М 335265

НА ДОМ НЕ ВЫДАЕТСЯ

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

Московское ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

ТРОПЕЙКО Геннадий Федорович

# ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПОСТРОЕНИЯ ТРАЕКТОРИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ИНСТРУМЕНТОВ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ НА СТАНКАХ С ЧПУ

(Специальность 05.02.08 – Технология машиностроения)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 1978 г.

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

Научные руководители: заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор КОРСАКОВ В.С.
кандидат технических наук, доцент БУРЦЕВ Б.М.

Официальные оппоненты: доктор технических наук ЕВГЕНЕВ Г.Б.
кандидат технических наук БОРИСОВ Е.И.

Ведущее предприятие: указано в решении специализированного учёного Совета.

Защита диссертации состоится "15" января 1979 г. на заседании специализированного Совета по технологии машиностроения шифр К053.15.15. МВТУ имени Н.Э. Баумана по адресу: 107005 Москва, Б-5, 2-ая Бауманская 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ имени Н.Э. Баумана.

Ваши отзывы и предложения на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направить по указанному адресу.

Автореферат разослан "____" _____ 1978 г.

Ученый секретарь Совета
к.т.н., доцент МЕЩЕРИКОВ Р.К.

М 335865

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана
1335865
Тропейко Г.Ф. Исследование

Актуальность проблемы. Глубина и качество проработки технологических задач, возникающих при подготовке управляющих программ (УП) для станков с числовым программным управлением (ЧПУ), оказывают существенное влияние на производительность и точность обработки. В настоящее время достаточно подробно изучены вопросы математических расчетов, кодирования и контроля вносимой в УП информации. В меньшей степени проработаны вопросы проектирования технологических операций обработки на станках с ЧПУ, конечным итогом которого является определение траекторий перемещения режущих инструментов и расчет координат опорных точек. Отсутствуют данные по выбору схем движения режущего инструмента при съеме напуска с элементарных поверхностей и детали в целом. Не даны рекомендации по выбору рациональных траекторий перемещения инструментов в процессе съема напуска и припуска. Отсутствуют математические модели известных в настоящее время способов предыскажения УП и методики их выполнения. Этим объясняется тот факт, что это важное направление повышения точности и производительности обработки не нашло промышленного применения. Технологические задачи в процессе проектирования решаются вне взаимосвязи с динамической устойчивостью технологической системы. Отсутствие полной научно-обоснованной методики проектирования операции обработки на станках с ЧПУ приводит к многократным переделкам УП в производственных условиях.

Ф335865

Поэтому поставленная в настоящей работе тема исследования, направленная на повышение точности и производительности обработки, является актуальной.

Цель исследования. Дальнейшее совершенствование технологических разработок для подготовки УП, направленных на снижение их трудоемкости и повышение точности и производительности токарной обработки. В качестве объекта исследования принята операция токарной обработки деталей сложного профиля на станках с ЧПУ.

Методы исследования. Теоретические исследования проводились на базе основ технологии машиностроения и теории резания металлов с применением современных математических методов оптимизации решений (в частности динамического программирования).

В основу теоретических исследований положен расчетно-аналитический метод. Экспериментальные исследования проводились в лаборатории кафедры "Технология механо-сборочного производства" МВТУ им. Н.Э. Баумана на токарном станке с ЧПУ модели 16К20Ф3С4

с использованием современной регистрирующей и измерительной аппаратуры и теории планирования экспериментов. Обработка экспериментальных данных производилась на ЭВМ. Производственные исследования включали получение фактических данных по трудоемкости подготовки и отладки УП различными методами.

Научная новизна. Установлена взаимосвязь между принятой схемой движения инструмента в процессе съема напуска и производительностью обработки с учетом формы и размерной характеристики заготовки, схемой ее установки и динамической устойчивости технологической системы.

Разработана общая теория выполнения предыскажения при токарной обработке. Получены математические модели определения величины предыскажения при токарной обработке основных поверхностей детали.

Доказана возможность повышения точности обработки сферических поверхностей путем стабилизации радиальной составляющей силы резания за счет целенаправленного изменения рабочей подачи в процессе выполнения последнего перехода.

Показана возможность и целесообразность предыскажения УП при токарной обработке основных поверхностей детали путем целенаправленного изменения глубины резания на последнем переходе, что обеспечивается предыскажением траектории перемещения инструмента при выполнении предпоследнего для данной поверхности перехода.

Установлено, что погрешность выполнения запрограммированного предыскажения не зависит от технологических факторов, а целиком обусловлена факторами, вызывающими погрешности малых перемещений исполнительного органа станка.

Практическая ценность. Разработаны рекомендации по: выбору рациональных схем съема напуска с цилиндрических, конических и криволинейных поверхностей; выбору способов предыскажения УП в целях уменьшения погрешности формы в продольном сечении; построению траектории перемещения режущих инструментов в местах резкого изменения направления его перемещения.

Разработан (и реализован на ЭВМ модели ЕС 1040) алгоритм нахождения оптимальной траектории перемещения режущих инструментов при съеме напуска с деталей сложного профиля. Данная программа может быть введена в пр[illegible]мер существующих систем автоматизированной подготовки УП в качестве подпрограммы решения



МВТУ им. Баумана
ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ БИБЛИОТЕКА

технологических задач.

Разработаны методики расчета и выполнения предыскажения траектории перемещения инструмента на последнем и предпоследнем переходах в целях повышения точности формы и размеров цилиндрических, конических и сферических поверхностей.

Разработана методика расчета и выполнения предыскажения УП путем целенаправленного изменения рабочей подачи, в целях уменьшения погрешности формы указанных поверхностей.

Апробация работы. Основные разделы работы докладывались на научных семинарах кафедры "Технология механосборочного производства" МВТУ им. Н.Э. Баумана, на научно-технической конференции "Автоматизация проектирования технологических процессов механической обработки и сборки" (Москва, 1972 г.), на Всесоюзной научно-технической конференции "Повышение эффективности программного управления в машиностроении" (Ташкент, 1974 г.), на Всесоюзной конференции "Технологические методы повышения качества изготовления машин" (Фрунзе, 1978 г.).

Объем работы. Диссертационная работа изложена на 210 страницах машинописного текста, включающих введение, пять глав, выводы по главам и общие выводы. Сопровождается 76 рисунками, 13 таблицами, списком литературы из 96 наименований и приложением.

Публикации. По теме диссертации имеется шесть публикаций.

Во введении обосновывается актуальность и направление исследований, по результатам которых можно разработать методику построения траектории перемещения режущих инструментов при токарной обработке на станках с ЧПУ.

В первой главе дана сравнительная оценка современных направлений повышения точности и производительности обработки на станках с ЧПУ, приведен анализ литературных и производственных материалов современного состояния технологических разработок при подготовке УП, обоснованы цель и объект исследования.

Показано, что развиваемое в исследовании направление повышения точности и производительности обработки, в основе которого лежит расчетно-статистический метод, перспективно. Основным преимуществом его является, прежде всего, высокая универсальность. Оно применимо как для деталей различных типоразмеров, так и деталей различных классов. На его основе возможно создание типовых решений, что исключает необходимость повторения трудоемких расчетов в конкретных условиях технологического проектирования.

Развитие и совершенствование проектирования оптимальных условий протекания станочной операции способствует применению ЭВМ для управления станками с ЧПУ. Качественный анализ математических моделей, которые составляют основу рассматриваемого направления, позволяет наметить пути дальнейшего повышения точности и производительности обработки.

Установлено, что в настоящее время достаточно подробно решены вопросы математических расчетов, кодирования и контроля вносимой в УП информации. Вопросы, касающиеся проектирования технологических процессов обрабатываемой детали, конечным итогом которых является построение траектории инструмента, разработаны недостаточно глубоко.

Обосновываются необходимость дальнейшего совершенствования технологических разработок при подготовке УП, разработка рекомендаций по их выполнению и автоматизации. В соответствии с целью исследования в диссертации ставились следующие задачи:

1) Определить области рационального использования технологических схем движения режущего инструмента "петля", "спуск", "контурная" при съеме напуска с элементарных обрабатываемых поверхностей (ЭОП).

2) Разработать методику построения оптимальной траектории перемещения режущих инструментов при съеме напуска с деталей, имеющих цилиндрические, конические и криволинейные поверхности.

3) Разработать методики расчета и построения предыскаженной траектории и целенаправленного изменения величины подачи, обусловливающих уменьшение погрешности формы обрабатываемых поверхностей в продольном сечении.

4) Разработать рекомендации по: выбору рациональных схем съема напуска с ЭОП; выбору способов предыскажения траектории перемещения режущих инструментов; построению траектории режущего инструмента в местах резкого изменения направления его перемещения.

Во второй главе рассмотрены вопросы, связанные с построением оптимальной траектории перемещения инструментов при съеме напуска с деталей сложного профиля. Для исследования приняты возможные варианты движения инструмента при съеме напуска относительно образующей элементарной поверхности (ЭП), известные в литературе под названием "петля", "зигзаг", "спуск", их комбинации и разновидности. Оценка вариантов выполнялась по неполному

оперативному времени (целевая функция). Для режимов резания приняты ограничения по периоду стойкости инструмента, по мощности главного привода, по максимальной силе, допускаемой прочностью слабого звена механизма подач станка и по динамической устойчивости технологической системы. Последняя оценивалась величиной предельной стружки. Расчетные зависимости величины предельной стружки от режимов резания получены математической обработкой результатов экспериментальных исследований, выполненных в ЭНИМСе под руководством профессора Кудинова В.А.

Определение варианта съема напуска с ЭП, удовлетворяющего поставленным ограничениям и дающего минимальное значение целевой функции, производится по разработанному алгоритму.

Реализация данного алгоритма на ЭВМ позволила произвести сравнительную оценку схем движения режущего инструмента при съеме напуска с ЭП по производительности в зависимости от геометрических параметров последних и величин срезаемого напуска. В результате проведенного сравнительного исследования определены области рационального использования различных схем движения инструмента и разработаны рекомендации по их использованию при ручном программировании обработки.

Определение оптимальной траектории движения инструмента при съеме напуска с ЭП позволило перейти к решению общей задачи – построению оптимальной траектории движения режущего инструмента при срезании напуска с деталей, имеющих цилиндрические, конические и сферические поверхности. Процедура построения оптимальной траектории движения инструмента при съеме напуска со всей детали методом динамического программирования разбивается на две стадии: предварительную и окончательную. На предварительной стадии определяются допустимые, с технологической точки зрения, траектории перемещения режущих инструментов (построение графа возможных траекторий движения инструмента при съеме напуска). Затем определяется для каждого шага условная оптимальная траектория съема напуска, зависящая от состояния заготовки, достигнутого в результате предыдущих шагов. На окончательном этапе определяется безусловная (оптимальная) траектория, т.е. нахождение кратчайшего пути на графе.

Поиск оптимального пути на графе сводится к задаче динамического программирования.

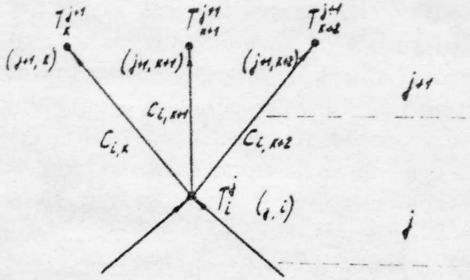


Рис. I.

Обозначим время перемещения режущего инструмента до $i$-ой точки $j$-го уровня графа $T_i^j$, а саму точку - парой $(j, i)$ (рис. I). Если известно время перемещения инструмента во все точки следующего $(j+1)$ уровня, то время перемещения в точку $T_i^j$ определяется из выражения

$$T_i^j = \min_K \left( C_{i,K} + T_K^{j+1} \right)$$

где "K" пробегает все связанные с точкой $(j, i)$ точки последующего уровня графа, а $C_{i,K}$ - время перехода инструмента для обработки следующего участка детали. Используя приведенное рекуррентное соотношение, получим, в конечном итоге, величину $T_K^0$, соответствующую оптимальному пути, и траекторию движения по графу, обеспечивающую минимум оперативного времени для съема всего напуска. Таким образом, алгоритм вычисления оптимального пути движения режущего инструмента направлен вниз по графу с последнего $K$-го уровня к 0-му.

В результате расчетов, приведенных по данному алгоритму, на печать выводятся координаты опорных точек оптимальной траектории движения режущего инструмента при съеме напуска с данной детали и численное значение оперативного времени.

В случае применения разработанной программы при ручном программировании обработки (использование мини-ЭВМ) на печать могут выводиться: I) координаты опорных точек оптимальной траектории движения режущего инструмента при съеме напуска с обрабатываемой детали; 2) номер схемы движения режущего инструмента при съеме напуска с любой элементарной поверхности, дающей минимальное оперативное время ее обработки; 3) режимы резания для каждого перехода.

<u>В третьей главе</u> приведены результаты теоретических и экс-

периментальных исследований по проектированию и расчету предыскаженной траектории перемещения режущих инструментов. Дана сущность применяемых способов предыскажений УП, анализируются их преимущества и недостатки, разработана общая теория однопараметрического предыскажения УП.

Показано, что в зависимости от принятого метода определения наладочного размера, предыскажение может быть выполнено по одному из двух возможных вариантов. В первом случае предыскажение позволяет максимально приблизить по форме и положению нижнюю границу поля рассеивания фактической образующей к требуемой. Во-втором – с требуемой образующей поверхности совмещается средняя по форме и положению фактическая образующая поверхности.

Кривые, характеризующие положение и форму фактической (предыскажаемой) образующей поверхности, описываются равенствами

$$X_{\Phi min} = f(Z) + \Delta(Z)_{min} + \Delta_{min} \; ; \quad \overline{X}_{\Phi} = f(Z) + \overline{\Delta(Z)} + \overline{\Delta} \; ,$$

где $f(Z)$ – функция, описывающая форму и положение требуемой образующей поверхности; $\Delta(Z)_{min}$, $\overline{\Delta(Z)}$ – текущие значения отклонения формы, соответственно, нижнего и среднего положений фактической образующей линии от требуемой; $\Delta_{min}$, $\overline{\Delta}$ – соответственно минимальная и средняя величины отклонения положения фактической образующей от требуемой (погрешность размера); $Z$ – осевая координата.

Погрешность $\overline{\Delta}$ или $\Delta_{min}$ определяется в поперечном сечении с координатой $Z_K$, в котором текущее значение размера по соответствующей образующей минимально. При этом $\Delta(Z_K)_{min} = 0$ или $\Delta(Z_K) = 0$. В работе рассмотрены способы определения погрешности размера $\Delta_{min}$ или $\overline{\Delta}$ и ее компенсации предыскажением как на стадии подготовки УП, так и на стадии обработки.

В отличии от предыскажения с целью компенсации погрешности размера, предыскажение с целью компенсации погрешности формы может быть реализовано только на стадии подготовки УП. Рассмотрены три способа выполнения однопараметрического предыскажения для уменьшения погрешности формы: 1) предыскажение траектории движения режущего инструмента на последнем переходе; 2) предыскажение УП путем закономерного изменения рабочей подачи; 3) предыскажение УП при выполнении предпоследнего перехода.

В первом случае (рис. 2а) предыскажается траектория перемещения инструмента соответствующая по форме требуемой образующей

поверхности (кривая I), причем предыскаженная траектория (кривая 3) является зеркальным отображением фактической образующей поверхности, получаемой при обработке без предыскажения (кривая 2). Ввиду дискретного характера перемещения исполнительного органа, фактически программируемая предыскаженная траектория (кривая 4) является ломанной линией.

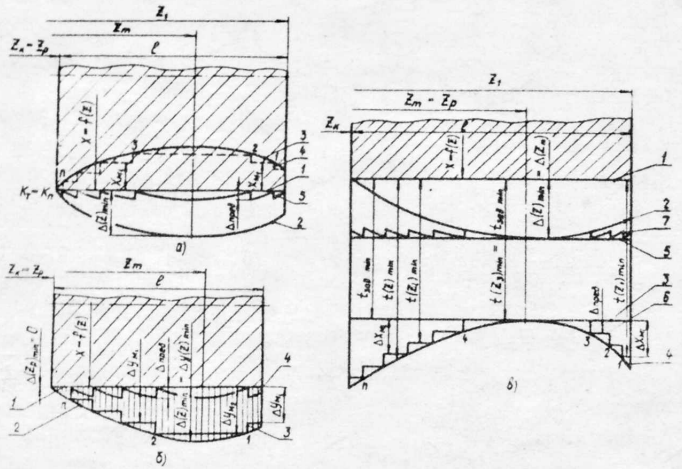


Рис. 2.

Во втором случае (рис. 2б) текущие значения погрешности формы $\Delta(z)_{min}$ или $\overline{\Delta(z)}$ компенсируются непрерывным изменением величины упругих отжатий $\Delta y(z)_{min}$ или $\overline{\Delta y(z)}$, являющихся следствием целенаправленного изменения подачи. Как и в первом случае, кривая уменьшения величины упругих отжатий (кривая 3) является ломанной линией. В третьей случае (рис. 2 в), погрешность формы компенсируется непрерывным изменением упругих отжатий, являющихся следствием целенаправленного изменения заданной глубины резания $t(z)_{min}$ или $\overline{t(z)}$. Это достигается предыскажением траектории перемещения инструмента (кривая 3) при выполнении предпоследнего для данной поверхности перехода. Фактически программируемая предыскаженная траектория перемещения инструмента и в этом случае является ломанной линией (кривая 6).

Доказано, что расчетное сечение $Z_p$ (сечение, в котором параметр предыскажения численно равен его исходному значению) в первых двух случаях должно совпадать с сечением $Z_к$, в котором размер минимален, а в последнем – с сечением $Z_m$, в котором размер максимален (рис. 2).

Для выполнения предыскажения УП по одному из указанных способов разработана (в общем виде) методика расчета координат опорных точек. Она включает: определение общего количества опорных точек $\Sigma n$ и характерных точек, в которых совпадают требуемая и фактически программируемая кривые предыскажения (рис. 2, точки $1,2,\ldots,n$); определение величины предыскажения в каждой характерной опорной точке и их осевые координаты. В заключение, для первого и третьего способов определяются радиальные координаты опорных точек, а для второго – величины подач по всем участкам предыскажения.

Установлено, что расчетные выражения для определения количества характерных опорных точек, радиальных предыскажений $[\Delta X_i$ (рис. 2а), $\Delta Y_i$ (рис. 2б), $\Delta t(Z_i)=\Delta X_i$ (рис. 2в)] и величины подач по участкам предыскажения $S(Z_i)$ зависят от положения экстремальных сечений $Z_к$ и $Z_m$. В общем случае, они могут находиться как на торцах обрабатываемой поверхности, так и между ними.

Показано, что несмотря на принципиальные отличия рассматриваемых способов предыскажения их математические модели и последовательность расчета во многом схожи. Поэтому в работе приведен общий алгоритм для расчета координат опорных точек как по минимальным, так и по средним параметрам.

Выполнены исследования по определению величины радиального предыскажения. Установлено, что, в общем случае, для цилиндрических и конических поверхностей она является функцией $\Delta(Z)=f(\Delta_{ФУ};\ \Delta_{ФИ};\Delta_{ФГ}.\ \Delta_{Ф.Т.Д};\ \Delta_{Ф.Т.И})$, где $\Delta_{ФУ}$ – погрешности, обусловленные переменной жесткостью технологической системы; $\Delta_{ФИ}$ – погрешности, обусловленные размерным износом инструмента; $\Delta_{Ф.Г}$ – погрешности, обусловленные геометрическими неточностями станка; $\Delta_{Ф.Т.Д.}$, $\Delta_{Ф.Т.И}$ – погрешности, обусловленные соответственно тепловыми деформациями детали и инструмента. Здесь имеются в виду закономерно изменяющиеся систематические погрешности при минимальном или среднем значении случайного фактора их вызывающего. В каждом конкретном случае следует принимать во внимание

только доминирующие составляющие. На основе теоретического анализа существующей информации получены расчетные зависимости для определения каждой составляющей, за исключением $\Delta_{ф.т.д}$. Последнюю рекомендуется в каждом конкретном случае определять по результатам математической обработки производственных наблюдений.

Для сферических поверхностей $\Delta(Z)=f(\Delta_{ф.т.и};\ \Delta_{ф.р})$, где $\Delta_{ф.р}$ – погрешность формы, обусловленная непрерывным изменением величины и направления силы резания. Для количественной оценки составляющей $\Delta_{ф.р}$ выполнены экспериментальные исследования силы резания и податливости суппорта при обработке сферических поверхностей. Составляющие силы резания измерялись в процессе обработки сферы трехкомпонентной динамометрической резцедержкой с последующей записью их значений на осциллографе Н-115 к. Жесткость суппорта в радиальном и осевом направлениях измерялась в процессе его нагружения на неработающем станке. Величина силы нагружения варьировалась в пределах от 0...200 кГс, угол ее наклона к оси вращения изменялся в пределах $\alpha$ =0...90°. Исследования показали, что все три составляющих силы резания непрерывно изменяются в процессе обработки сферы, что является следствием изменения кинематических углов в плане. Эмпирические зависимости радиальной $P_y$ и осевой $P_{x_{0.16}}$ имеют следующий вид: $P_y = A(\lambda+1)^{-0.37}$; $P_x = C(\lambda+1)^{-0.16}$, где $A$, $C$ – коэффициенты, соответствующие по величине силам резания, возникающим при обработке цилиндрических поверхностей при тех же условиях; $\lambda$ – угол обхвата сферической поверхности. Непрерывное изменение радиальной и осевой составляющих сил резания обусловливает изменение величины и направления их равнодействующей $P_{xy}$, что вызывает непрерывное изменение радиальных и осевых отжатий суппорта. В случае обработки стальных заготовок получена следующая зависимость для определения текущих значений погрешности

$$\Delta_{ф.р} = \frac{a\cdot lg\left\{B\cdot arctg\left[\frac{A}{C}(\lambda+1)^{-0.21}\right]^{-0.21}\right\}+C}{\sin arctg\left[\frac{A}{C}(\lambda+1)^{-0.21}\right]}\cdot A(\lambda+1)^{-0.37} - \frac{R(Z_K)\cdot\sin\lambda}{\sin\lambda_K},$$

где: $a$, $B$, $C$ – эмпирические коэффициенты, характеризующие податливость суппорта. (для станка 1К20ФЗС4 $a$ = 0,45...0,52; $B$ = 0,19; $C$ = 0,45...0,5); $R(Z_K)$ – величина минимального размера сферы с угловой координатой $\lambda_K$. По результатам полученных расчетных зависимостей доказана возможность уменьшения погрешности формы путем однопараметрического предыскажения в случае обработки сферических поверхностей.

Проведено экспериментальное исследование точности отработки вводимого в УП предыскажения. Целью данного исследования являлось выявление величины погрешности отработки предыскажения в процессе обработки деталей и факторов ее определяющих. На точность отработки запрограммированного предыскажения исследовано влияние глубины резания $t$, геометрических параметров режущего инструмента $\varphi$, $\varphi_1$, $\gamma$, $\alpha$, марки обрабатываемых материалов, жесткости технологической системы. Для выявления количественных зависимостей между погрешностью отработки запрограммированного предыскажения и технологическими факторами, влияющими на нее, поставлен полный факторный эксперимент типа $q^K$ (где $K$ – число уровней, на которых варьируют факторы).

Проведенные экспериментальные исследования показали, что точность отработки запрограммированного предыскажения не зависит от технологических факторов. Установлено, что погрешность отработки предыскажения, возникающая при реверсе движения исполнительного органа, для каждого конкретного станка является величиной постоянной и обусловлена техническими характеристиками цепи привода подач станка.

Установлено, что при выполнении предыскажения траектории перемещения инструмента появляются кольцевые канавки. Их глубина, в зависимости от жесткости технологической системы, лежит в пределах 12...48 мкм. Причиной их появления является упругое восстановление технологической системы в момент отработки величины предыскажения. На основании изложенного выполнять предыскажение траектории перемещения инструмента на последнем переходе для окончательной обработки не целесообразно.

Дается расчет погрешности смещения обрабатываемого контура в местах резкого изменения направления перемещения режущего инструмента. Известно, что величина погрешности смещения ($\Delta_{см}$) обрабатываемого контура обусловлена, в основном, динамическими ошибками, возникающими при переходных процессах и определяется по формуле

$$\Delta_{см} = (\dot{Z}_0 - \dot{Z}_c)\left(\frac{h_1 + P_z \cdot tg\alpha_1}{K_1}\right)\cdot \sin\alpha - (\dot{X}_0 - \dot{X}_c)\left(\tau + \frac{h_2 + P_z \cdot tg\alpha_1}{K_2}\right)\cdot \cos\alpha ,$$

где $\dot{Z}_0$, $\dot{Z}_c$ – начальные значения скорости подачи по осям $X$ и $Z$; $\dot{Z}_c$, $\dot{X}_c$ – конечные значения скорости подачи по осям $Z$ и $X$;

$\frac{h_1 + P_z \cdot tg\alpha_1}{K_1}$ – время переходного процесса по оси $Z$;

$\tau + \frac{h_2 + P_z \cdot tg\alpha_1}{K_2}$ - время переходного процесса по оси X ;
$\alpha$ - угол наклона образующей обрабатываемого контура к оси детали.

В отличие от ранее проводимых расчетов погрешности смещения обрабатываемого контура $\Delta$см, в формулу введена величина запаздывания $\tau$ , $\tau$ - время, характеризующее величину зоны нечувствительности системы управления, привода и механической части цепи подач станка (определяется экспериментально). Экспериментальными исследованиями установлено, что величина зоны нечувствительности системы управления, привода и механической части цепи подач не зависит от технологических факторов. Суммарная ее величина определяется жесткостью элементов цепи привода подач исполнительного органа станка, точностью их изготовления и износом в процессе эксплуатации, регулировкой при сборке и для каждого конкретного станка имеет свое значение.

В работе приведены экспериментальные исследования влияния технологических факторов на величину погрешности $\Delta$см. Установлено, что величина погрешности смещения обрабатываемого контура ( $\Delta$см) относительно его запрограммированного положения практически не зависит от глубины резания $t$ и геометрии режущего инструмента. С увеличением скорости подачи режущего инструмента ( $S$ ) и угла наклона образующей обрабатываемой поверхности ( $\alpha$ ) погрешность обработки $\Delta$см увеличивается.

В четвертой главе приведена методика построения траектории перемещения инструментов при токарной обработке, даны последовательность и рекомендации по решению технологических задач, возникающих в процессе проектирования последней.

Изложены рекомендации по назначению схем движения режущего инструмента, позволяющие получить максимальную производительность при съеме напуска с основных обрабатываемых поверхностей, в зависимости от их геометрических параметров и величины снимаемого напуска.

Дано описание блок-схемы алгоритма построения оптимальной траектории перемещения режущего инструмента при съеме напуска с деталей сложной конфигурации. При разработке этого алгоритма, предназначенного для повышения производительности съема напусков и припусков, а также снижения трудоемкости программирования обработки, исходили из возможности автоматизированного получения УП.

Для решения поставленной автором задачи: I) выбрана целевая функция - неполное оперативное время; 2) разработаны математические модели для различных схем срезания напуска с цилиндрических, конических и криволинейных поверхностей; 3) определены ограничения на режимы резания по: стойкости режущего инструмента; допускаемой мощности двигателя главного привода станка; максимальной силе, допускаемой прочностью слабого звена механизма подачи станка; динамической устойчивости технологической системы. Алгоритм реализован на ЭВМ модели ЕС 1040 и программа помещена в приложении к диссертации. Использование данного алгоритма в процессорах современных систем автоматизированной подготовки УП в качестве подпрограммы решения технологических задач позволит не только значительно сократить трудоемкость подготовки УП, но и повысить производительность токарной обработки при съеме напусков и припусков с деталей сложной конфигурации.

Излагаются рекомендации по построению траектории перемещения инструмента в местах резкого изменения направления его перемещения. В зависимости от конкретных производственных условий (программы выпуска, конструктивно-технологических параметров детали, используемого оборудования с ЧПУ и метода подготовки УП) описаны два пути исключения погрешности $\Delta$см: I) предыскажение УП на величину заранее рассчитанной погрешности $\Delta$см; 2) снижение скорости подачи в 2-3 раза в местах резкого изменения направления перемещения режущего инструмента.

Приводятся описания блок-схем алгоритмов расчета и выполнения предыскажения траектории перемещения режущего инструмента на последнем и предпоследнем переходах в целях повышения точности формы и размеров цилиндрических, конических и сферических поверхностей; расчета и выполнения предыскажения путем целенаправленного изменения рабочей подачи в целях уменьшения погрешности формы указанных поверхностей. В зависимости от конкретных производственных условий даны рекомендации по назначению одного из перечисленных выше способов повышения точности размеров и формы обрабатываемых поверхностей.

В пятой главе дается комплексный анализ результатов исследований и приводится расчет экономического эффекта. Показано, что народнохозяйственный эффект от внедрения полученных результатов складывается из научного, технического, организационного, социального и экономического эффектов.

Подсчитано, что годовой экономический эффект от внедрения полученных разработок составляет 1850 руб. на единицу оборудования.

## Общие выводы

1. Разработанная методика построения траектории перемещения инструментов является одним из средств повышения качества технологических разработок при подготовке УП, способствует снижению их трудоемкости и повышению точности и производительности токарной обработки на станках с ЧПУ.

2. С целью повышения производительности обработки на токарных станках с ЧПУ целесообразно использовать разработанные рекомендации по назначению схем движения режущих инструментов, позволяющие повысить производительность съема напуска с основных поверхностей деталей на 14-16%.

3. Для снижения трудоемкости подготовки УП и повышения производительности обработки рекомендуется ввести в процессор существующих САП (в качестве подпрограммы решения технологических задач) разработанную и реализованную на ЭВМ ЕС 1040 программу построения оптимальной траектории перемещения режущих инструментов при съеме напуска с деталей сложного профиля.

4. На основании теоретических и экспериментальных исследований разработана общая теория выполнения предыскажения при токарной обработке на станках с ЧПУ и созданы математические модели расчета величины предыскажения и координат опорных точек.

5. Точность и шероховатость поверхностей деталей, обрабатываемых на токарных станках с ЧПУ, зависит от применяемого способа предыскажения траектории перемещения режущих инструментов. При окончательной обработке основных поверхностей детали на токарном станке следует выполнять предыскажение траектории перемещения инструмента на предпоследнем переходе, а при предварительной (окончательная обработка поверхностей производится на шлифовальном станке) - предыскажение траектории инструмента на последнем переходе и обработку с целенаправленным изменением величины рабочей подачи, что обеспечивает уменьшение погрешности формы до величин, соответствующих дискрете перемещения исполнительного органа, а шероховатости - до $R_a$ = 1,25...0,8 мкм.

6. Точность отработки запрограммированного предыскажения не зависит от технологических факторов, а целиком обусловлена

факторами, вызывающими погрешности малых перемещений исполнительного органа. Для каждого конкретного станка погрешность отработки предыскажения имеет свое численное значение и определяется экспериментально.

7. В основу разработанных методик предыскажения траектории перемещения инструментов положен расчетно-аналитический метод определения текущих значений погрешности формы обрабатываемых поверхностей. Расхождение между расчетной и фактической величиной погрешности не превышает 15-20%.

8. Результаты исследования, разработанные рекомендации и методики внедрены на машиностроительном предприятии. Годовой экономический эффект от их использования составляет 12985 руб.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Корсаков В.С., Тропейко Г.Ф. Технологическая подготовка УП для токарных станков с ЧПУ. Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции "Повышение эффективности программного управления в машиностроении", 8-10 октября 1974, Ташкент, 1974, с. 33-37.

2. Тропейко Г.Ф. Анализ методов подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ токарной группы. Тезисы докладов научно-технической конференции "Автоматизация проектирования технологических процессов механической обработки и сборки", 28-29 июня 1972 г., Москва, 1972, с. 112-113.

3. Тропейко Г.Ф. К вопросу повышения эффективности использования токарных станков с числовым программным управлением. В сб. "Экономико-математические исследования затрат и результатов", "Наука", Москва, 1976, с. 202-214.

4. Тропейко Г.Ф., Золотаревский Ю.М. Особенности проектирования технологических процессов обработки деталей на станках с числовым программным управлением. Автотракторное электрооборудование. НИИАвтопром, 1976, № 10, с. 10-13.

5. Корсаков В.С., Бурцев В.М., Тропейко Г.Ф. Предыскажение управляющих программ как средство повышения точности и производительности обработки деталей на станках с ЧПУ. Тезисы докладов Всесоюзной конференции "Технологические методы повышения качества изготовления машин", Фрунзе, ФПИ, 1978, с. 15-16.

6. Тропейко Г.Ф. Построение оптимальной траектории перемещения режущих инструментов при съеме напуска с деталей сложного

профиля. Тезисы докладов Всесоюзной конференции "Технологические методы повышения качества изготовления машин" Фрунзе,ФПИ, 1978,с. 24-25.

Зак. 1452 Объем I п.л. Л72497 Тираж I00 экз.
Подп. к печ. 7.XII.78г

Ротопринт МВТУ , I07005 Москва, Б-5 2-я Бауманская, 5