

**Ключевые слова:**

зубофрезерный станок, мехатронный модуль, кинематическая точность, прямой привод, встраиваемые двигатели

**Keywords:**

gear hobbing machine, mechatronic module, kinematic accuracy, direct drive, building motors

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗУБОФРЕЗЕРНЫХ СТАНКОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ НА БАЗЕ МЕХАТРОННЫХ МОДУЛЕЙ

**Виктор БУШУЕВ, Александр ОСТРЕЦОВ**

Статья посвящена проектированию зубофрезерных станков с использованием мехатронных модулей. Проведен анализ встраиваемых электрических двигателей фирмы Siemens AG (Германия) для установления границы их использования в вертикальных и горизонтальных зубофрезерных станках в качестве приводов фрезы и заготовки.

The article describes a design of a hobbing machines with the use of mechatronic modules. The analysis of embedded electric motors from Siemens AG (Germany) to establish the boundaries of their use in vertical and horizontal gear hobbing machines as drives the mill and the workpiece.

В настоящее время развитие мирового машиностроения связано с широким использованием мехатронных систем, когда в станках с ЧПУ используются мотор-шпиндели в приводах главного движения, следящие мехатронные приводы подач, поворотные и глобусные столы и т.п. [2], [3], [10].

Для металлорежущих станков идеальным конструкторским решением представляется применение так называемых прямых приводов для реализации движения исполнительного органа. В этом случае источник движения находится непосредственно на рабочем органе станка. Между ним и конечным звеном, несущим инструмент или заготовку, нет промежуточных передач (зубчатых, ременных), а также муфт. Следовательно, исключаются зазоры в передачах, что обеспечивает высокую жесткость при передаче вращения от двигателя к заготовке и инструменту.

Например, в зубофрезерных станках благодаря использованию прямых приводов вращения заготовки и фрезы решаются многие сложные задачи, в том числе:

→ исключается точная делительная передача привода вращения заготовки, оказывающая решающее влияние на кинематическую точность, которая не изменяется весь срок эксплуатации станка.

→ исключаются редукторы или понижающие передачи в приводе фрезы и различные механизмы для устранения зазоров в соединениях, передающих вращение от двигателя к фрезе.

Далее приведены результаты исследований возможности использования прямых приводов вращения заготовки и фрезы в вертикальных (по ГОСТ 659-89) и горизонтальных (по ГОСТ 18065-91) зубофрезерных станках.

На рис. 1 показана кинематическая схема вертикального зубофрезерного станка класса точности П мод. 5320Ф4 с диаметром обработки 200 мм с прямыми приводами заготовки и фрезы, созданного МГТУ «СТАНКИН» и станкостроительным заводом «САСТА» (г. Сасово, Рязанская обл.).

Станок спроектирован на базе мехатронных систем, в его формообразующих цепях отсутствуют зубчатые или иные промежуточные передачи, а согласование перемещений исполнительных органов выполняется системой ЧПУ. Мотор-шпиндели МШ1 и МШ2, установленные соответственно на фрезерном суппорте и столе, осуществляют вращение фрезы и заготовки. Двигатель МЗ, расположенный на фрезерном суппорте, обеспечивает осевое перемещение фрезы, как периодическое (при затуплении фрезы), так и непрерывное — при диагональном зубофрезеровании.

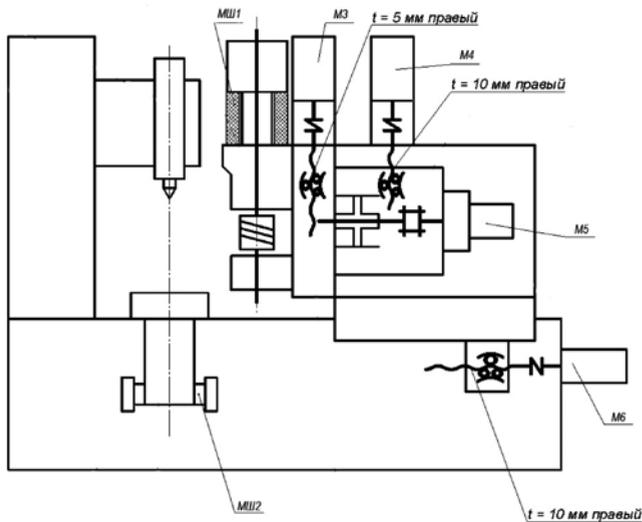


Рис. 1. Кинематическая схема

Перемещение инструмента вдоль оси заготовки, обеспечивая обработку колес требуемой ширины, осуществляется электродвигателем М4.

Электродвигателем М5 и редуктором фреза устанавливается на требуемый угол (установочное перемещение). Электродвигатель М6 перемещает фрезу в радиальном направлении для установки на глубину резания и при совместной работе с двигателем М4 обеспечивает требуемую модификацию зуба по длине (бочкообразность, малый угол конуса и т.п.).

Таким образом, станок полностью построен на основе мехатронных устройств, а именно: для вращения фрезы и заготовки — на базе прямых приводов (мотор-шпиндели), для перемещения узлов — на базе следящих приводов подачи.

На рис. 2 показана конструкция суппорта с прямым приводом 1 вращения фрезы 5. Ротор 2 электродвигателя установлен на шпинделе 3, в конусе которого устанавливается оправка 4 с фрезой 5. Статор 6 двигателя закреплен в корпусе 7 суппорта, который перемещается приводом 8 по направляющим скольжения относительно поворотного корпуса 9, установленного в салазках. При этом производится тангенциальная подача инструмента. При резании без тангенциального перемещения фрезы корпус 7 закрепляется тарельчатыми пружинами механизма зажима 10. Для смены фрезы предусмотрено перемещение контрподдержки 11 от гидроцилиндра и ее закрепление в рабочем положении механизмом зажима 12 [9].

Контроль углового положения шпинделя фрезы осуществляется датчиком 13, а требуемая взаимосвязь угла поворота фрезы и стола реализуется с помощью системы ЧПУ SINUMERIK.

На рис. 3 приведена конструкция стола станка с прямым приводом 1 вращения шпинделя 2 с установленной в нем заготовкой. Ротор 1 электродвигателя крепится на стакане 3, который муфтой 4 жестко связан со шпинделем. Статор двигателя 5 закрепляется на неподвижной части стола. Контроль угла поворота шпинделя осуществляется датчиком обратной связи 6. Зажим заготовки на торце приспособления (не показано) осуществляется гидроцилиндром 7.

Можно заметить (рис. 2 и 3), что конструкции наиболее ответственных узлов благодаря использованию прямых приводов становятся жесткими, а кинематические цепи максимально короткими и безззорными. Для изучения возможности

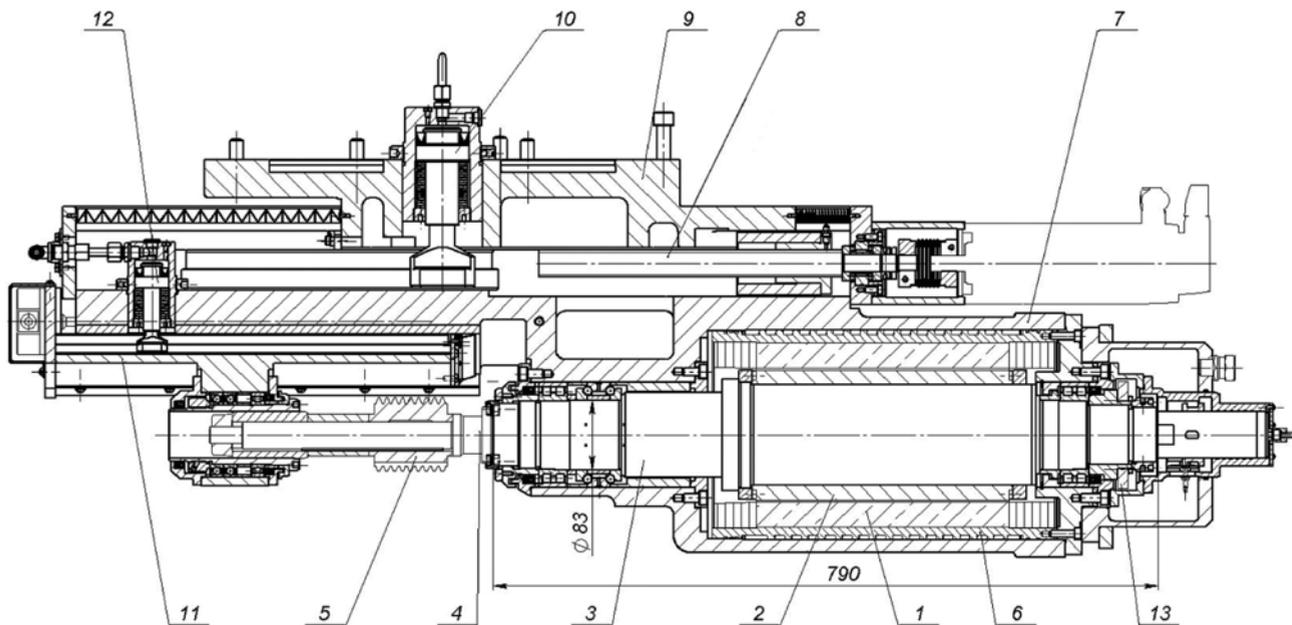


Рис. 2. Конструкция суппорта

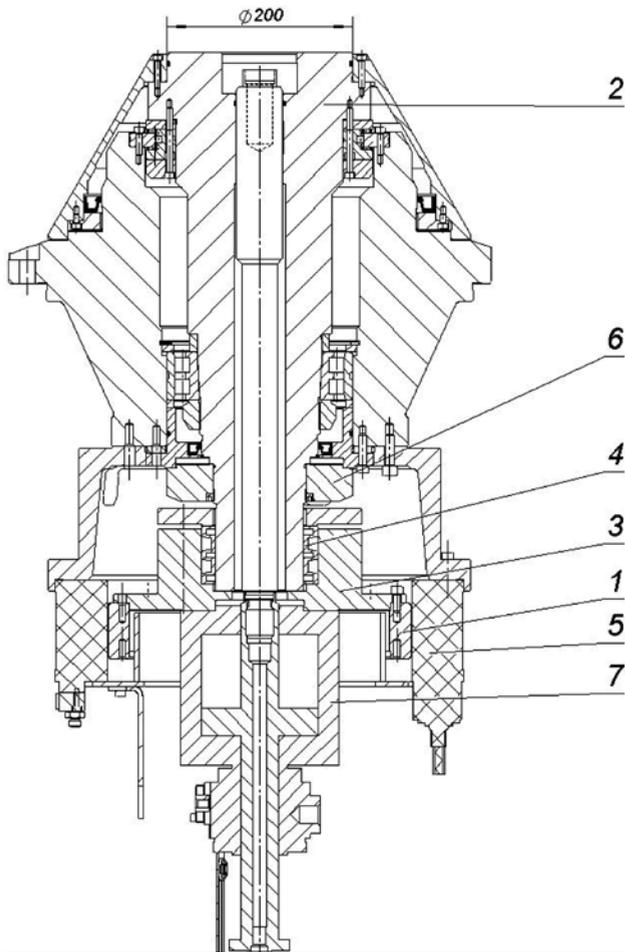


Рис. 3. Конструкция стола

построения по аналогичной схеме станков всей гаммы были проведены исследования по определению требуемых параметров прямых приводов (моменты, мощности, частоты вращения, размеры выпускаемых двигателей и т.п.). При расчете усилий резания, моментов на фрезе и заготовке использовались источники [1], [5], [6], [7], [8].

Для получения максимальных значений этих параметров назначались максимальные модули  $m$  и диаметры  $D$  обрабатываемых колес и стандартные скорости резания  $v$  и подачи  $S$ . Глубина резания  $t$  принималась равной  $2,1m$ . Расчет силовых параметров осуществлялся для различных стальных зубчатых (прямозубых, косозубых, с модифицированным профилем) и червячных (из чугуна и бронзы) колес. В качестве инструмента применялись червячные и дисковые быстрорежущие и твердосплавные фрезы. Использовались сведения информационных материалов, посвященные станкам таких известных немецких компаний и холдингов, как *Gleason-Pfauter*, *Höfler*, *Liebherr* и др.

Было установлено, что максимальные усилия резания и моменты возникают при обработке зубчатых колес из конструкционных сталей при рабо-

те червячной быстрорежущей фрезой. При обработке труднообрабатываемых материалов уменьшаются глубина резания и подача, а усилие резания не увеличивается. Составляющие силы резания определялись по формулам работы [5]:

$$F_i = C \cdot m^{xm} \cdot (t/m)^{xt} \cdot S^{xs} \cdot V^{xv} \cdot Z^{xz}, H.$$

Значения коэффициентов для определения средней  $F_{z\text{cp}}$  и максимальной окружной составляющей силы резания  $F_{z\text{max}}$ , а также максимальных радиальной  $F_{y\text{max}}$  и осевой  $F_{x\text{max}}$  при обработке стали 45 приведены в табл. 1.

Таблица 1

Составляющие сил	$C$	$X_m$	$X_t$	$X_s$	$X_v$	$X_z$
$F_{z\text{cp}}$	132	1	1,5	0,87	-0,14	0
$F_{z\text{max}}$	143	1,39	1,13	0,61	-0,17	0,07
$F_{y\text{max}}$	690	1	0	0,64	-0,28	-0,26
$F_{x\text{max}}$	87	1,3	1,2	0,44	0	-0,4

Здесь  $C$  — постоянный коэффициент, зависящий от материала заготовки;  $m$  — модуль в мм;  $t$  — глубина резания в мм;  $S$  — подача  $S = S_{oc}/\cos\beta$ , где  $S_{oc}$  — подача (мм/об. заготовки) вдоль оси зуба;  $\beta$  — угол наклона зуба, угловые градусы;  $V$  — скорость резания (м/мин);  $Z$  — число нарезаемых зубьев.

Момент на фрезе  $M_{\text{фр}}$  определялся:  $M_{\text{фр}} = F_z \cdot D_{\text{фр}}/2$  и не учитывалось трение в подшипниках. Момент  $M_{\text{заг}}$ , необходимый для вращения заготовки определялся без учета трения в опорах, так как они выполняются либо на подшипниках качения, либо на гидростатических подшипниках с малым трением.

$$M_{\text{заг}} = F_z \sin\beta + F_{x\text{cp}} \cos\beta$$

Принималось, что  $F_{x\text{cp}} \approx 0,5 F_{x\text{max}}$ , так как сила  $F_x$ , действующая вдоль оси фрезы, знакопеременная и составляет около 15% от общей нагрузки.

Расчет сил резания и моментов при обработке дисковыми фрезами определялся по источнику [5], а при обработке червячных колес по [7].

Пристальное внимание было отведено выбору максимальной частоты вращения, так как эта величина особенно важна при работе твердосплавными фрезами с минимальным диаметром инструмента. Расчетный модуль (по которому определялись максимальные частоты вращения) принимался равным  $0,4m_{\text{max}}$  для данного станка. Максимальные частоты вращения фрез в большинстве случаев требуются при работе твердосплавными дисковыми фрезами. В табл. 2 приведены сводные усредненные данные по силовым и скоростным параметрам гаммы вертикальных зубофрезерных станков для выбора прямых приводов фрезы и заготовки.

Таблица 2. Параметры для выбора прямых приводов вертикальных зубофрезерных станков

№ пп	Параметр	Размер станка (макс. диаметр обрабатываемого изделия D)										
		125	200	320	500	800	1250	2000	3150	5000	8000	12500
1	Максимальный модуль $m$ , мм	2,5	4	6	8	10	12	20	32	40	40	40
2	Максимальный диаметр червячной фрезы $D_{фр}$ , мм	100	125	160	180	200	225	300	340	340	340	340
3	Угол наклона зубьев $\beta$ , град	45	45	45	35	35	30	30	30	25	20	15
4	Скорость резания $V$ , м/мин	25	25	25	22	22	20	20	20	20	20	20
5	Величина осевой подачи $S_{ос}$ , мм/об.заг	4	4	4	3,5	3,5	3,5	3,5	3	3	3	3
6	Окружное усилие резания $F_z$ , Н	3000	4800	7200	7600	9500	11 000	18 000	26 000	32 000	32 000	32 000
7	Момент на фрезе $M_{фр}$ , Нм	150	300	580	700	950	1200	2700	4200	5400	5400	5400
8	Момент на заготовке $M_{заг}$ , Нм	140	360	850	1300	2500	3800	10 500	24 000	40 000	55 000	65 000
9	Максимальная частота вращения фрезы $n_{max}$ , об/мин	700	600	500	400	300	250	200	150	150	150	150

На рис. 4 представлены графики изменения силы резания ( $F_z$ ), а также моментов на фрезе  $M_{фр}$  и столе  $M_{ст}$  для наиболее распространенных станков гаммы. Из него следует, что в диапазоне размеров станков от D1250 до D12500 мм имеет место существенная нелинейная зависимость силы и моментов резания от размера станка. Это связано с нелинейной зависимостью максимального модуля от размера станка, модуль растет почти вдвое меньше, чем обрабатываемый диаметр. Для реализации параметров табл. 2 были проанализированы выпускаемые в настоящее время электродвигатели фирмы Siemens AG (Германия).

Анализ показал, что станки с размерами от D125 до D800 мм могут успешно проектироваться с прямыми приводами стола и фрезы на двигателях типа 1FW6 или 1FE1 (в зависимости от требуемой частоты вращения). Станок размера D1250 требует установки на шпинделе фрезы двух двигателей для обеспечения требуемого крутящего момента.

Станки больших размеров можно конструировать с использованием специальных сборных сегментобразных двигателей (аналогично станкам

компании Höfler размера D2500 мм мод. HF2500 мм или размера D6500 мод. HF6500 мм). В приводе фрезы всех станков гаммы с диаметром обрабатываемого изделия  $D > 1250$  мм требуется установка промежуточной понижающей передачи между двигателем и шпинделем для увеличения крутящего момента.

Аналогичный подход применим и к горизонтальным зубофрезерным станкам. Российская компания ООО «Морена» (г. Коломна) уже несколько лет назад выпустила четыре станка мод. 5M370Ф4 с диаметром обработки 320 мм, созданных на базе мехатронных устройств с прямыми приводами фрезы и заготовки [4]. Результаты их успешной эксплуатации подтвердили возможность использования прямых приводов во всех горизонтальных зубофрезерных станках гаммы по ГОСТ 18065-91.

В табл. 3 приведены усредненные данные по силовым и скоростным параметрам станков гаммы для выбора прямых приводов фрезы и заготовки (на основе анализа работы электродвигателей Siemens AG).

Таблица 3. Параметры для выбора приводов горизонтальных зубофрезерных станков

№ пп	Параметр	Размер станка (макс. диаметр обрабатываемого изделия D)					
		125	200	320	500	800	1250
1	Максимальный модуль $m$ , мм	2,5	6	10	20	32	40
2	Максимальный диаметр червячной фрезы $D_{фр}$ , мм	71	112	200	300	380	420
3	Угол наклона зубьев $\beta$ , град	45	45	35	30	30	30
4	Скорость резания $V$ , м/мин	25	25	22	20	20	20
5	Режимы обработки: глубина $t = 2,1$ м подача $S_{ос}$ , мм/об.заг	4	4	3,5	3,5	3	3
6	Окружное усилие резания $F_z$ , Н	3000	7200	9500	18 000	26 000	32 000
7	Момент на фрезе $M_{фр}$ , Нм	110	400	950	2700	4900	6700
8	Момент на заготовке $M_{заг}$ , Нм	140	550	1000	2600	6000	12 000
9	Максимальная частота вращения фрезы $n$ , об/мин	700	500	300	200	200	150

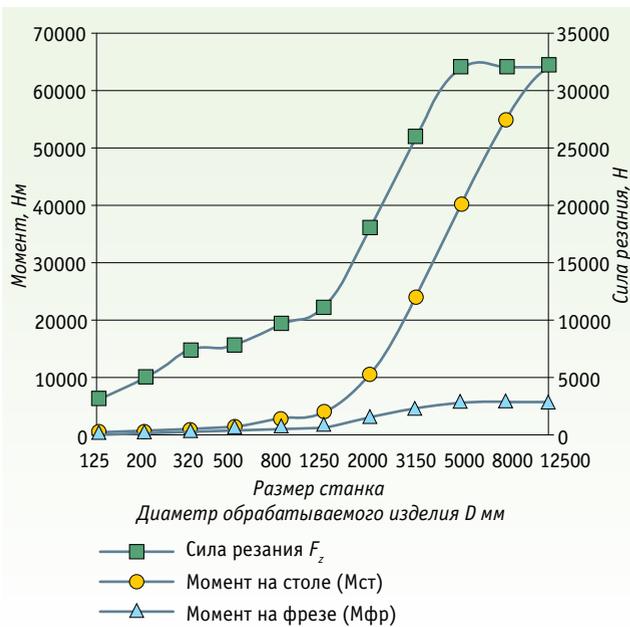


Рис. 4. Графики изменения силы резания, моментов на фрезе и столе для гаммы станков

Анализ показал, что станки с размерами от D125 до D320 мм могут в настоящее время создаваться с прямыми приводами фрезы и заготовки на двигателях 1FW6 или 1FE, а станки размера D1250 мм — с прямыми приводами заготовки с использованием двигателей типа 1FW6. Причем в станке D1250 мм требуется установка двух двигателей на шпинделе вращения заготовки. Прямой привод фрезы возможен только на станке размера D500 мм при установке двух двигателей типа 1FW6 на шпинделе. В станках размера D800 мм и D1250 мм для привода фрезы требуется установка промежуточной передачи для увеличения момента.

## ВЫВОДЫ

1. Зубофрезерные станки с ЧПУ нового поколения целесообразно проектировать на базе мехатронных систем в механизмах формообразующих движений станков. Наиболее рациональным решением для станков классов точности П и В является использование прямых приводов вращения фрезы и заготовки. Для принятия решения о применении мехатронных систем в станках класса точности А необходимо более длительный опыт эксплуатации станков с прямыми приводами.

2. Выпускаемые в настоящее время двигатели позволяют создавать станки с прямыми приводами фрезы и заготовки следующих размеров:

- вертикальные зубофрезерные станки размеров D125... D1250 мм;
- горизонтальные зубофрезерные станки размеров D125... D320 мм.

3. Вертикальные зубофрезерные станки размеров D2000...D12500 мм могут проектироваться с прямыми приводами заготовок на базе специальных составных сегментообразных двигателей.

Горизонтальные зубофрезерные станки размеров D500...D1250 мм могут проектироваться с прямыми приводами заготовок на существующих двигателях.

Для приводов фрезы, указанных в п. 3, станков выпускаемые в настоящее время двигатели не обеспечивают требуемого крутящего момента и необходимо устанавливать дополнительную понижающую передачу.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адам Я.И., Овумян Г.Г. Справочник зубофрезеровщика. — М.: Машиностроение. 1975. С. 232.
2. Бушуев В.В. Тенденции развития мирового станкостроения // Приводная техника. 2006. № 5. С. 2–6.
3. Бушуев В. В., Дорожко А. О., Рывкин Б. М. Метод проектирования станков нового поколения на базе унифицированных мехатронных модулей // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2012. № 1 (18). С. 15–22.
4. Бушуев В. В., Молодцов В. В. Роль кинематической структуры станка в обеспечении требуемой точности обработки изделия // СТИН. 2010. № 6, 7. С. 34–36.
5. Бушуев В.В., Налетов С.П. Тяжелые зубообрабатывающие станки. — М.: Машиностроение. 1986. С. 280.
6. Производство зубчатых колес / Под ред. Б.А. Тайца; 6-е изд. перераб. и доп. — М.: Машиностроение. 1975. 482 с.
7. Филатов В.П. Жесткость зубофрезерных станков. — М.: Машиностроение. 1969. 320 с.
8. Гиловой Л.Я., Молодцов В.В. Проектирование зубофрезерных станков повышенной жесткости. Справочник // Инженерный журнал с приложением. 2013. № 2. С. 40–45.
9. Бушуев В.В., Молодцов В.В. Высокоскоростные мотор-шпиндели приводов главного движения металлорежущих станков // Технология машиностроения. 2012. № 1. С. 27–31.
10. Подураев Ю.В. Актуальные проблемы мехатроники // Мехатроника, автоматизация. Управление. 2007. № 4. С. 50–53.

**Виктор Валерьевич БУШУЕВ** —  
аспирант МГТУ «СТАНКИН»

**Александр Георгиевич ОСТРЕЦОВ** —  
инженер-конструктор, ГИЦ МГТУ «СТАНКИН»