

М430096
МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

МОСКОВСКОЕ ордена ЛЕНИНА, ордена ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ и ордена
ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧИЛИЩЕ имени
Н.Э.БАУМАНА

На правах рукописи
УДК 621.91.06-529

НИФАГИН СЕРГЕЙ ДМИТРИЕВИЧ

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОМПЕНСАЦИИ
ТЕПЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ МЕТАЛЛОРЕЗУЩИХ СТАНКОВ С ЧПУ

Специальность 05.03.01

Процессы механической и физико-химической обра-
ботки, станки и инструменты

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

Диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Москва - 1985

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище им. Н.Э. Баумана.

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
СТАРОДУБОВ В.С.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
НАХАПЕТЯН Е.Г.

кандидат технических наук
БОРИСОВ Е.И.

Ведущее предприятие: Указано в решении специализиро-
ванного совета

Защита состоится " 1 " апреля 1985 года в 14³⁰
часов на заседании специализированного Совета К 063.15.15 по
технологии машиностроения при Московском высшем техническом
училище имени Н.Э.Баумана по адресу: г.Москва, 2-я Бауманская
ул.5.

Отзыв на автореферат в 1-м экземпляре, заверенный печатью,
просим направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно
Н.Э.Баумана.

Автореферат разосл

Ученый секретарь
специализированного Совета
к.т.н., доцент

Л.-96691 Подп

Тир. 100 экз.

Ротапринт МВТУ. 107005

М430096

Актуальность. Одним из генеральных направлений технического прогресса в машиностроении является широкое внедрение металлорежущих станков с ЧПУ, совершенствование этого прогрессивного технологического оборудования и повышение его точности и надежности.

Процесс обработки деталей является результатом функционирования всех элементов технологической системы. Металлорежущий станок с ЧПУ является одним из наиболее важных и сложных элементов технологической системы, точность которого определяет качество обрабатываемых деталей. Кроме того, он является тем элементом технологической системы, посредством которого реализуются многие функции ее остальных элементов и обеспечивается выполнение заданной технологической операции (процесса) обработки. К металлорежущим станкам с ЧПУ предъявляются требования не только высокой начальной точности, но и сохранения этой точности в течение заданного периода эксплуатации. Это требование особенно важно при построении на основе металлорежущих станков с ЧПУ гибких производственных модулей и систем, которые должны работать длительное время без участия оператора. В настоящее время ведутся работы по созданию металлорежущих станков с ЧПУ, в которых особое внимание уделяется ограничению влияния тепловых деформаций деталей и узлов станка на точность обработки, которые в общем балансе погрешностей обработки могут составлять $40 + 70\%$ от суммарной погрешности обработки. Одним из перспективных путей решения данной проблемы является компенсация погрешностей металлорежущих станков с ЧПУ из-за тепловых деформаций путем внесения в управляющую программу обработки поправок, пропорциональных величинам смещений рабочих органов станка. Построение современных систем ЧПУ на базе микро-ЭВМ с высоким быстродействием и достаточным объемом памяти позволяет применить программный метод автоматической компенсации смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций по всем управляемым осям координат без измерения величин смещений оси шпинделя в процессе работы металлорежущего станка с ЧПУ.

Цель и задачи работы. Целью диссертационной работы является разработка и исследование программного метода автоматической компенсации смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций металлорежущего станка с ЧПУ на основе заранее измеренных и рассчитанных закономерностей их изменения, введенных в память ЭВМ системы управления; разработка и исследование системы ускоренных испытаний металлорежущих станков с ЧПУ для получения закономерностей и величин изменения смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций.



Для достижения этой цели необходимо решить следующие основные задачи : 1. дать обоснование формирования и граничных условий общих закономерностей (типовых функций) изменения смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций металлорежущего станка с ЧПУ вертикальной компоновки в условиях непрерывного режима работы станка с целью дальнейшей компенсации данных смещений; 2. разработать программный метод автоматической компенсации смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций металлорежущего станка с ЧПУ; 3. определить закономерности изменения смещений оси шпинделя металлорежущего станка с ЧПУ вертикальной компоновки в условиях повторно-переменного режима работы станка и разработать алгоритм программы автоматической компенсации смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций на основе этих закономерностей; 4. провести полные экспериментальные исследования смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций металлорежущих станков с ЧПУ вертикальной компоновки с целью определения характера и параметров типовых функций с учетом вероятностной картины их распределения на различных частотах вращения шпинделя при нагреве и охлаждении станка по всем управляемым осям координат; 5. провести анализ метода ускоренных испытаний металлорежущих станков с ЧПУ с целью прогнозирования изменения смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций и разработать алгоритм программы на основе данного метода с применением статистических методов расчета установившегося значения этих смещений; 6. разработать, опробировать и экспериментально исследовать систему ускоренных испытаний металлорежущих станков с ЧПУ по тепловым деформациям и автоматическую систему компенсации смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций металлорежущих станков с ЧПУ; 7. провести анализ путей построения и возможностей использования автоматических систем компенсации смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций для металлорежущих станков с ЧПУ класса NC и CNC; 8. разработать методику реализации автоматических систем компенсации смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций и методику ускоренных испытаний металлорежущих станков с ЧПУ по тепловым деформациям.

Методы исследований. В работе использовались методы теории вероятностей и теории ошибок, теории базирования и размерных цепей, теории надежности, теории линейной алгебры и аналитической геометрии.

Научная новизна диссертационной работы заключается в обосновании наличия ограниченного количества типовых закономерностей изменения смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций в условиях непрерывного режима работы станка и использовании этого положения

для автоматической компенсации указанных смещений программным методом. Данная компенсация проводится на основе заранее измеренных закономерностей изменения смещений оси шпинделя в функции времени и частот его вращения в непрерывном режиме работы станка с ЧПУ, введенных в память системы ЧПУ, и выведенных аналитических зависимостей этих смещений при переходе с одной частоты вращения шпинделя на другую в условиях повторно-переменного режима работы станка.

Практическая полезность. Разработаны: автоматическая система компенсации смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций металлорежущих станков с ЧПУ, система ускоренной оценки характера и величины этих смещений на разных частотах вращения шпинделя, алгоритмы программ работы этих систем, а также инженерные методики реализации этих систем и их программное обеспечение.

Реализация работы. Разработанные автоматическая система компенсации смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций металлорежущих станков с ЧПУ и система ускоренной оценки характера и величины этих смещений, а также методики их реализации внедрены в Научно-исследовательском институте с суммарным годовым экономическим эффектом 31090 руб.

Апробация работы. Результаты исследований докладывались на Всесоюзной конференции "Измерения и контроль при автоматизации производственных процессов", Барнаул, 1982, на Всесоюзной конференции "Робототехника и автоматизация производственных процессов", Барнаул, 1983, на семинаре "Прогрессивные методы технического обслуживания и ремонта оборудования" в МДНТИ им. Ф.Э. Дзержинского, Москва, 1983, а также на заседании кафедры АМ-1 МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1980, 1982.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 3 печатных работы и получено 2 авторских свидетельства на изобретение.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы из 81 наименования, приложений. Содержит 119 страниц основного текста, 52 рисунка, 7 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В первой главе диссертации анализируются исследования в области точности металлорежущих станков, экспериментальные и теоретические исследования тепловых деформаций металлорежущих станков с ЧПУ, а также способы и методы снижения их влияния на точность металлорежущих станков с ЧПУ и на точность обработки деталей.

Высокая степень автоматизации станков с ЧПУ, большая доля машинного времени, дополнительное применение новых механизмов, использование более интенсивных режимов резания увеличивает теплоэнергоемкость станков. Это обуславливает большие избыточные температуры, неравномерность распределения их по объему станка и между его элементами, а также приводит к значительным тепловым деформациям, сложным по своему характеру и направлению действия. Проведен анализ работ по исследованию влияния внутренних и внешних источников тепловыделений. Во многих из них показано, что величина влияния тепловых деформаций достигает значительных величин, соизмеримых с величиной допуска на обрабатываемое изделие или с величиной допуска на точность перемещений узлов станка.

Результатом тепловых деформаций узлов и деталей станка является, как правило, смещение шпинделя металлорежущего станка с ЧПУ в направлении осей координат Ox , Oy , Oz и его угловые повороты вокруг этих осей. В ряде работ отмечается, что в условиях повторно-переменного режима работы металлорежущего станка с ЧПУ, когда обработка ведется на различных частотах вращения шпинделя и происходит частичное остывание станка при останове шпинделя во время снятия деталей или обеденного перерыва, характер смещения оси шпинделя из-за тепловых деформаций зависит от уже имеющейся величины смещений оси шпинделя в данный момент времени и вида закономерности изменения смещений оси шпинделя при непрерывном режиме работы станка на данной частоте вращения (останова) шпинделя. Анализ работ по тепловым деформациям металлорежущих станков показывает, что большинство исследований тепловых деформаций проводится не при обработке деталей, а при вращении шпинделя на холостом ходу. В данной работе анализ развития смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций металлорежущих станков с ЧПУ вертикальной компоновки проводился также при вращении шпинделя на холостом ходу.

Способы и методы уменьшения влияния тепловых деформаций на точность металлорежущих станков с ЧПУ можно разделить на конструкторские, технологические, организационно-технические и с помощью систем управления и компенсации. Не отрицая важности первых трех направлений, следует отметить, что возможности их ограничены - они могут только до некоторой степени уменьшить величину тепловыделений. Применение же систем управления и компенсации тепловых деформаций позволяет не только увеличить начальную точность металлорежущих станков с ЧПУ, но и решить задачу более длительного сохранения этой точности, независимо от тепловых деформаций в процессе эксплуатации.

Методы уменьшения влияния тепловых деформаций на точность металлорежущих станков с ЧПУ с помощью систем управления и компенсации подразделяются на четыре группы: управление тепловыделением и стабилизация температуры нагрева (тепловых деформаций); управление тепловыми деформациями путем направленного нагрева и охлаждения; компенсация линейных смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций путем внесения в управляющую программу обработки поправок, пропорциональных этим смещениям; компенсация линейных смещений и угловых поворотов оси шпинделя путем применения специальных механизмов, установленных на столе станка, с приводами для микроперемещений. Анализ возможностей указанных групп систем управления и компенсации показал, что третья группа обладает большими преимуществами по сравнению с другими, а именно: высоким быстродействием, независимостью от источников тепловыделений, малой инерционностью, возможностью проведения компенсации одновременно по всем управляемым осям координат, не требует больших экономических затрат.

Рассмотрение имеющихся работ по исследованию тепловых деформаций металлорежущих станков с ЧПУ показывает, что анализ характера и величин смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций в этих станках проводится при непрерывном режиме работы без обоснования формирования закономерностей изменения смещений оси шпинделя и их граничных условий; нет вывода аналитических зависимостей изменения смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций в условиях повторно-переменного режима станка. Имеется незначительное число работ, посвященных возможностям повышения точности металлорежущих станков с ЧПУ путем применения автоматических систем компенсации тепловых деформаций, особенностям их построения.

Во второй главе рассматриваются закономерности изменения смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций металлорежущих станков с ЧПУ вертикальной компоновки, дается обоснование предлагаемого программного метода автоматической компенсации смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций этих станков, разрабатывается метод ускоренных испытаний металлорежущих станков с ЧПУ как основа прогнозирования изменения смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций.

Анализ теоретических и экспериментальных исследований общих закономерностей изменения смещений оси шпинделя станка с ЧПУ вертикальной компоновки в условиях непрерывного режима станка показывает, что при нагреве и охлаждении металлорежущих станков с ЧПУ может быть получено шесть типовых функций изменения смещений оси шпин-

шпинделя во времени. В работе дано обоснование формирования данных типовых функций и их граничных условий.

Анализ закономерностей изменения смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций металлорежущего станка с ЧПУ вертикальной компоновки в условиях повторно-переменного режима работы станка показывает, что текущее смещение оси шпинделя зависит от следующих факторов: имеющейся в данный момент времени величины смещения оси шпинделя, типовой функции этих смещений на данной частоте вращения (останова) шпинделя, параметров данной типовой функции, последовательности частот вращения шпинделя и продолжительности работы на каждой частоте вращения (останова).

Используя положение о наличии вполне определенного количества видов типовых функций изменения смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций был разработан программный метод автоматической компенсации данных смещений по всем управляемым осям координат без измерения величин смещений оси шпинделя в процессе работы металлорежущего станка с ЧПУ (а.с. № 1041226).

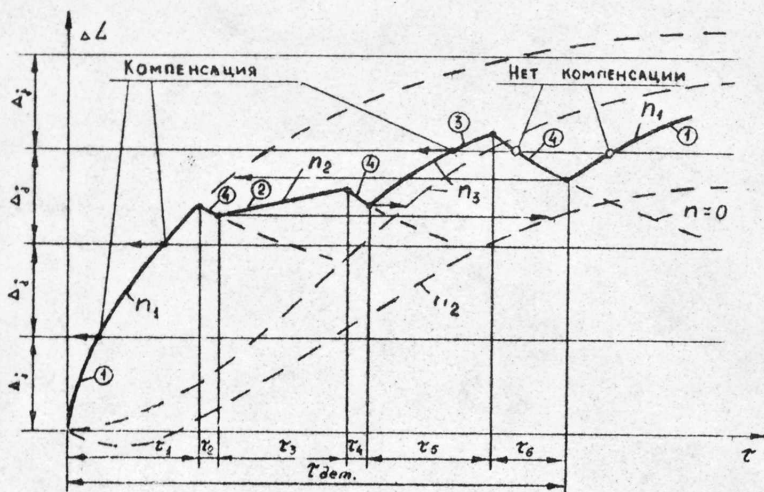


Рис. 1. Принцип автоматической компенсации смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций станка по одной координате программным методом

Суть предложенного метода заключается в следующем (см. рис. 1). Экспериментально для конкретного металлорежущего станка с ЧПУ определяются типовые функции изменения смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций по всем осям координат для соответствующих частот вращения шпинделя n_i . Эти данные вводятся в память ЭВМ системы ЧПУ. В последующем при работе станка, зная величину частоты вращения n_i и время работы на этой частоте, ЭВМ системы ЧПУ производит постоянный расчет смещений оси шпинделя станка из-за тепловых деформаций по соответствующим типовым функциям и при достижении определенной величины Δ_i этих смещений производится автоматическая компенсация путем соответствующего дополнительного перемещения рабочих органов станка. Компенсация производится периодически как при нагреве, так и при охлаждении станка. Величина Δ_i устанавливается исходя из дискретности применяемой на данном станке системы ЧПУ. Для реализации данного метода выведены аналитические зависимости смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций в условиях повторно-переменного режима работы на примере металлорежущего станка с ЧПУ вертикальной компоновки:

$$\Delta L_{i(i+n)} = [\Delta L_{y(i+n)} - \Delta L_{(i)} - \Delta L_{y2(i+n)}] \cdot [1 - e^{-\beta_1(i+n) \cdot \tau_{i+n}}] + \Delta L_{(i)}; \quad (1)$$

$$\Delta L_{(i+n)} = \Delta L_{y(i+n)} \cdot \{1 - e^{-\beta_1(i+n) \cdot [\tau_{L(i+n)} + \tau_{i+n}]}\} - \Delta L_{y2(i+n)}; \quad (2)$$

$$\Delta L_{(i+n)} = \Delta L_{y(i+n)} \cdot \{1 - e^{-\beta_1(i+n) \cdot [\tau_{L(i+n)} + \tau_{i+n}]}\} - \Delta L_{y2(i+n)} \cdot \{1 - e^{-\beta_2(i+n) \cdot [\tau_{L(i+n)} + \tau_{i+n}]}\}; \quad (3)$$

$$\Delta L_{(i+n)} = [\Delta L_{(i)} - \Delta L_{y(i+n)} + \Delta L_{y2(i+n)}] \cdot e^{-\beta_0 \tau_{(i+n)}} + \Delta L_{y(i+n)} - \Delta L_{y2(i+n)}; \quad (4)$$

$$\Delta L_{(i+n)} = \Delta L_{y(i+n)} \cdot [1 - e^{-\beta_1(i+n) \cdot \tau_{(i+n)}}] - \Delta L_{y2(i+n)} [1 - e^{-\beta_2(i+n) \cdot \tau_{(i+n)}}]; \quad (5)$$

$$\Delta L_{(i+n)} = [\Delta L_{y(i+n)} - \Delta L_{(i)}] \cdot [1 - e^{-\beta_1(i+n) \cdot \tau_{(i+n)}}] + \Delta L_{(i)}; \quad (6)$$

$$\Delta L_{(i+n)} = \Delta L_{y(i+n)} \cdot \{1 - e^{-\beta_1(i+n) \cdot [\tau_{L(i+n)} + \tau_{i+n}]}\}; \quad (7)$$

$$\Delta L_{(i+n)} = [\Delta L_{(i)} - \Delta L_{y(i+n)}] \cdot e^{-\beta_0 \tau_{(i+n)}} + \Delta L_{y(i+n)}; \quad (8)$$

где под $\Delta L_{(i+n)}$ понимается смещение оси шпинделя из-за тепловых деформаций на частоте вращения шпинделя, на которую переходят работать; $\Delta L_{(i)}$ - достигнутый уровень смещений оси шпинделя в данный момент времени; $\Delta L_{y1}, \Delta L_{y2}, \beta_1, \beta_2, \beta_0$ - параметры типовых функций ($\Delta L_{y1}, \Delta L_{y2}$ - установившиеся значения смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций базовых узлов станка; β_1, β_2 - температурные факторы, соответствующие базовым узлам станка; β_0 - температурный фактор, соответствующий этим же узлам при остывании); τ_{L1}, τ_{L2} - мо-

менты времени, соответствующие определенным точкам типовых функций; τ - текущее время. Так как экспериментальное получение информации о характере и величине смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций во всем диапазоне частот вращения шпинделя, необходимой для последующей автоматической компенсации этих смещений программным методом, занимает длительное время, то был взят за основу и опробован метод ускоренной оценки характера и величины смещений оси шпинделя, обеспечивающий значительное сокращение времени проведения испытаний с получением достоверных результатов (а.с. № 998092). Было предложено определять характер и величины смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций металлорежущего станка с ЧПУ при его нагреве и охлаждении в любой период времени до его тепловой стабилизации на основе информации, полученной экспериментально за короткий начальный промежуток времени. При этом данные измерения производят через определенные и равные интервалы времени, находят разность текущих и предшествующих величин смещений оси шпинделя и по их сравнению выявляют характер изменения этих смещений, а по их отношению рассчитывают величины этих смещений за весь период до тепловой стабилизации металлорежущего станка с ЧПУ. Для реализации метода ускоренных испытаний металлорежущих станков с ЧПУ выведены математические зависимости расчета параметров шести типовых функций изменения смещений оси шпинделя. Выбор фиксированных интервалов времени между замерами зависит от точности применяемых средств измерения смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций, а также ожидаемых значений ΔL и B , которые определяются по данным исследований аналогичных станков или по приближенным расчетным оценкам этих величин. Приведено соотношение точности средств измерений и времени между замерами с диапазоном отношения разностей текущих и последующих величин смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций металлорежущих станков с ЧПУ.

В третьей главе проведена разработка программного обеспечения системы ускоренной оценки характера и величины смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций металлорежущих станков с ЧПУ и автоматической системы компенсации смещений оси шпинделя, рассмотрены статистические методы расчета среднего арифметического установившегося значения смещений оси шпинделя, а также предложена методика расчета параметров типовых функций изменения смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций для металлорежущих станков с ЧПУ с бесступенчатым регулированием частоты вращения шпинделя.

Алгоритмы программы системы ускоренной оценки характера и вели-

чин смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций основан на положении о том, что при экспериментальном определении смещений оси шпинделя характер типовой функции можно определить по наличию или отсутствию характерных точек (максимума, минимума, точки перегиба), а также знака текущих величин смещений оси шпинделя. Для этого в данном алгоритме программы предусмотрено вычисление первой и второй производных по времени изменения смещений оси шпинделя станка. После определения характера типовой функции по предложенным математическим зависимостям вычисляются ее параметры.

Алгоритм программы автоматической системы компенсации смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций был разработан для металлорежущего станка с ЧПУ вертикальной компоновки мод. 6520Ф3 по координате "У", учитывая его термосимметричность в плоскости ZOX. В память микро-ЭВМ "Электроника-60" заложены статистически обработанные параметры типовых функций изменения смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций по координате "У" для всех частот вращения шпинделя, а также параметры типовой функции остывания станка. В основу алгоритма программы автоматической системы компенсации смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций металлорежущих станков с ЧПУ положены математические зависимости, выведенные во второй главе при разработке программного метода. Оба разработанных алгоритма программ реализованы на языке "Ассемблер" для микро-ЭВМ "Электроника-60".

Для реализации программного метода автоматической компенсации смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций металлорежущих станков с ЧПУ необходимо знать достоверность предварительной информации, то есть соотношение систематической и случайной составляющей смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций, а также величину рассеивания экспериментально определенных типовых функций во всем диапазоне частот вращения шпинделя станка. С этой целью на станке с ЧПУ мод. 6520Ф3 по координате "У" была проведена серия экспериментов по определению смещений оси шпинделя на частотах вращения шпинделя: 200 об/мин, 800 об/мин, 1600 об/мин. Испытания проводили при вращении шпинделя на холостом ходу. Было показано, что с помощью статистических методов расчета среднего арифметического установившегося значения смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций металлорежущих станков с ЧПУ можно рассчитывать параметры типовых функций изменения смещений оси шпинделя с определенной, наперед заданной точностью.

Предложена методика расчета параметров типовых функций изменения смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций металлорежу-

ших станков с ЧПУ с бесступенчатым регулированием частоты вращения шпинделя. В этом случае предварительно проводятся испытания по определению смещения оси шпинделя из-за тепловых деформаций на верхнем и нижнем краях диапазона частот вращения шпинделя. Получены выражения для определения параметров типовых функций:

$$\Delta L_{y(i)} = \frac{(\Delta L_{y_{max}} - \Delta L_{y_{min}})(n_i - n_{min})}{(n_{max} - n_{min})} + \Delta L_{y_{min}}; \quad (9)$$

$$B_{(i)} = \frac{(B_{max} - B_{min})(n_i - n_{min})}{(n_{max} - n_{min})} + B_{min}; \quad (10)$$

где $\Delta L_{y(i)}$, $\Delta L_{y_{max}}$, $\Delta L_{y_{min}}$ — установившиеся значения смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций базовых узлов станка на частотах вращения шпинделя n_i , n_{max} , n_{min} , соответствующих исследуемой частоте, верхней и нижней границе диапазона частот вращения шпинделя; B_{max} , B_{min} , $B_{(i)}$ — температурный фактор на верхней и нижней границах диапазона и на исследуемой частоте вращения шпинделя. Если внутри диапазона происходит переход от одной типовой функции изменения смещений оси шпинделя к другой, то на основе знания тенденции перехода методом половинного разбиения опытным путем находят граничные частоты вращения шпинделя.

Аналогичный подход предложен для расчета параметров типовых функций с учетом влияния относительного положения шпиндельной бабки.

В четвертой главе приводятся экспериментальные исследования бесконтактной системы ускоренных испытаний металлорежущих станков с ЧПУ по определению характера и параметров типовых функций изменения смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций и автоматической системы компенсации этих смещений, метрологические испытания вихретоковых преобразователей, расчет погрешностей установки вихретоковых преобразователей, сравнительный анализ полных и ускоренных испытаний по определению характера и параметров типовых функций изменения смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций металлорежущего станка с ЧПУ вертикальной компоновки, а также рассчитанных по методике испытаний для металлорежущих станков с ЧПУ с бесступенчатым регулированием частоты вращения шпинделя, дается анализ путей построения и возможностей использования автоматических систем компенсации смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций для металлорежущих станков с ЧПУ класса NC и CNC.

Для реализации предложенного метода ускоренной оценки харак-

тера и величины смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций в производственных условиях была разработана измерительная система, блок-схема которой для одного канала представлена на рис. 2. Данная измерительная система работает следующим образом. В микро-ЭВМ "Электроника-60" вводится разработанная программа определения характера и параметров типовых функций изменения смещений оси шпинделя при нагреве и охлаждении металлорежущего станка с ЧПУ, которая затем переводится в память запоминающего устройства микро-ЭВМ. С блока кодирования частоты вращения шпинделя или посредством печатающего устройства в микро-ЭВМ вводится код частоты вращения шпинделя. Информация о смещениях оси шпинделя металлорежущего станка измеряется с использованием оправки, установленной в шпинделе станка. Сигнал, поступающий от вихретокового датчика, усиливается, преобразуется из аналогового вида в цифровой и поступает в микро-ЭВМ, из которой данные о характере и параметрах получаемых типовых функций за весь период до установившегося режима выводятся на печать. В современных системах ЧПУ, построенных на основе микро-ЭВМ, оценка смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций предлагаемым методом может проводиться с использованием непосредственно системы ЧПУ металлорежущего станка с добавлением только измерительного устройства 1.

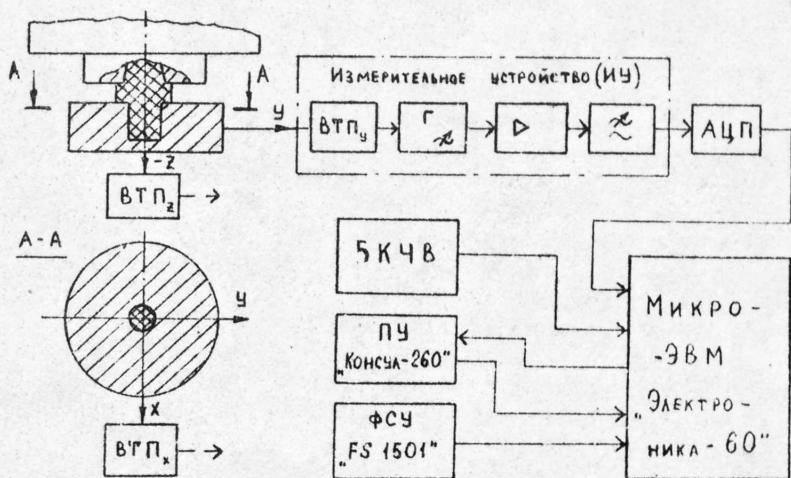


Рис. 2. Блок-схема бесконтактной системы ускоренных испытаний металлорежущих станков с ЧПУ

Важным элементом бесконтактной системы ускоренных испытаний является измерительный элемент – вихретоковой преобразователь (ВТП) ПД-4М. Проведенные метрологические исследования показали, что данный тип ВТП может быть использован в составе различных систем для измерения линейных размеров и перемещений токопроводящих объектов. Экспериментально определено, что суммарная погрешность измерения при его применении не превышает 2 мкм. Проведен расчет погрешности установки вихретоковых преобразователей. Доказано, что для данного типа измерительной оправки и погрешности установки ВТП по осям координат станка в результате смещения оси шпинделя из-за тепловых деформаций в пределах 100 мкм, погрешность измерения не превышает 0,1 мкм, что практически не влияет на результат измерений.

Экспериментальные исследования общих закономерностей изменения смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций в условиях непрерывного режима работы станка проводились на станках с ЧПУ вертикальной компоновки мод. 6P11Ф3 и 6520Ф3. Измерения смещений оси шпинделя металлорежущего станка с ЧПУ мод. 6520Ф3 проводились по координате "У" при вращении шпинделя на холостом ходу в диапазоне частот вращения шпинделя $31,5 \pm 1600$ об/мин. Ошибка определения смещений оси шпинделя методом ускоренной оценки при установившемся режиме не превышает 10% по сравнению с проведенными полными испытаниями. Если при полных экспериментальных исследованиях на шести частотах вращения шпинделя потребовалось в общей сумме 108 часов, то при ускоренных испытаниях предложенным методом – в три раза меньше. При статистических методах расчета среднего установившегося значения смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций выигрыш во времени в зависимости от объема испытаний возрастает в 7–10 раз. Исходя из выбранной точности определения значений параметров типовых функций изменения смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций достаточное количество экспериментов на одной частоте вращения шпинделя не превышает четырех.

Для проверки методики испытаний металлорежущих станков с ЧПУ с бесступенчатым регулированием частоты вращения шпинделя было проведено сравнение рассчитанных в диапазоне частот 200 ± 1600 об/мин и статистически обработанных данных ускоренных испытаний металлорежущего станка. Ошибка определения смещений оси шпинделя, рассчитанных по данной методике, в установившемся режиме не превышает 10 % значений смещений оси шпинделя, определенных ускоренным методом и статистически обработанными.

Автоматическая система компенсации смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций была разработана и испытана на станке мод.

652033 с системой ЧПУ НЗЗ-ІМ с шаговым приводом подачи по координате "У". Система работает следующим образом. В соответствии с программой автоматической компенсации микро-ЭВМ "Электроника-60" вырабатывает импульс коррекции, который, в зависимости от направления смещения оси шпинделя, поступает на вход одного из устройств компенсации. На другие входы устройств компенсации поступают соответствующие импульсы с интерполятора устройства ЧПУ. Устройство компенсации работает по принципу - не пропускать столько импульсов основной программы, сколько импульсов коррекции поступает от микро-ЭВМ. Последовательности импульсов, скорректированные на величину смещения оси шпинделя, с выхода устройств компенсации поступают на соответствующие входы устройства управления шаговым приводом подачи. Экспериментально показано, что если без применения автоматической системы компенсации максимальная погрешность из всех реализаций на холостом ходу работы станка находилась в диапазоне 0 ± 60 мкм, то с использованием системы компенсации погрешность снизилась до 13,3 мкм (с учетом погрешности канала измерения). При чередовании обработки детали и работы станка на холостом ходу экспериментально установлено, что степень влияния смещения уровня настройки от действия тепловых деформаций станка по межцентровым расстояниям ($\tau = 210$ мин), выполненным по 10 качеству ($3\sigma 10$), уменьшилась с применением автоматической системы компенсации смещений оси шпинделя в четыре раза.

Проведен анализ путей построения и возможностей использования автоматических систем компенсации смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций металлорежущих станков с ЧПУ класса NC и CNC. Разработана блок-схема автоматической системы компенсации смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций металлорежущих станков с ЧПУ класса NC со следящим приводом. Показано на примере микро-ЭВМ "Электроника-60", что с использованием программного способа реализации комплекса алгоритмов управления и хранения управляющих программ в оперативной памяти устройства ЧПУ класса CNC имеется достаточный резерв времени для выполнения внецикловой программы автоматической компенсации смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций - $17,5 \pm 55$ % общего времени в зависимости от вида интерполяции.

В пятой главе приведены основные положения разработанной методики ускоренной оценки характера и величины смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций металлорежущих станков с ЧПУ и методики реализации автоматических систем компенсации смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций, а также расчет экономической

эффективности и результаты внедрения их в производство.

ВЫВОДЫ

1. На основе анализа имеющихся способов и методов снижения влияния тепловых деформаций на точность металлорежущих станков с ЧПУ с учетом построения современных систем ЧПУ на базе микро-ЭВМ с высокими быстродействием и большим объемом памяти показано, что перспективным направлением является применение программных методов компенсации этих погрешностей.

2. Предложен программный метод автоматической компенсации смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций по всем управляемым осям координат без измерения величин этих смещений в процессе работы металлорежущего станка с ЧПУ путем внесения в управляющую программу обработки поправок, пропорциональных данным смещениям оси шпинделя.

3. Для реализации данного метода выведены аналитические зависимости смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций металлорежущего станка с ЧПУ в условиях повторно-переменного режима его работы, позволяющие рассчитывать величину этих смещений в любой период времени работы металлорежущего станка с ЧПУ во всем диапазоне частот вращения шпинделя.

4. Для ускоренной оценки характера и величины смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций металлорежущего станка с ЧПУ с целью последующего использования этой информации для автоматической компенсации этих смещений взят за основу и доработан метод ускоренных испытаний металлорежущих станков с ЧПУ. Для реализации этого метода выведены математические зависимости расчета параметров шести типовых функций изменения смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций металлорежущего станка с ЧПУ при его непрерывной работе. Дано обоснование формирования и граничных условий данных типовых функций. Доказано, что с помощью статистических методов расчета среднего арифметического установившегося значения смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций металлорежущих станков с ЧПУ можно рассчитывать параметры типовых функций с определенной, наперед заданной точностью.

5. Предложена методика расчета параметров типовых функций изменения смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций для металлорежущих станков с ЧПУ с бесступенчатым регулированием частоты вращения шпинделя. Доказано, что ошибка определения смещений оси шпинделя в установившемся режиме, рассчитанных по данной методике, не превышает 10 % значений, определенных методом ускоренных испы-

таний и статистически обработанными.

6. Для практической реализации метода ускоренной оценки характера и величин смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций составлена программа для микро-ЭВМ, разработана и опробирована в производственных условиях бесконтактная система ускоренных испытаний металлорежущих станков с ЧПУ. Показано, что в современных станках с ЧПУ класса CNC структура системы значительно упрощается, т.к. имеется возможность непосредственного использования ЭВМ системы ЧПУ.

7. Проведенные исследования метрологических характеристик вихретоковых преобразователей (ВТП), входящих в состав измерительного канала бесконтактной системы ускоренных испытаний металлорежущих станков с ЧПУ по определению характера и параметров типовых функций изменения смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций, показали, что данный тип ВТП может быть использован в составе различных систем для измерения линейных размеров и перемещений токопроводящих объектов с суммарной погрешностью измерения не более 2 мкм.

8. Анализ полных и ускоренных испытаний металлорежущих станков с ЧПУ подтверждает общие закономерности смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций в условиях непрерывного режима работы станка, ошибка определения смещений оси шпинделя ускоренным методом при установившемся режиме не превышает 10 % по сравнению с полными испытаниями. Экспериментально показано, что время испытаний по методике ускоренных испытаний с применением статистических методов расчета среднего арифметического установившегося значения смещений оси шпинделя в зависимости от объема испытаний сокращается в 7-10 раз, достаточное количество экспериментов на одной частоте вращения шпинделя не превышает четырех.

9. Для практической реализации предложенного программного метода автоматической компенсации составлена программа для микро-ЭВМ, разработана и опробирована на станке мод. 6520ФЗ с шаговым приводом подачи и системой ЧПУ НЗЗ-1М автоматическая система компенсации смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций по координате "Y". Экспериментально установлено, что с применением данной автоматической системы компенсации максимальная погрешность смещения оси шпинделя из всех реализаций при вращении шпинделя на холостом ходу уменьшилась в пять раз, а при чередовании обработки детали и работы станка вхолостую степень влияния смещения уровня настройки от тепловых деформаций по межцентровым расстояниям уменьшилась в четыре раза.

10. Анализ путей построения и возможностей использования автоматических систем компенсации смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций металлорежущих станков с ЧПУ класса NC и CNC показал, что для станков с ЧПУ класса NC необходимо встраивать микро-ЭВМ, а для станков с ЧПУ класса CNC можно рекомендовать в качестве одной из функций устройства ЧПУ расчет внецикловой программы компенсации и введение коррекции в управляющую программу обработку. На примере микро-ЭВМ "Электроника-60" показано, что имеется достаточный резерв времени для выполнения внецикловой программы компенсации, составляющий 17,5 + 55 % общего времени в зависимости от вида интерполяции.

11. Разработанные автоматическая система компенсации смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций металлорежущих станков с ЧПУ и система ускоренной оценки характера и величины этих смещений, а также инженерные методики реализации этих систем внедрены в Научно-исследовательском институте с суммарным годовым экономическим эффектом, равным 31090 руб.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Нифагин С.Д., Крайшкин М.Т., Уваров А.В. Бесконтактная система ускоренных испытаний тепловых деформаций металлорежущих станков с ЧПУ. - Измерение и контроль при автоматизации производственных процессов.: Тез. докл. Всесоюз. научно-техн. конф. - Барнаул, ч. III, 1982, с. 152.

2. Стародубов В.С., Нифагин С.Д. Способ и устройство ускоренной оценки тепловых деформаций при испытании на точность металлорежущих станков с ЧПУ. - В сб.: Прогрессивные методы технического обслуживания и ремонта оборудования. - М.: МДНТП, 1983, с. 83-89.

3. Нифагин С.Д., Стародубов В.С. Автоматическая система компенсации тепловых деформаций металлорежущих станков с ЧПУ. - Робототехника и автоматизация производственных процессов.: Тез. Всесоюз. научно-техн. конф. - Барнаул, ч. II, 1983, с. 89.

4. А.с. № 998092 (СССР). Способ контроля температур и тепловых деформаций металлорежущего станка и устройство для его осуществления /В.С. Стародубов, А.П. Кузнецов, С.Д. Нифагин. - Оpubл. в Б.И., 1983, № 7.

5. А.с. № 1041226 (СССР). Способ автоматической компенсации тепловых смещений шпинделя металлорежущего станка /В.С. Стародубов, А.П. Кузнецов, С.Д. Нифагин. - Оpubл. в Б.И., 1983, № 34.

