предельные размеры инструментов или обрабатываемых поверхностей, тип и способ подвода смазочно-охлаждающей жидкости и другие условия обработки. Кроме того, должен быть выполнен анализ конструкций и технических параметров станков, аналогичных проектируемому.

3.2. Нагрузки на приводы многоцелевых сверлильно-фрезерно-расточных станков

Нагрузки на главный привод станков, предназначенных для черновой и чистовой обработки чёрных и цветных сплавов, определяют следующим образом.

Минимальную частоту вращения шпинделя определяют по режиму развёртывания отверстий инструментами из быстрорежущей стали в чугунных заготовках или твердосплавными инструментами в стальных заготовках. Максимальную частоту вращения шпинделя находят по режиму чистового растачивания отверстий резцами из сверхтвёрдых материалов в алюминиевых заготовках.

Максимальный момент на шпинделе находят, исходя из режима чернового фрезерования стальных заготовок торцовой твердосплавной фрезой, имеющей диаметр $0,35 B$, где B – ширина стола станка.

Полезная мощность на шпинделе, P , кВт

$$P = \frac{P_z \cdot V}{60 \cdot 1000},$$

где P_z – тангенциальная составляющая силы резания, Н;

V – скорость резания, м/мин.

Наибольший крутящий момент на шпинделе, M , Н·м

$$M = \frac{9550 \cdot P}{n_p},$$

где n_p – расчётная частота вращения шпинделя, об/мин.

3.3. Нагрузки на приводы многоцелевых токарных станков

Наибольший момент или мощность на шпинделе станка средних размеров находят при условии, что производится продольное черновое точение заготовки из конструкционной стали, имеющей диаметр, равный 0,8 высоты центров станка. При этом используется резец с пластиной из твёрдого сплава с покрытием. Глубина резания t принимается приблизительно равной $D^{1/3}$, где D – наибольший диаметр обрабатываемой заготовки.

Наибольшая частота вращения шпинделя определяется по режимам чистового точения стальной заготовки диаметра $0,12D$ резцом, оснащённым композитом, или при точении заготовки из цветного сплава синтетическим поликристаллическим алмазом.

Наименьшая частота вращения шпинделя обусловлена режимом развёртывания.

4. ПРИВОДЫ СО СТРУКТУРОЙ «ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ–ШПИНДЕЛЬ» (ПРЯМЫЕ, IOD ШПИНДЕЛИ)

4.1. Структура привода

Двигатель D (рис. 4.1) с помощью муфты 2 с упругим элементом соединяется непосредственно со шпинделем 3. В двигатель встроены датчик I для определения углового положения и частоты вращения шпинделя.

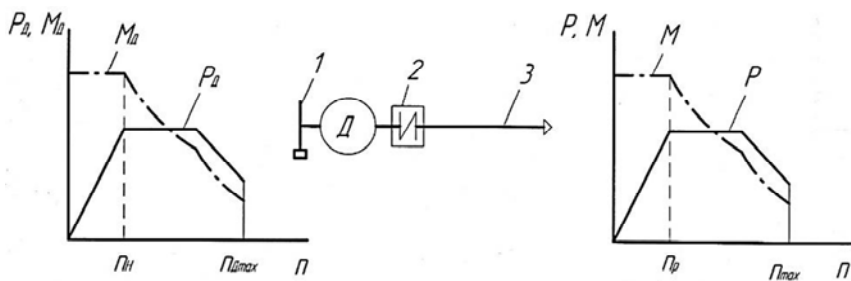


Рис. 4.1. Механические характеристики прямого привода

4.2. Силовая характеристика привода

Силовая характеристика привода почти такая же, как и характеристика электродвигателя. Различие между ними состоит в том, что мощность на шпинделе меньше мощности двигателя на величину потерь в опорах шпинделя.

4.3. Двигатели для прямого привода

Если в станке, оснащённом прямым приводом, предусматривается подвод СОЖ в зону образования стружки, то применяется двигатель с полым валом 1 (рис. 4.2) и датчиком 2. Двигатель имеет воздушное (с помощью пристроенного к заднему торцу вентилятора) или водяное охлаждение. В двигателе отсутствует щеточный узел, что обеспечивает его высокие частотные характеристики и повышенную долговечность.

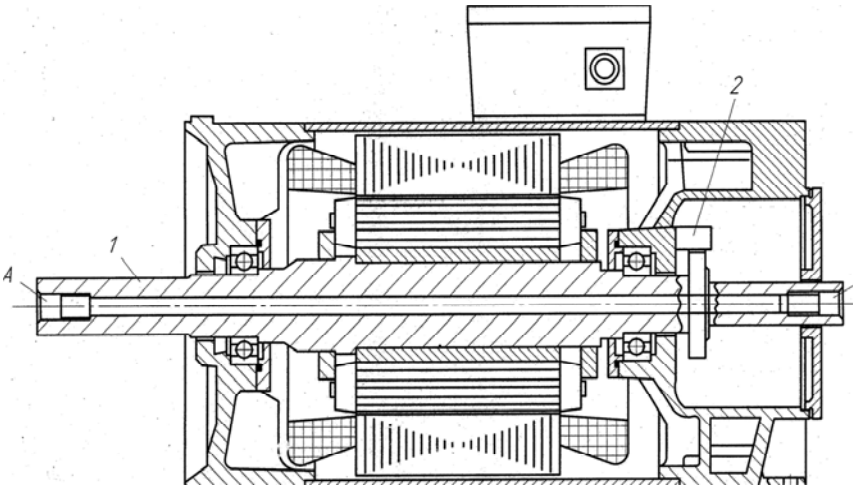


Рис. 4.2. Схема электродвигателя с полым валом

4.4. Выбор электродвигателя

Исходными данными являются тип станка, предельные частоты вращения шпинделя, наибольшая мощность или наибольший мо-

мент на шпинделе, информация об электродвигателях, о возможных режимах работы привода и допустимых перегрузках.

Электродвигатель выбирается исходя из двух условий:

1) наибольшая частота вращения двигателя $n_{Дmax}$ приблизительно равна наибольшей частоте вращения шпинделя;

2) наибольшая мощность на валу двигателя при работе в режиме S_i соответствует мощности P на шпинделе с учетом потери P_0 в опорах на преодоление трения

$$P_{ДС_i} = P + P_0.$$

Номинальная мощность двигателя (в режиме S_1)

$$P_{ДС_1} = \frac{P_{ДС_i}}{k_{S_i}},$$

где k_{S_i} – коэффициент перегрузки, приблизительно равный 1,2; 1,4; 1,6; 1,8 при перегрузке 60; 40; 25; 16 %.

Проверяется, достигается ли в приводе требуемый по технологии момент на шпинделе. Если он не обеспечивается, то следует использовать другой двигатель.

Потери мощности в подшипниках являются суммой потерь на преодоление трения качения между телами качения и кольцами, трения скольжения на площадке контакта, трения скольжения между телами качения и сепаратором, трения в смазочном материале. Момент трения зависит от нагрузки на подшипник, частоты вращения и свойств смазочного материала. Момент трения и соответствующую потерю мощности можно определить по справочнику-учебнику [3].

4.5. Достоинства прямых приводов

Прямые приводы обладают рядом достоинств: обеспечивают стабильность угловой скорости шпинделя (на него не передаются вибрации двигателя), имеют малое время разгона и торможения, низкий уровень шума. Важно и то, что тепло от двигателя не передаётся на шпиндель.

4.6. Примеры прямых приводов

На рис. 4.3 представлена схема шпиндельного узла с прямым приводом станка. Шпиндель 2 получает вращение от двигателя 7 через муфту 6. Инструментальная оправка 12 затянута в коническое гнездо шпинделя пакетом тарельчатых пружин 8. Сила затягивания регулируется гайкой 3. Оправка освобождается, когда поршень 5 гидроцилиндра, перемещая посредством планки 4 шток 1, сжимает пакет пружин. Гильза 10 шпинделя охлаждается жидкостью, подаваемой в полости 9 и 11. В зону резания смазочно-охлаждающая жидкость поступает поливом.

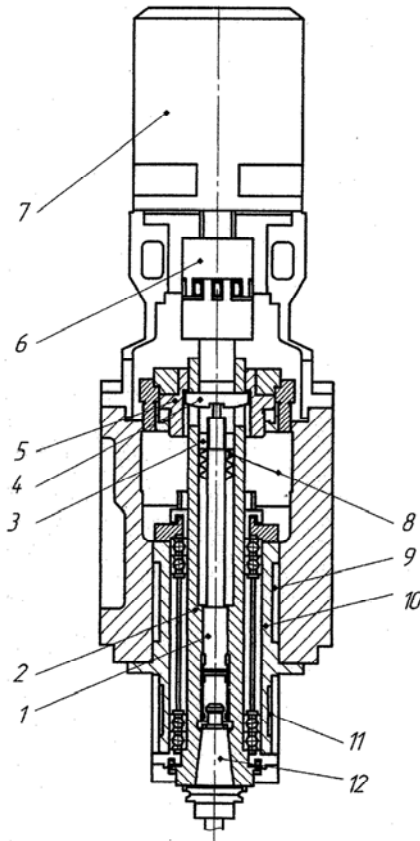


Рис. 4.3. Шпиндельный узел с прямым приводом

Прямой привод шпинделя многоцелевого станка представлен на рис. 4.4. Плита, на которой базируется электродвигатель 10 соосно со шпинделем 4, закреплена на корпусе 1 шпиндельной бабки. Вращающий момент с вала двигателя передается на шпиндель 4 муфтой 9 (см. п. 9.1 данного пособия). При воздействии поршня гидроцилиндра, не показанного на рис. 4.4, на диск 7, насаженный на шпиндель, вставленный в диск штифт смещает шток 2 вправо. В результате этого сжимается пакет тарельчатых пружин 6 и инструментальная оправка освобождается. В отверстии шпинделя шток направляется несколькими втулками 5.

Смазочно-охлаждающая жидкость посредством ротационной муфты 11 вводится в осевое отверстие, имеющееся в валу электродвигателя, и через ниппель 8 попадает в продольное отверстие 3, изготовленное в штоке 2. По каналам, имеющимся в теле инструмента, эта жидкость проходит в зону резания.

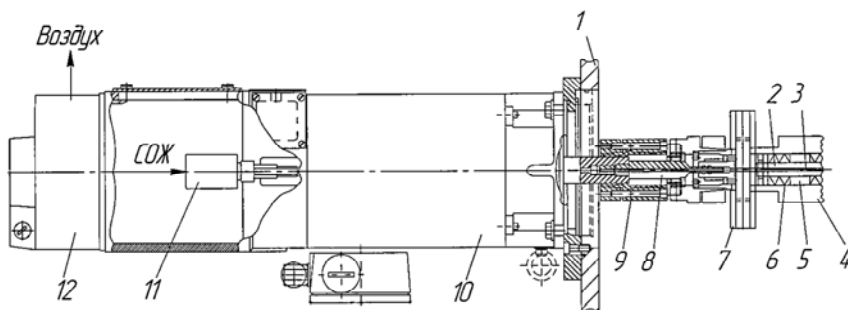


Рис. 4.4. Привод шпинделя многоцелевого станка

5. ПРИВОДЫ СО ВСТРОЕННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Встроенный электродвигатель состоит из статора 2 и ротора 3 (рис. 5.1), от размеров которого зависят параметры технической характеристики двигателя. Ротор вместе с гильзой 1 монтируются на шпинделе 4 по прессовой посадке, создаваемой термическим способом. Он может быть демонтирован с помощью масла, нагнетаемого через отверстия 8 с высоким давлением в полости, имеющиеся между шпинделем и гильзой. Ротор подвергается балансировке совместно с гильзой. Двигатель охлаждается водой, поступающей из холодильного агрегата в винтовой канал 7, изготовленный на корпусе 6 статора. В нем имеются уплотнения 5.

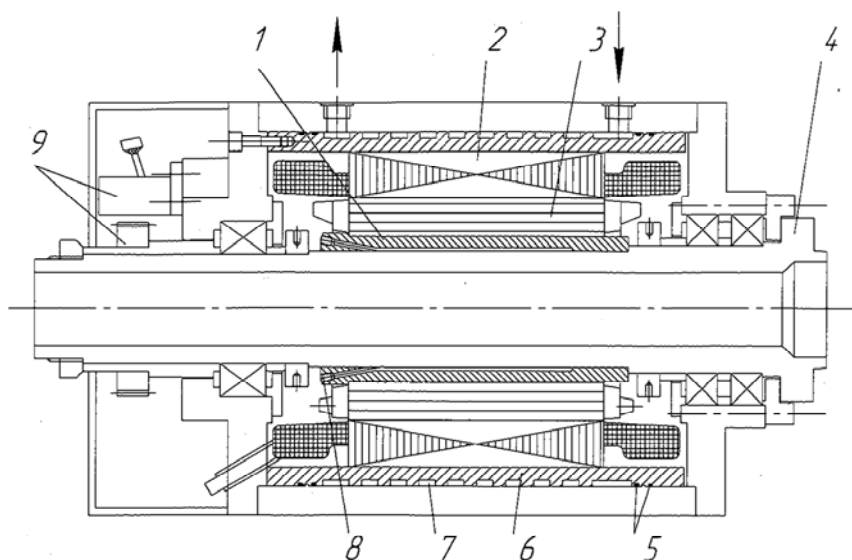


Рис. 5.1. Шпиндельная бабка со встроенным электродвигателем

Привод оснащается тормозом и измерительной системой 9 для определения частоты вращения шпинделя. Двигатель может быть смонтирован между опорами шпинделя или позади его задней опоры.

Для приводов со встроенным двигателем характерно:

- компактность конструкции, ввиду отсутствия традиционных для главных приводов муфты, редуктора, ременной передачи;

- низкий уровень шума из-за небольшого числа механических элементов;
- повышенная жёсткость шпиндельного узла, если элементы двигателя смонтированы между опорами шпинделя;
- отсутствие поперечных силовых воздействий на шпиндель со стороны привода;
- высокая удельная мощность благодаря водяному охлаждению;
- малое время разгона и торможения.

На токарных и шлифовальных станках, оснащённых главным приводом со встроенным электродвигателем, достигается повышенное качество обработки.

Электродвигатель выбирается по тем же критериям, что и для прямого привода.

6. ПРИВОДЫ СО СТРУКТУРОЙ «ДВИГАТЕЛЬ-РЕМЕННАЯ ПЕРЕДАЧА-ШПИНДЕЛЬ»

6.1. Кинематические и силовые соотношения в приводе

Схема привода представлена на рис. 6.1. Если передаточное отношение ременной передачи $i_{\text{рем}}$ ($0,4 \leq i_{\text{рем}} \leq 1$), то расчётная n_p и максимальная n_{max} частоты вращения шпинделя Z , мощность и момент M на нём определяются по зависимостям

$$n_p = n_H \cdot i_{\text{рем}}; \quad n_{\text{max}} = n_{D \text{ max}} \cdot i_{\text{рем}};$$

$$P = (P_D - P_0) \cdot \eta; \quad M = (M_D - M_0) \cdot \eta / i_{\text{рем}},$$

где $n_{D \text{ max}}$, P_D , M_D – соответственно максимальная частота вращения, мощность и момент на валу двигателя;

P_0 , M_0 – потери мощности и момента в опорах шпинделя;

η – КПД ременной передачи.

Потери мощности в ременной передаче обусловлены наличием скольжения, внутренним трением в ремне при переменном изгибе, растяжении и сжатии.

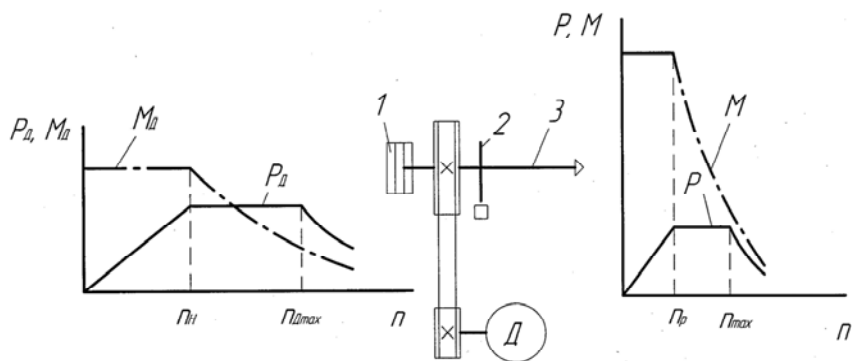


Рис. 6.1. Механические характеристики привода со структурой «двигатель-ременная передача-шпиндель»

При $i_{\text{рем}} < 1$ момент на шпинделе почти в $\eta/i_{\text{рем}}$ раз больше момента на валу двигателя. Поэтому приводы описываемой структуры целесообразно применять в станках, способных производить обработку с большим моментом резания, например, при фрезеровании.

Ременная передача даёт возможность смещать двигатель относительно оси шпинделя, обеспечивать удобное расположение тяжёлого электродвигателя, датчика 2 частоты вращения шпинделя и механизма 1 зажима инструментов, выполнять плавное вращение шпинделя. Недостатками привода являются значительная потеря мощности в ременной передаче и необходимость обеспечить её долговечность. Кроме того, опоры шпинделя дополнительно нагружаются поперечной силой.

6.2. Выбор двигателя

Двигатель выбирается с учётом наибольшей мощности P на его валу при работе в режиме S_1

$$P_{ДСi} = P + P_{\text{рем}} + P_0,$$

где $P_{\text{рем}}$ – потери мощности в ременной передаче;

P_0 – потери мощности в опорах шпинделя.

Наибольшая частота вращения шпинделя обеспечивается ременной передачей

$$n_{max} = n_{Д max} \cdot i_{рем}$$

6.3. Пример привода

Привод главного движения токарного станка приведен на рис. 6.2. Шпиндель получает вращение с помощью ременной передачи 2. Передняя опора шпинделя сконструирована из трёх радиально-упорных шариковых подшипников, задняя опора состоит из двух таких же подшипников. Датчик резбонарезания 6 связан со шпинделем зубчатой ременной передачей 1, валиком и муфтой 5. Быстрая остановка шпинделя после выключения двигателя обеспечивается тормозным устройством 3, в состав которого входит тормозной диск. Заготовка зажимается в патроне 8 гидроцилиндром 4, поршень которого соединен с патроном тягой 7.

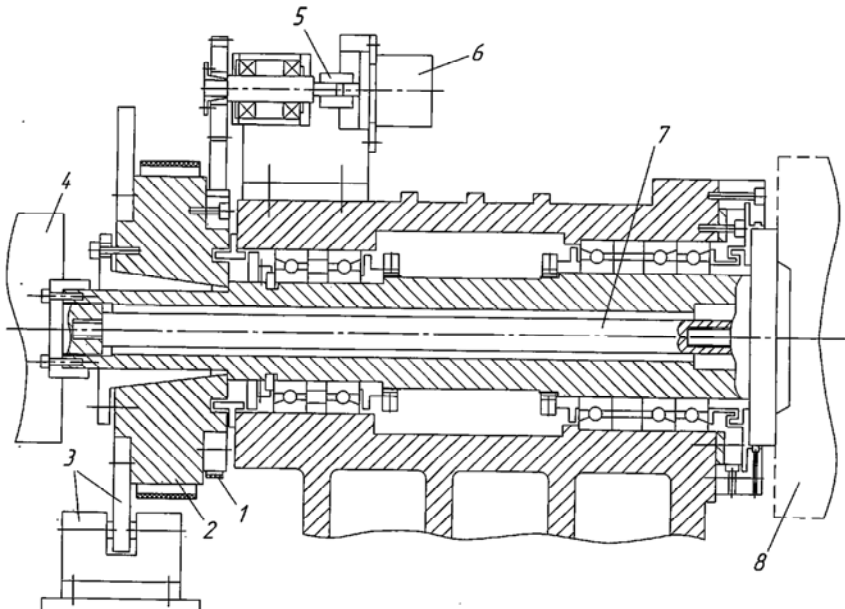


Рис. 6.2. Привод с ременной передачей

Гидравлический тормоз с поршнями 2 и 4 изображён на рис. 6.3. На поршнях закреплены накладки из фрикционного материала. При подаче масла в полости 1 и 5 тормозной диск 3 зажимается.

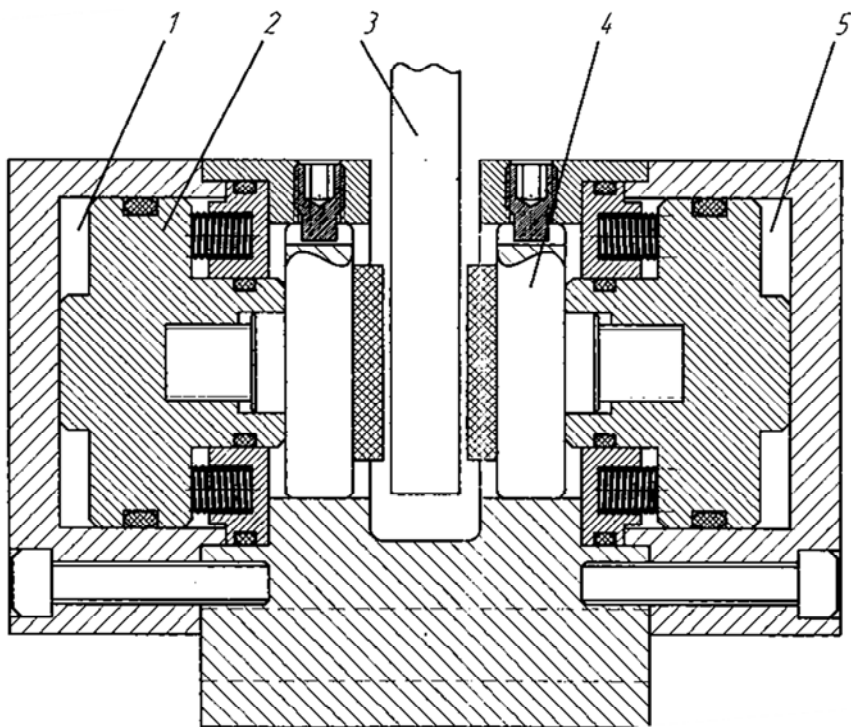


Рис. 6.3. Гидравлический тормоз

7. ПРИВОДЫ С РЕДУКТОРОМ

7.1. Кинематические и силовые соотношения в приводе

Наиболее часто применяются следующие редукторы: планетарные, с широким зубчатым колесом, с косозубыми зубчатыми колёсами и двусторонней муфтой.

Далее рассматривается привод с редуктором (рис. 7.1), в состав которого входит широкое зубчатое колесо с числом зубьев z_1 . Благодаря редуктору бесступенчатое регулирование частоты вращения шпинделя производится в двух диапазонах. Частоты верхнего диапазона получаются по цепи $z_1 - z_2, z_2 - z_3$ с передаточным отношением i_1 , нижнего диапазона – по цепи $z_1 - z_2, z_4 - z_5$ с передаточным отношением i_2 .

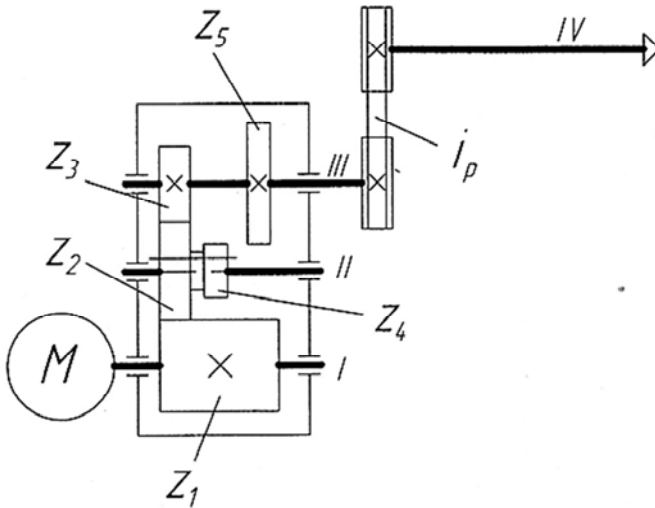


Рис. 7.1. Схема привода с редуктором

Передаточное отношение

$$i_1 = \frac{z_1}{z_2} \cdot \frac{z_2}{z_3} = \frac{z_1}{z_3}$$

обычно принимается равным единице (при передаточном отношении ременной передачи $i_{\text{рем}} = 1$), что обеспечивает равенство наибольшей частоты вращения шпинделя и двигателя:

$$n_{\text{max}} = n_{\text{Д max}}.$$

Из этого следует

$$z_3 = z_1.$$

Передаточное отношение

$$i_2 = \frac{z_1}{z_2} \cdot \frac{z_4}{z_5}$$

задаётся, исходя из требований к диаграмме мощности на шпинделе. Пусть $OABC$ – график мощности электродвигателя (рис. 7.2, а) и $OA_1B_1C_1$ – графики мощности на шпинделе при регулировании его частоты вращения в верхнем диапазоне при $i_{\text{рем}}=1, i_1=1$.

Регулирование частоты вращения шпинделя в нижнем диапазоне, т. е. при $i_2 < 1$ приводит к снижению характерных частот (рис. 7.2, б): $n_{A_2} = n_{\text{H}} \cdot i_2, n_{B_2} = n_1 \cdot i_2, n_{C_2} = n_{\text{max}} \cdot i_2$ (при $i_{\text{рем}}=1$). Провал мощности на шпинделе отсутствует, когда частота n_{B_2} совпадает с частотой n_{H} , т. е. при $n_1 i_2 = n_{\text{H}}$. Следовательно,

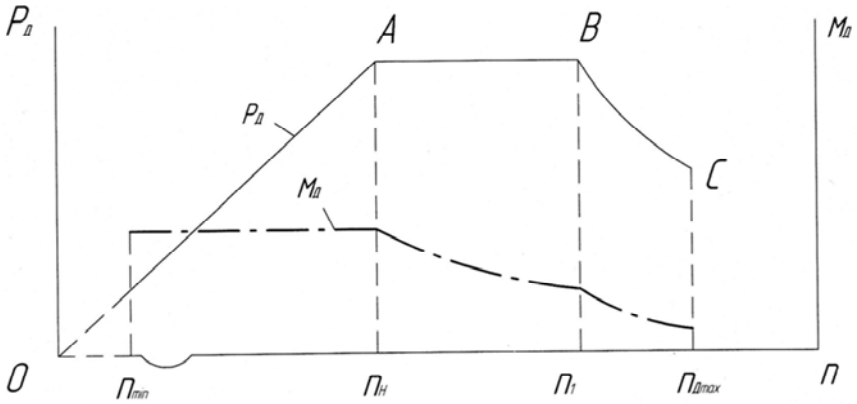
$$i_2 = \frac{n_{\text{H}}}{n_1} = \frac{1}{R_{\text{ДР}}},$$

где $R_{\text{ДР}}$ – диапазон регулирования двигателя с постоянной мощностью.

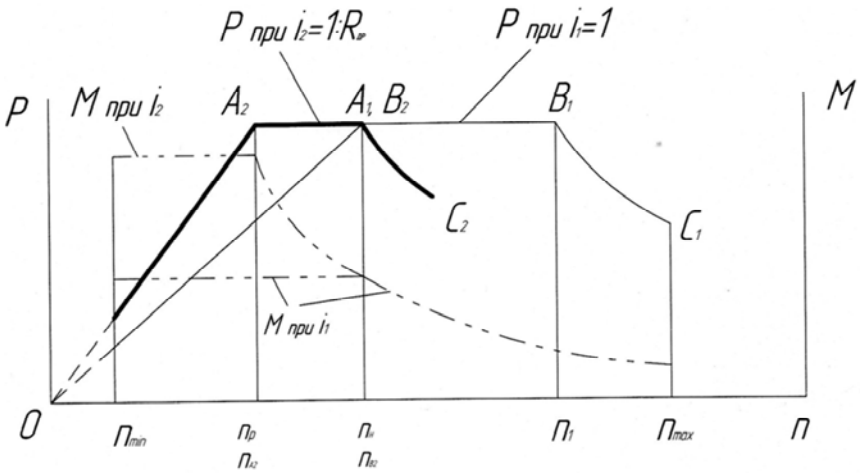
Таким образом, $OA_2B_2C_2$ есть диаграмма мощности на шпинделе при регулировании двигателя в первой зоне.

Частота $n_{\text{р}}$ называется расчётной частотой вращения шпинделя, частота n_{min} является его минимальной частотой. В диапазоне частот $n_{\text{min}} - n_{\text{р}}$ на шпинделе сохраняется постоянный момент, в диапазоне $n_{\text{р}} - n_1$ – постоянная мощность, которая меньше мощности на валу

двигателя в интервале $n_H - n_1$ на величину потерь в редукторе, ременной передаче и опорах шпинделя.



а



б

Рис. 7.2. Механические характеристики привода с редуктором

Момент на шпинделе в интервале частот $n_{min} - n_p$ значительно больше момента на валу двигателя в интервале частот $n_{min} - n_H$

$$M = M_D \cdot R_{др} \cdot \eta,$$

где η – коэффициент полезного действия механических элементов привода.

Следовательно, применение двигателя с бесступенчатым регулированием частоты вращения вместе с двухскоростным редуктором расширяет диапазон частот вращения шпинделя при сохранении на нём постоянной мощности и значительно повышает момент при относительно низких частотах. Это позволяет обрабатывать с рациональными режимами как лёгкие сплавы (при высоких частотах вращения шпинделя), так и труднообрабатываемые материалы (при относительно низких частотах).

Когда необходимо расширить диапазон регулирования частоты вращения шпинделя с постоянной мощностью R_p , то следует снизить расчётную частоту n_p , для чего уменьшить i_2 по сравнению с отношением $1/R_{др}$. При этом вблизи частоты n_H появляется провал мощности на шпинделе, но он не должен быть значительным.

Если появляется возможность уменьшить диапазон регулирования частот вращения шпинделя R_p при сохранении постоянной мощности, то следует принять $i_2 > 1/R_{др}$. В этом случае вблизи частоты n_H диапазоны регулирования несколько перекрываются.

7.2. Выбор электродвигателя

Электродвигатель вместе с редуктором должны обеспечить наибольшие требуемые уровни мощности и момента на шпинделе с учётом режима работы S_i , передаточного отношения редуктора i_2 и потерь мощности в приводе. Учитываются потери: в опорах шпинделя P_o при номинальной частоте вращения n_H , в ременной передаче $P_{рем}$, а также в редукторе.

Если P – наибольшая мощность резания, η – КПД редуктора, то наибольшая мощность на валу двигателя в наиболее жёстком режиме работы привода

Наклонными линиями обозначены передаточные отношения зубчатых передач, которые должны находиться в интервале 0,25...2. Наклон линии влево соответствует понижающей передаче, вправо – повышающей. Применение в редукторе широкого зубчатого колеса позволяет простым способом обеспечить передаточное отношение

$$i_2 = \frac{z_1}{z_2} \cdot \frac{z_4}{z_5}$$

меньшее чем 0,25, и, следовательно, большой момент на шпинделе при относительно низких частотах вращения. Этим обусловлено достоинство редуктора с широким колесом.

Из графиков на рис. 7.3 следует, что мощность и момент на шпинделе наибольшие, когда частота его вращения равна расчётной n_p .

На этом основании выделяется расчётная цепь редуктора, обозначенная на рис. 7.3 штрихами. Как правило, редукторы для станочных приводов главного движения изготавливаются производителями электродвигателей. Например, фирма Siemens изготавливает двухступенчатый планетарный редуктор с передаточными отношениями $i_1=1$ и $i_2=1/4$. Фланец двигателя крепится к редуктору, который может быть установлен соосно со шпинделем или передавать ему вращение с помощью ременной или зубчатых передач.

7.4. Определение чисел зубьев колёс

Минимальное число зубьев z_1 имеет широкое зубчатое колесо. Обычно оно принимается от 18 до 26. Так как

$$i_1 = \frac{z_1}{z_2} \cdot \frac{z_2}{z_3} = 1,$$

то $z_3 = z_1$.

Так как модуль всех передач одинаков, схеме редуктора отвечает соотношение

$$z_2 + \frac{z_3}{2} = \frac{z_2}{2} + \frac{z_4}{2} + \frac{z_5}{2}$$

или

$$z_1 + z_2 = z_4 + z_5.$$

Кроме того,

$$\frac{z_1}{z_2} \cdot \frac{z_4}{z_5} = i.$$

Приняв конкретные значения z_1 и z_2 , по этим зависимостям определяют z_4 и z_5 . При этом отношение z_1 / z_2 и z_4 / z_5 должны быть больше 0,25. Чтобы числа зубьев колёс получились целыми, результаты расчёта приходится корректировать. Но из-за этого на границе диапазонов регулирования возможен небольшой провал мощности.

8. МОТОРЫ-ШПИДЕЛИ

Мотор–шпиндель является мехатронным модулем, изготавливаемым серийно. Собственно мотор-шпиндель состоит из шпинделя с опорами, встроенного электродвигателя, механизма зажима инструментальной оправки или заготовки, датчика обратной связи по положению шпинделя, датчиков системы диагностики. Все эти элементы объединены в один блок.

Собственно мотор-шпиндель обслуживается подсистемами охлаждения двигателя и опор шпинделя, смазывания опор, предохранения их от загрязнения, очистки инструментального конуса, а также подсистемой охлаждения.

Моторы-шпиндели изготавливаются для сверлильно-фрезерно-расточных, токарных и шлифовальных станков. Между собой они различаются кинематическими и силовыми параметрами, набором выполняемых функций, конструкцией некоторых элементов, например, базовыми поверхностями для установки инструментов.

Моторы-шпиндели могут иметь большую мощность (до 60 кВт) и высокую частоту вращения (до 90 000 об/мин). Для них характерны низкие уровни вибраций и шума. Мотор-шпиндели являются альтернативой приводов с ременной передачей и с редуктором. Модульное исполнение мотор-шпинделей обеспечивает их удобный и быстрый

монтаж. Их положение в станках может быть вертикальным, горизонтальным и наклонным. На базе этих модулей создаются станки разнообразных конфигураций, в том числе с поворотной бабкой.

Схема мотор-шпинделя с базовым конусом SK для многоцелевых сверлильно-фрезерно-расточных станков представлена на рис. 8.1. Гильза 9 с ротором установлены на шпинделе 7. Статор 8 помещён в корпус 10. Опоры 5 и 12 шпинделя скомпонованы из высокоскоростных прецизионных стальных или гибридных радиально-упорных шариковых подшипников. В передней опоре могут находиться 2, 3 или 4 шарикоподшипника, в задней – обычно 2 шариковых или однорядный радиальный подшипник с цилиндрическими роликами.

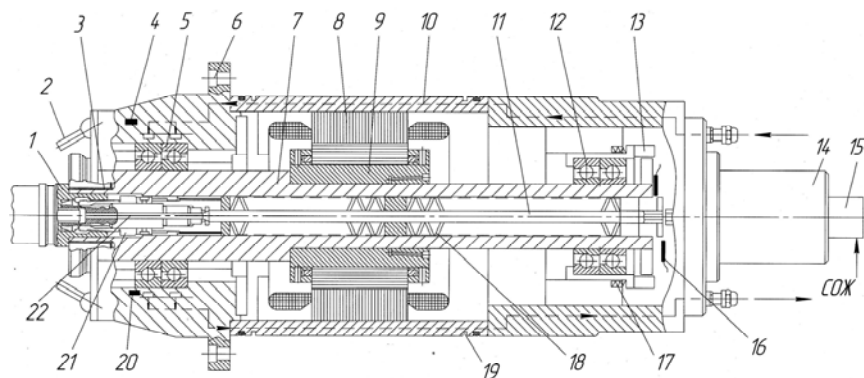


Рис. 8.1. Схема мотор-шпинделя

Для компенсации теплового удлинения заднюю опору делают плавающей. Натяг в подшипниках обеспечивается пружинами 17 или маслом. Подшипники смазываются пластичным материалом (ресурсное смазывание), жидким маслом или масляно-воздушной смесью. Для подвода и отвода жидкости, охлаждающей подшипники 5, в корпусе предусмотрены продольные отверстия 10. Уплотнения опор – лабиринтные, при этом для передней опоры предусмотрена воздушная блокировка.

Вода с антикоррозионными присадками проходит по закрытому винтовому каналу 19 или в других конструкциях по каналам, изготовленным в корпусе шпиндельной бабки.

Для управления шпинделем по скорости вращения и по положению установлен датчик 13.

Сопла 2 служат для направления в зону резания смазочно-охлаждающей жидкости, вводимой через муфту 15. Если охлаждение осуществляется через тело инструмента, то СОЖ поступает по каналу, имеющемуся в штанге 11, а затем по отверстию 22.

Отверстия 6 во фланце предназначены для крепления мотор-шпинделя в корпусе шпиндельной бабки.

На заднем фланце находятся штуцеры для подачи сжатого воздуха, используемого для обдува инструментальной оправки, для входа и выхода СОЖ; для подачи сжатого воздуха в воздушное уплотнение. На заднем фланце также находятся электровилки: для подвода силового питания и заземления; для питания датчиков механизма зажима инструмента и датчика скорости вращения шпинделя.

Для затягивания инструментальной оправки 1 служит пакет тарельчатых пружин 18, действующих на рычаги 21. Оправка освобождается гидро- или пневмоцилиндром 14. Зажим и освобождение оправки контролируются датчиками 16. Перед закреплением новой оправки конические поверхности её и гнезда шпинделя, а также их торцы очищаются сжатым воздухом, поступающим по каналу 3, или с помощью СОЖ, подаваемой через отверстие 22.

В мотор-шпиндель встроены датчики системы диагностирования его состояния:

- датчики 20 температуры шпиндельных опор, находящиеся рядом с наружными кольцами каждого подшипника, которые позволяют останавливать станок, когда температура какого-либо подшипника превышает допустимый уровень;
- датчики температуры двигателя, находящиеся в обмотке статора;
- вибродатчик 4, контролирующий уровень вибраций мотор-шпинделя, установленный в корпусе около передней опоры. При возникновении опасных вибраций станок может перейти на другой режим резания;
- датчик, контролирующий осевое смещение шпинделя, которое может появляться при его нагреве, столкновении мотор-шпинделя с заготовкой, повышенной силе резания. По сигналу датчика осевое перемещение бабки с мотор-шпинделем корректируется или выключается.

9. КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ШПИНДЕЛЬНОЙ БАБКИ

9.1. Соединительная муфта

Для соединения вала двигателя и шпинделя часто применяется высокоскоростная муфта фирмы *Rotex* (рис. 9.1), в состав которой входят две втулки 1 и, в качестве упругой детали, звёздочка 3.

Муфта передаёт вращающий момент шпинделю силами трения, возникающими на поверхностях контакта при осевом перемещении втулок 2 винтами.

Благодаря упругому элементу муфта допускает смещения вала двигателя относительно шпинделя: радиальное, угловое, осевое. Этим снижаются требования к точности деталей привода. Кроме того, муфта предохраняет привод от действия пиковых нагрузок при пуске и торможении, а также при резком изменении частоты вращения шпинделя. Муфту выбирают в зависимости от передаваемого момента и частоты вращения.

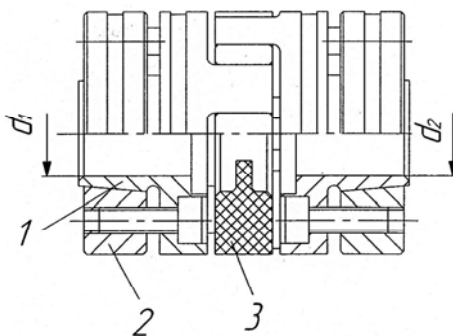


Рис. 9.1. Соединительная муфта

9.2. Ротационная муфта для ввода СОТС в зону резания

Обработка с подводом СОТС к режущим кромкам инструментов через отверстие в шпинделе позволяет:

- уменьшить расход СОТС (в зону резания вводится всего от 5 до 50 см³ в час, при глубоком сверлении – до 120 см³ в час);
- повысить стойкость инструментов;

- улучшить экологическую обстановку в цехе;
- уменьшить расходы на переработку стружки (из-за высокой температуры резания она остаётся сухой).

Но при таком резании ухудшается отвод стружки и возникают дополнительные требования к режущим инструментам и СОТС (для подготовки эмульсии можно использовать только дистиллированную воду, максимальный размер частиц загрязнений в ней не более 60 мкм).

СОТС подаётся в отверстие шпинделя через ротационную муфту (рис. 9.2), стержень 1 которой ввинчен в отверстие Б вала двигателя (см. рис. 4.2). СОТС (СОЖ на водной основе, масляный туман) вводится в отверстие А муфты и по её осевому отверстию проходит в шпиндель. Плотный контакт между вращающимся кольцом 2 и находящимся в покое кольцом 4 обеспечивается пружиной 3. Кольца, изготовленные из износостойкого материала, допускают частоту вращения до 12 000 об/мин. Уплотнение 5 защищает подшипники от СОТС. Через отверстие Б проходит воздух, охлаждающий кольца 2 и 4.

Проход СОТС в шпиндель обеспечивается ниппелем, ввинченным в отверстие А двигателя и вставленным в соединительную муфту.

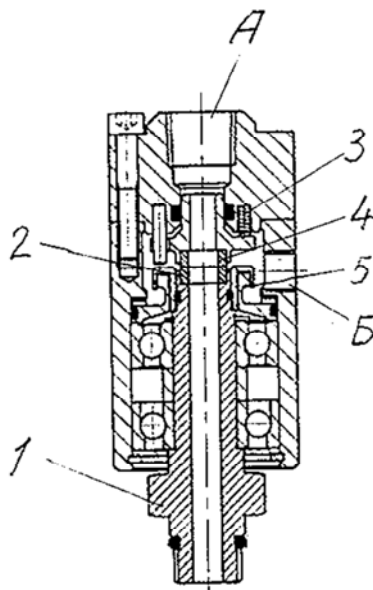


Рис. 9.2. Ротационная муфта

9.3. Устройства зажима и освобождения оправок с инструментом

9.3.1. Зажим и освобождение оправок с конусностью хвостовика 7:24

В станках с ЧПУ оправки с инструментом или заготовки в случае токарной обработки зажимаются и освобождаются автоматически. Оправка 2 с инструментом (рис. 9.3) затягивается в коническое гнездо шпинделя 3 шомполом 6 под действием осевой силы, создаваемой предварительно сжатым пакетом тарельчатых пружин 7. Эта сила регулируется гайками 10.

Захват штифта 4, винченного в оправку, производится рычагами 5, которые поворачиваются при перемещении вправо шомпола 6 под действием пружин. Для направления шомпола служат втулки 8, 9 и 18. Вращающий момент от шпинделя передается оправке торцовыми шпонками 1.

Для освобождения оправки тарельчатые пружины сжимаются силой, развиваемой гидроцилиндром 15. При поступлении масла в бесштоковую полость поршень перемещает шомпол 6 влево. В выточке втулки 19 рычаги разводятся центробежными силами и не препятствуют выталкиванию оправки из гнезда шпинделя. Гайка 17 служит упором для пакета тарельчатых пружин при отсутствии в шпинделе инструментальной оправки.

Сигналы о зажиме и освобождении оправки выдаются в систему управления станка бесконтактными конечными переключателями 16 при перемещении вдоль них упора 14, закрепленного на шомполе 6.

Скорость и угловое положение шпинделя контролируются датчиком, состоящим из вращающейся шкалы 13 и считывающей головки 12, расположенной на корпусе 11 шпиндельной бабки.

Кроме приведенного выше применяется шариковое захватное устройство (рис. 9.4, а). Инструментальная оправка 1 затягивается в гнездо шпинделя 2 шомполом 4 при действии на него силы, создаваемой пакетом тарельчатых пружин 6. Шарик 3 прижимается к штифту, винченному в оправку. Она освобождается, когда шомпол перемещается гидроцилиндром влево и шарик оказывается в выточке втулки 5.

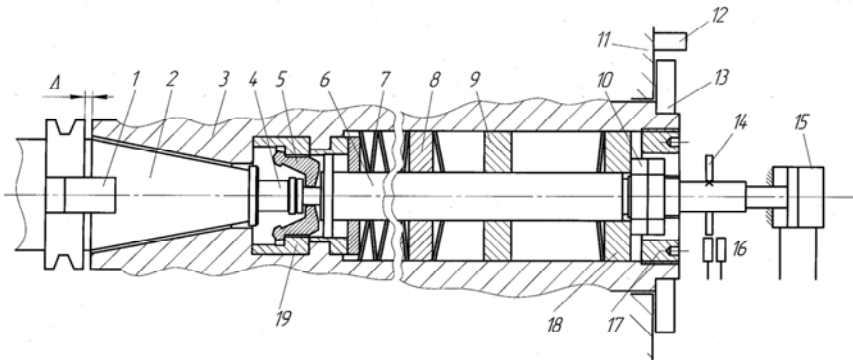


Рис. 9.3. Устройство для зажима оправки с конусностью 7:24

Из-за малого диаметра штифта шариков в захвате недостаточно для получения большой силы затягивания.

Между торцом затянутой оправки с конусностью 7:24 и торцом шпинделя имеется зазор Δ , что является особенностью данного соединения. При высоких частотах вращения от действия центробежных сил изменяются диаметры посадочных поверхностей, и оправка затягивается в шпиндель дополнительно. Поэтому сила, необходимая для извлечения оправки из гнезда, значительно возрастает, а контактирующие конические поверхности оправки и гнезда для нее изнашиваются быстрее. Этим вызвано применение при высоких частотах вращения конического соединения оправки и шпинделя типа HSK.

9.3.2. Зажим и освобождение оправок с коротким конусом типа HSK

Особенностями соединения HSK являются базирование оправки (рис. 9.4, б) по короткому конусу (конусность 1:10) и торцу, зажим оправки изнутри, увеличение силы зажима с повышением частоты вращения из-за действия центробежных сил. Соединение отличается высокой жесткостью и применяется в основном в высокоскоростных станках. В связи с базированием по конусу 7 и торцу 2 требуется повышенная точность изготовления деталей соединения. Шпоночные пазы 9 на торце хвостовика служат для восприятия крутящего момента, передаваемого на хвостовик шпонками, находящимися на торце шпинделя. Коническая поверхность обеспечивает базирование хвостовика в коническом гнезде шпинделя. Внутри хвостовика

вводятся элементы, взаимодействующие с упором 8 и обеспечивающие зажим хвостовика в шпинделе в результате деформации в радиальных направлениях. На хвостовике имеется трапецевидная канавка 3 и ориентирующие канавки 4 под захват манипулятора, а также индексирующая канавка 6, используемая при ориентации и автоматической смене инструмента. Для кодирования инструмента в углубление 5 вставляется микросхема (чип). Сквозное отверстие 1 необходимо при использовании ручных зажимных устройств, используемых при сборке инструментальных модулей. Размеры конических полых хвостовиков регламентированы.

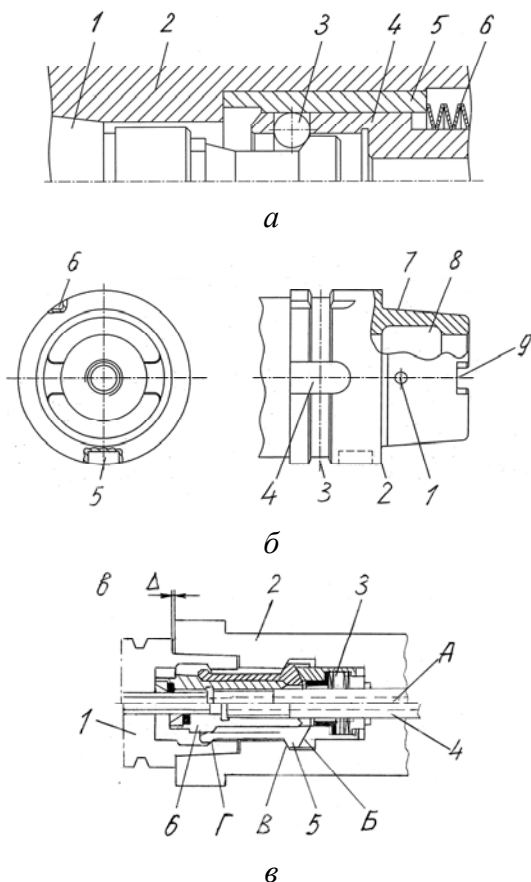


Рис. 9.4. Примеры конструкций захватных устройств

Механизм зажима оправки с инструментом (рис. 9.4, *в*) работает автоматически. Оправка *1* вставляется в шпиндель *2*. Когда шомпол *4* с навинченной на него втулкой *б* смещен влево, между торцами оправки и шпинделя имеется зазор Δ (изображение этого положения находится выше оси оправки). Затем шомпол смещается вправо пакетом тарельчатых пружин (на рис. 9.4, *в* не показаны) и втулка *б* поворачивает рычаги *5*. В результате их взаимодействия с коническими поверхностями *Г* оправки и *В* шпинделя оправка затягивается в шпиндель с устранением зазора Δ (это положение показано ниже оси оправки). Таким образом возникло геометрическое замыкание усилия зажима на шпиндель (между торцом оправки и поверхностью *В* шпинделя), что повышает надежность соединения. Благодаря коническим поверхностям *Б* и *В* контактирующих элементов пружины *3* повышают силу зажима. Через отверстие *А* в шомполе в зону резания вводится смазочно-охлаждающая технологическая среда.

9.4. Гидроцилиндры в системе зажима и освобождения инструментальных оправок

Гидроцилиндр (пневмоцилиндр), предназначенный для освобождения оправки с инструментом, может быть двухсторонним (масло поступает то в одну его полость, то в другую) или односторонним (масло для разжима оправки подается только в одну полость цилиндра, а отвод штока цилиндра от шомпола производится пружиной). Если цилиндр закреплен жестко на корпусе шпиндельной бабки, то осевые силы, возникающие в устройстве зажима и освобождения инструментальных оправок, действуют на радиально-упорные подшипники опор шпинделя, снижая их долговечность. Эти нагрузки на подшипники можно значительно снизить, если гидроцилиндр закреплен на шпинделе или соединяется с ним в моменты подачи в него масла.

Схема двухстороннего цилиндра, периодически соединяемого со шпинделем, представлена на рис. 9.5. Корпус *5* гидроцилиндра может перемещаться во фланце, закрепленном винтами на корпусе шпиндельной бабки. Когда для освобождения инструментальной оправки масло под давлением подается в полость гидроцилиндра, находящуюся выше поршня со штоком *1*, он перемещается вниз. В это же время давлением масла корпус *5* перемещается вверх на рас-

стояние $a = 0,15$ мм и прихват 3, поворачиваясь относительно оси 4, сцепляется с гайкой 2 и, следовательно, со шпинделем. (Это состояние устройства разжима оправки на рис. 9.5 показано слева от оси цилиндра). При этом на радиально-упорные подшипники опор шпинделя действует сила меньшая силы разжима оправки.

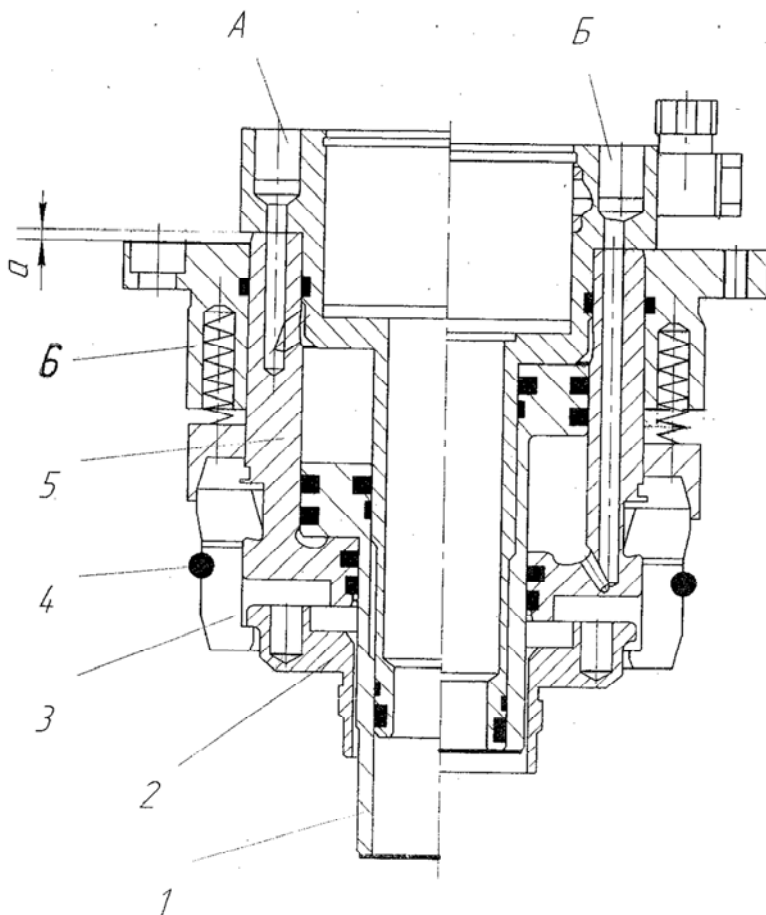


Рис. 9.5. Гидроцилиндр

ЛИТЕРАТУРА

1. Авраамова, Т. М. Металлорежущие станки: учебник. В 2 т. / Т. М. Авраамова, В. В. Бушуев, Л. Я. Гиловой и др.; под ред. В. В. Бушуева. Т. 1. – М.: Машиностроение, 2011. – 608 с.
2. Фираго, Б. И. Теория электропривода: учеб. пособие / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик, – Мн.: ЗАО «Техноперспектива», 2004. – 527 с.
3. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем: справочник-учебник в 3 т. / под ред. А. С. Проникова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. – Машиностроение, 1995.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИВОДОВ ГЛАВНОГО ДВИЖЕНИЯ СТАНКОВ С ЧПУ.....	4
2. ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ ДЛЯ ПРИВОДОВ ГЛАВНОГО ДВИЖЕНИЯ.....	5
2.1. Режимы работы двигателей.....	6
2.2. Зоны регулирования и механическая характеристика двигателя.....	8
3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗКИ НА ПРИВОД.....	10
3.1. Исходные данные.....	10
3.2. Нагрузки на приводы многоцелевых сверлильно-фрезерно-расточных станков.....	10
3.3. Нагрузки на приводы многоцелевых токарных станков.....	11
4. ПРИВОДЫ СО СТРУКТУРОЙ «ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ–ШПИНДЕЛЬ» (ПРЯМЫЕ, IDD ШПИНДЕЛИ).....	11
4.1. Структура привода.....	11
4.2. Силовая характеристика привода.....	12
4.3. Двигатели для прямого привода.....	12
4.4. Выбор электродвигателя.....	12
4.5. Достоинства прямых приводов.....	13
4.6. Примеры прямых приводов.....	14
5. ПРИВОДЫ СО ВСТРОЕННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ.....	16
6. ПРИВОДЫ СО СТРУКТУРОЙ «ДВИГАТЕЛЬ-РЕМЕННАЯ ПЕРЕДАЧА-ШПИНДЕЛЬ».....	17
6.1. Кинематические и силовые соотношения в приводе.....	17
6.2. Выбор двигателя.....	18
6.3. Пример привода.....	19

7. ПРИВОДЫ С РЕДУКТОРОМ.....	21
7.1. Кинематические и силовые соотношения в приводе	21
7.2. Выбор электродвигателя.....	24
7.3. График частот вращения привода.....	25
7.4. Определение чисел зубьев колёс	26
8. МОТОРЫ-ШПИНДЕЛИ.....	27
9. КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ШПИНДЕЛЬНОЙ БАБКИ.....	30
9.1. Соединительная муфта	30
9.2. Ротационная муфта для ввода СОТС в зону резания.....	30
9.3. Устройства зажима и освобождения оправок с инструментом	32
9.3.1. Зажим и освобождение оправок с конусностью хвостовика 7:24.....	32
9.3.2. Зажим и освобождение оправок с коротким конусом типа HSK.....	33
9.4. Гидроцилиндры в системе зажима и освобождения инструментальных оправок	35
ЛИТЕРАТУРА	37

Учебное издание

КОЧЕРГИН Анатолий Иванович

ВАСИЛЕНКО Тамара Васильевна

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРИВОДОВ ГЛАВНОГО ДВИЖЕНИЯ СТАНКОВ С ЧПУ

Пособие по курсовому проектированию
для студентов специальностей
1-36 01 01 «Технология машиностроения»,
1-36 01 03 «Технологическое оборудование
машиностроительного производства»

Редактор *Е. О. Германович*
Компьютерная верстка *Е. А. Беспанской*

Подписано в печать 19.05.2020. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 2,33. Уч.-изд. л. 1,82. Тираж 100. Заказ 628.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.