На правах рукописи

УДК 621.941.277 – 229.3.001.57

Кетат Владислав Владимирович

РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ РАСТОЧНЫХ СТАНКОВ НА ОПОРАХ КАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДИСКРЕТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ «ШПИНДЕЛЬ-ИНСТРУМЕНТ-ДЕТАЛЬ»

Специальность: 05.03.01 – Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Москва 2004

Работа выполнена в Московском Государственном Техническом Университете им. Н.Э. Баумана

Научные руководители:	Доктор технических наук, профессор А. С. Проников
	Доктор технических наук, профессор Г.Н. Васильев
Официальные оппоненты:	Доктор технических наук, профессор Хомяков В.С.
	Кандидат технических наук, с.н.с. Слипухов А.И.
Ведущее предприятие:	АООТ «Московский завод координатно- расточных станков»

Защита состоится «12» [illegible] 2004г. в ____ часов на заседании диссертац[illegible] [illegible]сковском Государственном Техничес[illegible] по адресу: 105005, Москва, ул. 2-я Ба[illegible]

Ваш [illegible] [illegible]пляре, заверенный печатью, [illegible] г.

У1661312
Кетат В.В.
Разработка метода расчета динамических характеристик шпиндельных узлов

У1661312

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока

Б-ка МГТУ им. Н.Э. Баумана
1661312
Кетат В.В. Разработка мето

Васильев

39т

Баумана

502

ФУЛК

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В современном машиностроении решение проблем повышения точности обработки корпусных деталей и растачивания их основных отверстий являются одними из важнейших задач.

В станкостроении и тяжелом машиностроении расточные операции по сложности и трудоемкости их выполнения занимают одно из первых мест и составляют 35% всей трудоемкости механической обработки корпусных деталей. При этом системы основных отверстий корпусных деталей преимущественно обрабатывают по схеме однорезцового консольного растачивания. При такой схеме обработки уровень точности растачиваемого отверстия определяется как выходными параметрами шпиндельного узла (ШУ) станка, так и характеристиками закрепленного в шпинделе расточного инструмента.

Для достижения постоянно повышающихся выходных параметров станков расточной группы необходимо создание такого метода расчета, который бы содержал как можно более полное и точное (адекватное) описание механики движения ШУ с закрепленным в нем расточным инструментом.

Из этого следует, что без решения этой задачи представляется затруднительным дальнейшее совершенствование конструкций прецизионных ШУ расточных станков.

Целью работы являются:

- создание эффективного метода анализа динамики ШУ на опорах качения с расточным инструментом, позволяющего изучать с необходимой точностью влияние основных конструктивных и технологических параметров ШУ на выходные параметры станка;
- разработка бесконтактного, наглядного и точного метода определения значений и форм частот собственных колебаний расточных резцов.

Методы исследования

Работа включает в себя теоретические и экспериментальные исследования и моделирование на ЭВМ в среде Delphi. Динамические свойства ШУ в данной работе исследовались посредством дискретного моделирования. Экспериментальные исследования проводились с использованием телевизионного спекл-интерферометра.

Научная новизна

Разработана универсальная математическая модель ШУ и программы расчетов динамических характеристик высокоскоростных ШУ на радиально-упорных шарикоподшипниках, отличающаяся:

- рассмотрением пространственной динамики упругого тела шпинделя;

МГТУ
им. Н. Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

- учетом зависимости силы резания от траектории движения инструмента;
- учетом неидеальной формы колец подшипников;
- учетом неидеальной формы обрабатываемой детали.

Экспериментальное подтверждение адекватности модели производилось при помощи телевизионного спекл-интерферометра.

На защиту выносятся:

- математическая модель шпиндельного узла;
- метод расчета динамических характеристик ШУ расточных станков на опорах качения;
- метод определения собственных частот и форм колебаний расточного инструмента;
- результаты теоретических исследований зависимости некруглости обработанного отверстия от частоты вращения шпинделя.

Практическая полезность работы

Создана и сертифицирована программа расчета динамических характеристик ШУ, выполняющая роль эффективного инструмента для проведения прикладных вычислительных экспериментов, которая позволяет:

- расширить и дополнить объем информации о кинематическом состоянии ШУ, а так же повысить ее точность в отношении тех физических параметров состояния шпинделя и расточного инструмента, экспериментальное измерение которых затруднено;
- повысить адекватность модели не только за счет расширения исходных данных об объекте моделирования, но и за счет данных, получаемых в процессе моделирования;
- оценить избирательное влияние отдельных конструктивных, технологических и экспериментальных параметров на процесс формообразования поверхности детали с целью целенаправленного выбора параметров узлов ШУ на стадии проектирования.

Разработан бесконтактный метод точного определения значений и форм частот собственных колебаний расточных резцов с использованием установки на базе телевизионного спекл-интерферометра.

Реализация результатов работы

Результаты работы нашли применение в виде программного комплекса, использованного при проведении плановых научно-исследовательских работ (НИР) в МГТУ им. Н.Э. Баумана и в учебном процессе на кафедре МТ1 «Металлорежущие станки».

Апробация работы

Основные положения и результаты работы обсуждались на:

- Научно-методической конференции, посвященной 35-летию образования факультета «Фундаментальные науки» МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999 г.

- IV международном конгрессе «Конструкторско-Технологическая Информатика 2000», МГТУ «СТАНКИН»2000г.

- 8-ой Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и проблемы измерений» МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002 г.

- расширенных заседаниях кафедры «Металлорежущие станки» МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2003 г.

Свидетельства РОСПАТЕНТА и публикации

По теме диссертации получено свидетельство РОСПАТЕНТА на полезную модель № 14283 «Устройство для определения геометрических характеристик поверхности объекта» от 10 июля 2000 г., свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ «Программа расчета динамических характеристик шпиндельного узла» № 2002611719, а также опубликовано 5 печатных работ.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения и выводов, списка литературы и приложения. Работа изложена на ___ страницах машинописного текста, содержит ___ рисунков, ___ таблиц, ___ приложений; список литературы включает в себя ___наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность решаемых в диссертационной работе проблем, а также формируются её цель и задачи.

Первая глава содержит обзор состояния исследований в области динамического моделирования ШУ. Произведен анализ факторов, вызывающих погрешности обработки при растачивании. Также определены критерии качества ШУ, произведен анализ, предъявляемых к ним требований на основании работ А.С. Проникова, З.М. Левиной, В.Э. Пуша, Д.Н. Решетова, А.М. Фигатнера, В.С. Хомякова, И.А. Зверева, В.Б. Бальмонта, З.М. Левиной, С.Н. Клепикова, А.П. Сегиды, а также зарубежных авторов Н. Опица, А.О. Пальмгрена, И. Брэндляйна и других. Кроме того, представлена модель ШУ как объекта исследования и определены основные требования к динамической модели ШУ.

Произведен обзор существующих динамических моделей расчета ШУ на подшипниках качения. Рассмотрены динамические модели ШУ, разработанные в ЭНИМС (З.М. Левина, И.Г. Горелик), МГТУ СТАНКИН (А.В. Пуш, И.А. Зверев) и МГТУ им. Н.Э. Баумана (П.М. Чернянский). Анализ этих моделей показывает, что существующие методы расчета ШУ имеют ограничения, которые не позволяют учитывать все многообразие факторов, влияющих на точность обработки.

Вторая глава посвящена разработке динамической модели ШУ на основе стержневой модели. Предлагаемая динамическая модель ШУ основывается на расчетной схеме, в которой шпиндель с установленной в нем расточным инструментом считается упругой балкой, установленной на двух податливых неидеальных подшипниках качения и совершающей пространственное движение при взаимодействии с заготовкой. При этом шпиндель имеет:

- прямолинейную нейтральную линию в недеформируемом состоянии;
- ступенчатый закон изменения изгибной и крутильной жесткостей.

Кроме того, учитываются:

- конечные жесткости шпинделя и инструментальной оправки на изгиб и кручение;
- конечные жесткости сопряжения шпинделя и инструментальной оправки на изгиб и кручение;
- неидеальная форма поверхностей беговых дорожек колец подшипников;
- отклонения расположения посадочных мест колец подшипников;
- отклонения формы и расположения поверхностей обрабатываемой детали.

Эквивалентная расчетная схема ШУ представлена на рис.1.

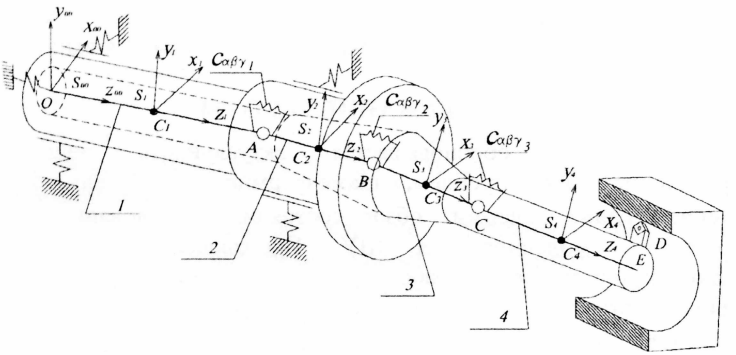

Рис.1. Дискретная расчетная схема

Шпиндель с закрепленным в нем инструментом состоит из n (в качестве примера рассмотрен случай $n=4$) массивных элементов дискретизации (рис.1), условно называемых жесткими стержнями плотности $\rho_{ст}$, длины l_i и диаметра d_i каждый ($i=1..n$).

Для каждого элемента его массово–инерционные характеристики рассчитываются как для абсолютно твердого тела, с формой тела вращения. Элементы дискретизации соединены друг с другом посредством идеальных сферических шарниров (соединений Кардана), состоящих из невесомых безмассовых упругих элементов (по три в каждом шарнире).

Для разработки математической модели введены следующие системы координат:

- S_{00} -$O\,x_{00}\,y_{00}\,z_{00}$ – система координат, жестко связанная со шпиндельной бабкой станка, при этом ось Oy_{00} – вертикальна, а ось Oz_{00} соответствует направлению продольной оси шпинделя в недеформированном состоянии;

- S_i - $C_i\,x_i\,y_i\,z_i$ – системы координат главных центральных осей инерции для i-того инерционного элемента дискретизации;

- S_h - $O_h\ x_h\ y_h\ z_h$ – система координат, связанная с обрабатываемой деталью, расположенной на суппорте станка;

Положения центров масс элементов дискретизации в системе S_{00} заданы с помощью декартовых координат x_{Ci}, y_{Ci}, z_{Ci}. Взаимная ориентация дискретных элементов шпинделя задана в системе углов Крылова. Пространственная ориентация осей системы S_1 относительно S_{00} задается углами $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$. Пространственная взаимная ориентация осей систем S_{i+1} относительно S_i $(1 \le i \le 3)$ задается углами $\alpha_{i+1}, \beta_{i+1}, \gamma_{i+1}$. Схема силового взаимодействия элементов приведена на рис.2.

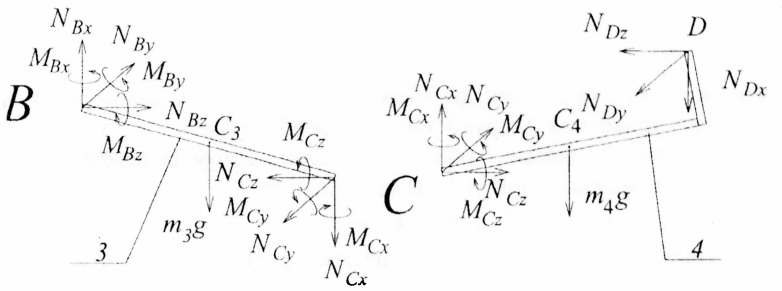

Рис.2. Силовое взаимодействие звеньев
(на примере третьего и четвертого звеньев)

Основными информационными параметрами кинематического состояния расчетной эквивалентной системы служат координаты центров масс и углы поворота главных центральных осей инерции каждого инерционного элемента дискретизации. Поэтому математическая модель динамики эквивалентной механической системы составлена в виде:

- совокупности канонических дифференциальных уравнений движения каждого, отдельно взятого, подвижного элемента дискретизации;
- кинематических уравнений Эйлера для углов Крылова;
- необходимого количества уравнений связи между декартовыми координатами центров масс элементов дискретизации в неподвижной системе координат S_{00};
- математической модели реакций неидеальных подшипников;
- математической модели силы резания.

Дифференциальные уравнения пространственного движения центров масс элементов дискретизации (на примере четвертого элемента) относительно неподвижной системы координат - S_{00} имеют вид:

$$\begin{aligned} m_4 \cdot \ddot{x}_{C_4} &= N_{Cx} - N_{Dx}; \\ m_4 \cdot \ddot{y}_{C_4} &= N_{Cy} - N_{Dy} - m_4 \cdot g; \\ m_4 \cdot \ddot{z}_{C_4} &= N_{Cz} - N_{Dz}; \end{aligned} \tag{1}$$

Динамические уравнения Эйлера для каждого инерционного элемента дискретизации, представленные в проекции на оси соответствующих систем координат - S_i - $C_i x_i y_i z_i$ имеют вид (на примере четвертого элемента):

$$\begin{aligned} J_{4x} \cdot \varepsilon_{4x} &= -(J_{4z} - J_{4y}) \cdot \omega_{C4z} \cdot \omega_{C4y} - c_\alpha \cdot (\alpha_4 - \alpha_3) + M_{CX4} + M_{Dx}; \\ J_{4y} \cdot \varepsilon_{4y} &= -(J_{4x} - J_{4x}) \cdot \omega_{C4x} \cdot \omega_{C4z} - c_\beta \cdot (\beta_4 - \beta_3) + M_{CY4} + M_{Dy}; \\ J_{4z} \cdot \varepsilon_{4z} &= -(J_{4y} - J_{4x}) \cdot \omega_{C4y} \cdot \omega_{C4x} - c_\gamma \cdot (\gamma_4 - \gamma_3) + M_{CZ4} + M_{Dz}; \end{aligned} \tag{2}$$

Уравнения связи, отражающие взаимное положение центров масс элементов дискретизации (на примере третьего и четвертого элемента), имеют вид:

$$\begin{aligned} \Delta_{xC4} &= x_{C4} - x_{C3} - [\Phi_3^T \cdot \frac{l_3}{2} \cdot \overline{k}_{3|S3}]_x - [\Phi_4^T \cdot \frac{l_4}{2} \cdot \overline{k}_{4|S4}]_x; \\ \Delta_{yC4} &= y_{C4} - y_{C3} - [\Phi_3^T \cdot \frac{l_3}{2} \cdot \overline{k}_{3|S3}]_y - [\Phi_4^T \cdot \frac{l_4}{2} \cdot \overline{k}_{4|S4}]_y; \\ \Delta_{zC4} &= z_{C4} - z_{C3} - [\Phi_3^T \cdot \frac{l_3}{2} \cdot \overline{k}_{3|S3}]_z - [\Phi_4^T \cdot \frac{l_4}{2} \cdot \overline{k}_{4|S4}]_z. \end{aligned} \tag{3}$$

Так как основные уравнения динамики представлены в дифференциальной форме, то уравнения связи также преобразуются к эквивалентной дифференциальной форме, обеспечивающей автоматическое затухание невязок уравнений связи при численном решении:

$$\ddot{\Delta}_k + 2 \cdot n_0 \cdot \dot{\Delta}_k + k_0^{\,2} \cdot \Delta_k = 0; \quad k = 1 - 12 \tag{4}$$

где: Δ_k- универсальное обозначение невязок уравнений связи в скалярной форме, k_0, n_0 - постоянные коэффициенты.

Также во второй главе приведены математическая модель неидеального радиального подшипника качения и модель реакции обрабатываемой поверхности заготовки на инструмент, т.е. силы резания.

Модель неидеального радиального подшипника качения:

В настоящей работе рассматривается задача, сводящаяся к отысканию сближений тел в каждой контактной области с учетом отклонений формы поверхностей при известном взаимном положении колец в квазистатических условиях. При этом учитываются неидеальная форма поверхностей беговых дорожек колец подшипников и отклонения расположения посадочных мест колец подшипников. Результатом расчета является значение сил реакции *неидеального* радиального шарикоподшипника на вал при заданном взаимном положении его колец.

Модель силы резания:

При моделировании процесса резания принято, что обрабатываемая заготовка жестко закреплена на суппорте станка, который совершает

поступательное движение с постоянной скоростью v_s в направлении, параллельном оси z, системы координат S_{00}; материал обрабатываемой детали упруго пластичен.

Поверхность обрабатываемой заготовки является внутренней цилиндрической поверхностью, жестко связанной с системой координат S_h – $O_h\ x_h\ y_h\ z_h$. Считается, что оси z систем координат S_h и S_{00} параллельны вследствие того, что отверстие обработано предварительно на этом же станке. Взаимное расположение начал систем координат S_h и S_{00} задается вектором $\overline{e_h}$.

Величины проекций силы резания при растачивании моделируются эмпирическими степенными зависимостями вида:

$$N_{D_{x,y,z}} = 10 \cdot C_p \cdot t_h^{\,x} \cdot s^y \cdot v^n \cdot K_p; \qquad (5)$$

Глубина срезаемого слоя материала t_h определяется (рис.3) расстоянием между точкой пересечения H проекций прямой KD и поверхности цилиндра на плоскость $O_{00}\,x_{00}\,y_{00}$, т.е. окружности радиусом ρ_h и центром в точке O_h. Таким образом, реализована зависимость величины силы резания от траектории движения режущей кромки инструмента.

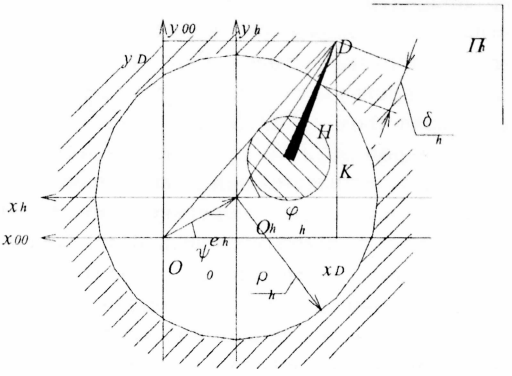

Рис.3. Схема расположения инструмента и заготовки

Представленные математические модели неидеального подшипника качения и силы резания включены в динамическую модель шпиндельного узла. Численные решения полученной системы уравнений выполнялись методом Рунге-Кутта четвертого порядка с шагом интегрирования по времени равным $h = 0.1 \cdot 2\pi / k_0$. Величина частоты k_0 назначалась в 2-3 раза выше чем расчетная частота третьего тона свободных поперечных колебаний «вала», рассматриваемого в виде упругой балки при консольном закреплении. В этом случае частота k_0 выводится из исследуемого низкочастотного диапазона колебаний изучаемой механической системы, что упрощает анализ частотного спектра колебаний механической системы, а также обеспечивается быстрое затухание невязок уравнений связи.

В результате численного решения получена информация о следующих динамических характеристиках:

- кинематике движения режущей кромки инструмента в режиме холостого хода;
- кинематике движения режущей кромки инструмента в режиме обработки;
- диапазоне изменения силы резания и ее проекциях;
- амплитудно-частотных спектрах виброперемещений режущей кромки инструмента и силы резания;
- изменении формы упругой линии шпинделя во времени;
- реакции опор.

На основе рассмотренных математической модели и алгоритмов численного решения систем дифференциальных уравнений автором была разработана «Программа расчета динамических характеристик шпиндельного узла» (свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2002611719). Программа является полностью оригинальной и реализована в среде *DELPHI-4* операционной системы *WIN 98*

Основной процедурой программы является процедура *RUNGE*, в которой производится нахождение корней системы дифференциальных уравнений второго порядка методом Рунге-Кутта четвертого порядка. По полученным данным производятся определение резонансных частот методом Фурье-анализа посредством процедуры *FOURIE* или построение упругой линии балки процедурой *SPLINE*. Графическая интерпретация результатов работы программы осуществляется при помощи пакета *"Component Works"*.

Третья глава посвящена теоретическому и экспериментальному подтверждению адекватности математической модели шпиндельного узла.

С использованием упомянутого алгоритма проведено тестовое теоретическое исследование динамики однородной упругой балки - консоли, исследовано движение в вертикальной плоскости ее упругой линии, низшие частоты изгибных колебаний и внутренние силы в поперечных сечениях.

Сравнение полученных значений прогибов балки в сечениях, проходящих через центры масс звеньев и собственных частот колебаний балки с данными, рассчитанными методами сопротивления материалов, показало высокий уровень их соответствия. При этом относительная погрешность не превышала 10%.

С целью экспериментального подтверждения адекватности математической модели был проведен ряд экспериментов по определению частот и форм собственных колебаний консольно закрепленного металлического ступенчатого стержня с одновременной визуализацией и регистрацией полей перемещений и форм собственных колебаний в реальном времени. Испытания проводились на экспериментальном стенде, оборудованном телевизионным спекл–интерферометром, звуковым генератором ГЗ-109 и электронносчетным частотомером Ч3-33 (рис.4). В качестве экспериментальных образцов использовались ступенчатые стальные

стержни, размеры которых уменьшенным в несколько раз размерам расточных резцов.

По результатам экспериментов на телевизионном спекл-интерферометре получены следующие значения частот собственных изгибных колебаний образцов (Табл.1). Далее был проведен расчет при помощи «Программы расчета динамических характеристик шпиндельного узла» с использованием расчетной схемы консольно закрепленной (заделанной) ступенчатой шестизвенной балки (рис.5).

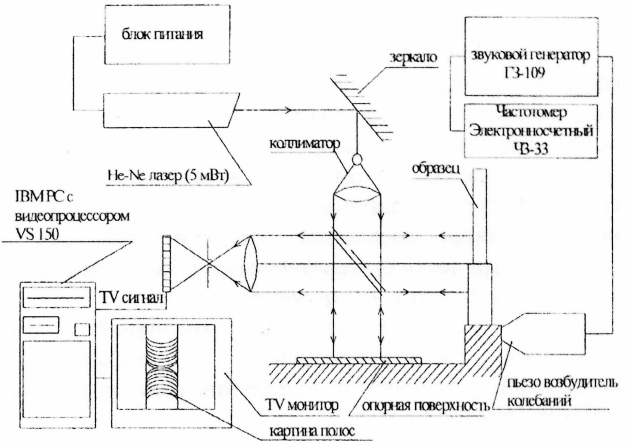

Рис.4.Схема экспериментального стенда на базе телевизионного спекл-интерферометра

Таблица 1

	Экспериментальные значения собственных частот, Гц	Расчетные значения собственных частот, Гц	Относительная погрешность δ%
Образец №1	4900	5270	5.4
	12300	11260	9.2
	21800	19870	10
Образец №2	3100	3200	3.1
	7300	7663	5.2
	19800	18717	5.8
Образец №3	2600	2682	3
	6500	6137	5.9
	13000	11955	8.7

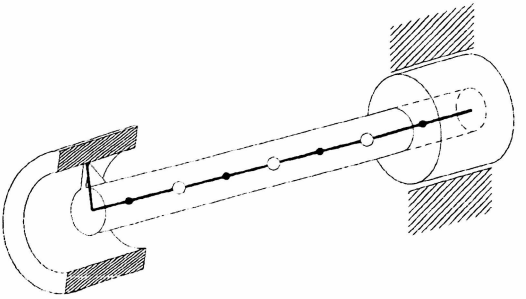

Рис.5. Расчетная схема расточного резца

Вследствие того, что экспериментально полученные значения собственных изгибных частот колебаний обоих образцов отличаются от расчетных не более чем на десять процентов, можно сделать вывод о том, что математическая модель, положенная в основу «Программы расчета динамических характеристик шпиндельного узла» адекватна эксперименту.

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию зависимости геометрических характеристик обработанной поверхности от динамических характеристик инструмента.

Определение частот собственных колебаний расточного резца проводилось на сконструированной и изготовленной автором экспериментальной установке с использованием телевизионного спекл-интерферометра. (рис.6).

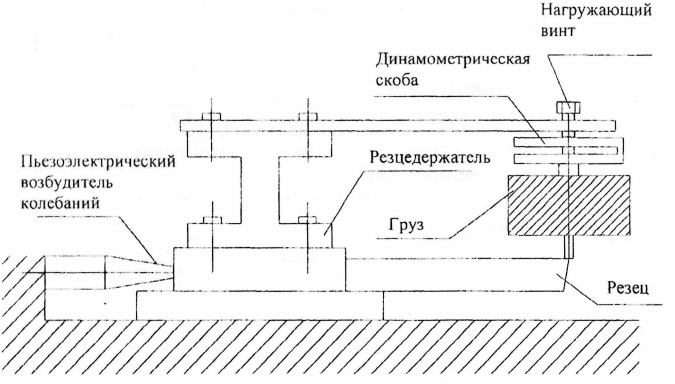

Рис.6. Структурная схема экспериментальной установки

Установка представляет собой резцедержатель с закрепленным в нем исследуемым резцом, и нагрузочное устройство с присоединенным грузом.

Нагрузка на резец создавалась регулировочным винтом через динамометрическую скобу. Резцедержатель закреплялся в тисках, пьезовозбудитель колебаний устанавливался у основания резца. Эксперимент проводился на голографической установке в лаборатории ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского в г. Тураево. Спекл-интерферометр был смонтирован на стационарном голографическом столе. Колебания резца возбуждались в диапазоне частот от *100 Гц* до *200 кГц*. Из распределения полос на экране телевизионного монитора были сделаны выводы о наличии изгибных и крутильных форм колебаний резца. В результате проведения эксперимента получены значения резонансных частот расточного резца.

На основании результатов численных экспериментов было установлено, что колебания резца будут отражаться на форме обработанной поверхности и что амплитуда этих колебаний возрастет при совпадении возмущающей частоты зацепления зубьев приводной шестерни шпинделя с одной из частот собственных колебаний резца. Для обнаружения этой связи был проведен эксперимент, который состоял в расточке внутренних цилиндрических поверхностей резцом с уже известными динамическими характеристиками с последующим исследованием частотных спектров макронеровностей обработанных поверхностей. Схема проведения эксперимента представлена на рис.7.

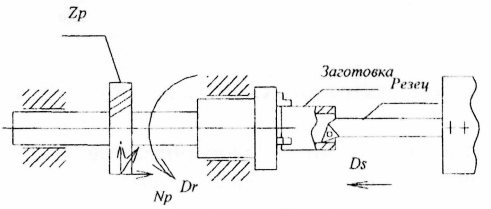

Рис.7. Схема обработки внутренней цилиндрической поверхности

В ходе эксперимента расточной резец с уже известными частотными характеристиками устанавливался в позицию револьверной головки станка с плавной регулировкой частоты вращения шпинделя. Обработка проводилась при частоте вращения шпинделя *N* близкой по значению к:

$$N = \frac{F_i}{Z_p}; \qquad (6)$$

где: *Fi* –резонансная частота колебаний резца; *Zp* – число зубьев приводной шестерни, расположенной на шпинделе станка.

Профили шероховатости поверхностей, обработанных во время эксперимента, регистрировались на кругломере *TALEROND MODEL 2* фирмы

TAYLOR HOBSON. После оцифровки измерительных данных был проведен их частотный анализ. Результаты обработки круглограмм после преобразования Фурье приведены на рис.8.

Далее было проведено сравнение экспериментальных данных с расчетными. Данные были получены при помощи программы расчета динамических характеристик шпиндельного узла с использованием расчетной схемы консольно закрепленной ступенчатой шестизвенной балки (рис.5). По результатам расчета произведен Фурье – анализ, результаты которого показали, что отклонение экспериментально найденной (1090 Гц) и определенных расчетным путем (1210 Гц) значений первой собственной частоты резца составляет 13%.

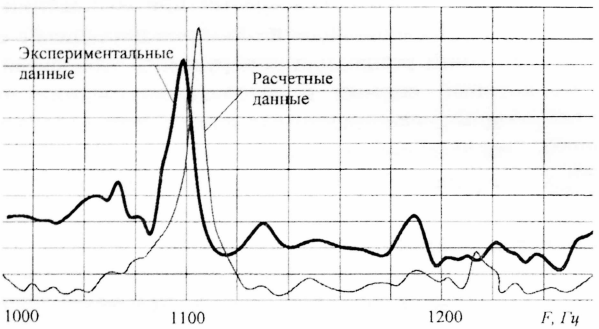

Рис.8. Участок частотного спектра круглограммы поверхности

По результатам проведенных экспериментов был сделан вывод о существенном влиянии динамических характеристик инструмента на качество обработанной поверхности. При работе инструментом, который имеет собственные частоты колебаний, сопоставимые с частотами возмущающих сил механизмов станка, необходимо назначать режимы резания, исключающие возможность резонанса. Для этого необходимо знать спектр собственных частот инструмента и возможные частоты возмущающих сил механизмов станка в зависимости от режима работы, что становится все более актуальным с ростом скоростей резания.

Пятая глава посвящена исследованию зависимости величины некруглости обработанного отверстия от частоты вращения шпинделя станка фрезерно-расточной группы мод. МС12-250. С целью подтверждения применимости «Программы расчета динамических характеристик шпиндельного узла» для практических расчетов был проведен ряд численных экспериментов. В качестве объекта исследования был взят шпиндельный узел станка мод. МС12-250. Результаты численных экспериментов сравнивались с экспериментальными данными, полученными в ходе НИР

«Разработка и внедрение методов автоматизированных испытаний многоцелевых станков» тема № А0154-84 № Гос. Регистрации У25871. Руководитель темы проф. д.т.н. Проников А.С. Исследования проводились как на холостом ходу, так и при растачивании отверстий. За характеристику, определяющую отклонение формы и качество обрабатываемой поверхности детали, была принята круговая траектория оси шпинделя. Данная траектория была получена по результатам одновременных относительных смещений в двух взаимно перпендикулярных направлениях *x* и *y* датчиками относительных колебаний, установленными в опорных точках стола станка.

В ходе исследования было проведено растачивание отверстий Ø 33.2 мм при режимах: $V = 1.07$ м/с (n=11.8 с$^{-1}$); $S = 3.18$ мм/с; $t = 0.5$мм. На кругломере «Калибр» мод. 290 получены круглограммы этих отверстий с фильтром 3 для оценки отклонений формы.

В результате спектрального анализа профиля круглограммы обработанных отверстий были выявлены следующие частоты колебаний станка, проявляющиеся на детали:

- собственные частоты колебаний шпинделя *175 Гц, 350 Гц, 510 Гц*.
- параметрическая частота от передней опоры *240 Гц* (при *n=710об/мин*);
- зубцовая частота от приводного зубчатого ремня на шпинделе – *640 Гц* (при *n=710об/мин*).

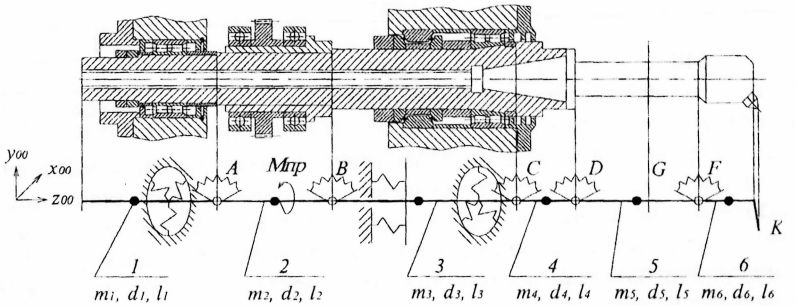

Рис.9. Конструктивная и расчетная схема ШУ станка МС12-250

При помощи программы расчета динамических характеристик шпиндельного узла проводился расчет шпиндельного узла станка мод. МС12-250 с использованием расчетной схемы ступенчатой шестизвенной балки на упругих опорах (рис.9).

Проведен спектральный анализ траектории движения оси шпинделя (точки *G*), в результате чего получен частотный спектр ШУ (рис.13). По результатам Фурье-анализа траекторий получены следующие значения частот собственных колебаний шпинделя (Табл.2)

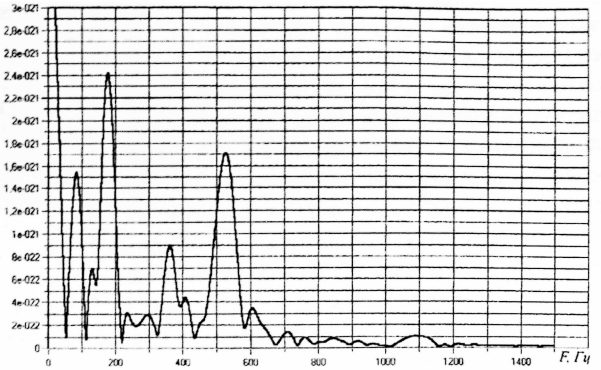

Рис.10. Спектральный анализ профиля траектории оси шпинделя

Таблица 2

Экспериментальные значения собственных частот, Гц	Расчетные значения собственных частот, Гц	Относительная погрешность δ%
175	179	2
240	237	2
350	364	4
510	529	4
640	609	5

Как видно из таблицы по первым частотам достигнуто высокое соответствие эксперименту.

Далее проведено исследование зависимости некруглости обработанного отверстия от величины частоты вращения шпинделя на базе станка МС12-250. Произведена серия численных экспериментов в режиме растачивания отверстий при шести различных частотах вращения шпинделя (от *700* до *1400мин*$^{-1}$). Результатами расчета являются траектории движения режущей кромки резца во время обработки (рис.11).

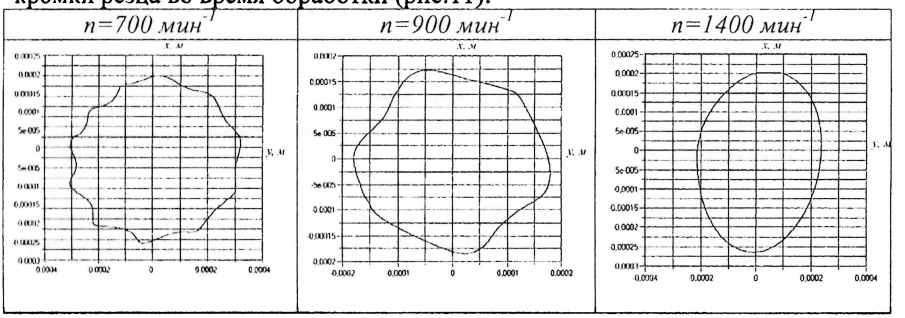

Рис.11. Траектории режущей кромки инструмента при разных частотах вращения шпинделя

Результатом обработки всех траекторий является зависимость величины некруглости от частоты вращения шпинделя (рис.12). Видно, что она *не линейно* убывает при увеличении числа оборотов шпинделя.

Для оценки индивидуального влияния различных факторов на некруглость обработанного отверстия для каждой из шести частот были проведены три расчета при различных начальных условиях:

1.Сила резания была принята постоянной, при этом дорожки качения подшипников имеют идеальную цилиндрическую форму;

2.Сила резания переменна и зависела от траектории движения режущей кромки резца;

3.Сила резания переменна, при этом дорожки качения подшипников имели отклонения от круглости.

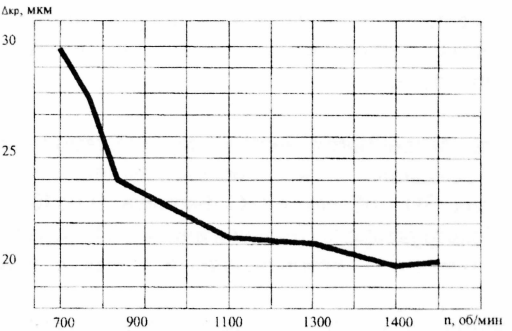

Рис.12. Зависимость величины отклонения от круглости от частоты вращения шпинделя

По результатам расчета построены гистограммы, наглядно демонстрирующие избирательное влияние каждого из перечисленных факторов на величину отклонения от круглости обработанного отверстия.

Также в работе (в приложении) произведены результаты экспериментального определения относительных смещений шпинделя и суппорта вертикально фрезерного станка при помощи комплекса бесконтактных оптических измерений.

Общие выводы и результаты работы

1. Предложена динамическая модель, построенная на основе обобщенной дискретной расчетной схемы пространственного движения шпинделя расточного станка с закрепленным инструментом, которая позволяет:

- получать информацию о траектории движения режущей кромки инструмента во время обработки;

- оценивать избирательное влияние отдельных конструктивных, технологических и экспериментальных параметров на процесс

формообразования поверхности детали с целью целенаправленного выбора параметров узлов ШУ на стадии проектирования.

2. Экспериментально подтверждена адекватность математической модели на примере определения собственных частот колебаний ступенчатых стержней на экспериментальной установке на базе телевизионного спекл-интерферометра.

3. В результате теоретических и экспериментальных исследований проведена оценка влияния частотных свойств расточного резца на характер неровностей обработанной поверхности.

5. В результате исследования шпинделя станка МС12-250 выявлен нелинейный характер зависимости величины отклонения от круглости обработанного отверстия от частоты вращения шпинделя.

6. Выявлена возможность экспериментального определения относительных смещений шпинделя и суппорта вертикально фрезерного станка на комплексе бесконтактных оптических измерений, контроля и диагностики поверхности.

Работы, освещающие основные положения диссертации

1.Перспективы создания и использования комплексов для формометрирования 3D - объектов Г.С. Бабичев, В.В. Кетат, А.В. Сивохин, В.М. Утенков / Конструкторско-Технологическая Информатика 2000: Труды конгресса; В 2-х томах / IV международный конгресс. – М., 2000. – Т.2. - С.45-46

2. Разработка методики и способа бесконтактной регистрации смещений быстровращающихся деталей машин / Г.Н. Васильев, В.В. Кетат, А.В. Сивохин, В.М. Утенков. Состояние и проблемы измерений: Материалы 8-ой Всероссийской научно-технической конференции. – М., 2002.- С.57-58

3. Жуков И.В., Кетат В.В., Русанов П.Г. Анализ динамики упругой балки методом физической дискретизации // Известия вузов. Машиностроение. - № 3. - 2000. - С.3-9

4. Русанов П.Г., Кетат В.В. Плоская модель реакции неидеального радиального подшипника качения // Известия вузов. Машиностроение. - № 4. - 2001. - С.8-13

5. Русанов П.Г., Жуков И.В., Кетат В.В. Анализ механики стержня и нити на основе дискретных моделей // Материалы всероссийской научно-методической конференции, посвященной 35-летию образования факультета «Фундаментальные науки» МГТУ им. Н.Э. Баумана. – М., 1999.- С. 75-76

6. Свидетельство на полезную модель № 14283. Устройство для определения геометрических характеристик поверхности объекта. А.В. Сивохин, В.В. Кетат, В.М. Утенков, Г.С. Бабичев от 10 июля 2000 г.

7. Программа расчета динамических характеристик шпиндельного узла. Кетат В.В. Свидетельство РОСПАТЕНТА об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2002611719.