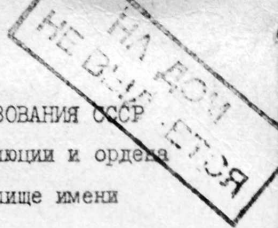


М387021



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

КУЗНЕЦОВ Александр Павлович

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА
СТАНКОВ С ЧПУ НА ИХ ПАРАМЕТРИЧЕСКУЮ НАДЕЖНОСТЬ

Специальность 05.03.01

Процессы и машины обработки металлов резанием;
автоматические линии

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва

1981

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

Научный руководитель - доцент, кандидат технических наук В.С.Стародубов

Официальные оппоненты - лауреат Ленинской премии, доктор технических наук, профессор Б.М.Базров

- доцент, кандидат технических наук А.А.Шатилов

Ведущее предприятие - Московский завод координатно - расточных станков

Защита диссертации состоится "4" января 1982 г.
на заседании специализированного Совета по технологии машиностроения МВТУ им. Н.Э.Баумана, шифр К 053.15.15 по адресу:
107005, Москва, Б-5, 2-я Бауманская ул. д.5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ имени

Н.Э.Баумана.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по указанному адресу.

Автореферат направлен "3" декабря 1981 г.

Р.К.Мешеряков

9 Тираж 100 экз Объем 1 п.л.

M 384621



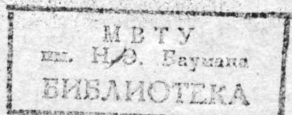
1387621

Кузнецов А. П. Исследование

Актуальность. Одним из генеральных направлений технического прогресса в машиностроении является создание и освоение промышленного производства металлорежущих станков с ЧПУ, автоматических линий и комплексов, управляемых от ЭВМ; систематическое совершенствование и непрерывное повышение надежности этих высокопроизводительных видов оборудования. В принятом в феврале 1980 года постановлении ЦК КПСС и Совета Министров СССР предусмотрена широкая программа повышения технического уровня и конкурентоспособности металлообрабатывающего, литейного и деревообрабатывающего оборудования и инструмента.

Металлорежущий станок с ЧПУ является одним из наиболее важных и сложных элементов технологической системы, определяющим в значительной степени качество обрабатываемых деталей, к точностным параметрам которых требования непрерывно возрастают. Для обеспечения этих требований к точности и надежности металлорежущих станков так же предъявляются высокие требования, причем важной проблемой является не только получение высокой начальной точности, но и сохранение её в течении длительного периода эксплуатации, что характеризует параметрическую надежность станков с ЧПУ. В настоящее время ведутся работы по созданию металлорежущих станков с ЧПУ и обрабатывающих центров третьего поколения, в которых особое внимание уделяется ограничению влияния тепловых деформаций на точность обработки, которые в общем балансе погрешностей обработки составляют 40 - 70% от суммарной погрешности обработки. Тепловые деформации металлорежущих станков носят нестационарный характер и при работе станка изменяются как по величине, так и по направлению, обуславливая постоянное воздействие на формирование показателей качества обработки и изменение уровня его параметрической надежности. Поэтому решение задач создания металлорежущих станков с ЧПУ с заданным уровнем параметрической надежности невозможно без глубокого и всестороннего изучения тепловых процессов, происходящих в станках при их работе, без разработки на этой основе системы мероприятий, обеспечивающих сохранение необходимого уровня параметрической надежности в течении заданного периода эксплуатации.

Цель и задачи работы. Целью диссертационной работы является разработка метода расчета показателей параметрической надежности станков с ЧПУ по их выходным параметрам с оценкой степени влияния



на них теплового режима станка с ЧПУ при экспериментально полученных или рассчитанных значениях погрешностей, формирующих эти параметры.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие основные задачи: 1. разработать методические положения по определению и выбору выходных параметров станков с ЧПУ; 2. разработать математическую модель и метод расчета показателей параметрической надежности станков с ЧПУ по выходным параметрам с оценкой степени влияния на них теплового режима станка; 3. исследовать механизм формирования тепловых деформаций станков с ЧПУ различных компоновок и определить общие закономерности смещения шпинделя из-за тепловых деформаций узлов и деталей станка; 4. провести расчет температурных полей и деформаций шпиндельных узлов и разработать программы для расчета и анализа влияния конструктивных и теплофизических параметров; 5. провести расчет температурных полей колонны станков с ЧПУ различных компоновок; 6. разработать метод ускоренных испытаний температур нагрева и тепловых деформаций станков с ЧПУ различных компоновок с целью последующего определения показателей их параметрической надежности; 7. разработать рекомендации по повышению параметрической надежности станков с ЧПУ различных компоновок.

Методы исследований. При исследовании использовались методы теории вероятностей и математической статистики, теории базирования и размерного анализа, теории надежности, теории теплопроводности и термоупругости, теории линейной алгебры.

Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке методического подхода к определению и выбору выходных параметров станков с ЧПУ различных компоновок и создании метода расчета показателей параметрической надежности этих станков по их выходным параметрам с оценкой степени влияния на них теплового режима; разработке общего механизма формирования смещений шпинделя станков с ЧПУ различных компоновок из-за их тепловых деформаций и создании метода ускоренных испытаний тепловых деформаций и температур нагрева этих станков, а также в разработке математических моделей, алгоритмов и программ расчета и анализа влияния конструктивных и теплофизических параметров на нагрев шпиндельного узла и колонны станков с ЧПУ различных компоновок с целью повышения их параметрической надежности.

Практическая полезность. Разработанные в диссертации положения позволяют проводить расчет и оценку показателей параметрической

кой надежности станков с ЧПУ с оценкой степени влияния их теплового режима, что позволяет наметить пути повышения уровня параметрической надежности станков с ЧПУ, воздействуя на механизм формирования тепловых деформаций этих станков.

Реализация работы. Проведенные исследования позволили разработать практические рекомендации по повышению уровня параметрической надежности станков с ЧПУ модели 6520Ф3. Результаты работы внедрены на Львовском заводе фрезерных станков с суммарным годовым экономическим эффектом равным 32524 руб. Отдельные положения работы использованы во ВНИИНМАШ ГОССТАНДАРТА СССР при разработке методических указаний, ожидаемый экономический эффект от внедрения которых составил 217800 рублей. Результаты работы использованы также в учебном процессе при проведении лабораторных работ по курсу "Системы программного управления".

Апробация работы. Результаты исследований докладывались на семинаре "Расчет точности деталей машин и приборов" в МДНТП им. Ф.Э.Дзержинского, Москва, 1978, на IV научно-техническом совещании "Автоматическое управление точностью обработки на металлорежущих станках", Москва-Ленинград, 1978, на научно-техническом семинаре "Ремонт и надежность технологического оборудования" в МДНТП им. Ф.Э.Дзержинского, Москва, 1979, представлялись в конкурсе научных работ молодых ученых и специалистов факультета АМ МВТУ им. Н.Э.Баумана, где заняла третье место, а также на заседании кафедры АМ-1 МВТУ им. Н.Э.Баумана, 1979, 1981.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 8 печатных работ.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 141 наименования, приложений. Содержит 149 страниц основного текста, 74 рисунка, 10 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В первой главе диссертации анализируются исследования в области точности и надежности металлорежущих станков, а также экспериментальные и теоретические исследования температурных полей и тепловых деформаций металлорежущих станков. Отмечается большой вклад в разработку проблемы точности обработки ученых МВТУ им. Н.Э.Баумана и Мосстанкина. Методы определения точности технологи-

ческих процессов, в анализируемых работах, основаны на двух принципиально различных подходах: статистическом и расчетно-аналитическом, что позволяет проследить тенденцию к созданию сложных математических моделей формирования погрешностей обработки на основе изучения физической сущности процесса их образования.

Надежность станков рассматривается с двух точек зрения: надежность станка как машины – надежность функционирования и надежность станка как технологической системы – параметрическая надежность. Вопросам надежности функционирования станков и автоматических линий посвящены работы А.П.Владзиевского, Л.И.Волчкевича и других советских ученых. Основные достижения и теоретические аспекты надежности сложных технических систем отражены в работах советских ученых Б.В.Гнеденко, Н.Г.Бруевича, Я.Б.Шора, Г.В.Дружинина и других ученых.

Заслуга в постановке, решении и развитии проблем в области параметрической надежности металлорежущих станков принадлежит проф. А.С.Проникову и его ученикам. Отмечается, что в настоящее время работы по проблеме параметрической надежности станков проводятся в следующих направлениях: исследование факторов и процессов, углубление знаний о их природе и характере влияния на выходные параметры станка, разработка методов экспериментальной оценки параметрической надежности станков, разработка методов расчета и оценки параметрической надежности станков различных групп, разработка методов прогнозирования параметрической надежности станков. Рассмотрены основные достижения в этих направлениях и делается вывод о том, что эти методы требуют дальнейшего развития и обобщения для станков различных групп по различным выходным параметрам.

Как отмечается во многих работах, посвященных параметрической надежности станков, основным фактором снижающим уровень надежности являются тепловые процессы, происходящие при работе станков.

Анализ работ по исследованию температурных полей и деформаций станков показал, что они проводятся в следующих направлениях: экспериментальное определение температурных полей и деформаций станков различных типов, экспериментальное определение влияния различных источников тепловыделений на тепловой режим станка, исследование температурных полей и деформаций отдельных узлов и деталей станка и их конструктивных особенностей, определение влияния теплового режима станка на точность обработки и на погрешность отдельных параметров станка, исследование средств и способов компенсации и снижения тепловых деформаций. Проведен также анализ работ советских и

зарубежных ученых, посвященных расчету температурных полей и деформаций основных узлов и деталей станков, которые проводятся различными методами и в большинстве своем в стационарной постановке.

Рассмотрев основные достижения в этой области делается вывод о том, что мало уделено внимания расчету температурных полей колонны станков для различных граничных условий, обусловленных многообразием конструктивных и компоновочных решений станков. Незначительное число работ посвящено анализу влияния конструктивных и теплофизических параметров на нагрев узлов и деталей станка и их тепловых деформаций, а также нет работ по определению общих закономерностей формирования тепловых смещений шпинделя для станков различных компоновок при действии источников различной интенсивности.

Вторая глава посвящена разработке метода расчета показателей параметрической надежности и оценке влияния на них теплового режима станков с ЧПУ.

Анализ работ, посвященных методам расчета и оценки параметрической надежности станков с ЧПУ, показывает, что под выходными параметрами станков с ЧПУ часто понимают точность размера, формы и расположения обрабатываемых на станке деталей и по их отклонениям судят о параметрической надежности станков с ЧПУ. С другой стороны, выходными параметрами технологической системы, построенной на основе станков с ЧПУ, являются: качество и (или) производительность выполняемого технологического процесса или операции при заданной себестоимости производства изделий. При этом под показателями качества обрабатываемых изделий, характеризующими его отдельные свойства, также понимают точность размера, формы и расположения обрабатываемых поверхностей, их шероховатость и физико-механические характеристики.

Очевидно, что одни и те же выходные параметры не могут одновременно характеризовать параметрическую надежность и станков с ЧПУ и технологической системы, построенной на основе станков с ЧПУ, так как выходные параметры технологической системы формируются одновременно всеми её элементами и доля их влияния на конечные выходные параметры различна. Поэтому при оценке параметрической надежности станков с ЧПУ необходимо выбрать такие выходные параметры, которые отражают основные объективные особенности этих станков и которые могли бы быть рассчитаны и определены экспериментально.

Рассматривая технологический процесс (операцию) обработки изделия видно, что функционирование всей технологической системы обеспечивает получение материального изделия (детали), в то время как

станок с ЧПУ, являющийся основным элементом технологической системы, формирует лишь ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ ОБРАЗ данного изделия, свойства которого будут интегральным выходным параметром станка с ЧПУ.

Формирование соответствующего геометрического образа в общем случае осуществляется совокупностью одновременных взаимосвязанных относительных единичных движений рабочих органов станка с ЧПУ по управляемым координатам X, Y, Z, ω_X и т.д.

Поэтому в качестве выходных параметров станка с ЧПУ предлагаются:

- интегральный выходной параметр - геометрический образ (или совокупность образов), формируемый станком с ЧПУ, отклонение свойств которого позволяет определять показатели параметрической надежности станка с ЧПУ в целом;
- дифференцированный выходной параметр - траектория единичного движения рабочих органов станка с ЧПУ, отклонение свойств которой позволяет определять показатели параметрической надежности отдельных узлов и механизмов станка с ЧПУ;
- частные выходные параметры - свойства отдельных узлов и деталей станка с ЧПУ, обусловленных их функциональным назначением.

В общем виде получены структурные формулы геометрических образов I - VI порядков, формируемых станком с ЧПУ, имеющие вид:

$$AXYZ \omega_x \omega_y \omega_z [\Omega_2] \quad (1)$$

где A - порядок геометрического образа, Ω_2 - множество, определяющее вид геометрического образа.

Данная структурная формула позволяет для геометрических образов различных порядков получать их математические выражения, которые будут характеризовать номинальные значения вектора геометрического образа. Отклонение свойств геометрических образов определится как разность между его реальным значением, формируемым частными и дифференцированными выходными параметрами, и номинальным значением.

Погрешность вектора геометрического образа может быть выражена через частные выходные параметры, приведенные к единой системе координат, которые предлагается определять в единой форме в виде "динамической матрицы состояний" следующего вида:

$$\Delta_{ij} = \begin{vmatrix} \Delta_{11} & \Delta_{12} & \Delta_{13} \\ \Delta_{21} & \Delta_{22} & \Delta_{23} \\ \Delta_{31} & \Delta_{32} & \Delta_{33} \end{vmatrix} \quad (2)$$

где $\Delta \dot{j}$ - характеризует величину погрешности в направлении $\dot{i}$ при движении (или действии какого-либо вида энергии) в направлении $\dot{j}$.

Причем все погрешности рассматриваются как случайные попарно независимые величины с нормальным законом распределения и являются функциями состояния основных элементов станка с ЧПУ

$$\Delta = f(X, Y, Z, \omega_x, \omega_y, \omega_z, P, \Theta, \tau) \quad (3)$$

где P и Θ - характеризуют соответственно силовые и тепловые воздействия, $X, Y, Z, \omega_x, \omega_y, \omega_z$ - пространственные положения и состояния основных элементов станка с ЧПУ, τ - время.

Здесь под состоянием понимается совокупность пространственных, временных и энергетических параметров, определяющих значение данной функции. Следовательно, погрешность вектора геометрического образа будет возникать лишь при изменении состояния. Каждая погрешность динамической матрицы состояний является функцией поля состояний и может быть выражена либо аналитически, либо в виде матрицы размера $m \times n$. Для характеристики полноты действия той или иной погрешности в различных направлениях введем понятие матрицы влияния направления $\dot{i}$ на направление $\dot{j}$: δ_{ij} - символ Кронекера, характеризующий влияние погрешности в направлении $\dot{i}$ при движении (или действии какого-либо вида энергии) в направлении $\dot{i}$, $X_{ij} = 0$ при $\dot{i} = \dot{j}$, $X_{ij} = I$ при $\dot{i} \neq \dot{j}$ - характеризует влияние погрешности в направлении $\dot{i}$ при движении (или действии какого-либо вида энергии) в направлении $\dot{j}$, K_{ij} - характеризует степень влияния погрешностей в различных направлениях, $A(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3)$ - характеризует повороты вокруг осей координат.

Тогда, исходя из вышеизложенного, величина погрешности вектора геометрического образа в различных полях функции состояния будет равна:

$$\begin{aligned} C \Delta i(\Omega) = & \Delta^y_{ij} \delta_{ij} K_{ij} + \Delta^y_{ij} \delta_{ij} A(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) (1 + x_{ij}) + \Delta^y_{ij} \delta_{ij} K_{ij} + \\ & + \Delta^y_{ij} A(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) x_{ij} K_{ij} + \Delta^{cn}_{ij} \delta_{ij} x_{ij} A(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) + \Delta^5 x_{ij} K_{ij} + \\ & + \Delta^c_{ij} \delta_{ij} A(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) K_{ij} + \Delta^m_{ij} A(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) x_{ij} + \Delta^{np}_{ij} K_{ij} \end{aligned} \quad (4)$$

где C - коэффициент равный размеру матрицы; Δ^{np} , Δ^m , Δ^{cn} , Δ^{no3} , Δ^5 , Δ^c , Δ^y - частные выходные параметры, характеризующие такие погрешности станка с ЧПУ как погрешность программирования, наладки, смены инструмента, позиционирования, быстропротекающих процессов,

процессов средней скорости, геометрических неточностей станка и упругих деформаций.

Тогда показатели параметрической надежности станка с ЧПУ будут равны:

$$P(t) = \prod_{i=1}^n \left[0,5 + \Phi \left(\frac{1 - K_{mi}}{K_{\epsilon i}} \right) \right], \quad (5)$$

$$K_m = \sup \Sigma M \Delta i(\Omega_1) / \delta_i, \quad (6)$$

$$K_{\epsilon} = \sup \sqrt{\Sigma \epsilon^2 \Delta i(\Omega_1)} / \delta_i. \quad (7)$$

$$K_T = \inf (1 - K_{mi} - K_p K_{\epsilon i}) \quad (8)$$

$$K_n = \inf \left[1 / (1 - K_{\pi i}) \right] \quad (9)$$

где под $\hat{i}$ понимается свойство выходного параметра, $\delta_{\hat{i}}$ - допуск на отклонение $\hat{i}$ - го свойства выходного параметра.

Для оценки степени влияния теплового режима станков запишем выражение для определения вероятности безотказной работы в виде:

$$P(t) = 0,5 + \Phi \left[\frac{X_i - M \hat{\Delta} i(\Omega_1) - M \hat{\Delta} i(\Omega_2)}{\sqrt{\epsilon^2 \hat{\Delta} i(\Omega_1) + \epsilon^2 \hat{\Delta} i(\Omega_2)}} \right] \quad (10)$$

где погрешности с индексами "н" и "т" характеризуют соответственно их значения в начальном состоянии (в поле пространственных состояний) и при нагреве. Тогда, введя обозначения $K_{\epsilon} = M \hat{\Delta} i(\Omega_2) / [X_i - M \hat{\Delta} i(\Omega_1)]$ - коэффициент, характеризующий долю погрешностей станка, обусловленных нагревом, в общем балансе начальных погрешностей; $K_{\epsilon} = \epsilon^2 \hat{\Delta} i(\Omega_1) / \epsilon^2 \hat{\Delta} i(\Omega_2)$ - коэффициент, характеризующий долю случайных составляющих погрешностей станка, обусловленных нагревом, в общем балансе случайных составляющих начальных погрешностей, находим:

$$P(t) = 0,5 + \Phi \{ [X_i - M \hat{\Delta} i(\Omega_1)] / \epsilon \hat{\Delta} i(\Omega_1) \cdot \xi \} \quad (11)$$

где $\xi = \sqrt{1 + K_{\epsilon} / (1 - K_{\epsilon})}$

Анализируя выражение (11), видно, что тепловой режим станка может как улучшать, так и ухудшать вероятность его безотказной работы по выходному параметру. Это зависит от степени подверженности той или иной погрешности воздействию теплового режима станка и определяется знаком и величиной коэффициента ξ . При этом возможны следующие случаи:

а) если $0 < K_{\Sigma} < 1$, то $\xi > 1$ и значение вероятности безотказной работы всегда находится в пределах от 0,5 до 1, а скорость изменения $P(t)$ зависит от величин и скорости изменения составляющих погрешностей;

б) если $K_{\Sigma} > 1$, то $\xi < 0$ и вероятность безотказной работы снижается до значений меньших 0,5, так как функция Лапласа нечетная;

в) если $K_{\Sigma} < 0$, то ξ всегда положительная величина, а изменение вероятности безотказной работы зависит от соотношения коэффициентов K_{Σ} и K_{Σ} . При этом, если выполняется неравенство $K_{\Sigma} < K_{\Sigma}(K_{\Sigma}-2)$ вероятность безотказной работы увеличивается, в противном случае снижается и имеет своим пределом значение равное 0,5.

Полученные зависимости позволяют судить о вероятности безотказной работы станка и влиянии на нее теплового режима станка только в условиях непрерывной работы станка. В действительности, учитывая особенности работы станков с ЧПУ, периоды непрерывной работы чередуются с периодами охлаждений, чередуются режимы работы, их последовательность и, следовательно, тепловые деформации, определяющие вероятность безотказной работы станка с ЧПУ за межсменочный период, носят более сложный характер, отличающийся от непрерывного их изменения. Поэтому и вероятность выхода за установленный предел также будет отличаться от ее значения, полученного в условиях непрерывной работы. Учитывая это также найдены выражения, позволяющие определять вероятность безотказной работы в условиях повторно-переменного режима работы станков с ЧПУ.

Для определения показателей параметрической надежности станков с ЧПУ и оценки степени влияния на них теплового режима необходимо экспериментальное или аналитическое определение температурных полей и деформаций основных узлов и деталей станка, приводящих к изменению выходных параметров станка с ЧПУ. Поэтому дальнейшая работа посвящена определению температурных полей и деформаций основных узлов и деталей станков с ЧПУ различных компоновок, что позволит на основе полученных во второй главе зависимостей наметить пути повышения параметрической надежности, управляя тепловым режимом станка.

В третьей главе рассматриваются общие закономерности формирования смещений шпинделя из-за тепловых деформаций узлов и деталей станков с ЧПУ различных компоновок, дается анализ влияния деформаций колонны при нагреве станков на величину смещения шпинделя, а также проведен расчет температурных полей и деформаций шпинделя и колонны станков с ЧПУ различных компоновок.

Величина, характер и направление действия тепловых деформаций в значительной степени определяются компоновкой и конструкцией уз-

лов и деталей станка, а также размещением тепловыделяющих элементов относительно базовых деталей станка.

На основе анализа компоновок и конструкций станков с ЧПУ с вертикальной колонной составлена классификация возможных вариантов расположения источников тепловыделений, позволившая получить три основных типа расчетных схем для определения закономерностей смещения шпинделя при нагреве станка. Для каждой расчетной схемы на основных базовых узлах и деталях станка построены системы координат, связанные между собой радиус-векторами, которые при нагреве станка изменяют свои линейные и угловые параметры. Для каждой расчетной схемы получены соответствующие математические зависимости. Анализ этих математических зависимостей позволил определить типовые законы смещения шпинделя станка из-за тепловых деформации его деталей и узлов.

Анализ влияния тепловых деформаций колонны станков с ЧПУ различных компоновок показал, что колонна станка при нагреве может как увеличивать, так и уменьшать результирующую величину смещения шпинделя. Полученные выражения для определения величины смещения шпинделя, обусловленные тепловыми деформациями колонны, позволили определить зоны, где деформации колонны не влияют на величину смещения шпинделя. Причем, доказано что положение этой зоны для станков данной компоновки определяется в основном конструктивными параметрами колонны и не зависит от её температурного поля.

Для количественного определения величин смещения шпинделя из-за нагрева станка необходимо знание о температурных полях и деформациях таких основных узлов станка как шпиндель и колонна.

В качестве тепловой модели шпинделя при расчете его температуры выбран цилиндр конечной длины, на боковых поверхностях которого происходит теплообмен с окружающей средой. Причем параметры тепловой модели определялись из равенства критериев подобия. Для определения температуры шпинделя решалась краевая задача с граничными условиями второго рода для условий постоянной мощности источников тепла и переменной, зависящей от времени нагрева.

Полученное решение для определения температурного поля шпинделя служило основой для нахождения его осевых тепловых деформаций, на основе решения уравнения термоупругости с граничными условиями, определяемыми жесткостями передней и задней опор. Для этих условий решена термоупругая задача и получены выражения по определению величины смещения шпинделя. Совместное решение этого выражения и зависимостей по определению типовых законов смещения шпинделя позво-

лило получить условия минимума осевых тепловых смещений шпинделя станка при его нагреве:

$$\gamma_2 = \left[\gamma_1 \cdot \gamma_3 / (\gamma_1 + \gamma_3) \right] \cdot K_K \quad (12)$$

где γ_1 , γ_2 и γ_3 - соответственно жесткости задней, передней опор и шпинделя, K_K - коэффициент, определяемый исходя из конструктивно-компоновочного решения станка и его теплового режима.

Для определения нестационарного температурного поля колонны станков с ЧПУ принята тепловая модель в виде пластины толщиной равной эквивалентной толщине стенки колонны с высотой и шириной конечной длины. Через боковые поверхности колонны происходит теплообмен с окружающей средой с коэффициентом теплообмена равным α . Подвод тепла к колонне осуществляется от узлов и деталей привода главного движения и задается в виде температуры на граничной поверхности колонны в местах их стыка или в виде источников тепла заданной интенсивности. Математическая модель для данной тепловой модели колонны состоит из уравнения теплопроводности с граничными условиями первого и второго рода. Получены решения для определения нестационарного температурного поля колонны станков в общем виде и для различных вариантов расположения источников тепловыделений, их интенсивности и эпюр распределения температуры на участках подвода тепла к колонне. Анализ полученных решений позволил определить характерные функции изменения температуры колонны во времени. Определены условия, при которых происходит изменение температуры во времени по тем или иным функциям, что обусловлено вполне определенным сочетанием теплофизических и конструктивных параметров колонны. Получены соотношения и определены условия, при которых происходит "покачивание колонны" (изменение направления изгиба колонны), обусловленное разностью температур между противоположными стенками колонны.

В четвертой главе рассматриваются экспериментальные исследования температурных полей и деформаций станков с ЧПУ, проводится расчет температурного поля шпинделя и колонны станка по полученным ранее зависимостям, дается анализ влияния конструктивных и теплофизических параметров на деформации шпинделя и колонны станков, дается обоснование предлагаемого метода ускоренных испытаний тепловых деформаций и температур нагрева станков, а также проводится расчет влияния теплового режима станка на уровень его параметрической надежности.

Экспериментальные исследования тепловых смещений шпинделя станков с ЧПУ различных компоновок проводились как в лабораторных усло-

виях, так и в заводских с целью подтверждения предложенных общих закономерностей механизма их формирования. Исследованию подверглись станки с ЧПУ вертикальной компоновки моделей 2P13542, 6P1143, 652043, 243B42. Экспериментально получены типовые законы смещения шпинделя станков, приведенные в главе 3, что подтверждает правильность предложенного механизма формирования смещений шпинделя станков при их нагреве. Дальнейшие экспериментальные исследования проводились на станке модели 652043, где более подробно определялись температурные поля отдельных узлов и деталей станка на различных режимах его работы. Для этого же станка по полученным зависимостям проведен расчет температуры нагрева шпинделя и колонны станка. Сравнение экспериментальных и расчетных величин температур нагрева этих узлов показало, что ошибка не превышает 20%, а характер изменения температуры во времени соответствует выводам, полученным в предыдущей главе. Экспериментально также определялась доля и степень колонны на результирующую величину смещения шпинделя и положение зоны, в которой тепловые деформации колонны не влияют на величину результирующего смещения. С целью определения доли случайных составляющих тепловых смещений шпинделя станка проводились многократные испытания станка, которые показали, что до 40% случайных колебаний этих смещений определяется колебаниями температуры окружающей среды. Экспериментально также определено влияние температуры нагрева станка на такие частные выходные параметры станка как отклонения от прямолинейности и перпендикулярности перемещения шпиндельной бабки. Эти отклонения при нагреве существенно изменяются как по величине, так и по направлению. Так, для станка модели 652043 отклонение от перпендикулярности с $-4,5$ мкм в начальном состоянии изменилось до $+7$ мкм при нагреве в течение 6 часов.

Для анализа влияния различных конструктивных и теплофизических параметров на нагрев шпинделя и колонны станка составлена и реализована на ЭВМ ЕС 1020 программа расчета. Проведен по составленной программе расчет и анализ влияния на нагрев шпинделя таких параметров как мощность источников тепла, коэффициента теплоотдачи, длина шпинделя и его диаметр. Этот анализ проведен как отдельно для каждого параметра, так и для их совместного попарного изменения. Этот анализ проведен как для определения границ изменения температуры, так и для определения температуры по заданным параметрам. Это позволило установить границы наиболее эффективного воздействия на тот или иной параметр с целью обеспечения заданного теплового режима,

обеспечивающего заданный уровень параметрической надежности.

Введено понятие коэффициента температурной устойчивости шпинделя, численно равного величине нагрева шпинделя при подводе тепла в одну ккал. Проведен анализ влияния параметров шпинделя на изменение величины коэффициента температурной устойчивости, что позволяет находить наиболее рациональное сочетание параметров, а также достаточно просто определять температуру его нагрева. Определены значения коэффициентов температурной устойчивости и сведены в таблицу для реально возможного диапазона изменения параметров шпинделя.

По полученным ранее зависимостям проведен расчет температурного поля колонны станка модели 520Ф3, а также проведен анализ влияния на нагрев и на разность температур противоположных стенок колонны таких параметров как толщина стенки колонны, ширина и высота колонны, температуры источников, коэффициентов теплоотдачи и теплопроводности. Этот анализ позволил получить как качественные зависимости влияния этих параметров, так и определить границы наиболее эффективного воздействия на них с целью достижения заданного теплового режима при заданном уровне параметрической надежности.

Так как получение информации о протекании тепловых процессов при работе станков занимает достаточно большое количество времени, то был предложен, разработан и опробован метод ускоренного определения тепловых деформаций и температур нагрева станков. Метод основан на полученных типовых законах изменения температур нагрева и тепловых деформаций станков с ЧПУ различных компоновок, определенных в третьей главе. Сущность метода заключается в том, что для данного конструктивно-компоновочного решения станка по предложенной методике определяют законы изменения тепловых деформаций или по аналогии выбирается из предложенных пяти законов соответствующий рассматриваемому случаю. Далее по информации о начальной стадии протекания тепловых деформаций по предложенным для каждого закона зависимостям или полученным для них номограммам определяются параметры, характеризующие данный закон. Ускоренные испытания по предлагаемому методу можно проводить последовательно на ряде частот вращения шпинделя. Экспериментально проверена возможность и целесообразность данного метода для всех законов изменения тепловых деформаций. Так для полного экспериментального определения тепловых деформаций станка модели 6520Ф3 на трех частотах вращения шпинделя потребовалось 72 часа, а при использовании метода ускоренных испытаний только 2 часа.

Для оценки степени влияния теплового режима станка модели 652043 на уровень его параметрической надежности по результатам экспериментальных и расчетных исходных данных определялась вероятность безотказной работы с учетом и без учета влияния теплового режима на частные выходные параметры. Так вероятность безотказной работы станка определенная без учета влияния теплового режима равна $P(t) = 0,9945$, а с учетом теплового режима — $P(t) = 0,7734$, т.е. тепловой режим снижает вероятность безотказной работы на 29%.

ВЫВОДЫ.

1. Для оценки параметрической надежности станков с ЧПУ предложен комплекс взаимосвязанных выходных параметров: интегральный выходной параметр — геометрический образ или совокупность образов; дифференцированный выходной параметр — траектория единичного движения рабочих органов станка; частные выходные параметры — свойства отдельных узлов и деталей станка.

2. Разработаны структурные формулы геометрических образов для всех возможных сочетаний единичных движений рабочих органов станков, что позволяет получить математические модели образов и рассчитывать показатели параметрической надежности станков с ЧПУ.

3. Предложен метод расчета погрешностей формируемых геометрических образов путем описания их единичных погрешностей в матричной форме ("динамической матрицей состояний", матриц влияний и поворота) в поле функций состояний, что позволяет получать значения погрешности радиус-вектора геометрического образа и определять показатели параметрической надежности станков с ЧПУ.

4. Для расчета влияния теплового режима станков с ЧПУ предложены зависимости по определению показателей их параметрической надежности в условиях непрерывного и повторно-переменного режимов работы станка.

5. Для станков с ЧПУ различных компоновок определены основные наиболее характерные схемы для расчета смещений оси шпинделя из-за тепловых деформаций узлов и деталей станка, разработаны математические модели полученных расчетных схем, обоснованы теоретически и экспериментально пять основных типовых законов смещения шпинделя станка при его нагреве.

6. Решена задача и получены выражения для практического определения нестационарного температурного поля шпинделя в условиях теплообмена с окружающей средой. Составлены программы и проведен рас-

чет на ЭВМ температурного поля шпинделя, проведен анализ влияния основных конструктивных и теплофизических параметров на среднюю температуру нагрева шпинделя и определены границы наиболее эффективного управления различными параметрами шпинделя. Показано, что увеличение диаметра шпинделя более 150 мм и его длины более 0,9 м неэффективно для снижения температуры нагрева шпинделя.

7. Получены зависимости, составлены программы и проведен расчет на ЭВМ нестационарного температурного поля колонны станка в условиях теплообмена с окружающей средой при различных условиях подвода тепла, что позволило определить условия, при которых температура колонны не изменяется по экспоненциальному закону, а также условия, при которых происходит изменение направления наклона колонны. Ошибка между расчетными и экспериментальными значениями температур колонны и шпинделя станка модели 6520Ф3 не превышает 20%.

8. Введено понятие температурной устойчивости шпиндельного узла, характеризующее его способность препятствовать росту температуры нагрева, и получены значения этих коэффициентов, позволяющие проводить сравнительный анализ шпиндельных узлов с целью определения оптимального сочетания их конструктивных и теплофизических параметров.

9. Решена термоупругая задача и получены зависимости для расчета осевых смещений шпинделя станка, обусловленным его нестационарным температурным полем, и определены условия минимума осевых температурных смещений шпинделя станков с ЧПУ различных компоновок, что позволяет повысить параметрическую надежность за счет уменьшения тепловых смещений.

10. На основе типовых законов смещения шпинделя разработан метод и инженерная методика ускоренных испытаний станков с ЧПУ для оценки влияния тепловых деформаций на параметрическую надежность. Экспериментально показано, что время испытаний по данной методике в зависимости от объема испытаний сокращается в 7 - 10 раз.

11. Разработанная методика оценки влияния теплового режима станков с ЧПУ на их параметрическую надежность позволяет рассчитывать показатели надежности с учетом теплового режима. Для станков с ЧПУ модели 6520Ф3 вероятность безотказной работы с учетом и без учета влияния теплового режима соответственно равны 0,7734 и 0,9945.

12. Отдельные положения работы использованы во ВНИИМАШ ГОССТАНДАРТа СССР при разработке методических указаний, ожидаемый экономический эффект от внедрения которых составил 217890 рублей. Результаты работы внедрены на Львовском заводе фрезерных станков с суммар-

ным годовым экономическим эффектом равным 32524 рубля, а также использованы в учебном процессе при проведении лабораторных работ по курсу "Системы программного управления".

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Кузнецов А.П. Расчет и прогнозирование вероятности изменения точности станков вследствие тепловых деформаций. - В кн.: Надежность и эффективность станков-автоматов. - М.: МВТУ, 1980. - с. 45-54.

2. Кузнецов А.П., Уколов М.С. Влияние тепловых деформаций на уровень технологической надежности станков. - М.: Известия ВУЗов. Машиностроение, 1979, №2. - с. 134-137.

3. Кузнецов А.П., Уколов М.С. Исследование динамики формирования тепловых деформаций металлорежущих станков с ЧПУ. - М.: Известия ВУЗов. Машиностроение, 1978, №4. - с. 168-173.

4. Стародубов В.С., Кузнецов А.П. Тепловые деформации базовых деталей металлорежущих станков. - М.: Известия ВУЗов. Машиностроение, 1978, №12. - с. 143-148.

5. Стародубов В.С., Кузнецов А.П. Влияние тепловых деформаций станков с ЧПУ на точность обработки. - М.: Машиностроитель, 1979, №3. - с. 19-21.

6. Стародубов В.С., Кузнецов А.П. Метод ускоренной оценки тепловых деформаций при контрольных испытаниях металлорежущих станков. - В кн.: Ремонт и надежность технологического оборудования. - М.: МДНТП, 1979. - с. 87-96.

7. Кузнецов А.П., Уколов М.С. Оценка надежности станков с числовым программным управлением. - М.: Надежность и контроль качества, 1980, №2. - с. 32-43.

8. Методические указания I-я редакция. Надежность в технике. Технологические системы. Расчет и оценка показателей параметрической надежности технологического оборудования с ЧПУ. - М.: ВНИИМАШ ГОССТАНДАРТ СССР, 1980. - 114с.

