

М85843

Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени государственный
технический университет имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

РУДЕНКО Валерий Николаевич

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ СОВМЕСТНОЙ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ
И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ФРЕЗЕРНЫХ СТАНКОВ С ЧПУ

05.03.01 – Процессы механической и физико-технической
обработки, станки и инструмент

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 1992

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана

Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент
Б.М. ДМИТРИЕВ

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
А.В. ПУШ

- кандидат технических наук, доцент
В.Б. АВДЕЕВ

Ведущее предприятие - Московский НИИ технологии
машиностроения

Защи-
на засе-
ском го
по адре

н. в ____ час.
в Москов-
Э.Баумана

Ваш о
чать,

ный пе-

С дис
Н.Э.Бау.

имени

Авто

У:
специ
канд.

М-85743

Подп. к печати 24.4.82 Объем 1 п.л. Заказ 106 Тир. 100 экз.
Типография МТУ им. Н.Э.Баумана

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современное машиностроительное производство характеризуется широким использованием высокоавтоматизированного технологического оборудования, в том числе металло-режущих станков, оснащенных системами ЧПУ. В настоящее время производится и находится в эксплуатации значительное число таких станков различных типоразмеров с разнообразными техническими характеристиками, обеспечивающих различную точность и производительность обработки.

Необходимость выпуска определенного объема годных изделий в заданный промежуток времени и высокая стоимость станков с ЧПУ усиливают тенденцию повышения требований к технической эффективности данного вида технологического оборудования, под которой понимают степень соответствия фактических точности и производительности станка требуемым (желаемым).

Фактические точность и производительность станка зависят от конкретного сочетания множества различных факторов, характеризующих его качество, режимы функционирования и условия эксплуатации. Изменение одного или нескольких влияющих факторов приводит, как правило, к одновременному изменению указанных свойств станка. При этом вследствие уменьшения влияния на точность и производительность станка ряда субъективных факторов, связанных с вмешательством человека и организационно-техническими причинами, взаимосвязь основных свойств в станках с ЧПУ принимает более объективный характер. Соответственно, традиционные подходы, ориентированные на независимое рассмотрение и раздельное получение количественных оценок точности и производительности, при разработке мероприятий по повышению технической эффективности станка становятся во многих случаях неприемлемыми, поскольку приводят к получению неверных результатов и принятию ошибочных решений.

Другой аспект проведения оценки и повышения технической эффективности станка связан с целесообразностью выработки оценочного суждения до применения станка или осуществления предполагаемых изменений влияющих параметров. Выполнение данного требования обуславливает необходимость использования методов, дающих возможность получения достоверных количественных характеристик

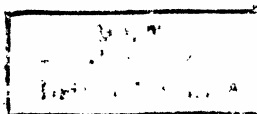
НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1085743

Руденко В.Н. Разработка м

I



точности и производительности станка на последующий период времени. На основании вышеизложенного, разработка методики, позволяющей проводить оценку точности и производительности станка с учетом взаимосвязи данных свойств, является актуальной задачей.

Целью работы является повышение технической эффективности металлорежущих станков с ЧПУ на основе определения количественной взаимосвязи точности и производительности.

Методы исследований. В работе использовались теоретические и экспериментальные методы. Применялись методы системного анализа, теории надежности, теории эффективности технических систем, исследований и испытаний металлорежущих станков, теории износа, технических измерений, теории вероятностей и математической статистики, теории планирования эксперимента. Экспериментальные исследования проводились с использованием электрических методов измерения механических величин, с применением современной измерительной и регистрирующей аппаратуры и специально созданных устройств.

Научная новизна. На основе исследования механизма формирования взаимосвязи точности и производительности разработана методика, позволяющая проводить совместную оценку указанных свойств станка при определении и повышении уровня технической эффективности путем целенаправленного изменения влияющих станочных и технологических параметров.

Практическая ценность. Использование разработанной методики совместной оценки точности и производительности станка позволяет: устанавливать целесообразность применения и проводить выбор станка для заданной технологической операции; осуществлять целенаправленное назначение и сбалансированное изменение параметров конструкции станка с целью достижения требуемого уровня технической эффективности; корректировать структуру и длительность межремонтного периода для каждого конкретного станка с учетом его фактического начального состояния и режимов работы.

Реализация результатов. Практические рекомендации по оценке и повышению уровня технической эффективности станков приняты к внедрению на Храпуновском инструментальном заводе. Ожидаемый годовой экономический эффект составляет 6340 рублей.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на всесоюзной научно-технической конференции

"Организационно-экономические проблемы повышения качества технологических систем в новых условиях хозяйствования" – г.Москва, 1990г. и на научных семинарах кафедры "Прецизионные станочные модули" МГТУ им.Н.Э.Баумана (1988-1990гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано две печатных работы.

Структура и объем работы. Диссертационная работа содержит введение, пять глав, общие итоги и выводы по работе, список литературы из 87 наименований и 8 приложений. Работа изложена на 104 страницах машинописного текста, включает 49 рисунков и 13 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, дана общая характеристика работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены особенности оценки технической эффективности металлорежущего станка, проведен анализ различных подходов и специфики определения количественных значений характеристик точности и производительности, рассмотрены достоинства и недостатки применяемых подходов, показана возможность и проанализированы предпосылки разработки методики совместной оценки исследуемых свойств, сформулированы задачи работы, намечены пути решения задач, выбран объект исследования.

В соответствии с общепринятыми классификационными признаками металлорежущий станок с ЧПУ как объект исследования относится к классу сложных динамических систем, обладающих нестационарными распределенными свойствами. Показано, что оценка двух взаимосвязанных свойств подобных объектов может быть выполнена в двух видах: 1) скалярном, основанном на введении и получении комплексного (обобщенного) показателя; 2) векторном, базирующемся на совместном определении единичных показателей свойств.

Оценка первого вида позволяет строго математически обосновать выбор оптимального пути повышения технической эффективности станка. Однако разработка и получение комплексного показателя точности и производительности на сегодняшний день не представляется возможной ввиду отсутствия решения ряда вопросов теоретичес-

кого и экспериментального исследования сложных систем. Отмечается, что несмотря на сложность обоснования наилучшего решения, связанную с трудностью применения процедур формальной оптимизации, большому числу практических задач удовлетворяет векторная оценка технической эффективности. Этот вид оценки применительно к станку предусматривает определение количественного соответствия между точностью и производительностью с помощью соответствующих единичных показателей, предполагая применение единого подхода к оценке рассматриваемых свойств и согласование оценок во времени.

С указанных позиций проанализированы подходы к исследованию взаимосвязи и методики совместной оценки точности и производительности станка, представленные в работах К.В.Вотинова, В.А.Кудина, А.И.Камышева, М.Веска и др. Анализ показал, что существующие подходы рассматривают исследуемые свойства как независимые либо от продолжительности, либо от режимов работы станка, т.е. как стационарные. В недостаточной мере выявлен и описан механизм формирования взаимосвязи точности и производительности. Общим недостатком предлагаемых методик является отсутствие возможности учета тех или иных причин, вызывающих нарушение заданного взаимного положения формообразующих узлов и изменение длительности обработки. Перечисленные ограничения и недостатки не позволяют получать достоверные оценки точности и производительности станка на последующий период времени.

Вместе с тем, на сегодняшний день, благодаря работам Б.М.Базрова, Л.И.Волкевича, А.М.Дальского, В.С.Корсакова, А.С.Проникова, В.Э.Пуша, Д.Н.Решетова, Г.А.Шаумяна, Н.Опитца и др., накоплен значительный фактический и теоретический материал, позволяющий получать достоверную информацию о состоянии станка на будущий период времени, необходимую для расчета показателей точности и производительности. Получение подобной информации в требуемом объеме возможно методом математического моделирования. Сформулированы основные требования, которым должна отвечать разрабатываемая модель.

Дальнейший обзор проводился в направлении анализа работ, позволяющих построить модель, удовлетворяющую сформулированным требованиям. Отмечается, что при проведении исследований точности и производительности станка широкое распространение получили

модели аналитического типа, основу которых составляет совокупность функциональных соотношений и логических условий, связывающих искомые величины с параметрами станка и технологической операции. Однако область применимости аналитического подхода существенно ограничена отсутствием возможности или высокой сложностью получения составляющих модель функциональных зависимостей, пригодных для различных значений параметров станка и режимов его функционирования. Показано, что решить задачу совместной оценки точности и производительности станка при широких диапазонах варьирования станочных и технологических параметров позволяет метод имитационного моделирования.

В качестве объекта исследования выбран вертикально-фрезерный полуавтомат мод. ЛФ 260 МТЗ с I4-и позиционным инструментальным магазином, имеющий достаточно высокую степень автоматизации и получивший широкое распространение в различных отраслях промышленности.

На основании проведенного анализа состояния вопроса сформулированы следующие задачи исследования: 1) установить механизм формирования взаимосвязи точности и производительности станка; 2) разработать математическую модель, позволяющую получать связанные между собой количественные характеристики исследуемых свойств для различных значений станочных и технологических параметров; 3) выбрать, адаптировать и разработать методы и средства, необходимые для получения исходных данных и зависимостей, используемых в разработанной модели; провести необходимые экспериментальные исследования станка; 4) на основе разработанной модели осуществить совместную оценку точности и производительности и выработать рекомендации по повышению технической эффективности объекта исследований; 5) разработать основные положения методики совместной оценки основных свойств станка.

Вторая глава посвящена вопросам разработки основных положений имитационной модели станка, включающим: определение механизма формирования взаимосвязи точности и производительности; выбор показателей основных свойств; построение общей структурной схемы и общего алгоритма модели.

По результатам проведенного в работе анализа сделан вывод, что в основе взаимосвязи точности и производительности станка лежат факторы и процессы, обуславливающие пространственно-времен-

ное отклонение фактических характеристик станка от идеальных. Отмечается, что особенностью механизма формирования взаимосвязи основных свойств станка является одновременное возникновение в станке комплекса отличающихся по характеру и продолжительности протекания процессов (обратимых, необратимых, линейных, нелинейных, непрерывных, дискретных и т.п.), неоднозначное изменение которых, вызываемое изменением влияющих на точность и производительность станка параметров, приводит к своеобразию проявления связи между свойствами в каждом конкретном случае.

В качестве показателей точности с учетом класса точности исследуемого станка и стохастической природы протекающих в станке процессов приняты вероятностные характеристики (математическое ожидание и с.к.о.) траекторий взаимного относительного перемещения формообразующих узлов в пределах исследуемого участка:

- максимальное значение проекции на координатные оси станка ($I = X, Y, Z$) смещения фактической траектории относительно заданной - $\delta_i \cdot \sigma_i^{\delta}$;

- размах - разница между максимальным и минимальным значениями смещения - $\rho_i \cdot \sigma_i^{\rho}$.

В качестве показателя производительности принята цикловая производительность - $\Pi_{ц}$.

Разработаны общая структура и общий алгоритм модели (рис.1). Структура модели представлена совокупностью связанных друг с другом компонент, в рамках каждой из которых описывается один из факторов или процессов, оказывающих существенное влияние на точность и производительность станка. Включенные в модель факторы и процессы выбирались по результатам анализа исследований аналогичных станков и предварительных экспериментов.

За основу организации общего имитационного алгоритма модели принята процедура квазипараллельного моделирования процессов, одновременно протекающих в станке, и способ задания шага до следующего события, под которым понимается изменение любых параметров рабочих и вспомогательных ходов, выполняемых станком. При моделировании на каждом текущем i -м шаге рассчитываются затраты времени $T(i)$ и изменение состояния станка, находящее отражение в отклонении взаимного относительного положения конечных звеньев цепи формообразования от запрограммированного

$$\bar{R}(i) = ((\delta_x(i), \sigma_x^{\delta}), (\delta_y(i), \sigma_y^{\delta}), (\delta_z(i), \sigma_z^{\delta}))^T,$$

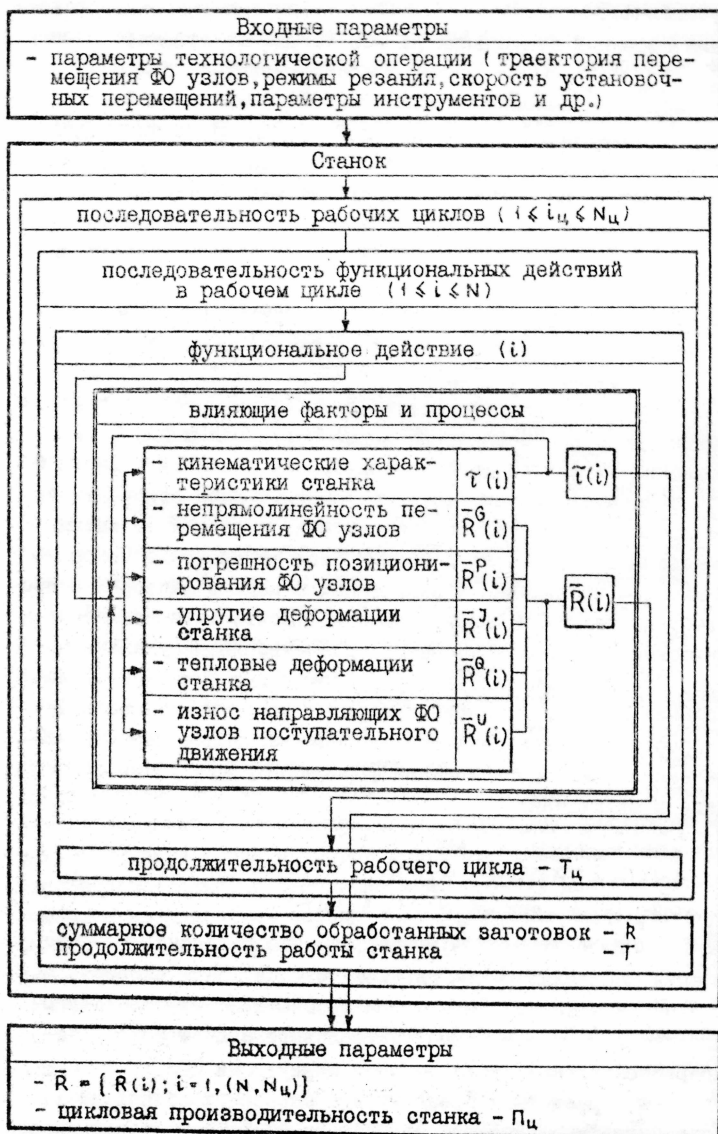


Рис. I. Общая структура и общий алгоритм модели станка.

где $\delta_x(i), \delta_y(i), \delta_z(i)$ — значения математического ожидания проекций отклонения на оси координат станка;
 $\sigma_x^\delta, \sigma_y^\delta, \sigma_z^\delta$ — соответствующее с.к.о.

Условиями окончания выполнения шагов служат либо количество заготовок k_0 , подлежащих обработке, либо ограничение по продолжительности работы станка T_0 . Такая организация моделирующего алгоритма, несмотря на разбиение модели на ряд отдельных составных частей, позволяет воспроизвести процесс формирования точности и производительности станка как различных сторон единого целого.

В третьей главе представлены формализованные описания составных частей и рассмотрены особенности программной реализации модели исследуемого станка.

Особое внимание при разработке формализованного представления компонент уделено обеспечению возможности получения с минимальной ошибкой на каждом шаге моделирования значений величин и функций, необходимых для определения выходных параметров модели. На основе проведенного анализа существующих в настоящее время стандартизованных и зарекомендовавших себя на практике ненормированных методов исследования включенных в модель факторов и процессов, выбраны методики, позволившие построить математические и алгоритмические описания компонент, удовлетворяющие указанному требованию. Специальный алгоритм разработан для описания теплового поведения станка. В основе алгоритма лежат представленные в виде регрессионных зависимостей экспериментальные характеристики изменения взаимного положения формообразующих узлов станка при нагреве и охлаждении

$$\begin{cases} \delta_I^H(\tau) = a_I(1) + a_I(2)\tau + a_I(3)n + a_I(4)t + \\ \quad + a_I(5)S + a_I(6)\tau^2 + a_I(7)n^2 + a_I(8)\tau^3; \\ \delta_I^O(\tau) = b_I(1) + b_I(2)\tau + b_I(3)\tau^2 + b_I(4)\tau^3. \end{cases} \quad (I)$$

где $a_I(1) \dots a_I(8); b_I(1) \dots b_I(4)$ — коэффициенты регрессии; n — частота вращения шпинделя; t — глубина резания; S — скорость подачи; I — ось координат. Определение вышеуказанных характеристик производится с учетом мощности тепловыделения в зоне резания и перераспределения тепла за счет циркуляции СОЖ.

Организация расчетных процедур в компонентах обеспечивает учет особенностей выполняемого станком текущего функционального действия (наличие или отсутствие процесса резания, вид обработ-

ки), а также для некоторых компонент, предшествующего (определенного на предыдущем шаге) состояния станка.

Приведено краткое описание этапов программирования и верификации модели. Разработанное программное обеспечение написано на языке FORTRAN и поддерживается разветвленной сетью каталогизированных процедур, позволяющих контролировать и выводить на печать промежуточные результаты различных стадий расчета, значения показателей точности для различных участков траекторий, графики зависимости между показателями точности и производительности в функции влияющих параметров. Машинная реализация модели построена по модульному принципу, который дает возможность в зависимости от задач исследования и стадии жизненного цикла станка изменять количество, набор и содержание модулей, соответствующих компонентам модели, проводить их автономную отладку.

В четвертой главе рассмотрены этапы получения эмпирических исходных данных, необходимых для функционирования модели, включающие: разработку методик и выбор средств измерения; разработку измерительной оснастки; проектирование, изготовление и градуировку нагрузочных устройств; проведение экспериментов (предварительных и основных); оценку погрешностей измерений.

Разработка схем измерения, позволяющих определить необходимые характеристики станка, проводилась с учетом особенностей исследуемых факторов и процессов. Значительное внимание уделено вопросу минимизации методической погрешности. После предварительных расчетов, экспериментов и анализа результатов, полученных другими исследователями, в качестве измерительных и нагрузочных средств были использованы следующие: для измерения малых линейных перемещений – автоматизированная система, состоящая из сопряженных между собой приборов мод. 276, оснащенных индуктивными преобразователями, и самописца мод. Н-3031; для измерения погрешности координатных перемещений формообразующих узлов – оптическая штриховая мера и оптический спиральный микрометр ОМС-3; для создания силовых воздействий в диапазоне от 10 до 1000 Н – динамометр "камертонный"; для имитации тепловыделения в зоне резания – тепловой электрический нагреватель (ТЭН) с регулятором мощности от 0,1 до 2,4 кВт.

Спроектирована и изготовлена специальная оснастка, являющаяся универсальной для различных видов экспериментальных исследова-

дований. Разработанная конструкция позволила проводить нагружение станка для определения жесткости по всем координатным направлениям. Использование термосимметричной компоновки обеспечило при перепадах температуры в зоне резания от $+10$ до $+60$ °C и непрерывной работы станка в течение шестнадцати часов минимизацию тепловых деформаций элементов оснастки на результаты измерения тепловых смещений по осям X и Y. Влияние тепловых удлинений оснастки по оси Z снижено за счет применения стержней из материала с малым тепловым коэффициентом линейного расширения (инвара). Снижение влияния тепловых факторов на результаты измерений достигнуто также путем использования особенностей конструкции прибора мод. 276 за счет размещения дополнительного первичного преобразователя в зоне измерений и применения мостовой схемы включения преобразователей.

Оценка характеристик используемых измерительных и нагрузочных средств показала, что они обеспечивают измерение и воспроизведение требуемых величин со следующими приведенными погрешностями: малых линейных перемещений $\pm 2,4\%$; силы $\pm 1,6\%$; мощности тепловыделения $\pm 1,1\%$.

Проведены экспериментальные исследования станка, представлены результаты экспериментов и их статистической и математической обработки.

Пятая глава посвящена вопросам практического применения результатов исследования.

Совместная оценка точности и производительности исследуемого станка проводилась применительно к детали-представителю, выбранной из номенклатуры изделий участка, на котором установлен станок, а также конкретным значениям продолжительности непрерывной работы станка и количеству подлежащих обработке заготовок. В качестве расчетного при определении показателей точности принят участок траектории чистовой обработки элемента детали, к точности изготовления которого предъявляются наиболее высокие требования.

Для выполнения оценки технической эффективности использовался критерий пригодности, согласно которому станок или вариант изменения влияющих параметров считается пригодным, если все отдельные показатели принимают значения не ниже некоторого установ-

ленного уровня. Сравнение значений показателей точности проводилось с учетом необходимости обеспечения вероятностной гарантии результатов сравнения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{соответствует, если } |\xi_1(v)| + \Delta_1^{\xi} \leq \xi_1^{\text{TP}} \\ \text{не соответствует, если } |\xi_1(v)| + \Delta_1^{\xi} > \xi_1^{\text{TP}} \end{array} \right. \quad (2)$$

где v - исследуемый вариант, $\xi_1(v)$ - фактическое значение показателя точности, ξ_1^{TP} - требуемое значение показателя, $\Delta_1^{\xi} = 3\sigma_1^{\xi}$ - доверительный интервал, I - ось координат.

В результате проведенной оценки установлено, что производительность исследуемого станка меньше заданной в производственной программе на 10%.

С целью определения наиболее рациональных путей повышения технической эффективности станка проведен анализ длительности цикла обработки по затратам времени на выполнение: рабочих ходов; ускоренных и установочных перемещений; замену инструмента; замену заготовок. Установлено, что с точки зрения влияния на производительность сокращение любой из указанных составляющих затрат времени равноценно.

В условиях действующего производства во многих случаях имеется возможность проведения многоместной обработки, позволяющей повысить производительность станка за счет снижения потерь времени на замену инструмента в расчете на одну деталь. Технические характеристики исследуемого станка допускают одновременное размещение на столе до трех приспособлений с заготовками - R_3 . Результаты совместной оценки основных свойств станка для двух- и трехместной обработки (с отдельным закреплением заготовок) показали, что обе схемы обеспечивают необходимый уровень производительности (рис.2). Вместе с тем, установка трех заготовок приводит к выходу за допустимое значение смещения траектории формообразующих узлов по оси X , что не позволяет использовать данный вариант для повышения технической эффективности станка.

При выборе целесообразной стратегии повышения технической эффективности, предусматривающей изменение конструкции станка, рассматривались следующие пути: 1) повышение скорости подачи при

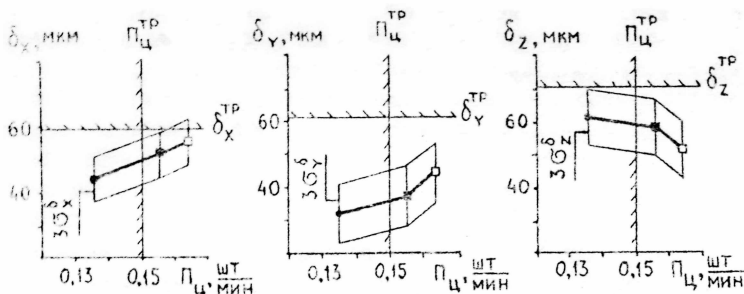


Рис.2. Характеристики взаимосвязи показателей δ и $P_{\text{ц}}$ при изменении количества устанавливаемых на стол станка заготовок - k_3 : $\bullet$ - 1 шт.; $\blacksquare$ - 2 шт.; $\square$ - 3 шт.

ускоренных перемещениях; 2) сокращение продолжительности замены инструмента $T_{\text{и}}$ за счет повышения быстродействия соответствующего устройства; 3) снижение продолжительности загрузки-съема заготовки T_3 за счет автоматизации данной операции. Предварительный анализ изложенных путей показал, что для исследуемого станка в затратах времени на перемещение формообразующих узлов из одной точки в другую значительное место занимает потери на разгон и торможение. Поэтому, дальнейшее увеличение скорости подачи признано нецелесообразным. Путем проведения совместной оценки основных свойств станка для ряда уменьшенных по сравнению с исходными значений $T_{\text{и}}$ и T_3 получены количественные зависимости между показателями точности и производительности в функции параметров $T_{\text{и}}$ и T_3 . Установлено, что уменьшение значений указанных параметров, обеспечивая требуемое повышение производительности практически не оказывает влияния на точность станка. При этом для достижения требуемого уровня технической эффективности, устройства, используемые для практической реализации рассмотренных стратегий, должны затрачивать на замену инструмента и заготовки не более 10 с и 53 с соответственно.

Рассмотрен аспект повышения технической эффективности станка за счет уменьшения смещения траекторий формообразующих узлов по оси X, не позволяющего полностью использовать потенциальные возможности станка по производительности при применении много-

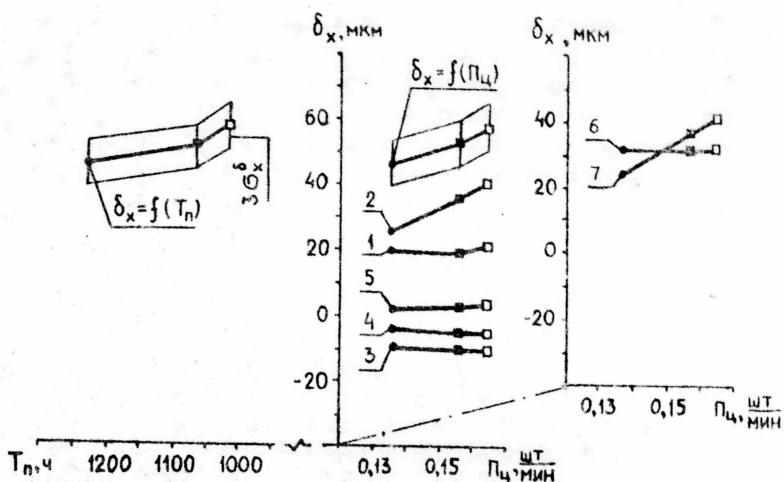


Рис.3. Влияние отдельных факторов и процессов на формирование взаимосвязи точности и производительности станка при варьировании параметра k_3 :

• - $k_3 = 1$ шт.; ■ - $k_3 = 2$ шт.; □ - $k_3 = 3$ шт.
 1 - $\delta_x = f_{\theta}(\Pi_c)$; 2 - $\delta_x = f_p(\Pi_c)$; 3 - $\delta_x = f_z(\Pi_c)$;
 4 - $\delta_x = f_a(\Pi_c)$; 5 - $\delta_x = f_v(\Pi_c)$; 6 - $\delta_x(\text{шб}) = f_{\theta}(\Pi_c)$;
 7 - $\delta_x(c) = f_p(\Pi_c)$

местной обработки. С помощью разработанной модели проведен анализ степени и направленности влияния факторов и процессов, включенных в модель, на зависимость между точностью и производительностью станка при варьировании количества одновременно устанавливаемых для обработки заготовок. Установлено (рис.3), что наибольший вклад в формирование погрешности в направлении оси X вносят совпадающие по знаку и имеющие практически одинаковые значения составляющие: непрямолинейность перемещения шпиндельной бабки - $\delta_{x(\text{шб})}$ и погрешность позиционирования стола - $\delta_{x(c)}$. В результате выполнения при ремонте станка мероприятий по снижению указанных составляющих стало возможным проведение трехместной обработки, что привело к повышению производительности станка на 19%.

На основе получаемой в результате анализа формирования зависимостей между основными свойствами целевого назначения станка информации, а также вычисляемых при моделировании значений интервалов времени $- T_{п}$, необходимых для обработки с разной производительностью заданной партии заготовок (рис.3), предложено проводить коррекцию структуры ремонтных работ и длительности межремонтного периода, которая позволяет учесть фактическое начальное состояние и режимы работы конкретного станка.

В заключении главы формулируются основные положения предлагаемой методики совместной оценки точности и производительности станка.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Проведенные исследования позволили разработать методику совместной оценки точности и производительности станка с ЧПУ, пригодную при проведении оценки и повышении путем целенаправленного изменения влияющих станочных и технологических параметров уровня технической эффективности станка.

2. В результате анализа процесса функционирования станка установлено, что в основе взаимосвязи точности и производительности лежит комплекс возникающих в станке процессов различных категорий, интенсивность протекания которых связана с качеством и режимами работы станка.

3. Разработанный методический подход, предусматривающий построение имитационной модели объекта исследований, дает возможность проведения совместной оценки точности и производительности станка для широких диапазонов варьирования станочных и технологических параметров с учетом нестационарности и распределенности рассматриваемых свойств.

4. Разработанный подход к построению модели станка, позволяет включить в рассмотрение и установить степень и направленность влияния различных факторов и процессов на формирование взаимосвязи точности и производительности, учесть вероятностный характер протекающих при работе станка процессов.

5. Разработан алгоритм описания теплового поведения станка для случая многооперационной обработки с различными режимами, в основе которого лежат экспериментальные зависимости изменения при

нагреве и охлаждении взаимного относительного положения рабочих органов станка, несущих заготовку и инструмент, определяемые с учетом мощности тепловыделения в зоне резания и перераспределения тепла за счет циркуляции СОЖ.

6. Создан испытательный стенд для экспериментального получения исходных данных и эмпирических зависимостей, оснащенный необходимым набором измерительных средств, нагрузочных устройств и вспомогательных приспособлений.

Созданный испытательный стенд обеспечивает следующие значения приведенных погрешностей: измеряемых линейных перемещений – 2,4%; создаваемой силы – 1,6%; воспроизводимой мощности при имитации тепловыделения в зоне резания – 1,1%.

7. Показано, что совместная оценка точности и производительности при варьировании влияющих технологических параметров позволяет осуществить выбор наиболее рациональных режимов работы станка с учетом заданного уровня рассматриваемых свойств.

8. Использование зависимости между показателями точности и производительности в функции станочных параметров дает возможность наметить пути повышения технической эффективности, связанные с изменением параметров конструкции станка. Так, для исследуемого станка снижение продолжительности замены инструмента с 15 с до 5 с или замены заготовки с 90 с до 30 с приводит к повышению производительности в 1,15 – 1,2 раза при изменении точности не более $\pm 0,5\%$.

9. Выполнение на основе разработанной модели анализа особенностей формирования взаимосвязи основных свойств исследуемого станка позволило за счет уточнения структуры ремонтных работ и длительности межремонтного периода повысить его производительность на 17 – 19% от первоначальной при сохранении в допустимых пределах значений показателей точности.

10. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения разработанного метода совместной оценки точности и производительности и практических рекомендаций по повышению технической эффективности станка составляет 6340 руб.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Руденко В.Н. Комплексная оценка точности и производительности станка с ЧПУ при тепловых процессах / МГТУ им.Н.Э. Баумана. - М., 1990. - 20 с.:ил. - Библиогр. 8 назв. Деп. в ВНИИГЭМР № 60 мл - 90.

2. Руденко В.Н. Исследование взаимосвязи точности и производительности станка с ЧПУ при действии силовых возмущений // Изв.вузов.Машиностроение - 1990. - №7. - С. 121-124.