

4. J. Pawlowski, Die Ähnlichkeitstheorie in der physikalisch-technischen Forschung, 1. Auflage, Springer-Verlag, 1971, S. 184
5. <http://www.stratasys.com>
6. <http://www.3dsystems.com>
7. <http://www.polymerbranch.com>

### **Методика формирования и выбора оптимальной конфигурации формообразующей системы многокоординатной обработки**

д.т.н. проф. Лукина С.В., к.т.н. доц. Иванников С.Н., Манаенков И.В.

Университет машиностроения

(495) 223-05-23, доб. 1451

[lukina\\_sv@mail.ru](mailto:lukina_sv@mail.ru), [ivannikov.51@mail.ru](mailto:ivannikov.51@mail.ru), [manaenkov\\_igor@mail.ru](mailto:manaenkov_igor@mail.ru)

*Анотация.* В статье изложена методика формирования и выбора оптимальных конфигураций формообразующих систем многоосевых станков, основанная на совокупности граф-моделей, аналитических представлений и целевых функций.

*Ключевые слова:* формообразующая система многокоординатной обработки, компоновка многоосевого станка, граф-модель, система целевых функций.

Процесс развития технологий в развитых странах мира предопределяет использование большого разнообразия методов обработки деталей с криволинейными пространственно-сложными поверхностями, таких как: лезвийная обработка, абразивная обработка, электролучевая обработка, комбинированная обработка и др. Выбор метода обработки зависит от требований точности, производительности и себестоимости обработки в рамках производственно-технических возможностей производственного предприятия [1-3].

В общем случае модель формирования средств оснащения формообразующей системы многокоординатной обработки может быть представлена в виде многослойной граф-модели, каждый слой которой определяет выбор определенного средства оснащения в зависимости от принятого метода обработки. Глубина каждого слоя определяет множество доступных вариантов исполнений средств оснащения.

Таким образом, множество слоев и их глубин формирует множество вершин сетевого графа  $x_{ij}$ , где  $x$  – наименование переменной, отражающей какую-либо группу средств оснащения формообразующей системы,  $i$ - переменная, характеризующая порядковый номер слоя графа;  $j$ - переменная, характеризующая глубину  $i$ -го слоя графа (рисунке 1).

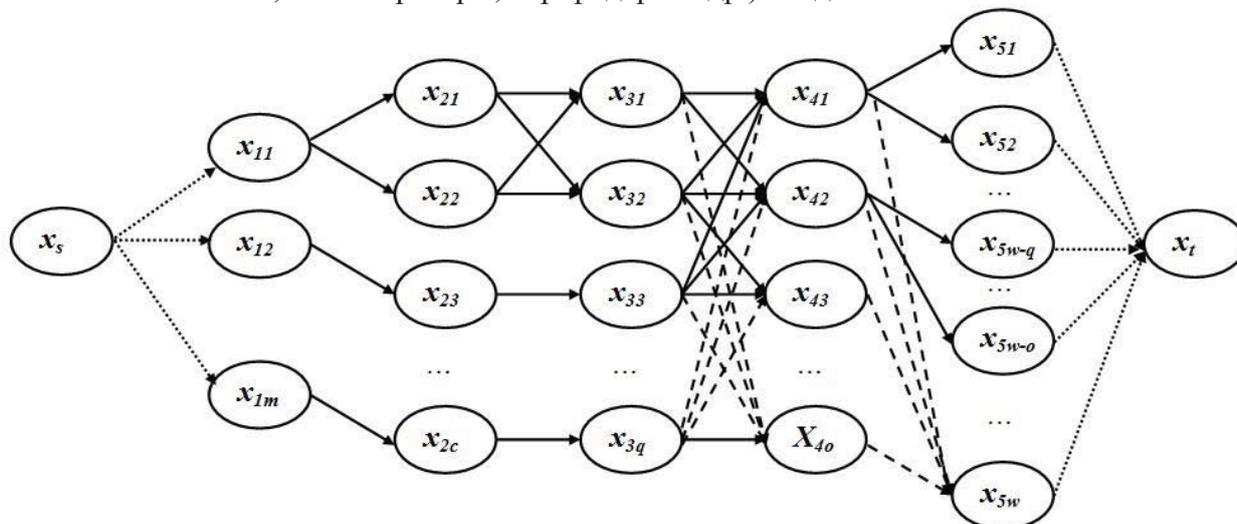
Как показал обзор отечественных и зарубежных литературных источников, в настоящее время в Российской Федерации и за рубежом разработано и эксплуатируется несколько тысяч конструкций металлообрабатывающих станков, инструментов и технологической оснастки, отличающихся по своему функциональному назначению, конструктивному исполнению или компоновке, конструктивным, геометрическим и эксплуатационным параметрам [5].

Многокоординатная обработка в зависимости принятого метода (слой  $x_1$ ) может производиться на (слой  $x_2$ ) многоцелевых (станки сверлильно-фрезерно-расточной и токарно-фрезерной групп); расточных (горизонтальных, координатных), шлифовальных (станки сферошлифовальные, продольно-шлифовальные и др.), эррозионных, лазерных, плазменных станках и т.д.

В качестве инструмента для многокоординатной обработки (слой  $x_3$ ) используется концевой инструмент (например, фрезы с различной формами режущей кромки), расточной инструмент, сверлильный инструмент, абразивный инструмент (шлифовальные круги со сферическим профилем), проволока или электроды, лазерный излучатель, плазматрон и др.

Расширение технологических возможностей станков происходит с применением дополнительной специальной оснастки и (слой  $x_4$ ) повышением степеней подвижности (одно- или двухкоординатные поворотные столы и инструментальные головки, поворотные головки

или столы и др.); автоматизацией функций контроля и измерения (лазерный интерферометры и линейки), диагностикой состояния (датчики обратных связей, квалитметрические приборы и др.); загрузкой-выгрузкой заготовок, оснастки, инструментов и обработанных деталей (съемные паллеты и столы, автооператоры, бар-фидеры и др.) и т.д.



**Рисунок 1** Граф формирования формообразующих систем многокоординатной обработки

Множество возможных вариантов формообразующих систем многокоординатной обработки (слой  $x_s$ ) определяются совокупностью обходных путей графа, формируемых при последовательных переходах между слоями от вершины  $x_s$ , содержащей исходную информацию, к вершине  $x_t$ , определяющей выбор оптимального варианта решения.

Условие выполнения всех заданных исходных данных определяет выполнение условия, характеризующего включение в обходной путь графа ребра, выходящего из вершины  $x_s$ :

$$\sum_{j=1}^m x_{sj} = 1, \text{ для } x_{ij} \in \{0,1\} (\forall i, j \in \{1,2,\dots,m\}). \quad (1)$$

Условие выбора метода обработки и формирования состава средств оснащения, включая станочное оборудование, инструмент и технологическую оснастку, определяет выполнение условия, характеризующего включение в обходной путь ребер промежуточных слоев графа:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} - \sum_{i=1}^n x_{ji} = 0 \quad (\forall i \in \{1,2,\dots,n\}, i \neq s, i \neq t). \quad (2)$$

Условие обеспечения выбора оптимального варианта решения из множества сформированных возможных вариантов формообразующих систем многокоординатной обработки определяет выполнение условия, характеризующего включение в обходной путь графа ребра, входящего в вершину  $x_t$ :

$$\sum_{j=1}^w x_{jt} = 1, \text{ для } x_{ij} \in \{0,1\} (\forall i, j \in \{1,2,\dots,w\}). \quad (3)$$

Алгоритм выбора оптимального варианта формообразующей системы многокоординатной обработки в работе предложено производить путем аддитивной свертки частных критериев предпочтения и ранжированием вариантов по совокупности частных критериев. Решение задачи методом многокритериальной свертки следует использовать при условии необходимости соблюдения совокупности частных критериев предпочтения при условии их аналитического представления. Решение задачи методом ранжирования следует применять при решении задачи сравнения доступных вариантов формообразующих систем по тому или иному частному критерию предпочтения.

Целевую функцию выбора оптимального варианта формообразующей системы многокоординатной обработки методом аддитивной свертки следует определять по выражению:

$$\Phi_{\text{MH}} = \sum_{i=1}^b \frac{\Phi_i K_{B_i}}{\Phi_{i_{\text{max}}}} - \sum_{j=1}^d \frac{\Phi_j K_{B_j}}{\Phi_{j_{\text{min}}}} \rightarrow \max . \quad (4)$$

Здесь  $b, d$  – количество максимизируемых и минимизируемых критериев предпочтения соответственно;  $\Phi_i, \Phi_j$  – текущие значения частных критериев предпочтения;  $\Phi_{i_{\text{max}}}, \Phi_{j_{\text{min}}}$  – текущие экстремальные значения частных критериев предпочтения.

При формировании варианта формообразующей системы многокоординатной обработки наиболее трудоемкой и затратной является задача выбора модели станочного оборудования. Проведенный анализ конструкций станков, используемых для операций многокоординатной обработки (слой  $x_2$  см. рисунок 1), позволил представить все многообразие существующего оборудования в виде граф-модели многоосевой станочной системы, состоящей из совокупности подсистем: кинематики, определяющей число управляемых координат и степени подвижности исполнительных звеньев; управления, определяющего возможности станочной системы обеспечивать многокоординатную интерполяцию; компоновки, определяющей взаимную ориентацию и расположение неподвижных и подвижных элементов станка по ветвям инструмента и заготовки; обеспечивающей, позволяющей расширить технологические возможности станка (рисунок 2).

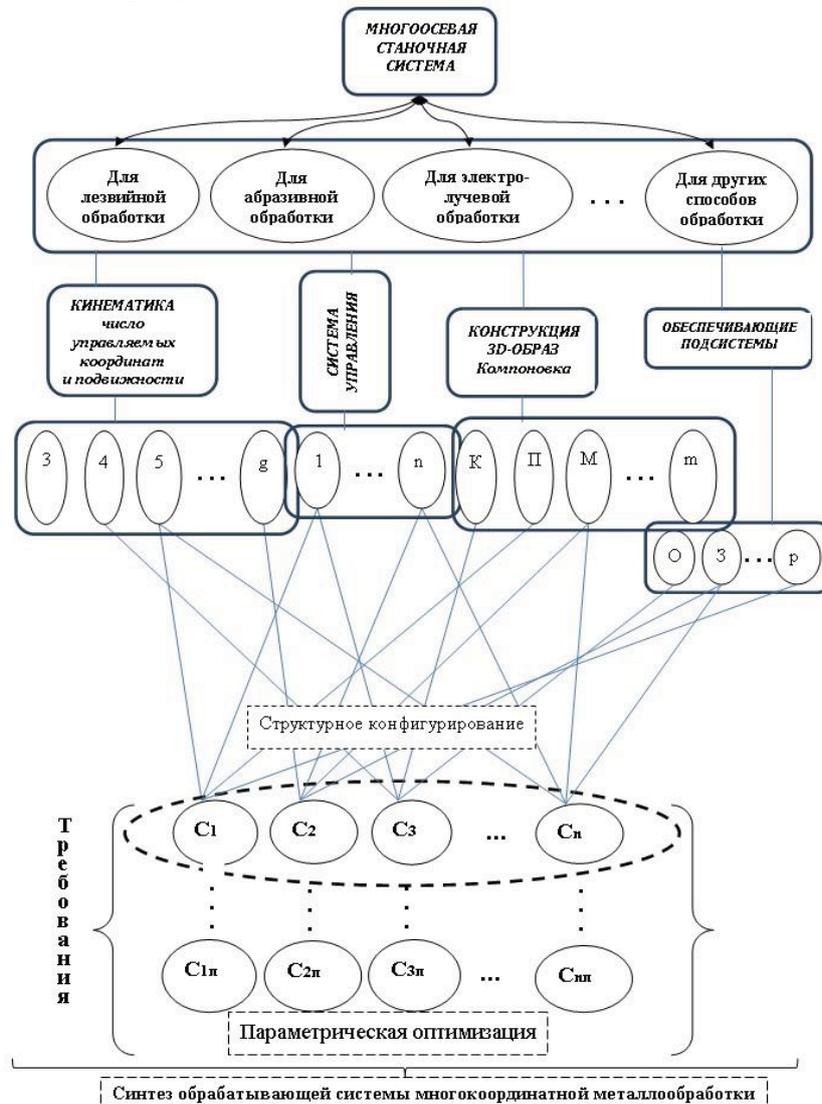


Рисунок 2. Граф-модель структурно-параметрического синтеза многоосевой станочной системы

При формировании кинематической подсистемы в зависимости от сложности формы обрабатываемой поверхности и конструктивного вида детали принимается решение о типе кинематики (последовательная, параллельная, гибридная) и степенях подвижности (последовательная 3-х, 4-х, 5-ти и более).

При формировании подсистемы управления осуществляется выбор соответствующей определенной кинематической подсистемы по функциональным возможностям системы управления станком, способной поддерживать многокоординатное формообразование с заданными требованиями по точности (например, 3-х, 4-х, 5-ти и более управляемых координат с наносплайновой интерполяцией или без нее и т.д.).

При определении подсистемы компоновки формируется 3D-геометрический образ станка и его конструктивная компоновка с параметризацией корпусных деталей и подвижных узлов; типоразмерная конфигурация оборудования относительно его рабочего пространства, определяющая ориентацию систем координат инструмента и заготовки и габаритно-массовые пропорции станка. Компоновка определяет структуру оборудования по распределению степеней подвижности по ветвям, несущим инструмент и заготовку; задает ориентационные признаки конструкции станка (например, горизонтальная, вертикальная, консольная, порталная компоновки и т.д.); определяет степень подавления возмущений через габаритно-массовые параметры и свойства сопрягаемых элементов подвижных стыков, а также компактное конфигурирование частных подсистем станка в единую систему [7].

При формировании подсистемы опционного дооснащения через обеспечивающие подсистемы определяется окончательный выбор комплекса функциональных возможностей формообразующей системы через дооснащение базовой конструкции станка специальными средствами расширения технологических возможностей путем адаптивного присоединения их к базовой конструкции (бар-фидеры, уловители деталей, контрольно-калибрующие приборы и др.). Дооснащение позволяет расширить технологические возможности станка до требуемой функциональной эффективности, соответствующей производственным потребностям заказчика.

Разработанная многослойная граф-модель позволяет структурировать порядок синтеза станочной многоосевой системы, обеспечивающей технологически обусловленное многокоординатное формообразование не зависимо от выбранного метода обработки.

Согласно разработанной граф-модели, вначале осуществляется структурное конфигурирование многоосевой станочной системы в зависимости от заданных требований по точности, производительности и стоимости формообразования, а затем производится параметрическое моделирование сформированной конфигурации под особые требования заказчика.

Для выбора оптимальной многоосевой станочной системы из множества сконфигурированных необходимо сформировать комплекс частных критериев и соответствующих целевых функций согласно (4).

Например, в работе получены целевые функции точности 3-х осевого станка, выражающие смещения по координатным осям между конечными узлами станка, несущими инструмент и заготовку, при действии силовых возмущающих факторов:

$$\delta_{ii} = \frac{P_i \cdot r_{ij}^2 - P_j \cdot l_i \cdot r_{ij}}{L_i^3 \cdot D_{ik}} + \frac{P_i \cdot r_{ik}^2 - P_k \cdot l_i \cdot r_{ik}}{L_i^3 \cdot D_{ij}} \rightarrow \min, \quad (5)$$

$$\delta_{ij} = \frac{P_i \cdot l_j^2 - P_j \cdot r_{ji} \cdot l_j}{L_j^3 \cdot D_{jk}} + \frac{P_i \cdot r_{jk}^2 - P_k \cdot r_{ji} \cdot r_{jk}}{B_j^3 \cdot L_j} \rightarrow \min, \quad (6)$$

$$\delta_{ik} = \frac{P_i \cdot r_{kj}^2 - P_j \cdot r_{ki} \cdot r_{kj}}{B_k^3 \cdot L_k} + \frac{P_i \cdot l_k^2 - P_k \cdot r_{ki} \cdot l_k}{L_k^3 \cdot D_{kj}} \rightarrow \min, \quad (7)$$

где  $\delta_{ii}$ ,  $\delta_{ij}$ ,  $\delta_{ik}$  - смещения расчетной точки  $p$  по оси  $i$  (первый индекс), обусловленные

поворотами узлов, перемещающихся вдоль осей  $i, j, k$  (второй индекс);  $P_i, P_j, P_k$  - составляющие силы резания, действующие на инструмент и направленные вдоль осей  $i, j, k$ ;  $D_{ij}, D_{ik}, D_{jk}$  и  $D_{kj}$  - размеры направляющих (В или Н) узлов, перемещающихся вдоль осей  $i, j, k$  (первый индекс), параллельные осям  $j$  и  $k$  (второй индекс).

При повышении степеней подвижности станка (до 4-х, 5-ти и более) целевая функция формируется аналогично с учетом соответствующих добавленных стыков.

Конструктивный объем компоновки отражает габаритно-массовые характеристики станка. При прочих равных условиях лучшим будет являться станок с минимальным объемом компоновки:

$$V = (L + l_x) \cdot K_B B + K_H H \rightarrow \min, \quad (8)$$

где  $K$  - коэффициенты, учитывающие параметризацию габаритов подвижных и неподвижных узлов пропорционально размерам стыков.

$l_{\text{хода}}$  - длина хода подвижного узла вдоль оси координат (определяет размер рабочего пространства станка по оси).

В качестве комплексного критерия, выраженного через аддитивную свертку целевых функций (5) - (8), предложен критерий компактности, выражающий свойство конструкции станка обеспечивать заданную точность наименьшими габаритно-массовыми характеристиками. При проектировании станочного оборудования создание компактных конструкций является одной из приоритетных задач, поэтому сформированная целевая функция является значимой.

$$\Phi_K = \delta_H K_B \delta + V_H K_B V \rightarrow \min, \quad (9)$$

где  $\delta_H, V_H$  - нормированные значения критериев точности и конструктивного объема относительно значений критериев базового варианта соответственно;  $K_{B\delta}, K_{BV}$  - весовые коэффициенты критериев точности и конструктивного объема соответственно.

Время на операцию многокоординатного фрезерования в общем случае является функцией траектории движения режущего инструмента  $l_\Sigma$  и режима резания:

$$T = f(l_\Sigma, l_1, s_z, t, v, n) \rightarrow \min, \quad (10)$$

где  $l_1$  - длина рабочей части инструмента;  $s_z$  - подача на зуб;  $t$  - глубина резания;  $v$  - скорость резания;  $n$  - количество проходов.

Стоимость обеспечения заданного уровня точности обработки предложено оценивать по укрупненному показателю переменной составляющей технологической себестоимости операции [8]:

$$C = \frac{C_0}{F_d} T \rightarrow \min \quad (4)$$

Здесь  $C_0$  - составляющая затрат, зависящая от выходной точности станочного оборудования;  $F_d$  - действительный годовой фонд времени работы станочного оборудования.

Разработанная методика формирования и выбора оптимальной конфигурации формообразующей системы многокоординатной обработки автоматизирована в среде MS Excel и апробирована в разработке станочных систем для лазерной резки сложнопрофильных хвостовиков турбинных лопаток из композитных материалов [7]. Сформированная конфигурация формообразующей системы лазерного станка оптимальна, так как обладает минимальным конструктивным объемом для заданных технологических условий и обеспечивает отклонения объемной точности в рабочем пространстве до 3 мкм.

#### Литература

1. Максимов Ю.В., Абрамова А.Р., Кузьминский Д.Л., Мокринская А.Ю. К вопросу об обеспечении качества обработки сложнопрофильных деталей на станках с изменяющимися элементами // Известия МГТУ «МАМИ». – 2012, №1(13), с. 168-174.
2. Макаров В.М. Модель управления точностью формообразования геликоидных поверхностей при проектировании станочной системы // СТИН.-2008, №12, с.15-20.

3. Анкин А.В., Кузьминский Д.Л. Разработка программного обеспечения для расчета пространственной размерной цепи // Известия МГТУ «МАМИ». – 2011, №2(12), с. 106-110.
4. Максимов А.Д., Сорокин Ю.А. Принципы алгоритмизации выбора баз механической обработки // Известия МГТУ «МАМИ». – 2010, №1(9), с. 116-119. // Известия МГТУ «МАМИ». – 2011, №2(12), с. 106-110.
5. Лукина С.В., Крутякова М.В., Соловьева Н.П. Обеспечение конкурентоспособности металлорежущего оборудования путем управления его качеством и себестоимостью на этапах НИОКР. - МГТУ «МАМИ». – 2011, 157.с.
6. Лукина С.В., Иванников С.Н., Крутякова М.В., Манаенков И.В. Технологический синтез мехатронных станочных систем для многоосевой обработки // Известия МГТУ «МАМИ». – 2013, №1(15), т.2., с. 48-53.
7. Лукина С.В., Манаенков И.В. Повышение эффективности многокоординатного фрезерования пространственно-сложных поверхностей на станках с ЧПУ // Известия МГТУ «МАМИ». – 2012, №2(14), т.2., с. 124-128.
8. Лукина С.В., Кудрявцева А.Л., Манаенков И.В. Технологический синтез многоосевого станка для лазерной обработки // РИТМ.-2013, №1(79), с.36-40.

### **Силовое взаимодействие заготовки с абразивными кругами при двустороннем шлифовании**

Балашов В.Н., Юдаев С.Н., Гневашев А.А.  
Университет машиностроения  
(495) 223-05-23, доб. 1068

*Анотация.* В статье рассмотрен процесс двухстороннего шлифования в подвижных центрах. Приводится описание силового взаимодействия абразивных кругов с заготовкой. Установлена возможность уменьшения упругих деформаций при двустороннем шлифовании за счет наладки станка.

*Ключевые слова:* *двухстороннее шлифование, упругая деформация, бесцентровое шлифование.*

Основными особенностями двустороннего шлифования в подвижных центрах являются: возможность свободного перемещения заготовки в направлении поперечной подачи, что создает некоторое сходство со способом бесцентрового шлифования; жесткая фиксация заготовки в вертикальном направлении, что характерно для центрового шлифования; одновременное шлифование двумя кругами, что является спецификой данной способа.

Из практики бесцентрового шлифования известно, что эффективность исправления погрешностей формы зависит от наладки станка, одним из параметров которой является высота расположения оси обрабатываемой заготовки над линией центров абразивных кругов. При двустороннем шлифовании эта особенность также имеет место (рисунок 1).

Для упрощения теоретических расчетов сделаем ряд допущений. Шлифовальные круги имеют одинаковые диаметры и окружные скорости. Система безынерционна. Деталь шлифуется двумя кругами одновременно, при этом один из кругов осуществляет встречное шлифование, другой - попутное. Радиальные составляющие силы резания от каждого из шлифовальных кругов равны:

$$P_{y1} = P_{y2}.$$

Исследованиями установлено, что отношение составляющих силы резания  $P_y/P_z$  для встречного и попутного шлифования различны, что обусловлено различными условиями работы абразивных зерен. Однако различие, как правило, не превышает 25%, кроме того, характер изменения соотношений  $P_y/P_z$  во времени при попутном шлифовании аналогичен встречному, что также подтверждается практикой бесцентрового шлифования, где в основном применяют попутное шлифование. Это обстоятельство позволяет сделать допущение о равенстве касательных составляющих: