УДК 621.91.04

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ КОМПОНОВОК ЗУБОФРЕЗЕРНЫХ СТАНКОВ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

В.А. ТЕРЕНТЬЕВ
(Полоцкий государственный университет)

Проведен анализ известных способов зубофрезерования и компоновок зубофрезерных станков. Выполнен синтез возможных компоновок зубофрезерных станков. Осуществлено твердотельное 3D-моделирование компоновок в графической среде «Компас-3D V8». Выполнен сравнительный анализ синтезированных компоновок зубофрезерных станков. Выработаны рекомендации конструкторам по выбору компоновок зубофрезерных станков с системой ЧПУ типа CNC.

Введение. В станкостроении под *компоновкой* станка понимают систему расположения его узлов и направляющих, отличающуюся структурой, пропорциями и свойствами [1].

В науке о металлорежущих станках вопросы, связанные с разработкой компоновки, недостаточно исследованы. Вместе с тем, разработка компоновки является одной из самых ответственных стадий проектирования станков. Как правило, компонование станков выполняется наиболее квалифицированными конструкторами, которые при этом руководствуются в основном своим опытом и интуицией.

Здесь необходимо отметить, что первой и наиболее фундаментальной работой, посвященной основам теории компоновок металлорежущих станков, является работа профессора Ю.Д. Врагова [1]. Данная теория получила признание и дальнейшее развитие, например, в книге О.И. Аверьянова [2].

Практика станкостроения постоянно указывает на то, что правильный выбор и рациональное построение компоновки оказывают большое влияние на качество станка. Влияние компоновки на качество станка проявляется по двум направлениям. Во-первых, через структуру компоновки, правильный выбор которой обеспечивает необходимую универсальность или специализацию станка, его соответствие ряду технологических и других требований. Во-вторых, через выбор рациональных конструкционных исполнений, размерных пропорций и расположения узлов в пространстве станка, что обеспечивает его высокие технико-экономические показатели качества.

Влияние компоновочных факторов на качественные показатели станков особенно возрастает при использовании систем числового программного управления (ЧПУ). Использование систем ЧПУ в станках требует принципиально нового подхода к построению структуры компоновок. Зачастую применение традиционных компоновок не позволяет полностью реализовать преимущества числового программного управления, особенно управления с использованием систем типа CNC (*C*omputer *N*umerikal *C*ontrol).

Все сказанное выше в полной мере относится и к зубофрезерным станкам. Некоторые результаты исследований компоновок зубофрезерных станков представлены в данной работе. При проведении исследований использовались основные положения теории Ю.Д. Врагова [1].

Анализ способов зубофрезерования цилиндрических зубчатых колес. Способ нарезания зубьев колес червячными фрезами широко используется в машиностроении благодаря его высокой производительности, универсальности, высокой точности и низким затратам на инструмент [3, 4].

Основой построения компоновки и конструкции любого металлорежущего станка, в частности зубофрезерного, является его *кинематическая структура*, которая определяется составом формообразующих и исполнительных движений и связями между этими движениями. Обусловленность кинематической структуры станка и его компоновки взаимная. Однако кинематическая структура станка всегда является первичным фактором, а компоновка – вторичным.

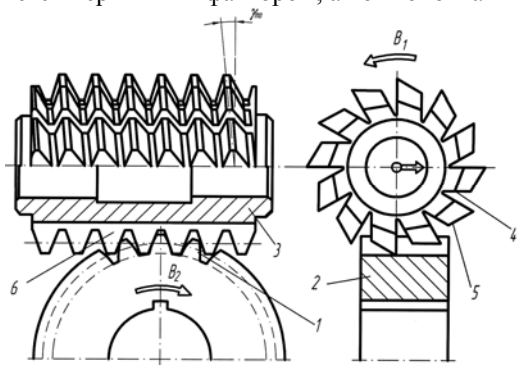


Рис. 1. Схема зубонарезания червячной фрезой

Профиль *1* (рис. 1) зуба цилиндрических колес *2* представляет собой эвольвенту. Применяемая на зубофрезерных стенках в качестве инструмента червячная фреза *3* имеет обкатывающее тело цилиндрического червяка, причем витки червяка прерываются режущими канавками *4*, а задний режущий угол образуется затылованием, чаще по спирали Архимеда *5*. То есть червячная фреза представляет собой совокупность исходных режущих реек *6* (зуборезных гребенок), расположенных на цилиндрическом теле и смещённых одна относительно другой по винтовой линии.

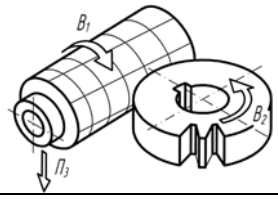
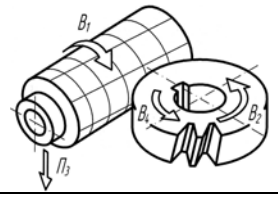
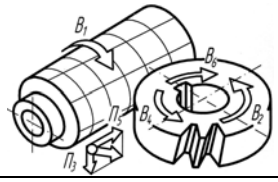
Кинематическая структура зубофрезерного станка включает в себя сложную формообразующую кинемати-

ческую группу главного движения $\Phi_V(B_1B_2)$, обеспечивающую получение профиля зуба методом обката, при котором имитируется (воспроизводится) червячное зацепление. Кинематическая структура станка, работающего червячной фрезой, определяется также характером направляющей производящей линии, т.е. формой зуба по длине, и методом врезания инструмента в заготовку на высоту зуба.

В таблице 1 представлены известные способы нарезания зубьев цилиндрических зубчатых колес и состав формообразующих движений для их реализации.

Таблица 1

Формообразующие движения при нарезании зубьев червячными фрезами

№ способа	Способ нарезания зубьев	Эскиз операции	Формообразующие и исполнительные движения
1	Нарезание прямозубых цилиндрических колёс		$\Phi_V(B_1B_2)$ $\Phi_S(П_3)$
2	Нарезание колёс с винтовым зубом (косозубых)		$\Phi_V(B_1B_2)$ $\Phi_{S1}(П_3B_4)$
3	Нарезание колёс с винтовым зубом при диагональной подаче фрезы		$\Phi_V(B_1B_2)$ $\Phi_{S1}(П_3B_4)$ $\Phi_{S2}(П_5B_6)$

Для осуществления каждого из способов зубофрезерования необходима частная кинематическая структура, на основе которой строится кинематика зубофрезерного станка. Все представленные в таблице 1 способы могут быть реализованы на зубофрезерном станке, имеющем полную кинематическую структуру. Подобная кинематическая структура станка с механическими связями изображена на рисунке 2.

На рисунке 3 представлен вариант структуры зубофрезерного станка с ЧПУ типа CNC.

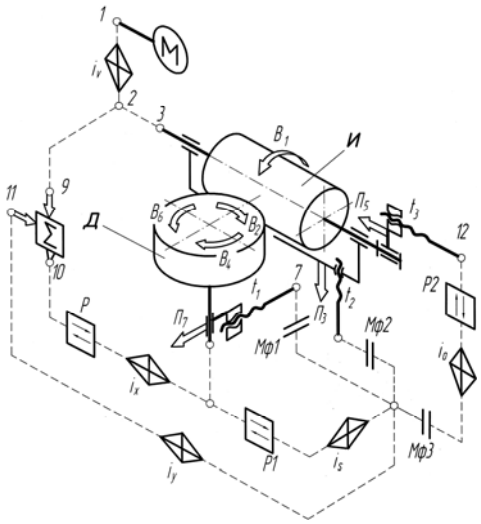


Рис. 2. Структурная схема зубофрезерного станка с полной кинематической структурой

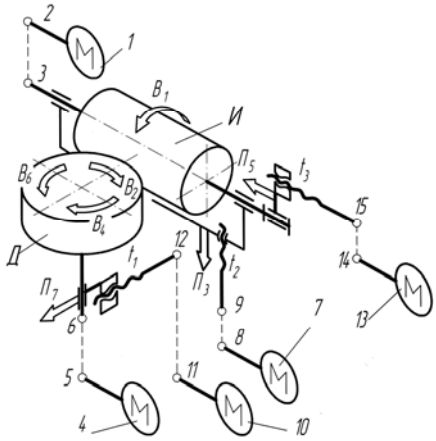


Рис. 3. Структурная схема зубофрезерного станка с ЧПУ

В станках с системой ЧПУ типа CNC кинематические связи исполнительных движений обеспечиваются электронной системой. Механические кинематические связи при этом не используются или используются ограниченно. В структурной схеме станка на рисунке 3 реализована полная кинематическая структура с возможностью нарезания зубьев по способам 1...3, представленным в таблице 1. Кинематическая структура содержит пять связанных через систему ЧПУ приводов исполнительных движений.

Анализ компоновок известных зубофрезерных станков. Был проведен анализ компоновок зубофрезерных станков, выпускающихся и выпускавшихся зарубежными и отечественными станкостроительными заводами. Анализ проводился на основе литературных, патентных и рекламных источников, в том числе с использованием компьютерной сети Интернет.

При большом разнообразии конструкций зубофрезерных станков их компоновки достаточно однообразны. Все известные компоновки можно сгруппировать по следующим признакам. Во-первых, существуют станки с *вертикальным* расположением оси изделия и станки с *горизонтальным* расположением оси изделия. Преимущественное распространение получили станки с вертикальной осью изделия. Во-вторых, вертикальные компоновки зубофрезерных станков можно классифицировать по подвижности ее блоков относительно стационарного блока. По этому признаку выявлено четыре типа структуры компоновок. Приводим их краткую характеристику.

ВК1. Компоновки, в которых стол с изделием перемещается в горизонтальном направлении, а каретка фрезерной головки с инструментом – в вертикальном. Преимущества компоновок первого вида: удобство установки, съема детали; удобство установки и съема инструмента; большая жесткость стола; возможность установки делительного колеса большого диаметра; удобное удаление стружки и подвод охлаждающей жидкости. Недостатки компоновок первого вида: недостаточная жесткость каретки и фрезерного суппорта (большое плечо силы резания); длинные кинематические цепи.

ВК2. Компоновки, в которых в горизонтальном направлении перемещается суппортная стойка, а по ней в вертикальном направлении – каретка фрезерной головки с инструментом. Преимущества и недостатки аналогичны компоновкам первого вида. Еще одно преимущество – удобство обработки колес большого диаметра. Дополнительный недостаток – меньшая жесткость подвижной суппортной группы.

ВК3. Компоновки, в которых стол с изделием перемещается в вертикальном направлении, а суппортная стойка с фрезерной головкой – в горизонтальном. Преимущества компоновок третьего вида: удобство установки и съема детали; хорошая жесткость суппортной группы; компактность компоновки; короткие кинематические цепи. Недостатком является затрудненный доступ к инструменту.

ВК4. Компоновки с признаками компоновки В1, в которых вертикальные направляющие каретки суппорта имеют возможность установки на определенный угол. Преимущества компоновок четвертого вида: удобство установки и съема детали; удобство установки и съема инструмента; большая жесткость стола; удобное удаление стружки и подвода-отвода охлаждающей жидкости; повышенная точность обработки косозубых колес из-за отсутствия дифференциала. Недостатки компоновок четвертого вида: недостаточная жесткость каретки и фрезерного суппорта; необходимость использования удлиненных червячных фрез для нарезания косозубых колес.

На рисунке 4 представлена компоновка типа *ВК1*. С такой компоновкой выпускались зубофрезерные станки завода «Комсомолец» (г. Егорьевск), в частности станки моделей 5К32 и 5К324.

На рисунке 5 представлена компоновка типа *ВК3*. С такой компоновкой выпускались некоторые зубофрезерные станки завода «Вистан» (г. Витебск), в частности станок модели 5В312.

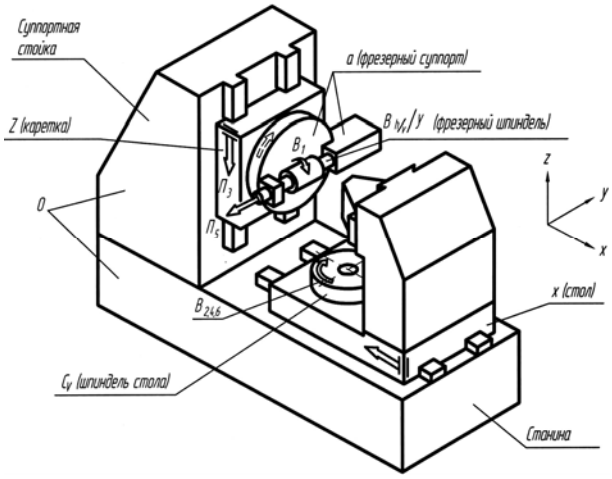


Рис. 4. Компоновка зубофрезерного станка типа ВК1

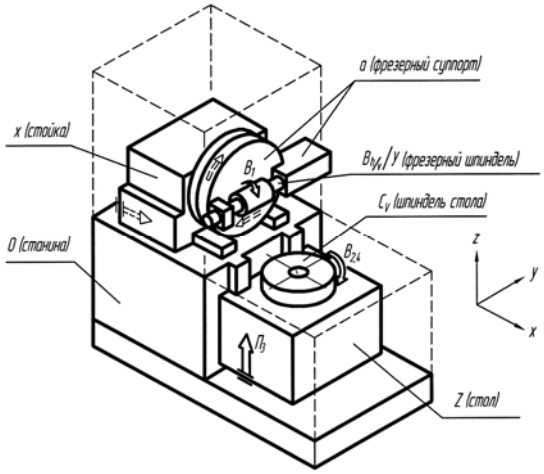


Рис. 5. Компоновка зубофрезерного станка типа ВК3

Синтез компоновок известных зубофрезерных станков. Поиск новых вариантов компоновок интуитивным путем либо путем их формального перебора требует проведения большого объема работы, поскольку в самом относительном характере движения формообразования заключено многообразие возможных вариантов движений детали и инструмента, а следовательно и компоновок станков. Синтез компоновок с применением структурных формул упрощает задачу и, кроме того, позволяет использовать алгебру логики и теорию множеств в качестве математического инструмента исследований, отбора и преобразования компоновок. *Структурная формула компоновки* – это определенная последовательность символов, обозначающих блоки компоновки, раскрывающая координатную принадлежность и способ сопряжения блоков [1]. В структурных формулах используют систему обозначений координат, отвечающую рекомендациям ИСО для станков с ЧПУ и многооперационных станков.

Определение количества и состава блоков компоновки. Компоновка металлорежущего станка имеет *блочную структуру*. Понятие «*блок*», в отличие от понятия «узел», указывает на то, что в одном блоке компоновки может быть не один, а два и большее число узлов. Определение состава блоков начнем с определения *технологического модуля (ТМ)* – наименьшего состава блоков компоновки, необходимых для выполнения операции формообразования. Технологический модуль является структурной технологической единицей компоновки и состоит, по меньшей мере, из двух блоков – подвижного и стационарного. Состав *ТМ* определяется кинематической схемой резания при зубофрезеровании (см. табл. 1).

В таблице 1 (строка 1) приведена кинематическая схема резания при нарезании цилиндрического прямозубого колеса червячной фрезой. Для осуществления процесса формообразования необходимы три элементарных движения B_1, B_2 и $П_3$. Для данного случая состав технологического модуля: $TM = COZB^{\text{б}}$, где C – шпиндель стола; O – стационарный блок; Z – каретка суппорта; $B^{\text{б}}$ – шпиндель инструмента. Учитывая относительность движения $П_3$, можно составить технологический модуль в виде: $TM = CZOB^{\text{б}}$, где в данном случае Z – подвижный в вертикальном направлении блок стола.

Следующий этап – определение модульного комплекта – наименьшего состава блоков для выполнения операции обработки на зубофрезерном станке, содержащего блоки формообразующих движений и дополняющие их установочные блоки.

Для зубофрезерных станков дополнительными установочными блоками будут: «*a*» – блок поворота оси фрезы вокруг оси *Ox*; «*x*» – блок установочного (на высоту зуба) перемещения вдоль оси *Ox*. Таким образом, модульный комплект зубофрезерного станка имеет состав $MK1: C; O; Z; B^{\text{б}}; a; x$. С учетом конструктивной связи блоков «*a*» и «*B*» в компоновке состав комплекта $MK1: C; O; Z; x; (a \cdot \hat{B})$.

Существенно повышает универсальность зубофрезерного станка введение в его кинематическую структуру осевой подачи фрезы. В зависимости от конструктивной схемы блока, выполняющего это движение, его знак в формуле компоновки запишется в виде: «$y / w / B^{\text{б}}$» или «$y / w \cdot B^{\text{б}}$». Модульный комплект при наличии осевой протяжки фрезы будет иметь состав $MK2: C;\ O;\ Z;\ a;\ x;\ y / w;\ B^{\text{б}}$. Учитывая конструктивную связь блоков «$B^{\text{б}}$», «*a*» и «*Y/W*», можно объединить их в конструктивный модуль $(a \cdot y / w \cdot B^{\text{б}})$. Тогда модульный комплект примет вид $MK2: C;\ O;\ Z;\ x; (a \cdot y / w \cdot B^{\text{б}})$.

При применении ЧПУ, особенно типов CN или CNC, рациональнее осуществлять осевую подачу фрезы в виде суммарного перемещения двух различных блоков вдоль осей *Oy* и *Oz*, что требует введения в состав компоновки независимого блока «*y*». В этом случае состав модульного комплекта компоновки имеет вид: $MK3: C;\ O;\ Z;\ y;\ x; (a \cdot B^{\text{б}})$.

Компоновки станков могут включать несколько технологических модулей и модульных комплектов. Совершенство станка, которое выражается высокой степенью использования движений рабочих органов, проявляется в возможности осуществления большого количества различных технологических модулей при минимальном числе подвижных блоков компоновки, включая и блоки установочных движений. Как следствие, повышение универсальности и степени использования компоновки станков достигают выбором такого состава блоков, который обеспечивает вместе с системой управления значительное увеличение числа технологических модулей, вводимых в действие последовательно.

В частности, состав блоков, соответствующий модульному комплекту *МК3* (и *МК2*), позволяет реализовать в компоновке следующие технологические модули нарезания зубчатых колес:

- $TM1 = COZ \cdot (a \cdot \hat{B})$ – цилиндрических;
- $TM2 = COx \cdot (a \cdot \hat{B})$ – червячных, методом радиального врезания инструмента;
- $TM3 = COy \cdot (a \cdot \hat{B})$ – червячных, методом тангенциального врезания;
- $TM4 = COZy \cdot (a \cdot \hat{B})$ – цилиндрических, методом диагональной подачи инструмента.

Определение и анализ множества координатных компоновок. Число возможных координатных (структурных) компоновок определяется числом возможных вариантов разрядных размещений знаков блоков в формуле компоновки, зависящее от числа движений в станке. Число вариантов компоновок можно подсчитать по формуле: $P_K = N_{ББ}!$, где $N_{ББ}$ – количество блоков (включая стационарный блок), разрядное положение в формуле компоновки (расположение в компоновке) может быть изменено.

Для зубофрезерного станка, состав блоков которого определяется модульным комплектом *МК1*, количество переставляемых блоков – $N_{ББ} = 3$, поскольку в формуле компоновки блоки, несущие инструмент и деталь («$(a \cdot \hat{B})$» и «*C*»), всегда имеют постоянный разряд. Следовательно, число возможных координатных компоновок: $P_{K1} = 3! = 6$. Аналогично для модульного комплекта *МК*2: $P_{K2} = 3! = 6$ (для каждого из двух конструктивных исполнений).

В случае, когда состав блоков зубофрезерного станка определяется модульным комплектом *МК3*, возможность перестановки разрядов в формуле компоновки имеют четыре блока: «*Y*», «*X*», «*Z*», «*O*». Число вариантов компоновок в этом случае $P_{K3} = 4! = 24$.

Используем упорядоченную запись анализируемого множества формул компоновок в виде матрицы с двумя координатами – разрядными положениями стационарного $n(0)$ и вертикально-подвижного $n(1)$ блока. При этом принимается обозначения: 1 – вертикально-подвижный блок; $\overline{1}$ (не 1) – горизонтально-подвижный блок.

На рисунках 6, а и 6, г приведены алгоритмы построения подобных матриц для трех и четырех блоков, позиция которых в формуле компоновки может изменяться. На рисунках 6, б, 6, в и 6, д представлены матрицы всех возможных вариантов формул компоновок для указанных выше модульных комплектов блоков зубофрезерного станка. Следует учесть, что при рассмотрении компоновок зубофрезерных станков с горизонтальной осью шпинделя детали количество формул компоновок удвоится.

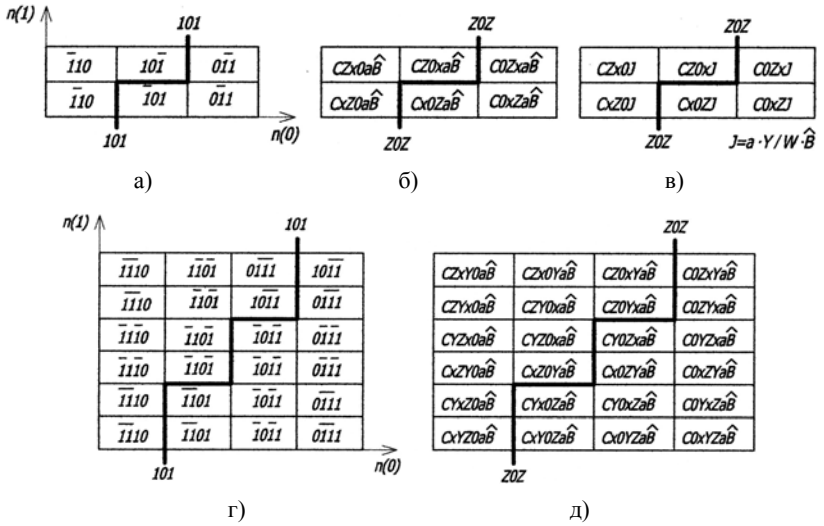


Рис. 6. Матрицы компоновок зубофрезерного станка:
а – алгоритм построения для 3-х блоков; б – матрица для набора *МК*1; в – матрица для набора *МК*2;
г – алгоритм построения для 4-х блоков; д – матрица для набора *МК*3

Ступенчатая линия *ZOZ* (101) делит матрицу на две кососимметричные половины. Слева от нее располагаются компоновки, у которых вертикальное перемещение совершает деталь (*ZO*), а справа – компоновки с вертикальным перемещением инструмента (*OZ*).

Подобные матрицы обладают рядом свойств, позволяющих провести предварительный анализ множеств и отбор компоновок. Соседние формулы компоновок по столбцам и по строчкам отличаются между собой только перестановкой двух знаков. Это относится и к крайним столбцам, и строчкам, что указывает на замкнутость множества и конечность вариантов. Если разделить матрицу на зоны, как показано на рисунке 7, то получится четыре подмножества компоновок с присущими им структурными признаками. Тип *E* – односторонние компоновки, в которых все движения формообразования совершает инструмент

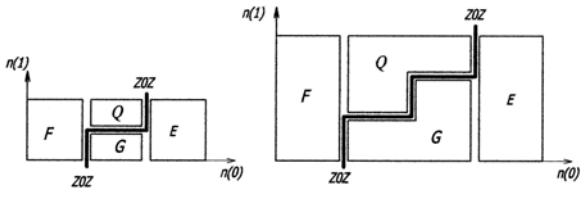


Рис. 7. Образование типов базовых компоновок

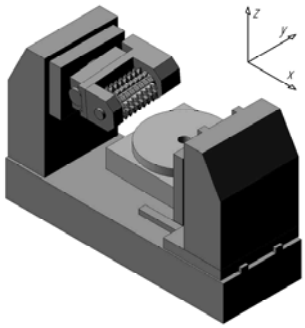
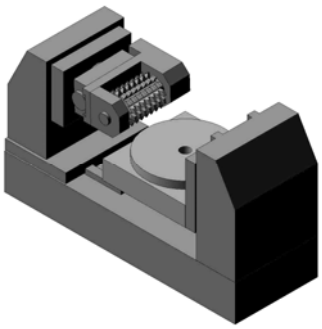
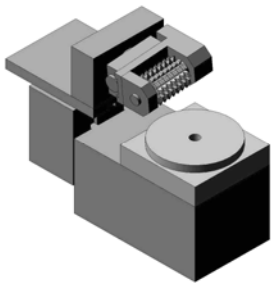
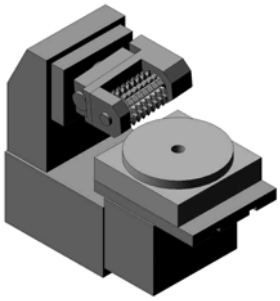
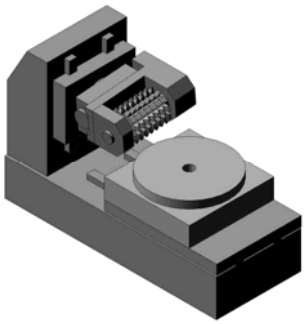
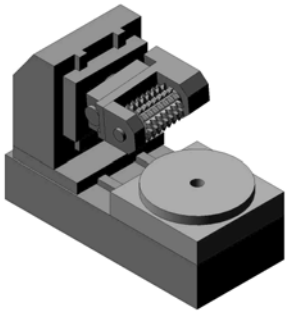
(за исключением вращения детали). Тип *F* – все движения формообразования, за исключением вращения инструмента, совершает деталь. Для компоновок типов *G* и *Q* движения формообразования распределяются между деталью и инструментом, при этом компоновки типа *G* – с вертикальным перемещением инструмента, а типа *Q* – с вертикальным перемещением детали. Подмножества *E*, *F*, *G*, *Q* определяются как типы базовых компоновок.

Объемное твердотельное параметрическое моделирование компоновок проведено в графической среде «Компас-3D V8». Твердотельное моделирование в среде «Компас-3D V8» позволяет визуально оценить состав, взаимосвязь и подвижность блоков компоновки. Кроме того, по моделям определяются характеристики: площадь, объем, вес, положение центра масс, осевые и центробежные моменты инерции блоков компоновки и компоновки в целом. Параметрический характер моделей позволяет свободно варьировать абсолютные и относительные размеры компоновочных блоков.

В таблице 2 представлены разработанные компоновки зубофрезерных станков, структурные формулы которых содержит матрица, изображенная на рисунке 6, в. В таблице на рисунках показаны изометрические проекции этих моделей. В дальнейшем описании используются обозначения компоновок, например *K*23, где первая цифра соответствует строке, а вторая цифра – столбцу таблицы.

Таблица 2

Компоновки зубофрезерных станков по матрице рисунка 6, в

К	1	2	3
1	 *CZxO*(*a·y/w·B*)	 *CZOx*(*a·y/w·B*)	 *COZx*(*a·y/w·B*)
2	 *CxZO*(*a·y/w·B*)	 *CxOZ*(*a·y/w·B*)	 *COxZ*(*a·y/w·B)*

Применение ЧПУ типа NC или CNC, как было отмечено выше, изменяет подход к построению компоновок станков. Нерационально использование в компоновках зубофрезерных станков использование блока осевого перемещения шпинделя червячной фрезы, сложного с точки зрения конструктивного исполнения и управления. Значительно расширяет возможности зубофрезерного станка использование в компоновке двух горизонтально-подвижных блоков: блока «*x*» и блока «*y*». При этом осевая подача фрезы осуществляется в виде суммарного перемещения этих блоков вдоль осей *Oy* и *Oz*.

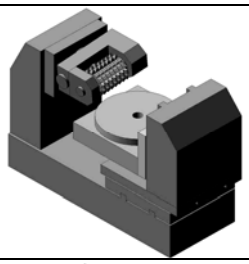
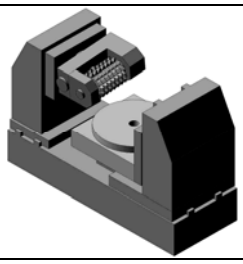
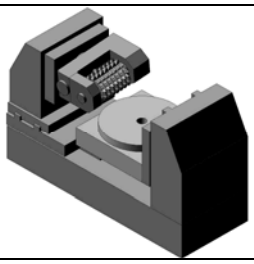
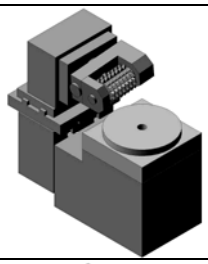
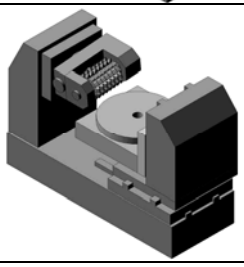
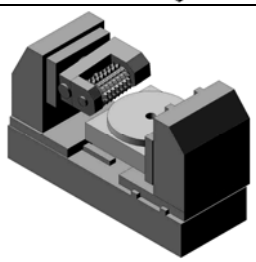
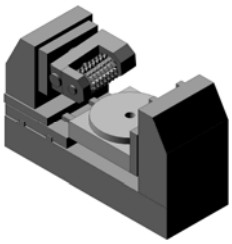
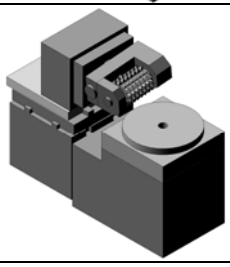
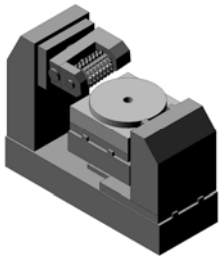
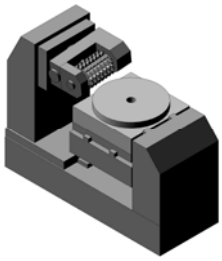
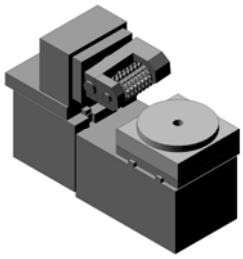
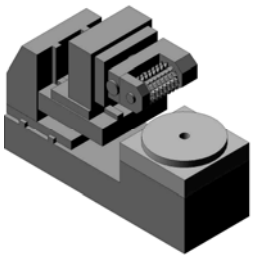
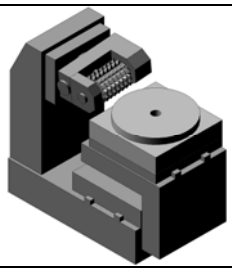
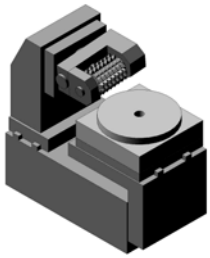
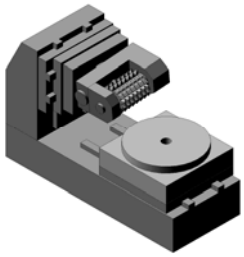
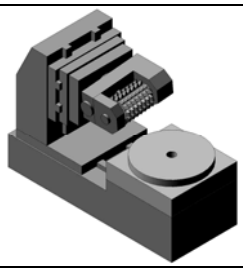
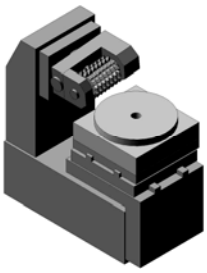
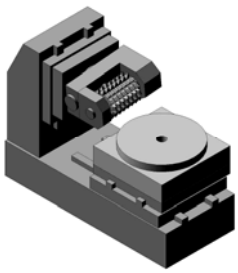
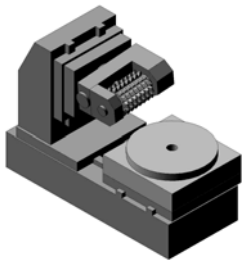
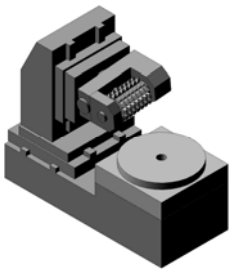
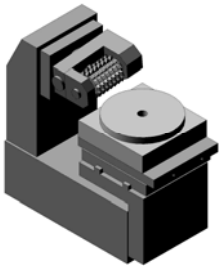
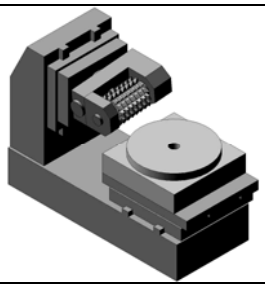
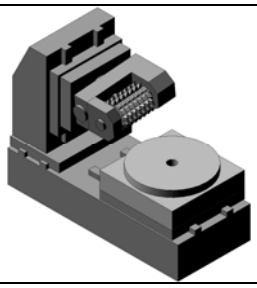
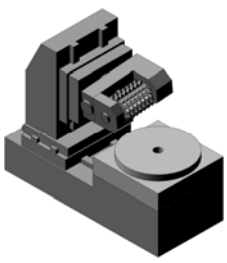
Кроме того, использование горизонтально-подвижного блока «*y*» в сочетании с вертикально-подвижным блоком «*Z*» делает возможной более точную обработку на станке косозубых колес (за счет бездифференциальной настройки обкатной цепи). В этом случае состав модульного комплекта компоновки изменится и будет иметь вид: $MK3:C;\ O;\ Z;\ y;\ x;(a\cdot B)$.

В таблице 3 представлены разработанные компоновки зубофрезерных станков, структурные формулы которых содержит матрица, показанная на рисунке 6, д. Это компоновки, в которых изменяется местоположение трех блоков. Один из блоков перемещается в вертикальном направлении, а два

других – взаимно перпендикулярно в горизонтальном направлении. Обозначение компоновок, аналогичное таблице 2.

Таблица 3

Компоновки зубофрезерных станков по матрице рис. 6, д

К	1	2	3	4
1				
2				
3				
4				
5				
6				

Структурный анализ синтезированных компоновок. Был проведен структурный анализ компоновок зубофрезерных станков, представленных в таблице 2, структурные формулы которых содержит матрица, показанная на рисунке 6, в. Структурный анализ проводился на соответствие компоновок структурным условиям отбора [1]. Результаты структурного проведенного анализа приведены в таблице 4.

Таблица 4

Соответствие компоновок условиям отбора

Обозначение	Краткая формулировка условия отбора	Компоновка (по таблице 2)					
		*К*11	*К*12	*К*13	*К*21	*К*22	*К*23
М1.1	Отсутствие влияния массы заготовки при вертикальном движении	–	–	+	–	+	+
М1.2	То же при горизонтальных движениях	–	+	+	–	–	–
М1.3	Отсутствие влияния массы узлов при продольном перемещении (движение по оси *X*)	–	–	–	–	–	–
М2.2	Сокращение размерной цепи – ось шпинделя параллельна оси *Z*	–	–	–	–	–	–
М2.3	Возможность поддержки консольных узлов (вертикального перемещения)	+	+	–	–	+	+
М2.4	Повышение симметричности расположения направляющих	+	+	+	+	+	+
М2.5	Уменьшение влияния температурных деформаций шпинельного узла	+	+	+	+	+	+
М3.2	Уменьшение преимущественно подвижных масс	–	–	+	–	+	–
М3.3	Распределение масс между двумя ветвями компоновки	–	+	–	–	+	–
М3.4	Устойчивость масс при величине ходов $Z > X \geq Y$	–	–	+	+	+	–
М4.1	Возможность обработки длинных заготовок (движение по оси *Z*)	+	+	–	–	+	+
М4.2	Возможность поточной загрузки-разгрузки	–	–	+	–	+	+
М4.4	Возможность встраивания в автоматическую линию	–	–	+	–	–	+
М5.1	Возможность исполнения с увеличенным продольным ходом (движение по оси *X*)	–	–	+	–	+	+
М5.3	Возможность исполнения с увеличенным вертикальным ходом (движение по оси *Z*)	–	+	–	–	+	+
М5.5	Возможность исполнений с наклоняемыми столами	–	–	+	–	–	+
М5.5'	Возможность исполнений с наклоняемыми суппортами	+	–	–	+	–	–

Проведенный анализ показал, что с точки зрения принятых критериев наиболее оптимальны две компоновки: компоновка *К*22 с формулой $CxOZ(a \cdot y / w \cdot \overset{6}{B})$ (рис. 8) и компоновка *К*23 с формулой $COxZ(a \cdot y / w \cdot \overset{6}{B})$ (рис. 9). Эти компоновки могут быть рекомендованы для проведения сравнительного анализа и принятия окончательного решения выбора варианта компоновки.

Проведен также структурный анализ компоновок зубофрезерных станков, представленных в таблице 3, структурные формулы которых содержит матрица, показанная на рисунке 6, д. Структурный анализ проводился на соответствие компоновок тем же структурным условиям отбора [1]. Данный структурный анализ выявил результаты, аналогичные предыдущему.

Проведенный анализ показал, что с точки зрения принятых критериев наиболее оптимальны также две компоновки: компоновка *К*43 с формулой $CxOZYa\hat{B}$ (рис. 10) и компоновка *К*44 с формулой $COxZYa\hat{B}$ (рис. 11). Эти компоновки также могут быть отобраны для сравнительного анализа и принятия окончательного решения выбора варианта компоновки.

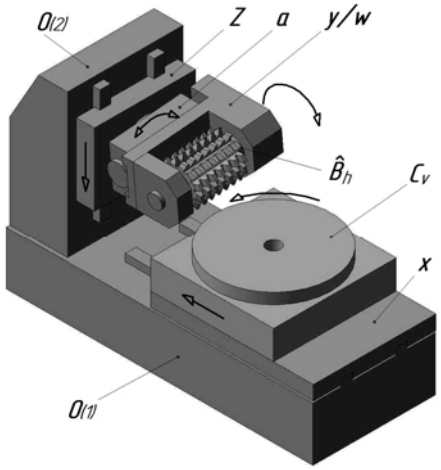


Рис. 8. Компоновка зубофрезерного станка с формулой $CxOZ(a \cdot y / w \cdot \hat{B})$

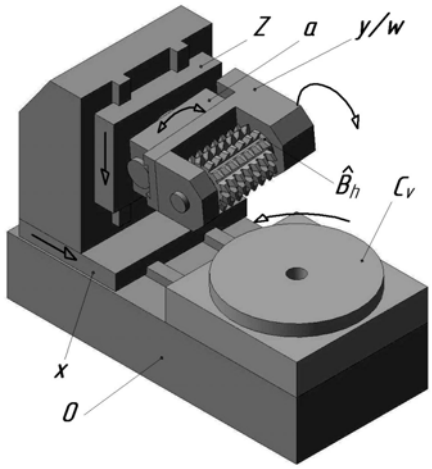


Рис. 9. Компоновка зубофрезерного станка с формулой $COxZ(a \cdot y / w \cdot \hat{B})$

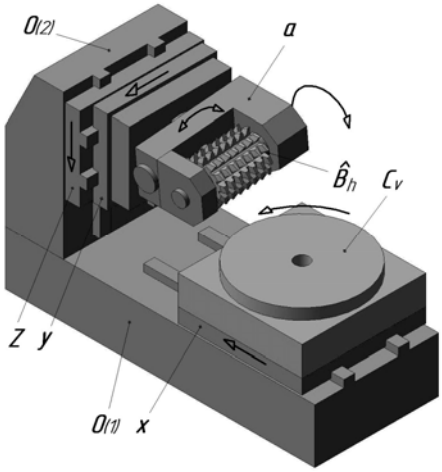


Рис. 10. Компоновка зубофрезерного станка с формулой $CxOZYa\hat{B}$

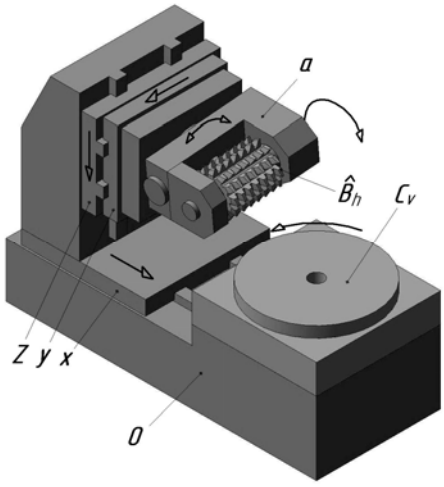


Рис. 11. Компоновка зубофрезерного станка с формулой $COxZYa\hat{B}$

Сравнительный анализ компоновок. Был проведен сравнительный анализ отобранных компоновок по качественным и технико-экономическим показателям. Сравнительный анализ с минимальной конкретизацией конструкции не только ускоряет проектирование, но и позволяет избежать влияния различий в конструктивных исполнениях узлов на результаты сравнения вариантов. В методике анализа качества компоновок основное внимание уделяется компоновочным факторам, а факторы, зависящие от особенностей конструкции, по возможности исключаются. Под компоновочными факторами понимают: расположение в компоновке; основные пропорции узлов, направляющих и деталей несущей системы. При сравнении оценивается влияние факторов на основные качественные и технико-экономические показатели станка: производительность; точность; стоимость МРС; себестоимость обработки; жесткость; виброустойчивость и др. Кроме характеристик качества, поддающихся расчету, при сравнении вариантов оценивают характеристики, формализация и количественный расчет которых затруднены.

Отобранные на этапе структурного анализа компоновки из первой группы (*К*23 и *К*24) используются известными станкостроительными заводами и фирмами, т.е. практически они являются типовыми. Сравнительный анализ выявил, что характеристики обеих компоновок достаточно близки. Приводим некоторые выявленные сравнительные преимущества и недостатки этих компоновок.

В компоновке *К*24 исключено влияние массы заготовки, что является существенным фактором для обработки заготовок с максимальным диаметром 500 мм и более. Станок с компоновкой *К*24 может быть встроен в поточную линию, а станок с компоновкой *К*23 – нет. Компоновка *К*24 имеет меньшую жест-

кость суппортной группы, так как имеет в своем составе последовательно расположенные горизонтальные и вертикальные направляющие. Это снижает точностные характеристики.

Сравнительный анализ отобранных компоновок *К*43 и *К*44, имеющих по два горизонтально-подвижных блока (блок «*x*» и блок «*Y*») дал аналогичные результаты. Необходимо отметить, что такие компоновочные структуры наиболее рациональны для станков с ЧПУ типа CNC.

Рекомендации по использованию компоновок зубофрезерных станков. Проведенные исследования по анализу и синтезу компоновок зубофрезерных станков позволяют рекомендовать разработчикам зубофрезерных станков с ЧПУ следующее.

1. Наиболее рациональными с точки зрения влияния компоновочных факторов на конструкцию станка являются компоновочные структуры: компоновка *К*22 (см. рис. 8) с формулой $CxOZ(a \cdot y / w \cdot \hat{B})$; компоновка *К*23 (см. рис. 9) с формулой $COxZ(a \cdot y / w \cdot \hat{B})$; компоновка *К*43 (см. рис. 10) с формулой $CxOZYa\hat{B}$; компоновка *К*44 (см. рис. 11) с формулой $COxZYa\hat{B}$.

2. При использовании в станке системы управления ЧПУ рациональнее осуществлять осевую подачу червячной фрезы в виде суммарного перемещения двух различных блоков вдоль осей *Oy* и *Oz*, что требует введения в состав компоновки независимого блока «*y*». Поэтому для зубофрезерных станков с ЧПУ (особенно типа CNC) предпочтительна реализация компоновочных структур типа *К*43 (см. рис. 10) с формулой $CxOZYa\hat{B}$ и типа *К*44 (см. рис. 11) с формулой $COxZYa\hat{B}$.

3. Из последних двух структур по динамическим характеристикам предпочтительна компоновочная структура *К*43 (см. рис. 10) с формулой $CxOZYa\hat{B}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Врагов, Ю.Д. Анализ компоновок металлорежущих станков / Ю.Д. Врагов. – М.: Машиностроение, 1978. – 208 с.
2. Аверьянов, О.И. Модульный принцип построения станков с ЧПУ / О.И. Аверьянов. – М.: Машиностроение, 1987. – 232 с.
3. Производство зубчатых колес: справочник / С.Н. Калашников [и др.]; под общ. ред. Б.А. Тайца. – М: Машиностроение, 1990. – 464 с.
4. Технология производства и методы обеспечения качества зубчатых колес и передач: учеб. пособие / В.Е. Антонюк [и др.]. – Минск: УП «Технопринт», 2003. – 766 с.
5. Федотенок, А.А. Кинематическая структура металлорежущих станков / А.А. Федотенок. – М.: Машиностроение, 1970. – 403 с.

Поступила 18.12.2007