

1548425

Московский государственный технический университет
имени Н. Э. Баумана

На правах рукописи

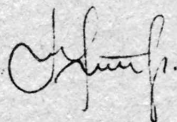
Утенков Владимир Михайлович

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОТЕРИ ТОЧНОСТИ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ
С НАПРАВЛЯЮЩИМИ СКОЛЬЖЕНИЯ

Специальность: 05.03.01 - процессы механической и
физико-технической обработки, станки и инструменты

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



Москва - 1995

13/01/95

Работа выполнена в московском государственном
техническом университете имени Н. Э. Баумана

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Геккер Ф. Р.

доктор технических наук,
профессор Нахапетян Е. Г.

доктор технических наук,
профессор Прохоров А. Ф.

Ведущая организация: Станкостроительное производственное
объединение "Красный пролетарий" г. Москва.

Защита состоится "8" ноября 1995 г. в 14³⁰ час.
на заседании диссертационного совета Д 053.15.04
московского государственного технического университета
им. Н. Э. Баумана по адресу: Москва, 107005, 2-я Бауманская ул., 5

Ваш отзыв на _____, заверенный печатью,
просим направить _____ секретаря
диссертационного совета _____

Авторедактор _____

С диссертацией
государственный _____

ди _____

Подписан _____

1548425

ского
мана

Усов Б. А.

Тир. 100.

НТБ МГТУ им. Н. Э. Баумана



1548425

утенков В. М. Прогнозирование

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Точность металлорежущего станка зависит от точности выполнения формообразующих движений рабочих органов. Направляющие станка обеспечивают требуемый характер траекторий (прямолинейная, круговая и др.) узлов, несущих режущий инструмент ил. заготовку и позволяют при минимальных изменениях областей состояния этих траекторий преодолевать весьма значительные силы резания.

Наиболее часто в конструкциях современных металлорежущих станков используют направляющие скольжения с парами трения чугуна-чугун, чугун-полимер и чугун-сталь, которые существенно изнашиваются при эксплуатации станка (интенсивность изнашивания направляющих станков обычно находится в пределах 10-120 мм/год), что приводит к искажению траектории подвижного рабочего органа.

В результате обрабатываемые на станке детали имеют погрешности формы, предотвращение которых методами подналадки или введением коррекции в управляющие программы ЧПУ возможно далеко не всегда:

Прогнозирование является единственным методом, позволяющим на ранних стадиях создания станка с необходимой степенью достоверности оценить показатели технологической надежности. Особую актуальность имеет прогнозирование потери точности станков при износе направляющих скольжения, так как многовариантность конструктивных решений систем направляющих и компоновок современных металлорежущих станков а так же большое разнообразие условий их эксплуатации делает малопродуктивным использование статистики отказов для суждений о предполагаемых показателях технологической надежности.

Цель и задачи работы. Целью работ является разработка научных основ и практическая реализация прогнозирования процесса изменения точности металлорежущих станков с направляющими скольжения, обеспечивающего возможность достоверной оценки гамма-процентного ресурса и вероятности безотказной работы по параметрам точности на ранних этапах создания станка после выбора его компоновки и конструкции системы направляющих для подвижных рабочих органов. Анализ результатов, выполненных в этой области исследований и опыт изучения закономерности процессов, происходящих в станке при его эксплуатации и снижающих начальные показатели точности, показал, что для достижения поставленной цели требуется

решение следующих частных задач:

Определение содержания и последовательности выполнения этапов процедуры прогнозирования потери точности станков на основе использования статистических алгоритмов Монте-Карло и экстраполяционных алгоритмов теории временных рядов. Установлено, что сочетание этих базовых методик позволяет выполнять прогнозирование с достаточной для практики современного станкостроения достоверностью и точностью, учитывая макроприработку направляющих в начальный период эксплуатации станка, когда процесс потери точности происходит по существенно нелинейным от длительности эксплуатации станка законам.

Разработка методики моделирования контактного взаимодействия направляющих скольжения, позволяющей при расчете эпюр давления учитывать реальный профиль плоских поверхностей направляющих скольжения и возможные сочетания внешних воздействий на рабочие органы станков: определение содержания и последовательности этапов моделирования, при которых с достаточной для практики точностью выполняется раскрытие статической неопределенности и обеспечивается гарантированная сходимость итерационного процесса моделирования.

Разработка методики имитационного моделирования процесса изнашивания направляющих с учетом статистических закономерностей по числу циклов взаимодействий на площадках фактического касания до отделения элементарного объема металла. Установлено, что только имитационный алгоритм позволяет учитывать прирабатываемость направляющих при износе, что является важным фактором повышения точности применяемых методов моделирования.

Разработка методики моделирования изменения траектории подвижных рабочих органов станков при износе направляющих скольжения, позволяющей учитывать расположение зон наиболее вероятного касания во всех гранях направляющих.

Разработка методики статистического моделирования исходного профиля направляющих скольжения новых станков, при использовании которой в максимально возможной мере учитываются особенности технологии их изготовления и контроля, в том числе заданные параметры отклонений от прямолинейности и плоскостности а также численности контактов на фиксированной площади поверхности направляющих после операции шабрения. Данная методика должна обеспечивать моделирование с заданными свойствами жесткости стыков для пар трения направляющих, для узлов и станка в целом.

Формирование базы данных для прогнозирования потери точности станков с наиболее широко распространенными монолитными чугунными направляющими подвижных рабочих органов и неподвижных станин а также с накладными стальными направляющими станин. В состав базы данных должны входить параметры, определяемые особенностями конструкций и компоновок исследуемых станков, технологии изготовления направляющих, параметры, определяемые условиями предполагаемой эксплуатации станков и параметры, характеризующие условия протекания процесса изнашивания направляющих скольжения.

Разработка методов и средств контроля и регистрации хода процесса потери точности шталлорежущих станков при эксплуатации, позволяющих с достаточной степенью достоверности выявить соответствие разработанных математических моделей реальным процессам.

Методы исследований. Основные положения работы базируются на современных методах расчета точности и жесткости металлорежущих станков, теории надежности машин, теории трения и изнашивания твердых тел, статистических методах моделирования, прогнозирования и теории временных рядов.

Математическое моделирование выполнено для ЭВМ типа РС и ЕС.

Экспериментальные исследования проведены с помощью автоматизированной компьютерной системы регистрации траекторий линейных перемещений на базе фотоэлектрического автоколлиматора, современных, преимущественно компьютеризированных средств регистрации формы поверхности направляющих образцов и металлорежущих станков, бесконтактных электромагнитных нагрузочных устройств. За создание автоматизированных средств, использованных при выполнении данной работы, коллектив авторов в 1986 г. был награжден серебряной медалью выставки достижений народного хозяйства СССР, цикл научно-исследовательских работ в 1986 и 1987 г. занял первое место в московском городском конкурсе внедренных работ по НТО "Приборпром" им. академика С. И. Вавилова.

Научная новизна. На основе экспериментальных исследований и математического моделирования процесса изнашивания направляющих скольжения и изменения по этой причине траектории подвижных рабочих органов впервые получены законы надежности ряда моделей токарных и фрезерных станков, определены наиболее значимые показатели надежности - гамма-процентный ресурс сохранения точности и вероятность безотказной работы по параметру отклонения траектории от прямолинейности.

Впервые прогнозирование потери точности выполнено с учетом макроприработки направляющих и возможного рассеивания параметров характеризующих условия эксплуатации станков. Доказано существенное влияние этих факторов на конечные результаты прогнозирования.

Реализация процедуры прогнозирования явилась результатом создания новых, оригинальных алгоритмов моделирования процессов контактирования и изнашивания направляющих скольжения, изменения траектории подвижных рабочих органов станков, базирующихся на новых теоретических разработках. При этом к основным научным результатам следует отнести:

- количественную оценку ряда важнейших параметров, необходимых для использования в алгоритмах моделирования, таких как число циклов взаимодействий на площадках фактического касания направляющих до отделения элементарного объема материала в алгоритме имитационного моделирования процесса изнашивания и коэффициенты пропорционального пересчета результатов моделирования в алгоритме моделирования контактного внедрения направляющих при определении элюр давления ;

- методику раскрытия статической неопределенности при определении зон наиболее вероятного касания направляющих с учетом реального профиля контактирующих поверхностей ;

- методику использования статистических алгоритмов Монте-Карло совместно с экстраполяционным алгоритмом теории временных рядов для оценки периода макроприработки направляющих;

- количественную оценку длительности периода макроприработки направляющих (в зависимости от износостойкости направляющих и интенсивности эксплуатации период макроприработки находится в пределах от 1,5 до 3,5 лет) и коэффициентов изнашивания для пары трения чугун-сталь (накладные стальные направляющие станины и чугунные направляющие подвижного рабочего органа).

Практическая ценность. Прогнозирование потери точности станков позволяет еще на стадии проектирования выбрать оптимальный, с точки зрения надежности, вариант конструктивного решения, сократить затраты времени и средств на длительные и трудоемкие испытания опытных образцов и наиболее рационально использовать потенциальную долговечность станка за счет научно-обоснованного построения системы его ремонта и технического обслуживания.

Для исследованных в процессе выполнения данной работы станков определены наиболее эффективные пути (изменение угла наклона суппортной группы станка мод.СТП-220АП, изменение положения цент-

ра тяжести суппортной группы станка мод. 16K20Ф3) увеличения ресурса сохранения точности для важнейшего параметра - отклонения траектории от прямолинейности. Определена возможность на 28+30% снизить скорость изменения точности станка без существенных затрат на модернизацию исследованных моделей.

Исследована эффективность повышения требований к выполнению завершающего этапа технологического процесса изготовления направляющих металлорежущих станков (операции шабрения). Показана возможность приблизительно в 1,5 раз увеличить ресурс станка мод. 16K20Ф3 (с 10,67 до 16,02 лет эксплуатации) при увеличении числа пятен контакта на площади поверхности направляющих, ограниченной квадратом 25×25 мм. При этом получены сведения об увеличении соотношения фактической и номинальной площади контакта в направляющих, снижении среднего давления на площадках касания, увеличении жесткости стыка и суппортной группы.

Определены законы надежности исследованных станков для различных по интенсивности условий эксплуатации. Получены сведения об особенностях процесса потери точности в различных зонах рабочего пространства станков, имеющие важное значение для рационального использования их потенциальной долговечности.

Исследована закономерность процесса потери точности станков при проведении ускоренных испытаний. Установлено, что ускоренные испытания токарных станков, имеющих традиционную компоновку (станок мод. 16K20Ф3) на форсированных режимах, за счет изменения соотношения интенсивности изнашивания различных граней направляющих, приводят к существенно, а иногда и принципиально ошибочным прогнозам. По этой причине предложено рассматривать ускоренные испытания опытных образцов новых моделей металлорежущих станков в качестве одной из составных частей комплекса исследований технологической надежности, главной целью которых является уточнение коэффициентов изнашивания направляющих и доказательство соответствия математических моделей реальным процессам изнашивания и изменения траектории подвижных рабочих органов.

Результаты работы внедрены в промышленности (НПО "Техномаш" г. Москва, ПО "Станкозавод" г. Павлоград, Закавказский филиал ЭНИМС г. Ереван, завод шлифовальных станков г. Ленинакан, ПО "Техника" г. Владимир, предприятие п/я М-5985, Украинский филиал ЭНИМС г. Одесса, завод агрегатных станков г. Харьков, станкозавод г. Мукачево, станкозавод г. Одесса, завод фрезерных станков г. Львов, станкозавод г. Иваново) и в учебном процессе МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Апробация работы. Результаты исследований по теме диссертации докладывались на двух всесоюзных и одной республиканской научно-технических конференциях. Полное содержание работы доложено на заседаниях кафедры "Прецизионные станочные модули" МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Публикации. Содержание диссертации отражено в 44 печатных работах (в том числе 4 авторских свидетельства на изобретения).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из четырех глав (включая введение), заключения, списка литературы из 231 наименования и приложения. Общий объем 327 страниц, в том числе 222 страницы основного текста, 165 рисунков, 11 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ГЛАВА 1. ВВЕДЕНИЕ

Во введении изложены материалы, позволяющих сделать заключение об актуальности темы диссертационной работы. Приведены сведения о типах направляющих, применяемых в настоящее время в конструкциях металлорежущих станков, скорости изнашивания направляющих, скорости изменения начальной точности станков по этой причине. Приведены данные экспериментальных исследований интенсивности изнашивания материалов, применяемых при изготовлении направляющих скользящих металлорежущих станков, показан баланс влияния основных факторов на погрешность формы обрабатываемых деталей.

Отмечено, что прогнозирование является единственным методом, позволяющим на ранних стадиях создания станка с необходимой степенью достоверности оценить показатели технологической надежности. Особую актуальность имеет прогнозирование потери точности станков при износе направляющих скользящих, так как многовариантность конструктивных решений систем направляющих и компоновок современных металлорежущих станков а так же большое разнообразие условий их эксплуатации делает малопродуктивным использование статистики отказов для суждений о предполагаемых показателях технологической надежности.

Сформулированы цели и задачи работы. Указаны использованные методы исследований, научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

Приведен список предприятий, где внедрены результаты выполненных исследований.

ГЛАВА 2. ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ. МЕТОДОЛОГИЯ, ТЕОРИЯ И РАБОЧАЯ МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОТЕРИ ТОЧНОСТИ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

Проанализирована возможность использования для прогнозирования потери точности металлорежущих станков при износе направляющих основных положений теории надежности машин А. С. Проникова.

Показана методика реализации алгоритма прогнозирования потери точности на основе метода статистического моделирования Монте-Карло, когда генерируются случайные величины с известными законами распределения и из этих величин по заданным алгоритмам вычисляются значения величин, распределенных по существенно более сложным или неизвестным законам.

Признательно рассматриваемой в данной работе задачи метод статистического моделирования Монте-Карло позволяет получить закон распределения ресурса станка по параметру точности x по данным об известных распределениях исходных параметров: p – давлений в направляющих, V – скорости движения рабочего органа по станине, K – коэффициента изнашивания направляющих. Для этого используется формула

$$V_j = K_j \cdot p_j \cdot V_j, \quad (1)$$

где V_j – скорость изнашивания направляющей в зоне с координатой j при заданных параметрах K_j , p_j и V_j .

Показаны результаты реализации прогнозирования потери точности станков на основе приведенной методики, проанализированы проблемы, возникающие при ее использовании и причины, в результате которых точность и достоверность прогнозирования может быть повышена более чем в 1,5 раза.

Отмечено, что на основе проведенного в данной работе комплекса теоретических и экспериментальных исследований разработаны теория и рабочая методика, позволяющие с достаточной для практики современного станкостроения достоверностью прогнозировать ход процесса потери точности металлорежущих станков с направляющими скользящими. Разработанная теория основывается на новых методиках и алгоритмах имитационного моделирования на ЭВМ процессов контактирования и изнашивания направляющих при эксплуатации металлорежущих станков, изменения траектории движения подвижных рабочих органов, несущих режущий инструмент.

В соответствии с разработанной теорией прогнозирование состоит из следующих основных этапов:

1. Моделируется исходный профиль направляющих станка по которо-

му определяется начальное значение параметра точности a . Таким параметром может быть, например, отклонение траектории суппорта токарного станка от прямолинейности при его продольном перемещении по направляющим станины. Полученное для момента времени t_0 значение параметра точности $a=a_0(j)$ определяет начало j -ой реализации моделирования (рис. 1, а). Эта, а также все последующие операции выполняются на основе статистических алгоритмов, использующих метод Монте-Карло. При этом полученные реализации являются случайными но, в тоже время, находятся в пределах возможных для исследуемой модели металлорежущего станка.

2. По имитационным алгоритмам процессов контактирования направляющих, изменения их формы в результате износа и искажения траектории рабочего органа оценивается возможное изменение параметра точности, как функции длительности эксплуатации станка t . При этом моделирование выполняется для фиксированных интервалов времени эксплуатации станка Δt_j .

Моделирование выполняется исходя из предположения, что за весь период времени до выхода станка за пределы работоспособности по параметру точности a , на станке выполняется обработка некоторой ограниченной выборки, состоящей из m_j наименований (номенклатуры) типовых деталей. При этом количество наименований деталей в каждой выборке определяется методом статистического генерирования по предварительно оцененной достаточно большой совокупности данных, отражающей возможное многообразие условий заводской эксплуатации исследуемой модели станка. Так, например, для токарных станков моделей 16К20Ф3 и СТП-220АП число m_j находилось в пределах от 3 до 9 при общей совокупности данных по 28 и 36 деталям соответственно.

Таким образом каждая полученная реализация возможного хода процесса потери станком начального уровня точности является результатом статистического моделирования процесса в условиях обработки на данном станке j -ой выборки из m_j деталей. При этом за каждый из периодов времени эксплуатации станка Δt_j моделируется обработка различного количества штук деталей каждого наименования, что определяется сгенерированным для каждого конкретного периода значением пути трения в направляющих.

Результаты проведенных исследований показывают, что в зависимости от исходного профиля направляющих и условий заводской эксплуатации станков ход процесса потери точности может иметь весьма существенное различие для каждой конкретной реализации

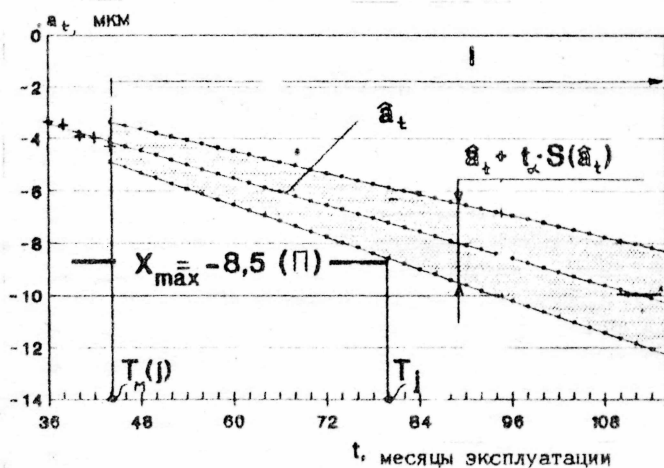
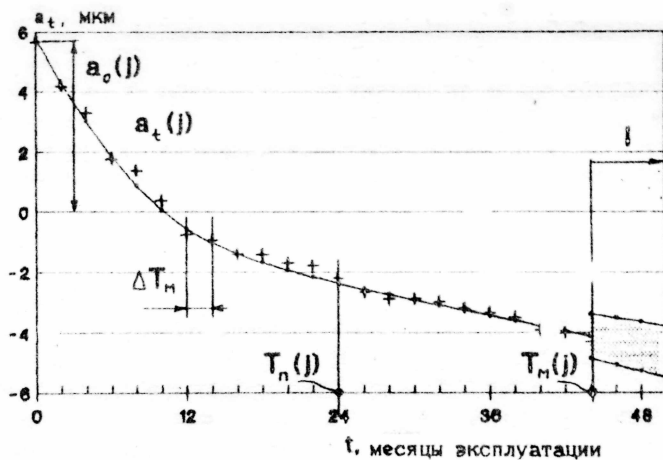


Рис. 1 Пример реализации этапов прогнозирования потери точности металлорежущих станков с направляющими скольжения

- а) аппроксимация временного ряда результатов статистического моделирования.
- б) экстраполяция временного ряда до выхода за границы допустимого значения параметра точности

статистического моделирования. Однако все полученные временные ряды значений параметров точности могут быть описаны функциями следующего вида

$$a_t = b_1 \cdot t + b_2 \cdot e^{(-b_3 \cdot t^{b_4})} \quad (2)$$

где b_1 , b_2 , b_3 и b_4 - постоянные коэффициенты, t - время эксплуатации станка.

Исследование процесса потери точности станков в условиях их реальной заводской эксплуатации показали, что статистическое моделирование может выполняться не на весь период эксплуатации станка а только на период действия процесса макроприработки T_n , который как правило является причиной нелинейного характера функции a_t в первый период эксплуатации металлорежущих станков с направляющими скольжения, а также еще на некоторый период времени $(T_n + T_p)$, требуемый для достоверного прогнозирования результатов с временным упреждением 1 на период до выхода станка за границы допуска по параметру точности.

Момент завершения периода макроприработки направляющих и следовательно возможность завершения первого этапа статистического моделирования наилучшим образом определяется по третьим разностям временных рядов $u_3(t)$, составленных из результатов статистического моделирования. При этом - для первых разностей: $u_1(t) = a(t) - a(t-1)$; - для вторых разностей: $u_2(t) = u_1(t) - u_1(t-1)$; - для третьих разностей: $u_3(t) = u_2(t) - u_2(t-1)$.

После периода макроприработки экспонента в формуле (2) не оказывает практического значения для оценки параметра a_t . При этом становится возможным и, как показали проведенные исследования весьма целесообразным с точки зрения упрощения расчетов, аппроксимация результатов этого периода линейной регрессией вида

$$a_t = b + c \cdot t, \quad (3)$$

где b и c - постоянные коэффициенты.

В этот второй период статистического моделирования требуемое число реализаций целесообразно определять по значению коэффициента корреляции r для имеющегося временного ряда.

На практике завершение статистического моделирования (т.е. оценка времени T_n) фиксируется по моменту достижения коэффициентом корреляции значений $r=0,98$. После этого должна выполняться

аппроксимация полученных результатов для оценки коэффициентов b и c в формуле (3). Для этой цели удобно применять метод наименьших квадратов.

После оценки параметров линейной регрессии выполняется расчет доверительных границ тренда значений параметра $\hat{a}_t$ с учетом упреждения 1, в которых с заданной доверительной вероятностью будут находиться значения прогнозируемой функции a_t . При этом для периода времени $t > T_n$ имеем (рис. 1, б)

$$a_t = \hat{a}_t \pm t_p \cdot S(\hat{a}_t), \quad (4)$$

где $S(\hat{a}_t)$ - средняя квадратическая ошибка прогноза; $\hat{a}_t$ - расчетное значение прогнозируемой функции a_t , т.е. прогноз для тренда, продленного на 1 единиц времени; t_p - значение t -статистики Стьюдента.

Для линейной регрессии параметр $S(\hat{a}_t)$ определяется по следующей формуле

$$S(\hat{a}_t) = S(a_t) \cdot \sqrt{\frac{n_1 - 1}{n} + \frac{(t_1 - t)^2}{\sum_{i=1}^{n_1} (t_1 - t)^2}}, \quad (5)$$

где $S(a_t)$ - дисперсия отклонений от регрессии результатов статистического моделирования, выполненного в период времени от T_n до T_n ; t_1 - период времени для которого делается экстраполяция, т.е. $t_1 = T_n + 1$; t - значение уровня, стоящего в середине ряда, используемого для оценки параметра $S(a_t)$, n_1 - число циклов моделирования выполненного в период времени от T_n до T_n .

Показанная на рис. 1 зона возможных значений параметров точности на период упреждения (экстраполяции) ограничена линиями, соответствующими уровню доверительной вероятности $P = 0.99$ (при t -статистике Стьюдента равной 2.821 с числом степеней свободы $\nu = 9$).

Пересечение нижней границы этой зоны с уровнем допустимой точности станка по исследуемому параметру точности a_{max} (в данном примере с уровнем $a_{max} = -8.5$ мкм - границей сохранения класса точности станка "П") дает оценку времени сохранения ресурса станка T_j с вероятностью не ниже $P = 0.99$.

3. После оценки параметра T_j аналогично с указанной выше методикой производится повторение операций статистического моделирования для $(j+1)$ -ой реализации. Циклы моделирования повторяются от

$j=1$ до $j=j_k$, где j_k - общее число реализаций статистического моделирования, которое должно быть достаточным для достоверной оценки закона распределения ресурса по параметрам точности исследуемых станков.

В данной работе эта задача решалась с помощью сравнения получаемых в результате статистического моделирования гистограмм с плотностью распределения вероятности закона Вейбулла - Гнеденко, имеющего вид

$$f(t) = \frac{b_1}{b_2} \cdot \left(\frac{t}{b_2}\right)^{b_1-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{b_2}\right)^{b_1}} \quad (6)$$

где b_1 и b_2 - постоянные коэффициенты.

С учетом этого, начиная с реализации под номером $j=500$ производилась оценка параметров теоретического распределения b_1 и b_2 , которые давали наибольшую степень соответствия результатов моделирования и теоретического распределения. Одновременно по критерию Пирсона выполнялась оценка числа χ^2 .

Таким образом по стабилизации параметров b_1 и b_2 , т.е. по их практической неизменяемости с ростом числа j (в пределах 5% за последние 10 циклов моделирования), определялось достаточное число выполненных реализаций статистического моделирования.

В завершении главы показаны результаты прогнозирования потери точности станков моделей 16К20ФЗ и СТП-220АП, которые были получены после завершения соответственно 617 и 623 циклов статистического моделирования. Определенные параметры в формуле (6) имели следующие значения - для станка 16К20ФЗ: $b_1 = 3,0$; $b_2 = 11,9$; $\chi^2 = 0,113$; - для станка СТП-220АП: $b_1 = 2,7$; $b_2 = 14,0$; $\chi^2 = 0,275$.

ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОТЕРИ ТОЧНОСТИ МЕТАЛЛОРЕЗУЩИХ СТАНКОВ С НАПРАВЛЯЮЩИМИ СКОЛЬЖЕНИЯ.

В главе рассмотрены вопросы методологии и практической реализации моделирования контактного взаимодействия и изнашивания направляющих скольжения металлорежущих станков изменения траектории подвижных рабочих органов.

В области моделирования контактного взаимодействия направляющих скольжения показаны проблемы использования теоретических положений, разработанных Д.Н. Решетовым, З.М. Левиной, В.Т. Портманом.

Приведена разработанная методика моделирования контактного взаимодействия направляющих скольжения, позволяющая при расчете

эпюр давления учитывать реальный профиль плоских поверхностей направляющих скольжения и возможные сочетания внешних воздействий на рабочие органы станков. Приведено содержание и последовательность этапов моделирования, при реализации которых с достаточной для практики точностью выполняется раскрытие статической неопределимости и обеспечивается гарантированная сходимость итерационного процесса поиска условий статического равновесия системы, т.е. устанавливается равенство в действии λ рабочий орган внешних сил (силы резания, вес рабочего органа) и сил, возникающих в зонах фактического касания направляющих. Алгоритм, обладающий указанными свойствами разработан и применен впервые.

В разработанной модели контактирования поверхностей выполняется приведение задачи расчета погрешностей положения узлов (в результате деформаций в стыках направляющих) к базовой задаче - расчету положения твердого тела на произвольном числе осевых упругих опор растяжения-сжатия постоянной жесткости. Оригинальность предлагаемого алгоритма заключается в использовании "условия касания", введенного в практику расчетов эпюр давления рабочих машин А.С.Прониковым.

Проведенные исследования показали, что моделирование процесса контактного внедрения направляющих по разработанной методике может выполняться с погрешностью не превышающей 2% от уровня результатов, полученных с помощью методики Д.Н.Решетова и З.М.Левиной (по сравнению результатов моделирования и расчета контактного внедрения поверхностей имеющих отклонения от плоскостности в виде параболы, клина, косинусоиды и т.р.), при существенном повышении универсальности алгоритма в смысле возможности расчета контактного внедрения для произвольного профиля направляющих и положения равнодействующей внешних сил.

Разработанная методика моделирования процесса изнашивания направляющих скольжения предусматривает учет прирабатываемости трущихся поверхностей при износе. Для этого был использован имитационный алгоритм, отрывающий возможность расчета износа направляющих при сколь угодно сложном характере изменения эпюры давления на пути движения рабочего органа по станине, с единственным требованием неизменности эпюры давления на элементарном шаге моделирования h . В ходе проведенных исследований установлено, что применение шага $h = 1 \cdot 10^{-3}$ м практически исключает различие между результатами моделирования процесса изнашивания направляющих пар трения скольжения с результатами, наблюдаемыми в ходе эксперимен-

тальных исследований.

Особое внимание в работе было уделено изучению вопроса том, после какого числа элементарных взаимодействий n_m в зонах фактического контакта должно выполняться отделение объема материала направляющих, рассчитываемого как элементарное приращение износа по формуле (1). При этом учитывалось, что при малых значениях параметра n уже достаточно заметно начинают проявляться эффекты и последствия явлений, которые происходят на микроуровне трения сопряжения и которые исследованы в работах И. В. Крагельского, Б. И. Костецкого, Н. Б. Демкина, П. А. Ребиндера, Э. В. Рыжова, И. М. Любарского, Михина Н. М., Боудена Ф. П., Тейбора Д., и др.

В основе молекулярно-механической теории сухого и граничного трения (направляющие скольжения большинства рабочих машин испытывают влияние граничного трения) лежит учет дискретности контакта двух твердых тел, обусловленной шероховатостью и волнистостью поверхности контакта. При этом внешнее трение осуществляется на отдельных пятнах контакта размером $0,1 \div 30$ мкм (в зависимости от сформировавшейся в процессе трения шероховатости).

В зоне контакта трущихся поверхностей с различной интенсивностью в зависимости от материала и ряда условий функционирования пары одновременно происходят упругое деформирование контактирующих выступов (действующая нагрузка и адгезия не приводят к возникновению в зоне контакта напряжений, превышающих предел текучести или прочности материала), пластическая деформация материала (контактные напряжения достигают предела текучести), микрорезание (контактные напряжения и деформации достигают разрушающих значений уже на первых циклах нагружения), адгезионное нарушение frictionной связи (сопутствует усталостным процессам), когезионный отрыв (схватывание). При этом в расчетах интенсивности изнашивания пар трения в качестве важнейшей характеристики используют параметр n - число циклов взаимодействия некоторого объема материала, приведших к его отделению. По данным И. В. Крагельского и Г. М. Харача для условий работы пар трения, близким к условиям работы направляющих металлорежущих станков, на микроуровне, т. е. когда под взаимодействием подразумевается контакт на площадях в нескольких квадратных микрометрах, параметр n находится в пределах от 2 до 22. Меньшие значения параметра n соответствуют условиям с преобладающим влиянием пластических эффектов и эффектов, связанных с микрорезанием.

В имитационных алгоритмах процесса изнашивания направляющих

по указанным ранее причинам требуется введение в систему расчетов параметра, аналогичного параметру n . Согласно результатам проведенных исследований параметр n_m , используемый при шаге моделирования порядка $h = 1 \cdot 10^{-3}$ м, должен статистически генерироваться в каждом цикле контактных взаимодействий направляющих p трения скольжения. Наиболее близкие к экспериментальным данным прогнозы получены для нормального распределения параметра n_m со следующими характеристиками

- для чугунных направляющих $n_m = 4$, $b_n = 0.5$;
- для стальных направляющих $n_m = 6$, $b_n = 0.4$.

Для подтверждения возможности использования изложенной методики моделирования процесса изнашивания направляющих металлорежущих станков проведены экспериментальные исследования на образцах с использованием машины трения, а также на металлорежущих станках различных моделей в условиях их заводской эксплуатации.

С использованием машины трения и компьютерного измерительного комплекса Tolisurf-6 (Англия) проведено исследование процесса изнашивания направляющих образцов, имеющих по аналогии с металлорежущим станком две грани направляющих. Направляющие верхнего и нижнего образцов были выполнены из материала и по технологии изготовления направляющих соответственно суппорта и станины станка модели СТП-220АП.

Эксперименты проводились с тремя парами трения при различном положении нагружающего усилия относительно центра симметрии ползуна (меньшего из образцов).

Поверхность направляющих образцов имела отклонения от прямолинейности. Была подготовлена пара с вогнутостью до 20 мкм профиля направляющих ползуна и вогнутостью до 6,5 мкм направляющих станины (пара N1), пара с вогнутостью до 23 мкм профиля направляющих станины и выпуклостью до 4 мкм направляющих ползуна (пара N2), а также пара с выпуклостью до 16 мкм профиля направляющих ползуна и выпуклостью до 50 мкм профиля направляющих станин (пара N3).

Для каждого образца было выполнено по 6 измерений формы направляющих. При этом были получены результаты, аналогичные тем, которые показаны на рис. 2 для пары трения N2, что свидетельствует о новых возможностях, открывающихся при использовании разработанной методики имитационного моделирования процесса изнашивания направляющих скольжения. Во всех экспериментальных исследованиях результаты моделирования эпюры износа существенно точнее резуль

татов расчетов по применяемым в настоящее время методикам и отражают характерные закономерности процесса изнашивания в различных зонах, расположенных по всей длине направляющих.

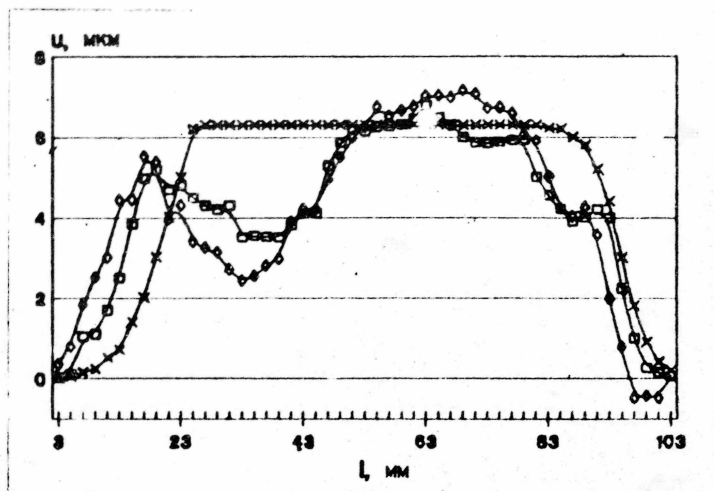


Рис. 2. Сравнение результатов эксперимента (ϕ), моделирования по имитационному алгоритму ($\square$) и расчета ($\times$) износа грани В направляющей станины пары N2

Для подтверждения возможности использования разработанной методики, для моделирования процесса изнашивания направляющих металлорежущих станков, были проведены исследования процесса изнашивания направляющих станка мод. 16K20ФЗ, находящегося в условиях 2-х сменной эксплуатации на МСПО "Красный пролетарий".

Измерение формы направляющих станка осуществлялось с помощью измерительных мостиков, применяемых на этом предприятии при контроле качества выполнения операций чистовой обработки направляющих, и координатно-измерительной машины "Beta" (Италия).

Наилучшее приближение результатов моделирования к экспериментальным данным (рис. 3) получено при следующих значениях коэффициентов изнашивания:

- для чугунов (СЧ 28), закаленных ТВЧ направляющих станины $K_{ст} = 0,9 \cdot 10^{-6}$ (МПа $^{-1}$), $\sigma_{ст} = 0,24 \cdot 10^{-8}$ (МПа $^{-1}$).

- для чугуновых (СЧ 24) незакаленных направляющих суппорта $K_0 = 1,7 \cdot 10^{-6}$ (МПа $^{-1}$), $\delta_0 = 0,58 \cdot 10^{-6}$ (МПа $^{-1}$).

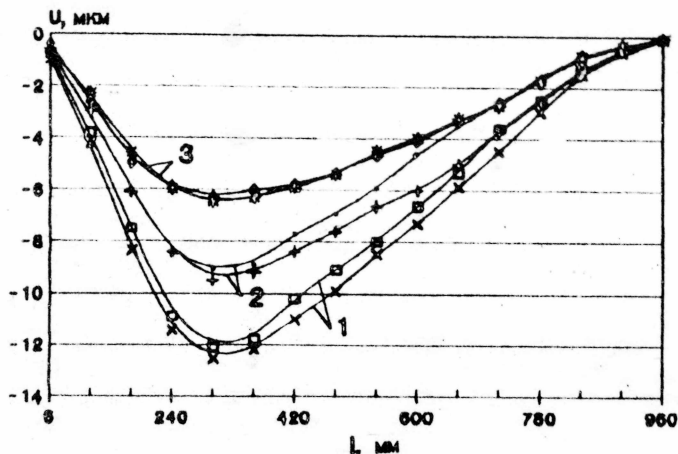


Рис.3 Износ направляющих станины станка мод.16К20Ф3

после 9,5 месяцев заводской эксплуатации

1 - грань В, 2 - грань А (грани передней направляющей),

3 - грань С задней направляющей,

◇, +, □ - результаты экспериментальных исследований,

*, ·, × - результаты моделирования на ЭВМ

Разработанная методика моделирования изменения траектории подвижных рабочих органов станков при износе направляющих скольжения позволяет учитывать расположение зон наиболее вероятного касания во всех гранях направляющих, что впервые нашло применение при прогнозировании потери точности металлорежущих станков.

Апробация данной методики была выполнена при исследовании процесса изменения траекторий шпиндельной бабки станка мод.6А75 (на основе данных ускоренных испытаний станов этой модели в УкрНИИСИП), процесса изменения траектории суппорта станков мод 16К20Ф3 и СТП-220АП. Для этого были выполнены долговременные наблюдения за станками при их эксплуатации на заводах-изготовителях.

Высокая точность и достоверность результатов заводских исследований изменения траекторий суппорта при износе направляющих были достигнуты при использовании для измерения параметров траекторий бесконтактных средств - автоколлиматоров модели АФ-1Ц в комплексе с аппаратурой (интерфейсная плата DAS-16 (США), специализированное программное обеспечение к компьютеру IBM PC), позволяющей проводить эти измерения с точностью до 0,5 мкм в автоматизированном режиме. Была разработана также оригинальная методика расчета параметров линейных траекторий суппорта на основе численного интегрирования по 1-й формуле Симпсона.

Наилучшее приближение результатов моделирования процесса потери точности станка мод.СТП-220АП к экспериментальным данным (рис.4) получено при следующих значениях коэффициента изнашивания:

- для направляющих станины (Сталь 7ХГ2ВМ): $K_{с\tau} = 0,24 \cdot 10^{-8}$ (МПа⁻¹), $b_{с\tau} = 0,09 \cdot 10^{-6}$ (МПа⁻¹);
- для направляющих суппорта (Чугун СЧ21): $K_c = 0,65 \cdot 10^{-8}$ (МПа⁻¹), $b_c = 0,36 \cdot 10^{-6}$ (МПа⁻¹).

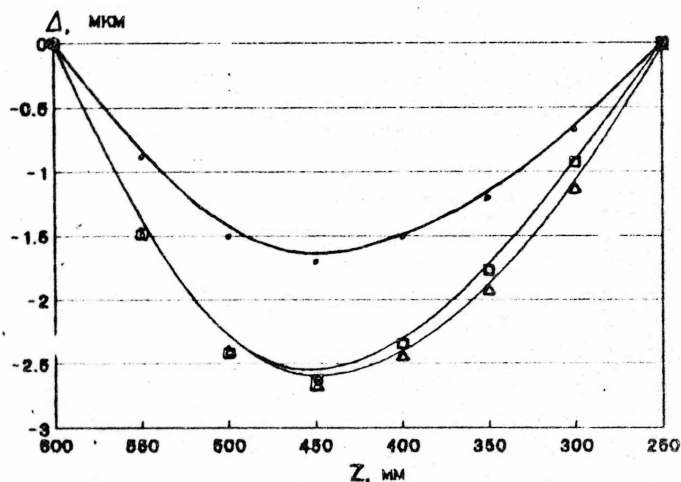


Рис.4 Изменение траектории вершины резца станка мод.СТП-220АП (зав. N 459) за 16 месяцев эксплуатации
 - результат первого измерения, ▲ - результат эксперимента,
 ■ - результат моделирования на ЭВМ

В главе приведена методика статистического моделирования исходного профиля направляющих скольжения новых станков, при использовании которой в максимально возможной мере учитываются особенности технологического процесса их изготовления и контроля, в том числе заданные параметры отклонений от прямолинейности и плоскостности, а также число пятен контакта на фиксированной площади поверхности направляющих после операции шабрения. Разработаны методики, основанные на применении интерполяционных формул Лагранжа и ячеечных перколяционных кластеров. Они обеспечивают возможность моделирования с заданными свойствами жесткости стыков для пар трения направляющих, для узлов и станка в целом.

В заключении главы содержатся сведения о сформированной для проведения прогнозирования потери точности металлорежущих станков с монолитными чугунными и накладными стальными направляющими скольжения базе данных.

ГЛАВА 4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ С НАПРАВЛЯЮЩИМИ СКОЛЬЖЕНИЯ

Разработанные в процессе выполнения диссертации алгоритмы и программы моделирования позволили выполнить исследование возможности совершенствования металлорежущих станков с направляющими скольжения. В главе содержатся основные результаты этих исследований.

С помощью варьирования параметров конструкции станков определены наиболее эффективные пути (изменение угла наклона суппортной группы станка мод. СТП-220АП, изменение положения центра тяжести суппортной группы станка мод. 16К20Ф3) увеличения ресурса сохранения точности для важнейшего параметра - отклонения траектории от прямолинейности. Разработанные рекомендации позволяют заметно снизить скорость изменения точности станка без существенных затрат на модернизацию исследованных моделей.

Прогнозирование потери точности станков при изменяющихся свойствах исходного профиля направляющих позволило исследовать эффективность повышения требований к выполнению завершающего этапа технологического процесса изготовления направляющих скольжения - операции шабрения. Показана возможность значительного увеличения ресурса станков по точности при увеличении числа пятен контакта на площади поверхности направляющих, ограниченной квадратом 25х25 мм. Получены сведения об изменении соотношения фактической и номинальной площади контакта в направляющих, снижении среднего

давления на площадках касания, увеличении жесткости стыка и суппортной группы.

Определены законы надежности исследованных станков для различных по интенсивности условий эксплуатации (примеры таких результатов приведены на рис. 5).

Получены сведения об особенностях процесса потери точности в различных зонах рабочего пространства станков, имеющие важное значение для рационального использования их потенциальной долговечности. Показано, что результаты прогнозирования изменения траектории режущего инструмента могут принципиально отличаться друг от друга, в зависимости от расположения зон, относительно которых выполняется такое исследование.

Определены возможные реализации процесса потери точности станков при проведении ускоренных испытаний. Установлено, что ускоренные испытания токарных станков, имеющих традиционную компоновку с треугольной передней и плоской задней гранью направляющих, на форсированных режимах, за счет изменения соотношения интенсивности изнашивания различных граней, приводят к существенно, а иногда и принципиально ошибочным прогнозам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Главный результат диссертационной работы - решение крупной научной проблемы, имеющей важное народно-хозяйственное значение: разработка научных основ и практическая реализация прогнозирования изменения точности металлорежущих станков с направляющими скольжения. Выполнена достоверная оценка гамма-процентного ресурса и вероятности безотказной работы по параметрам точности на ранних этапах создания станка после выбора его компоновки и конструкции системы направляющих для подвижных рабочих органов. При этом точность определения основных показателей технологической надежности по сравнению с применяемыми методами возросла более чем в 1,5 раза.

2. Установлено содержание и последовательность выполнения этапов процедуры прогнозирования потери точности станков на основе использования статистических алгоритмов Монте-Карло и экстраполяционных алгоритмов теории временных рядов, которые позволяют осуществлять прогнозирование с достаточной для практики современного станкостроения достоверностью, учитывая макроприработку направляющих скольжения в начальный период их эксплуатации, когда

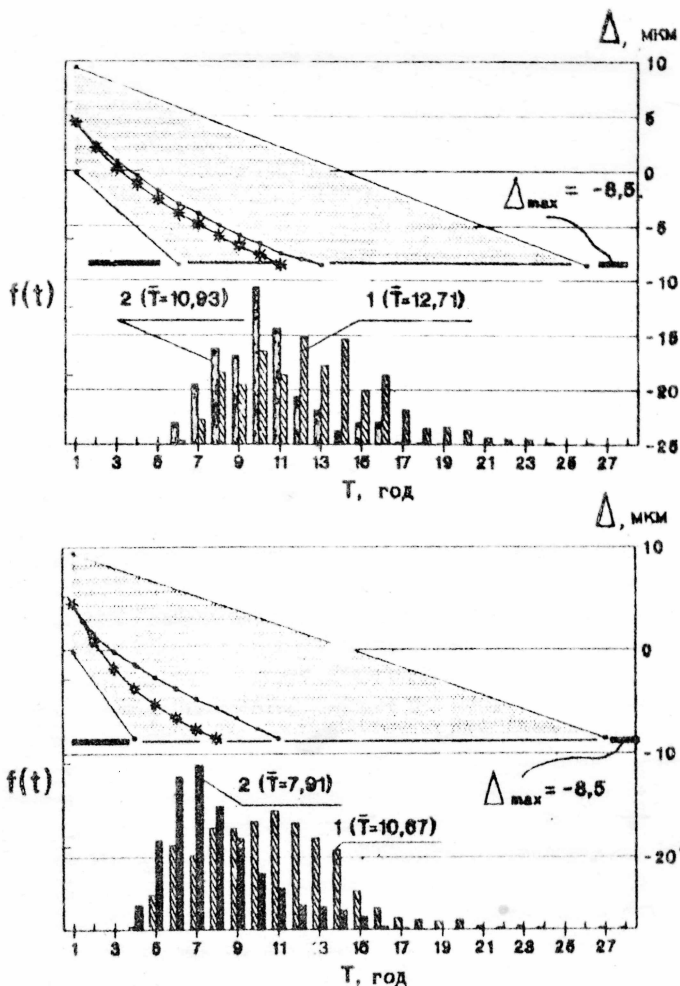


Рис. 5 Результаты прогнозирования потери точности станков мод. СТП-220АП (а) и 16К20ФЗ (б) по параметру отклонения траектории вершины резца от прямолинейности Δ_x на длине перемещения суппорта 400 мм для различных по интенсивности условий эксплуатации

-- прогноз для эксплуатации на заводах-изготовителях;

* - среднестатистический прогноз;

■ - область возможных реализаций процесса (с вероятностью $P=0.99$).

процесс потери точности происходит по существенно нелинейным от длительности эксплуатации станка законам. Учет макроприработки направляющих в статистических алгоритмах процесса изнашивания применен впервые.

3. Новые возможности повышения точности и достоверности результатов моделирования связаны с созданием оригинальных алгоритмов и программ математического моделирования процессов, происходящих в станках при эксплуатации и снижающие начальные показатели точности.

3.1 Разработана методика моделирования контактного взаимодействия направляющих скольжения, позволяющая при расчете эпюр давления учитывать реальный профиль плоских поверхностей направляющих скольжения и возможные сочетания внешних воздействий на рабочие органы станков. Определено содержание и последовательность выполнения этапов моделирования, при которых с достаточной для практики точностью выполняется раскрытие статической неопределимости и обеспечивается гарантированная сходимость итерационного процесса поиска условий статического равновесия системы, когда устанавливается равенство в действии на рабочий орган внешних сил (силы резания, вес рабочего органа) и сил, возникающих в зонах фактического касания направляющих. Алгоритм, обладающий указанными свойствами разработан и применен впервые.

3.2 Разработана методика имитационного моделирования процесса изнашивания направляющих, основывающаяся на использовании статистических закономерностей для оценки числа циклов взаимодействий на площадках фактического касания до отделения элементарного объема металла. Установлено, что имитационный алгоритм воспроизводит прирабатываемость направляющих при износе, что является важным фактором повышения (приблизительно на 15%) точности применяемых методов моделирования.

3.3 Разработана методика моделирования изменения траектории подвижных рабочих органов станков при износе направляющих скольжения, позволяющая учитывать расположение зон наиболее вероятного касания во всех гранях направляющих, что впервые нашло применение при прогнозировании потери точности металлорежущих станков.

3.4 Разработана методика статистического моделирования исходного профиля направляющих скольжения новых станков, при использовании которой учитываются особенности технологии их изготовления и контроля, в том числе заданные параметры отклонений от прямолинейности и плоскостности, а также число пятен контакта на

фиксированной площади поверхности направляющих после операции шабрения. Данная методика обеспечивает возможность моделирования с заданными свойствами жесткости стыков для пар трения направляющих, для узлов и станка в целом.

4. Выполнена количественная оценка ряда важнейших параметров, необходимых для использования в алгоритмах моделирования, таких как число циклов взаимодействий на площадках фактического касания направляющих до отделения элементарного объема материала в алгоритме имитационного моделирования процесса изнашивания и коэффициенты пропорционального пересчета результатов моделирования в алгоритме моделирования контактного внедрения направляющих при определении эпюр давления.

5. Сформирована база данных для прогнозирования потери точности станков с наиболее широко распространенными монолитными чугунными направляющими подвижных рабочих органов и неподвижных станин а также с накладными стальными направляющими станин. В состав базы данных входят параметры, определяемые особенностями конструкций и компоновок исследуемых станков, технологии изготовления направляющих, параметры, определяемые условиями предполагаемой эксплуатации станков и параметры, характеризующие условия протекания процесса изнашивания направляющих скольжения.

6. Разработаны методы и средства контроля и регистрации хода процесса потери точности металлорежущих станков при эксплуатации, позволившие с достаточной степенью достоверности выявить соответствие разработанных математических моделей реальным процессам. Экспериментальные исследования выполнены с помощью автоматизированной компьютерной системы регистрации траекторий линейных перемещений на базе фотоэлектрического автоколлиматора, современных, преимущественно компьютеризированных средств регистрации формы поверхности направляющих образцов и металлорежущих станков, бесконтактных электромагнитных нагрузочных устройств, имеющих оригинальную конструкцию, защищенную авторскими свидетельствами СССР.

7. Для исследованных в процессе выполнения данной работы станков определены наиболее эффективные пути (изменение угла наклона суппортной группы станка мод. СТП-220АП, изменение положения центра тяжести суппортной группы станка мод. 16К20Ф3) увеличения ресурса сохранения точности для важнейшего параметра - отклонения траектории от прямолинейности. Определена возможность на 28-30% снизить скорость изменения точности станка без существенных затрат на модернизации исследованных моделей.

8. Оценена эффективность повышения требований к выполнению завершающего этапа технологического процесса изготовления направляющих металлорежущих станков (операции шабрения). Показана возможность приблизительно в 1,5 раз увеличить ресурс станка мод. 16К20ФЗ (с 10,67 до 16,02 лет эксплуатации) при увеличении числа пятен контакта на площади поверхности направляющих, ограниченной квадратом 25×25 мм, от $n=20$ до $n=26$. При этом получены сведения об увеличении соотношения фактической и номинальной площади контакта в направляющих, снижении среднего давления на площадках касания, увеличении жесткости стыка и суппортной группы.

9. Определены законы надежности (параметры распределения Вейбула-Гнеденко) исследованных станков для различных по интенсивности условий эксплуатации. Получены сведения об особенностях процесса потери точности в различных зонах рабочего пространства станков, имеющие важное значение для рационального использования их потенциальной долговечности.

10. Определены длительность периода макроприработки направляющих (в зависимости от износостойкости направляющих и интенсивности эксплуатации период макроприработки находится в пределах от 1,5 до 3,5 лет) и коэффициенты изнашивания для пары трения чугуна-сталь (накладные стальные направляющие станины и чугунные направляющие подвижного рабочего органа).

11. Исследована закономерность процесса потери точности станков при проведении ускоренных испытаний. Установлено, что ускоренные испытания токарных станков, имеющих традиционную компоновку треугольной передней и задней плоской гранями направляющих, на форсированных режимах за счет изменения соотношения интенсивности изнашивания различных граней приводят к существенно, а иногда и принципиально ошибочным прогнозам. По этой причине предложено рассматривать ускоренные испытания опытных образцов новых моделей металлорежущих станков в качестве одной из составных частей комплекса исследований параметрической надежности, главной задачей которых является уточнение коэффициентов изнашивания направляющих и доказательство соответствия математических моделей реальным процессам изнашивания и изменения траектории подвижных рабочих органов.

12. Обобщение полученных в процессе выполнения данной работы результатов позволяет сделать вывод о том, что на ее основе может быть решена важнейшая задача современного станкостроения - разработка научно-обоснованных норм надежности отечественных металло-

режущих станков.

Основные результаты и методы исследований диссертационной работы используются в учебном процессе кафедры "Прецизионные станочные модули" МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Кузнецов Б.Н., Утенков В.М. Некоторые вопросы ускоренных испытаний технологического оборудования//Научные основы автоматизации производственных процессов и управления качеством в машиностроении: Тез. докл. всесоюз. межвуз. научно-техн. конф. -М.: МВТУ, 1979. - С. 20-23.
2. Кузнецов Б.Н., Утенков В.М. Анализ возможностей по ускорению испытаний станков на технологическую надежность//Надежность и эффективность станков-автоматов: Сб. научн. трудов. - М.: МВТУ, 1980. - С. 54-68.
3. Дальский С.А., Утенков В.М. Комплексная оценка точности перемещений рабочих органов металлорежущих станков//Технология, организация и экономика машиностроительного производства. - 1981. - Вып. 5. - С. 4-5.
4. Утенков В.М. Прогнозирование потери точности токарных станков при износе направляющих на базе ускоренного испытания опытных образцов. Дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 -М.: МВТУ, 1981. - 202 С.
5. Исследование и разработка норм и методов оценки надежности металлорежущих станков с ЧПУ с целью повышения их качества, надежности и долговечности. Отчет НИР (заключительный)/ МГТУ; рук. А.С.Проников, № ГР 01830027567; Инв. № Е75136. -М., 1979. - 144 с.
6. Теоретические основы и исследование качества и надежности станков, автоматических линий и их механизмов. Отчет НИР (заключительный)/ МГТУ; рук. А.С.Проников, № ГР 01830027218; Инв. № 02840027445. -М., 1979. - 116 с.
7. Разработка методических указаний проведения испытаний и подтверждения соответствия станка нормам надежности (при приемке станков) Отчет НИР (заключительный)/ МГТУ; рук. А.С.Проников, № ГР 78015938; Инв. № Б906115. -М., 1979. - 67 с.
8. Разработка типового положения и проекта государственного испытательного центра при ВУЗе для оценки качества и надежности технологического оборудования. Отчет НИР (заключительный)/ МГТУ; рук. А.С.Проников, № ГР 78015955; Инв. № 02820070833. -М., 1980. -24 с.

9. Разработка стандартов и методических указаний по испытанию и прогнозированию надежности технических и технологических систем. Отчет НИР (заключительный)/ МГТУ; рук. А.С.Проников, Н ГР 78015956; Инв. N 0382800. -М., 1980. - 77 с.

10. Разработка методики испытания надежности универсальных станков и создание оборудования для диагностического центра. Отчет НИР (заключительный)/ МГТУ; рук. А.С.Проников, Н ГР 01825029261; Инв. N 02830038756. -М., 1982. - 70 с.

11. Разработка и внедрение методики испытания надежности металлорежущих станков в условиях диагностического центра. Отчет НИР (заключительный)/ МГТУ; рук. А.С.Проников, Н ГР 01830076263; Инв. N 02860019262. -М., 1985. - 92 с.

12. Разработка методов испытания и создание испытательно-диагностического центра для оценки качества и надежности опытных образцов станков токарной группы. Отчет НИР (заключительный)/ МГТУ; рук. А.С. Проников, ГР 02860019197; Инв. N 81001426. -М., 1985. - 94 с.

13. Разработка программ прогнозирования изменения точности станка при износе направляющих и системы автоматизированной оценки параметров линейной траектории на основе автоколлиматора. // Разработка и создание испытательно-диагностического комплекса для автоматизированной оценки качества и надежности станков и станочных модулей методом программных испытаний. Отчет НИР (заключительный)/ МГТУ; рук. А.С.Проников, Н ГР У46389; Инв N Е70136. -М., 1989. Книга №6. -44 с, д.с.п.

14. Утенков В.М., Спиренков Н.П., Баланич А.М. Исследование суппортной группы станка СТП-220АП с помощью фотоэлектрического автоколлиматора// Технология: Науч.-техн. сб., серия: Технология машиностроения. -М.: НИИТМ, ЦНТИ Поиск. 1990. - Вып.4. - С. 52-61.

15. Разработка и внедрение автоматизированной системы оценки качества и диагностики станков токарно-фрезерной группы. Отчет НИ. (заключительный)/ МГТУ; рук. А.С.Проников, Н ГР 0190015731, Инв. N И10455, М., 1990. - 80 с.

16. Утенков В.М. Моделирование процесса изнашивания направляющих пар трения скольжения //Надежность и техническая диагностика оборудования перерабатывающих отраслей АПК: Сб.научн.работ. /Под ред. Т.В.Чижиковой. - М.: Полиграфсервис, 1995. - С.105-114.

17. Утенков В.М., Спиренков Н.П. Автоматизированный контроль точности подвижных узлов машин с использованием ЭВМ типа IBM PC //Надежность и техническая диагностика оборудования перерабатыва-

ющих отраслей АПК: Сб. науч. работ /Под ред. Т. В. Чижиковой. - М.: Полиграфсервис, 1995. - С. 115-122.

18. Утенков В.М. Исследование условий эксплуатации токарного станка с ЧПУ модели 16К20ФЗ //Станки с программным управлением в машиностроении и приборостроении: Сб. науч. трудов. - Саратов, 1982. - С. 46-48.

19. Кузнецов Б.Н., Утенков В.М. Испытание и расчет узлов металлорежущих станков. Оптимизация регламента испытаний станков //Методы исследования станков: Сб. науч. трудов. -М.: МВТУ, 1982. - С. 14-17.

20. Утенков В.М. Метод учета прирабатываемости трущихся поверхностей при износе направляющих металлорежущих станков // Известия вузов. Машиностроение. 1984. - Вып. 5. - С. 134-136.

21. Утенков В.М. Исследование закономерности формообразования деталей при токарной обработке. -М.: ВИНТИ, 1984, Вып. 10. - С. 103. (Деп. в ВНИИТЭРМ N 113 МШ - Д84).

22. Утенков В.М. Исследование процесса потери точности токарного станка с ЧПУ в условиях заводской эксплуатации. //Современные направления повышения точности механической обработки в машиностроении: Сб. научных трудов. - Саратов, 1984. - С. 64-65.

23. Использование мини-ЭВМ для обработки показаний фотоэлектрического автоколлиматора. /В.М. Утенков, Н.П. Спиренков, А.А. Аюпджанян, А.М. Григорян. //Метрология и качество: Тез. докл. респ. науч. техн. конф. - Ереван, 1984. - С. 45-47.

24. Утенков В.М. Применение вычислительного комплекса Искра 1256 для управления режимами испытаний металлорежущих станков //Производственный опыт. - М.: ЦНИИинформации, 1984, Вып. 9. - С. 42-45, д.с.п.

25. Иванов В.С., Смолянкин Г.В., Утенков В.М. Нагрузочное устройство для испытания токарных станков //Производственный опыт. - М.: ЦНИИинформации, 1984, Вып. 10. - С. 17-20, д.с.п.

26. Смолянкин Г.В., Утенков В.М., Григорян А.М. Использование микросистемы ВУМС-001 для автоматизации контроля точности металлорежущих станков //Производственный опыт. - М.: ЦНИИинформации, 1984, Вып. 11. - С. 42-45, д.с.п.

27. Утенков В.М., Соколов Ю.Е. Использование вычислительного комплекса для управления режимами испытаний и эксплуатации технологических систем //Известия вузов. Машиностроение. - 1984. - Вып. 6. - С. 114-117.

28. Утенков В.М., Спиренков Н.П., Акопджанян А.А. Контроль точности металлорежущих станков с помощью фотоэлектрического автоколлиматора в комплексе с микро-ЭВМ //Передовой опыт. - М.: ЦНИИинформации, 1986, Вып. 11. - С. 76-79, д. с. п.

29. Комплекс программных устройств для автоматизированной оценки качества металлорежущих станков //Сборник проспектов на экспонаты ВДНХ СССР. /А.С.Проников, В.М.Утенков В.М., В.С.Иванов и др. -М.: МВТУ, 1987. -14с.

30. Утенков В.М., Спиренков Н.П., Акопджанян А.А. Опыт автоматизации измерения сил резания с помощью микро-ЭВМ /Передовой опыт. - М.: ЦНИИинформации, 1987, Вып. 1. - С. 66-69, д. с. п.

31. Надежность в технике. Программные испытания технологического оборудования. Общие требования: Рекомендации Госстандарта СССР N Р50-54-98-88. /А.С.Проников, В.С.Стародубов, В.В.Селезнева, В.М.Утенков и др. - М., 1988. - 99с.

32. А.С.1117129 СССР, МКИ В 23 В 25/06. Устройство для испытания токарных станков/ А.С.Проников, В.С.Иванов, В.М.Утенков, Б.А.Усов, В.Я.Геча (СССР). -N 367997/25-08. Оpubл: 07.10.84, Бюл. N 7//Открытия. Изобретения. - 1984. - N 12. -С. 44.

33. А.С.1191191 СССР, МКИ В 23 В 25/06. Способ нагружения токарных станков при испытании/ А.С.Проников, В.С.Иванов, В.М.Утенков (СССР). -N 3678869/25-08. Оpubл. 15.11.85, Бюл. N 42//Открытия. Изобретения. - 1985. - N 12. -С. 21.

34. А.С.1325528 СССР, МКИ G 06 G 7/48. Устройство для моделирования силы резания на металлорежущем станке/ А.С.Проников, В.С.Иванов, В.М.Утенков (СССР). -N 3939446/24-24. Оpubл. 23.07.87, Бюл. N 27//Открытия. Изобретения. - 1987. - N 27. -С. 30.

35. А.С.1335374 СССР, МКИ В 23 В 25/06. Устройство для имитации сил резания на токарных станках/ А.С.Проников, В.С.Иванов, В.М.Утенков (СССР). -N 4056518/31-08. Оpubл. 07.09.87, Бюл. N 33//Открытия. Изобретения. - 1987. - N 33. -С. 27.

36. Программный метод автоматизированного испытания металлорежущих станков. Методические указания к лабораторным работам по курсу "Основы проектирования станков". /А.С.Проников, В.М.Утенков, В.С.Иванов и др. - М.: МГТУ, 1990. - 24 С.

37. Утенков В.М. Расчет направляющих станков // Учебное пособие по расчету механизмов станков для курсового и дипломного проектирования. / Под. ред. А.С.Проникова. - М.: МВТУ, 1985. - С. 17-30.

38. Проников А.С., Утенков В.М. Основные типы направляющих //Проектирование металлорежущих станков и станочных систем. Спра-

вочник-учебник. В 3-х томах /Под. общ. ред. А. С. Проникова. - М.: МГТУ, Машиностроение, 1995. - Т. 2. - С. 174 +187.

39. Проников А. С., Утенков В. М. Расчет направляющих по допустимым нагрузкам //Проектирование металлорежущих станков и станочных систем. Справочник-учебник. В 3-х томах. /Под. общ. ред. А. С. Проникова. - М.: МГТУ, Машиностроение, 1995. - Т. 2. - С. 187+191.

40. Проников А. С., Утенков В. М. Расчет направляющих на долговечность //Проектирование металлорежущих станков и станочных систем. Справочник-учебник. В 3-х томах. /Под. общ. ред. А. С. Проникова. - М.: МГТУ, Машиностроение, 1995. - Т. 2. - С. 203+209.

41. Разработка методики программных испытаний и структуры испытательно-диагностического центра // Разработка и создание испытательно-диагностического комплекса для автоматизированной оценки качества и надежности станков и станочных модулей методом программных испытаний. Отчет НИР (заключительный)/ МГТУ; рук. А. С. Проников, Н ГР У46389; Инв N Е75138. -М., 1989. Книга N 1. - 64с, д. с. п.

42. Разработка программных нагрузочных устройств. // Разработка и создание испытательно-диагностического комплекса для автоматизированной оценки качества и надежности станков и станочных модулей методом программных испытаний. Отчет НИР (заключительный)/ МГТУ; рук. А. С. Проников, Н Г. У46389; Инв N Е75139. -М.: 1989. Книга N5. -144с, д. с. п.

43. Разработка научно-технической документации по нормированию, расчету и прогнозированию надежности технических и технологических систем. Отчет НИР (заключительный)/ МГТУ; рук. А. С. Проников, Н ГР 0183002959; Инв N 02860037521. -М., 1985. - 37 с.

44. Утенков В. М. Прогнозирование изменения точности металлорежущих станков при износе направляющих по результатам ускоренных испытаний опытного образца// Надежность и качество машин: испытание, диагностика, прогнозирование: Тез. докл. всесоюз. научн.-техн. конф. М., 1981. - С. 57+59.