

На правах рукописи



**Кучеренко Надежда Александровна**

**РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ  
КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ НА ФРЕЗЕРНЫХ СТАНКАХ С ЧПУ С  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ POWER INSPECT**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание  
степени магистра по направлению Конструкторско-технологическое  
обеспечение машиностроительных производств (151900.68)  
магистерская программа – **Автоматизация конструкторско-технологического  
проектирования (151900.68.01)**

Красноярск 2014

Работа выполнена на кафедре «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» Политехнического института Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет»

**Научный руководитель:**

кандидат технических наук, доцент Пикалов Яков Юрьевич

**Рецензент:**

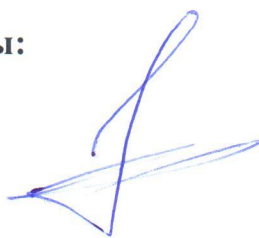
Рыжков Иван Анатольевич, начальник отдела метрологии ОАО «НПП «Радиосвязь»

Защита диссертации состоится «9» июля 2014 г. в 9:00 часов в ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» по адресу:  
660074, г. Красноярск, ул. Ак. Киренского 26, ауд. Г 2-47

С авторефератом магистерской диссертации можно ознакомиться на сайте СФУ <http://edu.sfu-kras.ru/engineering> и в архиве открытого доступа: <http://elib.sfu-kras.ru>

**Руководитель магистерской программы:**

кандидат технических наук,  
профессор



М. П. Головин

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность работы.** Сегодня главная миссия машиностроительной отрасли – это освоение и создание новых технологий производства, т.е. разработка и выпуск высококачественного, высокотехнологичного продукта, востребованного и конкурентоспособного, как на внутреннем, так и на внешнем рынках. Основой системы качества является метрологическое обеспечение, большинство современных проблем российского производства напрямую связано с организацией метрологического обеспечения. Однако, большинство предприятий идут по пути одностороннего развития – вкладываются не малые средства в приобретение и освоение нового технологического оборудования, способного производить обработку с повышенной точностью, но в виду слабого развития метрологической базы у предприятия нет возможности реально оценить точность произведенной продукции.

Актуальность данной работы заключается в наличии проблем метрологического обеспечения:

- 1) устаревшая эталонная база предприятий;
- 2) неудовлетворительное состояние парка средств измерений предприятий;
- 3) противоречие между высокими технологиями обработки и устаревшими технологиями метрологического контроля на предприятиях;
- 4) бессистемность организации метрологического обеспечения предприятий;
- 5) высокая стоимость обрабатывающих центров и координатно-измерительных машин.

**Цель диссертационной работы** – обеспечение требуемой точности и повышение интенсивности производства деталей сложной формы на фрезерных обрабатывающих центрах за счет применения предложенной методики межоперационного контроля на станках с использованием системы измерений Renishaw.

### **Основные задачи исследования:**

1. Анализ состояния метрологического обеспечения и его влияния на качество производимой продукции;
2. Сравнительный анализ современных метрологических средств и поиск наиболее эффективных путей использования технологического оборудования для решения метрологических задач;
3. Разработка методики проведения межоперационного контроля;
4. Выявление факторов, снижающих точность и производительность механической обработки, и минимизация их негативного воздействия;

### **Методы исследования:**

1. Методы математического моделирования на основе топологических методов исследования и численного моделирования, механики твердого тела;
2. Методы многопараметрической оптимизации;
3. Методы планирования эксперимента и регрессионного анализа.

### **Достоверность полученных результатов**

Достоверность теоретически полученных результатов обеспечивается общепринятыми методиками и методами и подтверждается результатами физического эксперимента.

#### **Научная новизна данной работы:**

1. Математическая модель определения отклонений геометрических размеров и алгоритм ее реализации, отличающиеся учетом параметров технологии обработки деталей.
2. Методика межоперационного контроля геометрической точности фрезерованных поверхностей, обеспечивающая минимальные затраты машинного времени для измерений на обрабатывающих центрах.

**Практическая значимость работы** заключается в применении разработанной методики контроля точности размеров, формы и положения поверхностей деталей сложной геометрии на фрезерных станках с ЧПУ. Данная методика ориентирована на промышленные предприятия, имеющие фрезерные станки, оборудованные измерительной головкой, не имеющие при этом современного измерительного оборудования. В частности, к такому типу предприятий относится ОАО «НПП «Радиосвязь», на котором планируется внедрение разработанной методики.

#### **Апробация работы**

Основные положения диссертационной работы и ее отдельные разделы докладывались на:

— Региональной научно-технической конференции магистрантов «Специальное инженерное образование – подготовка современных инженерных кадров» в 2013 году (г. Красноярск);

— 51– ой Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс» в 2013 году (г. Новосибирск, заочная форма выступления).

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Введение.** Рассматриваются общие вопросы и тенденции развития метрологических исследований.

**Первая глава** работы посвящена анализу проблем метрологического контроля в России. Рассмотрены основные факторы, влияющие на современное состояние метрологического обеспечения машиностроительных предприятий, а именно:

- 1) состояние эталонной базы предприятий;
- 2) состояние парка средств измерений предприятий;
- 3) методологические принципы организации метрологического обеспечения предприятия;
- 4) кадровая политика предприятий;
- 5) нормативно-законодательная база метрологического обеспечения.

В рамках первой главы проведен анализ современного метрологического оборудования (таблица 1) и программных средств, предназначенных для проведения геометрического контроля, разработаны рекомендации по их выбору с учетом специфики предприятий.

Таблица 1 – Анализ современных средств измерения

Система измерения	Достоинства	Недостатки	Область применения
Координатно-измерительная машина	<ul style="list-style-type: none"> <li>- высокая точность измерений;</li> <li>- высокая производительность измерений;</li> <li>- возможность выполнения цикла контроля по программе ЧПУ;</li> <li>- совместимость с программным обеспечением различных производителей</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- необходимость специальной термостатированной лаборатории с контролируемой влажностью;</li> <li>- измерения крупногабаритных деталей представляет собой сложную технологическую задачу;</li> <li>- нерациональность использования для проведения межоперационного контроля;</li> <li>- высокая стоимость</li> </ul>	Измерения размеров, отклонений формы и расположения поверхностей сложных корпусных деталей
Координатно-измерительная машина типа «рука»	<ul style="list-style-type: none"> <li>- мобильность;</li> <li>- возможность измерения крупногабаритных деталей;</li> <li>- возможность измерений в труднодоступных местах деталей;</li> <li>- совместимость с программным обеспечением различных производителей;</li> <li>- возможность измерения деталей сложной конфигурации</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- процесс измерения осуществляется вручную;</li> <li>- средняя точность измерения составляет 35-45 мкм;</li> <li>- износ шарниров, приводящий к потере точности оборудования</li> </ul>	Измерение размеров, отклонений формы и расположения поверхностей деталей сложной формы, крупногабаритных деталей
Лазерные сканеры и оптические средства	<ul style="list-style-type: none"> <li>- возможность измерения на больших расстояниях;</li> <li>- высокая скорость измерения и оцифровки;</li> <li>- высокая точность получения трехмерной модели реального объекта;</li> <li>- мобильность;</li> <li>- возможность сканирования в недоступных для других типов местах;</li> <li>- высокое разрешение (точность массива точек не ниже, чем на КИМ)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- необходимость многократного сканирования из-за наличия мертвых зон объекта;</li> <li>- дороговизна моделей высокой точности измерений (5-10 мкм)</li> </ul>	Измерение геометрических параметров объектов, недоступных для других типов средств измерения, реверсивный инжиниринг
Межоперационный контроль на станке	<ul style="list-style-type: none"> <li>- обработка и контроль с сохранением базирования;</li> <li>- возможность выполнения цикла контроля по программе ЧПУ;</li> <li>- минимизация временных затрат на транспортировку детали;</li> <li>- возможность оперативной выработки решения по резуль-</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- невысокая точность измерения (30-40 мкм);</li> <li>- потеря станочного времени;</li> <li>- требуется высокая точность позиционирования инструмента станка с ЧПУ</li> </ul>	Измерение размеров, отклонений формы и расположения поверхностей деталей, обрабатываемых на станке

	татам измерения		
--	-----------------	--	--

**Вторая глава** посвящена теме координатных измерений. Суть координатного метода измерений заключается в последовательном определении значений координат нужного числа точек объекта в принятой системе координат и расчете геометрической поверхности по координатам.

При контроле отверстия достаточно измерить координаты трех точек, позволяющие определить его диаметр и положение центра. Это условие позволяет каждую типовую поверхность или ее сечение представить минимально возможным числом точек. Данное условие можно назвать постулатом приоритета (старшинства).

Этот постулат соответствует основному положению теоретической метрологии, согласно которому измеряемый объект обладает лишь свойствами, а измеряемый параметр принадлежит модели объекта, и результат измерения представляет собой численное значение параметра модели объекта, полученное в результате физического эксперимента – измерения. В практике метрологии важнейшим является вопрос оценки корректности выбора модели. Использование постулата старшинства экономит время контроля за счет некоторого увеличения случайной составляющей погрешности, что требует оценки допустимости такого подхода в каждом конкретном случае.

Принципиально большая информативность координатных измерений позволяет неограниченно расширить набор контролируемых параметров. Однако отдельные координатные точки не дают представления о погрешностях поверхности. Для перехода от координат точек к значениям погрешностей, на базе средств аналитической геометрии был разработан алгоритм расчета отклонений (таблица 2).

Таблица 2 – Математический набор средств, реализуемый в алгоритме

Уравнение и расшифровка величин	Название уравнения и его область применения
$A \cdot x + B \cdot y + C \cdot z + D = 0,$	<i>Общее уравнение плоскости первой степени</i>
где А, В, С, D – некоторые фиксированные числа; они называются коэффициентами уравнения	Общее уравнение плоскости использовалось как основа для разработки алгоритма.
$N\{A; B; C\}$	<i>Нормальный вектор плоскости</i>  Вектор нормали плоскостей используется как элемент, определяющий положение плоскостей относительно друг друга и измеренных точек

Продолжение таблицы 2

$i = \frac{x_0 - x_{\text{изм}}}{ x_0 - x_{\text{изм}} }$ $j = \frac{y_0 - y_{\text{изм}}}{ y_0 - y_{\text{изм}} }$ $k = \frac{z_0 - z_{\text{изм}}}{ z_0 - z_{\text{изм}} }$ <p>где <math>x_0, y_0, z_0</math> – номинальное значение координат;  <math>x_{\text{изм}}, y_{\text{изм}}, z_{\text{изм}}</math> – измеренное значение координат</p>	<p><i>Значения векторов ортонормированного базиса, используемые для переориентации касательных плоскостей</i></p>
$\begin{vmatrix} x - x_0 & y - y_0 & z - z_0 \\ x_1 - x_0 & y_1 - y_0 & z_1 - z_0 \\ x_2 - x_0 & y_2 - y_0 & z_2 - z_0 \end{vmatrix} = 0$	<p><i>Уравнение плоскости, проходящей через любые три точки <math>M_0(x_0; y_0; z_0)</math>, <math>M_1(x_1; y_1; z_1)</math>, <math>M_2(x_2; y_2; z_2)</math>, не лежащие на одной прямой</i></p> <p>Данное уравнение использовалось при определении касательных плоскостей, посредством перебора трех точек, образующих соответствующие плоскости</p>
$d = \frac{A \cdot x + B \cdot y + C \cdot z + D}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}$	<p><i>Формула определения расстояния от точки до плоскости</i></p> <p>Определение отклонения от плоскостности требует значений расстояний от измеренных точек до касательных плоскостей, для определения которых в алгоритме используется данная формула</p>
<p><i>Допущения математической модели:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- для контроля рассматривались только плоскости, параллельные координатным плоскостям;</li> <li>- все не измеренные точки поверхности, считали подчиненными закону линейной интерполяции.</li> </ul>	

В расчете отклонений основной задачей является определение присоединенной плоскости. В соответствии с аксиомой геометрии, через любые три точки можно провести плоскость. На основании данной аксиомы в алгоритме предусмотрен перебор комбинаций из трех точек, определяющие все возможные касательные плоскости. Расстояние от измеренных точек до присоединенной плоскости должно быть минимальным, поэтому из найденного числа касательных плоскостей выбирается только та, расстояние от которой до наиболее удаленной измеренной точки  $\Delta$  будет наименьшим. Такая касательная плоскость будет являться

искомой присоединенной, а ее  $\Delta$  – отклонением от плоскостности измеренной поверхности.

Данный алгоритм был реализован с использованием программных средств MathCAD и в среде Delphi на языке Object Pascal.

*В третьей главе* данной работы описывается проведение экспериментального исследования, и представлены его результаты.

Для проведения эксперимента использовались следующие технические средства: универсально-фрезерный станок HAAS VM3 (3+2 осевой), с системой ЧПУ FANUC-6M, тиски, измерительная головка Renishaw OMP 40-2, измерительный наконечник диаметром 6 мм, ПК, «нуль-модемный» кабель. Также, для сбора данных со станка использовалось программное обеспечение HyperTerminal (версия 5.1).

Целью проведения экспериментального исследования являлось выявление взаимосвязи возникновения отклонения и технологических параметров механообработки деталей.

Полученные данные эксперимента использовались для разработки методики межоперационного контроля корпусных деталей.

Ниже представлен план экспериментальных исследований, каждый пункт которого был выполнен:

1. Разработка детали-образца, построение ее CAD-модели;
2. Разработка конструкторской документации;
3. Составление техпроцессов обработки детали-образца (PowerMILL);
4. Выбор программы обмена данными со станком;
5. Составление программы измерений для детали-образца;
6. Обработка деталей на фрезерном станке HAAS и их измерение на межпереходных этапах;
7. Анализ полученных данных (определение отклонений формы и расположения поверхностей);
8. Составление типового алгоритма контроля изделий.

Перед разработкой детали-образца для исследования был проведен поверхностный анализ производства ОАО «НПП «Радиосвязь». Большинство продукции, изготавливаемой заводом, производится из алюминиевых сплавов. Типовые корпусные детали имеют горизонтальные и вертикальные плоскости, при этом наиболее сложными для обработки являются тонкостенные элементы. Учитывая данные конструктивные особенности, была разработана деталь-образец, представленная на рисунке 1. Геометрическая форма образца содержит плоскости, обработка которых позволила проанализировать итоговую форму поверхностей.

Исследование обработанной тонкой стенки показали, что данный элемент является наиболее податливым и его поверхности имеют наибольшие отклонения формы и месторасположения.

Объем выборки составил девять деталей-образцов из алюминиевого сплава Д16, для которых было разработано три техпроцесса.



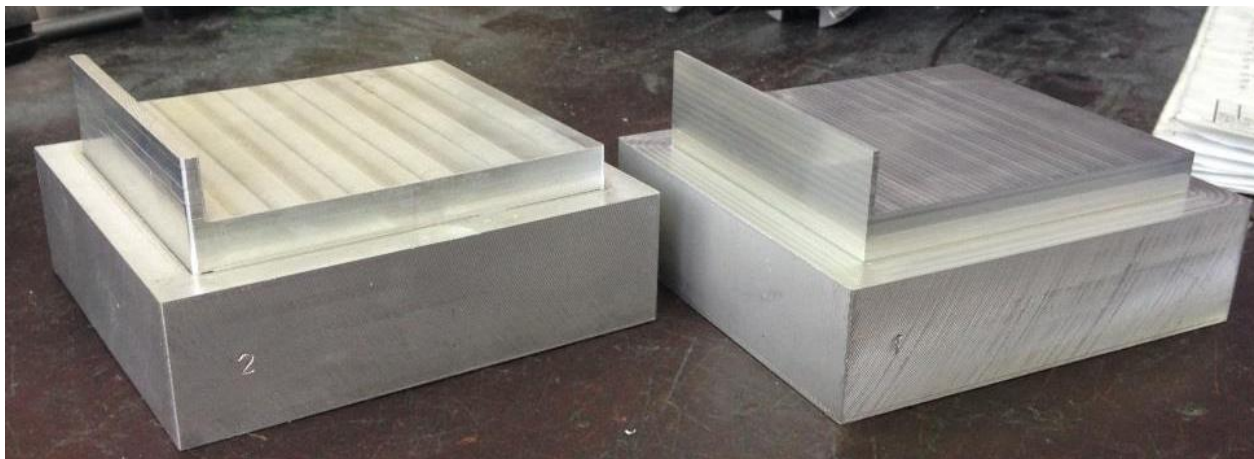


Рисунок 1 –Образец после черновой обработки (слева)  
и после чистовой обработки (справа)

Для исследования взаимосвязи параметров обработки и формы обработанных поверхностей был проведен контроль по 1561 точки. Управляющая программа измерений была составлена таким образом, что точки измерений распределены по поверхностям сеткой шагом в 3 мм.

Другой частью экспериментальных исследований являлось выявления влияния скорости подачи щупа на погрешность измерений. Для этого, проводили измерения одной точки с различными скоростями подачи щупа.

Контроль поверхностей производился после каждого этапа обработки.

Анализ полученных данных позволяет сделать следующий вывод:

- шаг обработки не влияет на точность измерений;
- с увеличением диаметра фрезы увеличивается разброс измеряемых значений;
- с ростом диаметра фрезы увеличиваются силы резания и возрастают погрешности обработки тонкостенных элементов;
- существует линейная зависимость постоянной погрешности от скорости движения щупа, которая была выражена величиной коррекции.
- скорость движения щупа не влияет на разброс измеряемых значений.

С помощью алгоритма были рассчитаны отклонения от плоскостности стенки. Проанализировав координаты точек, образующие присоединенные плоскости, установили, что эти точки распределены по краям измеряемой поверхности. Таким образом, для определений отклонений от плоскостности достаточно измерять наиболее удаленные друг от друга точки контролируемой поверхности.

Данные результаты эксперимента послужили основой для создания методики межоперационного контроля геометрической точности на станке, суть которой можно изложить следующими этапами:

1. Анализ стратегий механической обработки, инструмента и режимов резания с целью определения количества и расположения измеряемых точек;
2. Проведение измерений по намеченным точкам и получение результатов в виде набора точек с координатами;

3. Расчет погрешностей формы и расположения поверхностей по измеренным точкам;
4. Корректировка параметров механической обработки: при возникновении брака – снижать интенсивность режимов резания, при отсутствии брака – интенсифицировать обработку с целью повышения производительности.

### **Заключение**

В результате выполнения диссертации получены следующие результаты:

- сформулированы основные положения методики межоперационного контроля деталей на фрезерных обрабатывающих центрах;
- выявлено влияние стратегии обработки на погрешность формы и расположения фрезеруемых поверхностей;
- установлена зависимость между скоростью движения шупа и результатами измерений;
- выявлены параметры не оказывающие влияние на точность обработки.

Намечены перспективы для дальнейших исследований на базе предприятия ОАО «НПП «Радиосвязь»:

- более подробное экспериментальное исследование, с целью изучения влияния стратегий обработки на форму обрабатываемой поверхности;
- совершенствование методики прогнозирования формы обрабатываемой поверхности;
- совершенствование и доработка методики проведения геометрических измерений.

### **Основные публикации по теме диссертации:**

Основные положения диссертации отражены в публикациях: общее количество работ – 2 из них 1 статья, опубликованная в журнале, рекомендованная ВАК, 1 статьи, опубликованная в других изданиях.

– список основных научных работ:

#### ***статьи, опубликованные в журналах, рекомендованных ВАК:***

1. Кучеренко Н.А., Пикалов Я.Ю. Анализ технического и информационного обеспечения систем контроля геометрической точности деталей // Проблемы машиностроения и автоматизации – принята в печать

#### ***статьи, опубликованные в других изданиях:***

2. Кучеренко Н.А., Пикалов Я.Ю. Анализ современных средств измерения и контроля геометрической точности деталей // Сборник материалов региональной научно-технической конференции магистрантов «Специальное инженерное образование – подготовка современных инженерных кадров»: Красноярск, 2013;
3. Кучеренко Н.А., Пикалов Я.Ю. Анализ современных средств измерения и контроля геометрической точности деталей // Сборник материалов 51-й Международной научной студенческой конференции «Студент и научно – технический прогресс»: Новосибирск, 2013.