

*На правах рукописи*

Пестов Сергей Петрович

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ  
ОТВЕРСТИЙ КОНЦЕВЫМИ МЕРНЫМИ ИНСТРУМЕНТАМИ  
НА СТАНКАХ С ЧПУ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ЭТАПОВ НАСТРОЙКИ И ФОРМООБРАЗОВАНИЯ**

*Специальность 05.03.01 — «Технологии и оборудование  
механической и физико-технической обработки»*

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск

2004

Диссертация выполнена на кафедре «Технология машиностроения, станки и инструмент» филиала Южно-Уральского государственного университета в г. Златоусте.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор  
Мазеин Петр Германович.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Гузеев Виктор Иванович;  
кандидат технических наук, доцент  
Сурков Василий Иванович.

Ведущее предприятие – ФГУП «Производственное объединение  
Златоустовский машиностроительный завод».

Защита состоится « 3 » декабря 2004 г., в 15-00 часов, на заседании диссертационного совета Д 212.298.06 в Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан «    »                      2004 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук, профессор

В.В. Ерофеев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Значительную долю общей трудоемкости при изготовлении деталей на станках с числовым программным управлением (ЧПУ) сверлильно-фрезерно-расточной группы составляет обработка круглых отверстий, имеющих высокие требования к параметрам точности (ПТ) диаметрального размера, формы и расположения оси. Обработка таких точных отверстий производится последовательно за несколько переходов различными режущими инструментами, в том числе — высокопроизводительными концевыми мерными инструментами (КМИ) типа двухлезвийных сверл, многолезвийных зенкеров и разверток путем координатных перемещений исполнительных механизмов станка в соответствии с управляющей программой.

Однако по данным технической литературы и производственной практики обработка отверстий с высокими требованиями к ПТ при использовании КМИ на станках с ЧПУ сопряжена со значительными трудностями, связанными:

- с более низкой, на чистовых переходах достигаемой точностью расположения осей при развертывании, по сравнению с растачиванием;
- с необходимостью, для обеспечения повышенных требований к ПТ отверстий, вводить перед переходами развертывания – переходы растачивания или окончательно обрабатывать отверстия в деталях на отделочных станках с ручным управлением, что ведет к снижению производительности, а при перебазировании детали – к нарушению ранее достигнутых ПТ;
- с высокой трудоемкостью технологической подготовки производства, не позволяющей прогнозировать результаты обработки отверстий КМИ.

В связи с этим, обработка КМИ отверстий с высокими требованиями к ПТ на станках с ЧПУ не достаточно эффективна. Вместе с тем, задачи обеспечения эффективной обработки отверстий КМИ успешно решаются в производственных условиях на универсальных металлорежущих станках и автоматических линиях, чему способствовали многочисленные исследования в этих областях. Проблемы же, связанные с обеспечением эффективности обработки отверстий

КМИ на станках с ЧПУ в условиях автоматизированного мелкосерийного производства недостаточно изучены и обусловлены тем, что

– не учитываются в полной мере особенности достижения точности на этапе настройки оборудования, т.е. станка с ЧПУ (при координатных перемещениях инструмента на оси отверстий) и этапе процесса формообразования (непосредственной обработки) отверстий различными типами КМИ; далее по тексту в автореферате — на этапе настройки и этапе формообразования;

– имеющиеся математические модели точности на этапах настройки и формообразования несовершенны и не позволяют надежно и достоверно, с учетом конкретных конструкторско-технологических факторов проводить оценку ПТ;

– отсутствует оценка взаимосвязи точностных параметров, достигаемых на этапах настройки и формообразования;

– используемые элементы технологической системы (ТС) не выполняют функций переднего или заднего направления КМИ;

– отсутствует методика обеспечения точности при обработке отверстий КМИ на станках с ЧПУ, основанная на моделировании точности с учетом взаимосвязи и конкретных условий выполнения этапов настройки и формообразования отверстий.

Таким образом, вышеизложенные проблемы определяют актуальность настоящей работы как в теоретическом, так и в практическом плане.

**Цель работы:** обеспечение точности и производительности обработки отверстий КМИ типа двухлезвийных сверл, многолезвийных зенкеров и разверток на станках с ЧПУ сверлильно-фрезерно-расточной группы на основе математического моделирования этапов настройки оборудования и формообразования отверстий с учетом их особенностей и взаимосвязи.

**Научная новизна работы состоит:**

а) в подходе к моделированию точности обработки отверстий КМИ на станках с ЧПУ сверлильно-фрезерно-расточной группы как к совокупности особенностей достижения точности на этапах настройки и формообразования отверстий (с выделением моделирования точности на каждом из этих этапов);

б) в предложении, разработке и обосновании нового (интервального) метода решения обратных задач размерных цепей, что на этапе настройки позволит:

– обеспечить моделирование и оценку точности расположения оси отверстия путем использования положений интервальной математики при расчете размерной цепи и описания выпуклого плоского интервала в зависимости от погрешностей позиционирования исполнительных механизмов станка, настройки в “нуль” детали и других факторов;

– оценить минимальный запас точности, определяющий допустимую величину погрешности расположения оси отверстия для выполнения следующего этапа формообразования, устанавливая этим взаимосвязь этапов;

– сформировать требования к исходным параметрам этапов настройки и формообразования;

в) в предложенной системе математических моделей этапа формообразования отверстий КМИ типа двухлезвийных сверл, многолезвийных зенкеров и разверток, позволившей:

– установить радиус-векторы точек моделируемого отверстия, которые формируются режущими лезвиями КМИ, срезающими переменные площади, зависящие от реальной геометрии лезвий, неточности их заточки и переменного припуска с учетом предыдущих положений лезвий;

– определить влияние подачи, осевых биений шпинделя, параметров заточки режущих лезвий КМИ, жесткости элементов ТС и других факторов на обеспечение точности размера, формы и расположения осей отверстий.

### **Практическая ценность работы**

1. Разработаны и реализованы в виде алгоритмов и компьютерных прикладных программ для использования их в технологических отделах предприятий в составе CAD/CAM систем и в автономном режиме:

– методика оценки точности расположения осей отверстий на этапе настройки путем интервального расчета размерных цепей;

– методика расчета точности формообразования отверстий КМИ типа двухлезвийных сверл, многолезвийных зенкеров и разверток.

2. Предложена методика комплексного обеспечения точности при обработке отверстий КМИ, которая учитывает особенности выполнения этапов настройки и формообразования на станках с ЧПУ, а созданные компьютерные программы позволяют оценить точность обработки отверстий при заданной структуре операции, конкретных параметрах инструментальной оснастки, требованиях к оборудованию, условиям обработки и провести виртуальную отладку операций путем коррекции этих факторов.

3. На основе разработанных принципиальных схем элементов ТС для повышения точности предложены новые конструкции быстропереналаживаемых элементов ТС для переднего и заднего направления КМИ при обработке точных отверстий на станках с ЧПУ.

4. Результаты в виде знаний, полученные при моделировании на этапах настройки и формообразования отверстий КМИ на станках с ЧПУ, можно применять в учебном процессе при подготовке инженеров по машиностроительным специальностям.

**На защиту выносятся:**

– оценка точности расположения осей отверстий на этапе настройки путем решения обратной задачи расчета размерных цепей интервальным методом и построения выпуклого интервала;

– система математических моделей точности на этапе формообразования отверстий различными типами КМИ: двухлезвийных сверл, многолезвийных зенкеров и разверток;

– переналаживаемые элементы ТС с передним и задним направлением для повышения точности обработки отверстий на станках с ЧПУ;

– методика комплексного обеспечения точности при обработке отверстий КМИ на станках с ЧПУ с учетом специфики и конкретных условий выполнения этапов настройки и формообразования.

**Реализация результатов работы**

Результаты работы внедрены или приняты к использованию в производство на предприятиях ФГУП ПО «Златоустовский машиностроительный завод»,

ФГУП НИИ «Гермес» (г. Златоуст), ОАО «Агрегат» (г. Сим), ОАО «Ашасвет» (г. Аша), а также применяются в учебном процессе при подготовке инженеров по специальностям 151001, 220301 и могут быть использованы для специальностей 151002, 151003 и 220501.

Практическое использование разработок позволяет в технологической подготовке производства и при обработке отверстий КМИ на станках с ЧПУ обеспечить эффективность за счет:

- повышения точности по расположению осей отверстий в 1,4...2 раза, точности по диаметральному размеру и по форме отверстий на 15...32%, что исключает брак по этим параметрам и необходимость введения переходов растачивания или дообработку отверстий на отделочных универсальных станках;

- снижения, в отдельных случаях, количества технологических переходов, при обработке отверстий с высокими требованиями к ПТ на 1 – 2 перехода;

- сокращения на 17...24% трудоемкости и сроков технологической подготовки производства деталей с точными отверстиями, обрабатываемых на станках с ЧПУ, уменьшения затрат на натурную отладку операций.

**Апробация работы.** Основные положения работы доложены и обсуждены на II Международной специализированной конференции-выставке «Машиностроение – прогрессивные технологии», г. Челябинск, 1998 г.; на первой Международной электронной научно-технической конференции «Автоматизация и информатизация в машиностроении» (АИМ 2000), г. Тула, 2000 г.; на Всероссийских научно-технических конференциях «Аэрокосмическая техника и высокие технологии», г. Пермь, 2000 и 2001 гг.; на межвузовских научно-технических конференциях «Управляющие и вычислительные системы. Новые технологии», г. Вологда, 2000 и 2001 гг.; на научно-технических конференциях ЮУрГУ в 1998–2004 гг.; на объединенных заседаниях кафедр технологического профиля ЮУрГУ в 2003 и 2004 гг.

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликованы отдельно и в соавторстве 34 работы, в том числе 5 авторских свидетельств на изобретения, 1 свидетельство на программу для ЭВМ и 4 учебно-методических пособия.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав текста, основных выводов и результатов, библиографического списка и приложений. Содержит 222 страницы текста, в том числе 74 рисунка и 14 таблиц. В библиографическом списке приведено 152 наименования.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### 1. Состояние вопроса, задачи исследования

Анализ и моделирование точности обработки деталей, а также отверстий в них, в том числе на станках с ЧПУ, рассматривались в работах Колесова И.М., Базрова Б.М., Соломенцева Ю.М., Косова М.Г., Митрофанова В.Г., Петрова Н.Ф., Фридлиндера И.С., Трояновского М.В., Микитянского В.В., Корсакова В.С., Дибирова С.Ю., Косиловой А.Г., Лакирева С.Г., Хилькевича Я.М., Козлова А.В., Решетникова Б.А., Щурова И.А., Капустина Н.М., Стрельцова В.А., Кирсанова С.В., Дерябина И.П. и др. Например, в основу многих исследований точности обработки на металлорежущих станках любыми инструментами положена модель погрешности обработки  $\omega$ , которая учитывает погрешности установки  $\omega_y$ , статической  $\omega_c$  и динамической (при формообразовании)  $\omega_d$  настройки технологической системы:

$$\omega = \omega_y + \omega_c + \omega_d.$$

Однако указанный подход к моделированию точности обработки отверстий КМИ на станках с ЧПУ с учетом особенностей и взаимосвязи этапов статической и динамической настройки детально и углубленно пока не разработан.

Для оценки точности на этапах установки и статической настройки широко применяют методы расчета размерных цепей. Однако существующие методы расчета нелинейных размерных цепей (а именно такие цепи чаще формируются при настройке станка на обработку системы отверстий) не всегда учитывают взаимовлияние линейных и угловых звеньев размерной цепи, что снижает надежность и достоверность расчетов и поэтому необходима разработка новых



методов расчета размерных цепей. Большинство моделей формообразования отверстий КМИ разработаны для отдельных переходов, в моделях не в полной мере учитываются конструктивные особенности инструментальной оснастки и конкретные условия обработки на металлорежущем станке с ЧПУ, а отдельные коэффициенты и параметры носят эмпирический характер; в моделях формообразования КМИ также не учитываются особенности этапа настройки. Таким образом, состояние вопроса определяет необходимость в специальном научном исследовании процессов обработки отверстий КМИ на станках с ЧПУ.

Исходя из цели работы, необходимо решить следующие основные задачи:

1. Разработать для этапа настройки модель оценки точности расположения осей отверстий путем решения обратной задачи расчета размерных цепей.
2. Разработать систему математических моделей этапа формообразования отверстий двухлезвийными сверлами, многолезвийными зенкерами и развертками, учитывающих условия обработки на станке и параметры инструментальной оснастки.
3. Реализовать математические модели при выполнении компьютерных исследований для этапов настройки и формообразования; выявить влияние основных конструкторско-технологических факторов на точность обработки отверстий КМИ.
4. Разработать быстроперенастраиваемые элементы ТС для направления КМИ на станках с ЧПУ сверлильно-фрезерно-расточной группы.
5. Разработать методику комплексного обеспечения точности обработки отверстий КМИ на станках с ЧПУ с учетом выполнения этапов настройки и формообразования.

## **2. Моделирование точности на этапах настройки и формообразования отверстий концевыми мерными инструментами**

**Этап настройки.** На этапе настройки достаточным является рассмотрение моделирования точности расположения осей отверстий и в качестве математи-

ческих моделей выбраны модели геометрического уровня — размерные цепи. Вариант схемы размерной цепи, сформированной для моделирования поля рассеяния оси отверстия  $O_{i+1}$  относительно базовых поверхностей детали (параметры  $A_{i+1}^x$  и  $A_{i+1}^y$ ) при условии смещения нуля станка в начало координат детали  $O_d$ , приведен на рис. 1, а.

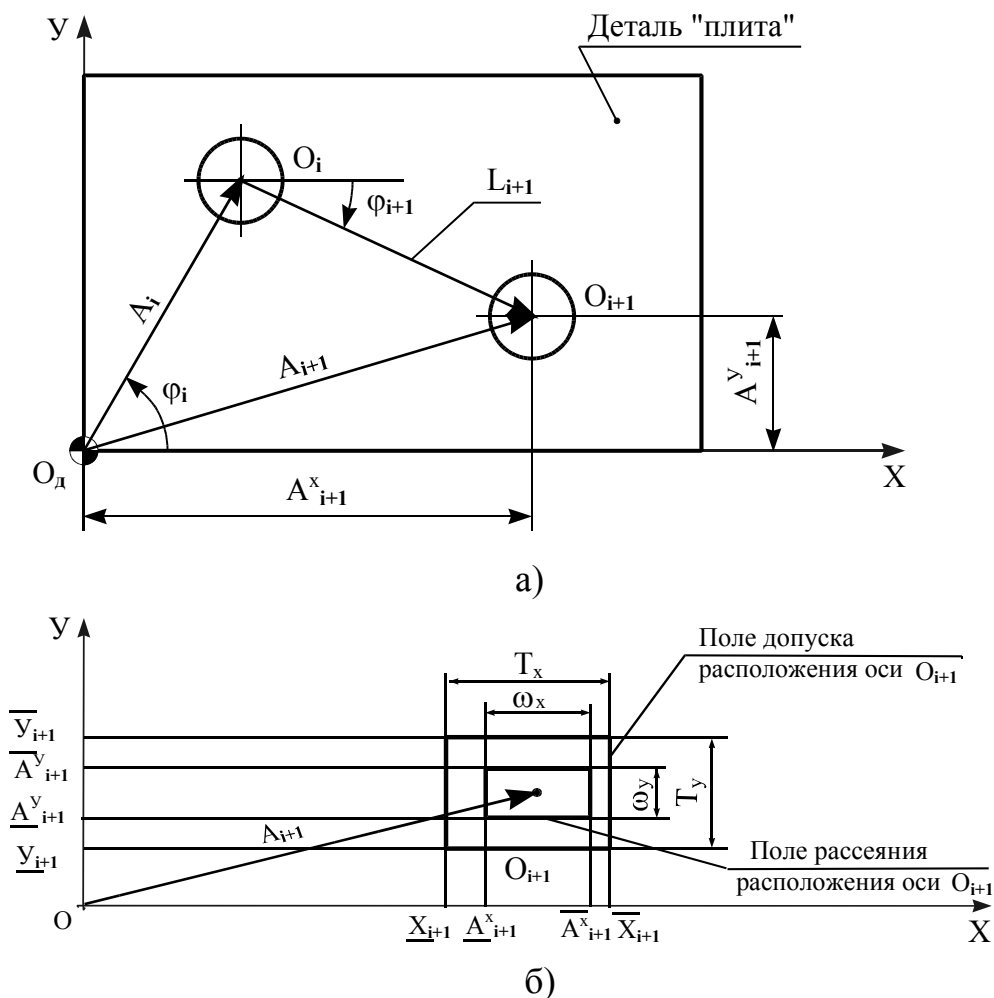


Рис. 1. Оценка точности расположения оси отверстия на этапе настройки: а – схема размерной цепи; б – построение выпуклых интервалов, определяющих поля рассеяния и допуска расположения оси  $O_{i+1}$  (увеличено)

Для расчета нелинейных размерных цепей и оценки точности расположения осей отверстий на этапе настройки предлагается новый метод расчета, разработанный на положениях интервальной математики. В основу этого интервального метода положено представление линейных, угловых размеров, их допусков в виде интервальных параметров и применения над ними интервальных операций сложения, вычитания, умножения. Например, линейное или угловое составляющее звено  $B$  размерной цепи записывается в интервальном виде в прямо-

угольной трактовке как  $B = [\underline{b}, \bar{b}]$ , где  $\underline{b}$  — наименьший,  $\bar{b}$  — наибольший предельные размеры составляющего звена. Интервальный подход при расчете размерных цепей позволяет более реально учитывать взаимосвязь линейных и угловых звеньев размерной цепи.

При моделировании точности расположения осей отверстий в проводимых исследованиях достаточным является решение проверочной (обратной) задачи расчета размерных цепей, но для плоских цепей определяется не проекция замыкающего звена, а весь его выпуклый интервал (в общем случае — многоугольник), который строится путем проецирования сформированной размерной цепи на несколько произвольно выбранных осей. Для практических расчетов достаточно найти проекции на две – четыре произвольные оси. Исходя из этого, в интервально-геометрическом виде выпуклый интервал, в зависимости от расчетной задачи, определит поле допуска (при расчете по данным чертежа) или поле рассеяния (по данным настройки) замыкающего звена размерной цепи.

Поле рассеяния, определяющее погрешность расположения оси отверстия  $O_{i+1}$  (замыкающее звено  $A_{i+1}$ ) при настройке, оценивается выпуклым интервалом в виде прямоугольника со сторонами (рис. 1,б):

$$\omega_x = [\bar{A}_{i+1}^x - \underline{A}_{i+1}^x] \text{ и } \omega_y = [\bar{A}_{i+1}^y - \underline{A}_{i+1}^y],$$

построенном на основе расчета интервальным методом уравнений проекций размерной цепи на координатные оси.

Аналогично можно определить поле допуска оси отверстия  $O_{i+1}$ . Отличие состоит в формировании размерной цепи и назначении параметров ее звеньев в интервальном виде, исходя из чертежа детали. Выпуклый интервал, задающий поле допуска расположения оси, представляет собой при проецировании на координатные оси прямоугольник со сторонами  $T_x$  и  $T_y$  (см. рис. 1,б).

Окончательная оценка точности на этапе настройки проводится путем сравнения полей допуска и рассеяния. Очевидно, что точность по расположению оси на этапе настройки будет обеспечена, если поле рассеяния располагается в

поле допуска. При этом можно вычислить запас точности расположения оси отверстия для выполнения следующего этапа формообразования.

**Этап формообразования.** Поскольку формообразование отверстий на станках с ЧПУ производится различными типами КМИ, то на статическом уровне разработана система частных математических моделей точности формообразования. При разработке моделей установлен единый подход, позволяющий описать формирование отверстия режущими лезвиями, которые срезают переменные площади в зависимости от их реальной геометрии, неточности заточки лезвий, переменного припуска и предшествующих положений лезвий, а также осевых биений шпинделя станка.

Разработанная с учетом этого подхода система математических моделей включает модели сверления двухлезвийными сверлами в сплошном металле (модели группы А), зенкерования и развертывания многолезвийными инструментами (модели группы В) в виде уравнений, в том числе с запаздывающим аргументом. Установлено, что площади срезаемых слоев существенно зависят от соотношения подачи на зуб (лезвие) инструмента  $S/z$  и осевого сдвига или осевого биения  $\tau$  режущих лезвий. Поэтому модели каждой группы разделены на две подгруппы: 1) с относительно большими подачами ( $S/z \geq \tau$ ) и 2) с относительно малыми подачами ( $S/z < \tau$ ). Пример расчетной схемы и математической модели формообразования отверстий многолезвийными зенкерами и развертками с относительно большими подачами (модель В1) приведены в табл. 1.

Положение вершины каждого  $i$ -го режущего лезвия в любой момент времени описывается текущим радиус-вектором  $\rho_i(\psi)$ , где  $\psi$  — текущий угол поворота инструмента от начала обработки. Для моделей формообразования многолезвийными инструментами рассмотрены смежные режущие лезвия. При формообразовании каждое  $i$ -е лезвие инструмента срезает суммарный слой материала площадью  $\Delta_i = \Delta_{1i} + \Delta_{2i}$ . На площади срезаемых слоев влияют такие параметры, как геометрия заточки режущих лезвий по углу в плане  $\varphi_i$ , предыдущее положение радиус-вектора  $\rho_{i+1}(\psi - 2\pi i/z)$  каждого лезвия ( $2\pi i/z$  — запазды-

<p>Модель В1</p>	<p>Получистовая и чистовая обработка. Зенкерование и развертывание отверстий многолезвийными зенкерами и развертками с относительно большими подачами <math>S/z \geq \tau</math></p>
<p>Расчетная схема</p>	
<p>Математическая модель</p>	
$  \begin{cases}  S_i = (S/z) + (O_s/2) \cos[n(\psi + 2\pi i/z)], \\  \Delta_{1i} = [\rho_i(\psi) - (r_0(\psi))] [S_i - (\tau + a_i - f_i)/2], \\  \Delta_{2i} = [\rho_i(\psi) - \rho_{i+1}(\psi - 2\pi/z)] [S_i + \tau - (f_i - f_{i+1})/2], \\  \Delta_{1(i+1)} = [\rho_{i+1}(\psi) - (r_0(\psi + 2\pi/z))] [S_{i+1} + (\tau + a_i + f_{i+1})/2], \\  \Delta_{2(i+1)} = [\rho_{i+1}(\psi) - \rho_i(\psi - 2\pi/z)] [S_{i+1} - \tau + (f_i - f_{i+1})/2], \\  r_0(\psi) = r_0'(\psi) + \omega \sin(\psi), \\  a_i = [2\tau / (D_{mn} - d_0)] [r_0(\psi + 2\pi/z) - d_0/2], \\  f_i = [\rho_i(\psi) - \rho_{i+1}(\psi - 2\pi/z)] / \operatorname{tg}(\varphi_i), \\  P_{y_i}^x = \sum_{i=1}^z K_i \Delta_i \cos(2\pi i/z), \\  P_{y_i}^y = \sum_{i=1}^z K_i \Delta_i \sin(2\pi i/z), \\  J_{x,x}(\psi) = P_{y_i}^x \cos(\psi) + P_{y_i}^y \sin(\psi), \\  J_{y,y}(\psi) = P_{y_i}^x \sin(\psi) + P_{y_i}^y \cos(\psi), \\  \alpha_i = \pi - \psi - (2\pi i/z) - \operatorname{Arctg}[y(\psi)/x(\psi)], \\  \delta_i(\psi) = \sqrt{x^2(\psi) + y^2(\psi)}, \\  \rho_i(\psi) = \sqrt{(D_{mn}/2)^2 + \delta_i^2(\psi)} - D_{mn} \delta_i(\psi) \cos(\alpha_i),  \end{cases}  $ <p>где <math>\rho_i(\psi)</math> – радиус-вектор вершины <math>i</math>-го лезвия инструмента; <math>r_0(\psi)</math> – радиус-вектор предварительно обработанного отверстия с учетом погрешности настройки <math>\omega</math>; <math>D_{mn}</math> – диаметр инструмента и <math>\psi</math> – его текущий угол поворота; <math>z</math> – количество зубьев (лезвий) инструмента; <math>J_x, J_y</math> – радиальная жесткость элементов ТС в направлении осей <math>X</math> и <math>Y</math>; <math>P_{y_i}^x, P_{y_i}^y</math> – проекции на оси <math>X</math> и <math>Y</math> суммарной радиальной силы резания <math>P_{y_i}</math>; <math>K_i</math> – коэффициенты резания; <math>x(\psi), y(\psi)</math> – смещение оси инструмента в направлении осей <math>X</math> и <math>Y</math>; <math>\delta_i(\psi)</math> – суммарное смещение оси инструмента</p>	

вающий аргумент), толщина срезаемого слоя  $S_i$  лезвия (зависит от подачи на зуб  $S/z$ , осевых биений шпинделя  $O_s$  и их числа  $n$  за один оборот), осевое биение смежных лезвий  $\tau$ , а также – радиус-вектор  $r_0(\psi)$  предварительно обработанного отверстия с учетом погрешности настройки  $\omega$ . В моделях принято, что радиальные составляющие силы резания  $P_{yi}$  на каждом лезвии пропорциональны площадям срезаемых слоев.

Предлагаемые модели формообразования решаются путем последовательной подстановки значений предыдущего и текущего положений радиус-вектора, рассчитывая их через равные углы  $\Delta\psi$  поворота режущего инструмента, например, через  $\Delta\psi=1^\circ$ . Такой метод позволяет перевести непрерывный процесс обработки к дискретному виду и использовать при моделировании компьютерную технику. При работе компьютерной программы в цикле вычисляются точки профиля отверстия, формируемые радиус-вектором  $\rho_i(\psi)$  инструмента в любом поперечном и продольном сечениях, т.е. определяется их числовой массив. Далее, зная координаты точек моделируемого отверстия из этого массива, можно перейти к определению его нормируемых ПТ.

### **3. Исследование влияния конструкторско-технологических факторов на точность обработки отверстий**

Разработанные математические модели реализованы при выполнении компьютерных исследований по изучению влияния основных конструкторско-технологических факторов и условий на точность обработки отверстий КМИ. Исследования проведены отдельно для этапов настройки и формообразования с помощью разработанных компьютерных методик.

В компьютерных исследованиях этапа настройки изучалось влияние вида устройства ЧПУ (позиционное или контурное) и класса точности металлорежущего станка (нормальный или повышенный) на точность расположения оси отверстия в детали с системой из трех отверстий. Результаты исследований, на-

пример, показывают, что для станков нормальной точности с позиционными устройствами ЧПУ поле рассеяния расположения оси рассчитываемого отверстия на этапе настройки при проецировании сформированной размерной цепи на координатные оси  $X$  и  $Y$  определяется выпуклым интервалом в виде прямоугольника со сторонами  $\omega_{x3} = 0,040$  мм и  $\omega_{y3} = 0,054$  мм, а минимальный запас точности по расположению оси для выполнения следующего этапа формообразования составляет  $P_x^{\min} = 0,060$  мм и  $P_y^{\min} = 0,063$  мм.

Компьютерные исследования для этапа формообразования проведены для переходов сверления, зенкерования, развертывания и соответствующих им стандартным КМИ. Исследования выполнялись при варьировании таких конструкторско-технологических факторов как осевая подача  $S$ ; главный угол в плане  $\varphi(2\varphi)$ ; осевое биение режущих лезвий  $\tau$ ; осевые биения шпинделя  $O_s$  станка; жесткость режущего инструмента  $J_i$ ; припуск  $h$ ; количество зубьев  $z$  инструмента. По результатам компьютерных исследований построены графики влияния этих факторов на точность формообразования и предложены рекомендации по повышению точности обработки отверстий КМИ на станках с ЧПУ. Например, на переходе сверления для повышения точности отверстий по позиционному отклонению оси необходимо снизить подачу при условии  $S < 2\tau$  или увеличить ее при  $S \geq 2\tau$ . Вывод о существенном влиянии жесткости инструментов на обеспечение точности отверстий использован для разработки новых элементов ТС.

#### **4. Элементы технологической системы для повышения точности обработки отверстий на станках с ЧПУ**

Для повышения точности обработки отверстий на станках с ЧПУ сверильно-фрезерно-расточной группы предложены принципиальные схемы элементов ТС для направления КМИ с учетом специфики этапов настройки и формообразования. На основе принципиальных схем разработаны новые конструкции

быстропереналаживаемых элементов ТС с передним и задним направлением применительно к различным станкам с ЧПУ; некоторые из элементов ТС показаны в табл. 2.

Экспериментальные исследования элементов ТС для направления КМИ проведены в производственных и лабораторных условиях на станках моделей FKrSRS-250, 2P118Ф2, C500/04. В экспериментах была подтверждена работоспособность и эффективность элементов ТС для направления КМИ по обеспечению точности при сравнении с существующими элементами ТС.

## **5. Методика обеспечения точности при обработке отверстий КМИ на станках с ЧПУ**

Разработанная инженерная методика (рис. 2) обеспечения точности на стадии технологической подготовки производства учитывает конкретные условия выполнения этапов настройки и формообразования при обработке отверстий КМИ на станках с ЧПУ. Методика включает два блока: I — блок обеспечения точности на этапе настройки и II — блок обеспечения точности на этапе формообразования. Для эффективного применения методики разработаны алгоритмы и компьютерные программы.

В блоке I путем решения обратной задачи расчета интервальным методом сформированной по заданным условиям настройки размерной цепи и построения выпуклых интервалов, проводится оценка точности расположения оси отверстия для этапа настройки. При сопоставлении полей допуска и рассеяния определяются условия и минимальный запас обеспечения точности расположения оси отверстия. В блоке II этапа формообразования осуществляется расчет ПТ как для отдельных переходов, так и при многопереходной обработке отверстий (с заданной структурой операции) различными типами КМИ, а также выполняется оценка условий обеспечения ПТ, которая производится путем сравнения ПТ, заданных чертежом, и расчетных ПТ. Данная методика позволяет также выполнить отладку технологических процессов обработки отверстий



ЭЛЕМЕНТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ НАПРАВЛЕНИЯ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

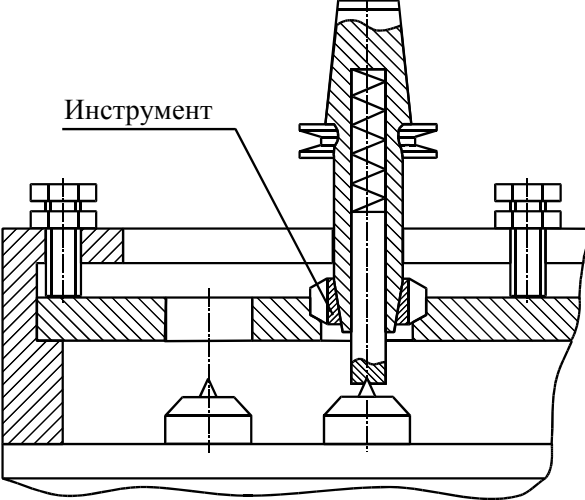
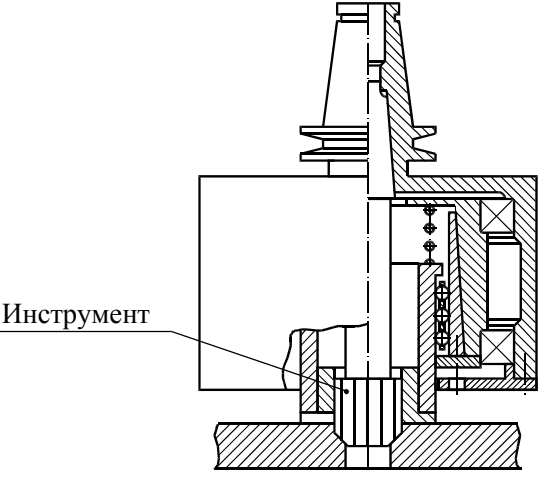
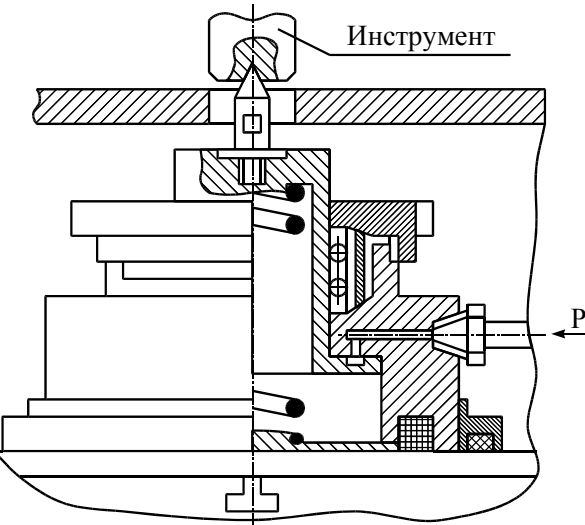
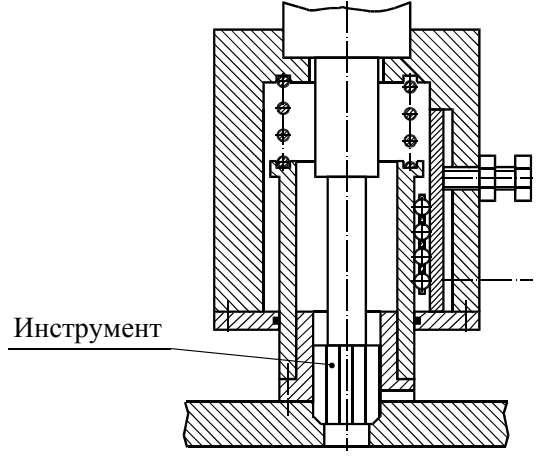
ПЕРЕДНЕЕ НАПРАВЛЕНИЕ		ЗАДНЕЕ НАПРАВЛЕНИЕ	
<p>Устройство для обработки отверстий (а.с. 1230755)</p> 	<p><i>Параметры:</i> D = 24...60 мм, L до 50 мм</p> <p><i>Переходы:</i> зенкерование и развертывание одно- и многолезвийное, расточивание</p> <p><i>Оборудование:</i> сверлильные, фрезерные, расточные, многоцелевые станки с ЧПУ</p>	<p>Устройство для крепления инструмента (а.с. 1540960)</p> 	<p><i>Параметры:</i> D = 15...30 мм, L до 30 мм</p> <p><i>Переходы:</i> зенкерование, развертывание многолезвийное</p> <p><i>Оборудование:</i> многоцелевые станки с ЧПУ</p>
<p>Металлорежущий станок (а.с. 1583222)</p> 	<p><i>Параметры:</i> D = 16...55 мм, L до 45 мм</p> <p><i>Переходы:</i> зенкерование и развертывание одно- и многолезвийное</p> <p><i>Оборудование:</i> сверлильные, фрезерные, расточные, многоцелевые станки с ЧПУ</p>	<p>Приспособление для направления инструмента (а.с. 1158304)</p> 	<p><i>Параметры:</i> D = 20...40 мм, L до 20 мм</p> <p><i>Переходы:</i> сверление, зенкерование, развертывание многолезвийное</p> <p><i>Оборудование:</i> сверлильные, фрезерные, расточные станки с ЧПУ</p>



Рис. 2. Структура методики обеспечения точности при обработке отверстий КМИ на станках с ЧПУ

КМИ на станках с ЧПУ путем коррекции исходных параметров этапов настройки и формообразования.

Работоспособность предлагаемой методики рассмотрена на примере обеспечения эффективности обработки КМИ отверстий  $\varnothing 20H7$  в детали «Плита толкателей» на многоцелевом станке.

### Основные выводы и результаты работы

1. Предложен подход к моделированию точности обработки отверстий КМИ на станках с ЧПУ сверлильно-фрезерно-расточной группы, как к совокупности особенностей достижения точности на этапе настройки станков с ЧПУ (при ко-

ординатных перемещениях КМИ на оси отверстий) и этапе процесса формообразования отверстий (непосредственной обработки), с выделением моделирования точности на этих этапах.

2. Предложен, разработан и обоснован новый (интервальный) метод решения обратных задач размерных цепей.

Установлено, что на этапе настройки станка на операцию интервальный метод обеспечивает моделирование и оценку точности расположения осей отверстий путем использования положений интервальной математики и описания выпуклого плоского интервала замыкающего звена размерной цепи в зависимости от погрешностей позиционирования исполнительных механизмов станка, настройки в “нуль” детали и других факторов.

Разработанный интервальный метод обеспечивает также расчет плоских размерных цепей на операциях разметки и сборки.

3. При сравнении выпуклых интервалов, задающих допустимое расположение оси отверстия (поле допуска) и расположение оси (поле рассеяния) на этапе настройки, сформулированы условия обеспечения точности для этапа формообразования и дана оценка минимального запаса точности, позволяющая определить допустимую величину погрешности расположения оси отверстия для выполнения этапа формообразования, устанавливая этим взаимосвязь этапов.

4. Для этапа формообразования разработана система математических моделей, включающая модели формообразования отверстий КМИ типа двухлезвийных сверл, многолезвийных зенкеров и разверток. Установлен единый подход к моделированию, позволивший описать формирование отверстия режущими лезвиями, которые срезают переменные площади в зависимости от их реальной геометрии, неточности заточки лезвий, переменного припуска и предшествующих положений лезвий, а также осевых биений шпинделя станка.

5. Разработанные математические модели реализованы при выполнении компьютерных исследований, что позволило:

– для этапа настройки оценить влияние на точность расположения оси отверстия — вида устройства ЧПУ (позиционное или контурное) и класса точно-

сти станка (нормальный или повышенный), имеющих различную погрешность позиционирования исполнительных механизмов станка, а также рассчитать запас точности;

– для этапа формообразования оценить влияние условий обработки и основных конструкторско-технологических параметров двухлезвийных сверл, многолезвийных зенкеров и разверток на обеспечение точности отверстий по позиционному отклонению, отклонению оси от перпендикулярности и отклонению от круглости.

6. Для повышения точности обработки отверстий КМИ на станках с ЧПУ с учетом специфики этапов настройки и формообразования предложены принципиально новые конструкции быстропереналаживаемых элементов ТС с передним и задним направлением применительно к различным станкам с ЧПУ. На конструкции элементов ТС получено (в соавторстве) пять авторских свидетельств на изобретения. Результаты выполненных экспериментальных исследований подтвердили работоспособность и эффективность предлагаемых элементов ТС для направления КМИ на станках с ЧПУ.

7. Разработана комплексная методика обеспечения точности на стадии технологической подготовки производства обработки отверстий КМИ на станках с ЧПУ, которая включает два блока: блок обеспечения точности на этапе настройки и блок обеспечения точности на этапе формообразования. Методика реализована в виде прикладных компьютерных программ, которые могут быть использованы как при технологической подготовке производства деталей на станках с ЧПУ, так и в алгоритмах систем металлорежущих станков с компьютерным управлением.

8. Использование результатов работы обеспечивает эффективность обработки отверстий КМИ на станках с ЧПУ, снижая трудоемкость и сроки технологической подготовки производства на 17...24%, уменьшая затраты на отладку операций, повышая точность обработки отверстий по расположению оси в 1,4...2 раза, точность по диаметральному размеру и форме на 15...32%, а также

сокращая на 1 – 2 количество переходов при обработке отверстий с высокими требованиями к ПТ.

9. Результаты работы внедрены или приняты к использованию в производстве на четырех предприятиях, а также применяются в учебном процессе при подготовке инженеров.

### **Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах**

1. Пестов С. П. Комплексный подход к моделированию точности обработки отверстий на станках с ЧПУ// Совершенствование наукоемких технологий и конструкций: Сборник научных трудов. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001. — С. 5–9.

2. Пестов С.П. Интервальное моделирование точности операций в машиностроении// Тематический сборник научных трудов. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 1998. — С. 40–43.

3. Пестов С.П. Моделирование точности настройки станков с ЧПУ на обработку отверстий// Совершенствование наукоемких технологий и конструкций: Сборник научных трудов. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001. — С. 9–12.

4. Пестов С.П. Математическое моделирование в САПР операций обработки отверстий на станках с ЧПУ. — Челябинск: Южно-Уральск. гос. ун-т, 2001. — 29 с. — Деп. в ВИНТИ 13.11.2001, № 2359 – В 2001.

5. Пестов С.П. Моделирование и обеспечение точности обработки отверстий концевыми мерными инструментами на станках с ЧПУ. — Златоуст: Златоустовский филиал Южно-Уральск. гос. ун-та, 1999. — 33 с. — Деп. в ВИНТИ 17.12.99, № 3764 – В 99.

6. Пестов С.П., Мазеин П.Г. Моделирование точности расположения осей отверстий на станках с ЧПУ при настройке// Известия Челябинского научного центра УрО РАН. — 2003. — № 2 (19). — С. 37–41.

7. Пестов С.П., Беляев О.О., Мазеин П.Г. Система математических моделей формообразования отверстий концевыми мерными инструментами на станках с

ЧПУ// Известия Челябинского научного центра УрО РАН. — 2003. — № 4 (21). — С. 83–87.

8. Пестов С.П., Парфиров С.А. Автоматизированная система размерно-точностных интервальных расчетов// Управляющие и вычислительные системы. Новые технологии: Материалы межвузовской научно-технической конференции. — Вологда: ВоГТУ, 2000. — С. 6.

9. Пестов С.П., Беляев О.О. Компьютерное моделирование точности при обработке отверстий в деталях// Управляющие и вычислительные системы. Новые технологии: Материалы межвузовской электронной научно-технической конференции. — Вологда: ВоГТУ, 2001. — С. 93.

10. Лакирев С.Г., Пестов С.П. Моделирование точности операций разметки отверстий// Вестник машиностроения. — 2000. — № 7. — С. 25–27.

11. Хилькевич Я.М., Пестов С.П., Мазеин П.Г. Методы интервальных расчетов размерных цепей// Известия Челябинского научного центра УрО РАН. — 2004. — № 1 (22). — С. 107–111.

12. Лакирев С.Г., Пестов С.П. Моделирование точности обработки отверстий на станках с ЧПУ// Автоматизация и информатизация в машиностроении (АИМ 2000): Сборник трудов первой международной электронной научно-технической конференции. — Тула: ТулГУ, 2000. — С. 223–224.

13. Лакирев С.Г., Пестов С.П. Технологическое обеспечение параметров точности обработки отверстий на станках с ЧПУ// Аэрокосмическая техника и высокие технологии – 2001: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. — Пермь: ПГТУ, 2001. — С. 170.

14. Пестов С.П. Интервальный расчет размерных цепей: Учебное пособие. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001. — 24 с.

15. Пестов С.П. Автоматизированная система "Интервал". Свидетельство № 2000610835 об официальной регистрации программы для ЭВМ от 04.09.2000. РФ РОСПАТЕНТ.

Новизна технических решений подтверждена также авторскими свидетельствами на изобретения № № 1583222, 1230755, 1158304, 1540960, 1784411.

Пестов Сергей Петрович

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ  
ОТВЕРСТИЙ КОНЦЕВЫМИ МЕРНЫМИ ИНСТРУМЕНТАМИ  
НА СТАНКАХ С ЧПУ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ЭТАПОВ НАСТРОЙКИ И ФОРМООБРАЗОВАНИЯ

Специальность 05.03.01 — «Технологии и оборудование  
механической и физико-технической обработки»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

---

Издательство Южно-Уральского государственного университета  
ИД № 00200 от 28.09.99. Подписано в печать 14.10.2004. Формат 60x84 1/16.  
Усл.печ.л. 1,16. Уч.-изд.л. 1. Тираж 100 экз. Заказ 314/59.

---

УОП Издательства. 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76.