

М 380087

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР
Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и орде-
на Трудового Красного Знамени высшее техническое училище имени
Н.Э. Баумана

На правах рукописи

Кондаков Александр Иванович

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЗАЦИИ ПОД-
ГОТОВКИ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ ДЛЯ КОНТУРНОГО
ФРЕЗЕРОВАНИЯ НА СТАНКАХ С ЧПУ

Специальность 05.02.08 - Технологии машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1981 г.

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

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

На правах рукописи

Кондаков Александр Иванович

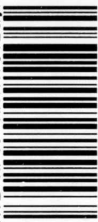
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЗАЦИИ ПОД-
ГОТОВКИ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ ДЛЯ КОНТУРНОГО
ФРЕЗЕРОВАНИЯ НА СТАНКАХ С ЧПУ

Специальность 05.02.08 - Технологи : машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1380087

Кондаков А. И. Технологический

Москва - 1981 г.



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

Научный руководитель

кандидат технических наук, доцент
МЕЛЬНИКОВ Г.Н.

Официальные оппоненты

доктор технических наук, старший
научный сотрудник

ЕВГЕНЕВ Г.Б.

кандидат технических наук, доцент
ПОЛТАВЕЦ О.Ф.

Ведущее предприятие

Горьковское станкостроительное про-
изводственное объединение

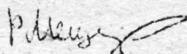
Защита диссертации состоится " " _____ 1981 г.
на заседании специализированного Совета по технологии машино-
строения шифр К-053.15.15. МВТУ им. Н.Э. Баумана по адресу:
107005, Москва, Б-5, 2-я Бауманская, 5.

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

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

Автореферат разослан " " _____ 1981 г.

Ученый секретарь Совета
к.т.н., доцент

 МЫЩЕРЯКОВ Р.К.

Подп. и печ. Л-85869 Заказ 201 Объем I п.л. Тираж 100 экз.
Ротоприят МВТУ 107005, Москва Б-5, 2-я Бауманская ул., д. 5

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Современное машиностроение характеризуется выпуском большого количества изделий, эксплуатационные свойства которых в значительной степени определяются качеством изготовления применяемых в них деталей сложной геометрической формы. Широко применимые при обработке таких деталей фрезерные станки с числовым программным управлением (ЧПУ) в ряде случаев не обеспечивают требуемого качества и производительности обработки ввиду неполного использования их технологических возможностей. Наиболее сильное влияние на качество обработки на фрезерных станках с ЧПУ оказывают погрешности, обусловленные упругими деформациями технологической системы под действием сил резания. Потенциальные возможности современных систем автоматизированной подготовки управляющих программ для контурного фрезерования на станках с ЧПУ позволяют решать вопросы обеспечения качества и производительности обработки на этапе технологической подготовки производства. Главным условием этого является наличие надежной и удобной методики обеспечения заданной точности при максимальной производительности обработки, представляемой в виде программно-технологического обеспечения и используемой в препроцессорах систем автоматизированной подготовки программ. Применение данного программно-технологического обеспечения не должно усложнять формирование управляющих программ.

В настоящее время несмотря на многочисленные попытки создания методики, полностью отвечающей поставленным условиям, машиностроение не имеет.

Цель работы. Разработка методики обеспечения заданной точности и максимальной производительности при контурном фрезеровании, представляемой в форме программно-технологического обеспечения, позволяющей в полной мере использовать возможности фрезерных станков с ЧПУ и систем автоматизированной подготовки управляющих программ.

Методы исследования. Применялись теоретические и экспериментальные методы исследования:

Расчетно-аналитический метод определения точности обработки; методы математической статистики; теории планирования эксперимента; теории систем; теории резания металлов; теория производитель-

ности рабочих машин. Экспериментальные исследования проводились в лаборатории кафедры "Технология механосборочного производства" МВТУ им. Н.Э.Баумана, лаборатория станков с ЧПУ ИПО "Оргстанкин-пром" и в производственных условиях на фрезерных станках с ЧПУ с использованием современной регистрирующей и измерительной аппаратуры.

Научная новизна. Установлены закономерности, позволяющие прогнозировать погрешности, обусловленные упругими деформациями технологической системы под действием сил резания и управлять точностью и производительностью контурного фрезерования при минимальном объеме исходных экспериментальных данных. Методика учитывает изменение сил резания при резком изменении кривизны обрабатываемого контура, при износе концевых фрез; влияние контактной податливости хвостовика инструмента на величину податливости инструмента и узла его крепления.

Практическая ценность. Результаты работы используются в промышленности в форме программно-технологического обеспечения пре-процессов систем автоматизированной подготовки управляющих программ для контурного фрезерования на станках с ЧПУ. Применение полученной методики и рекомендаций позволило гарантированно обеспечивать качество обработки при максимальной технологической производительности. Алгоритмы и программы технологического обеспечения, реализованные на языке Фортран IV, могут быть использованы в любой системе автоматизированной подготовки управляющих программ.

Реализация работы. Результаты работы внедрены в производство на Краснодарском станкостроительном заводе имени Седина. Использование предложенной методики и рекомендаций позволило повысить производительность труда при контурной обработке на фрезерных станках с ЧПУ мод 6520ФЗ, 6Р13ФЗ на 25%+30%, снизить время на разработку управляющих программ на 35%+40%, улучшить качество поверхности, что на отдельных деталях позволило снять дополнительную слесарную обработку. Экономический эффект составил 19 тыс. рублей в год.

Апробация работы. Основные разделы диссертации доложены на научных семинарах кафедры "Технология механосборочного производства" МВТУ им. Н.Э.Баумана 1975-1980 гг., на научно-техническом

совещании "Контактная жесткость в машиностроении" (г.Куйбышев, 1977), на Всесоюзной конференции "Технологическое управление качеством обработки и эксплуатационными свойствами деталей машин" (г.Киев, 1980 г.).

Объем работы. Диссертация, изложенная на 140 страницах машинописного текста, включает введение, пять глав, заключения по главам и общие выводы. Содержит 22 таблицы, III рисунков и список литературы из 88 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава I. Состояние вопроса и задачи исследования.

Основное влияние на точность обработки деталей на фрезерных станках с ЧПУ, как отмечено в работах Курсакова В.С., Молчанова Г.Н., Ратмирова В.А. и других, оказывают погрешности, обусловленные упругими деформациями технологической системы под действием сил резания. Наиболее сильно это проявляется при обработке участков контуров, представляющих собой сочетание нескольких геометрических элементов, когда резко меняется траектория относительно движения инструмента и детали. В связи с появлением систем автоматизированной подготовки управляющих программ, обладающих большими потенциальными возможностями закладывать предпосылки обеспечения требуемой точности и производительности обработки на этапе технологической подготовки производства, в настоящее время наиболее эффективным методом уменьшения указанных погрешностей является расчетная коррекция управляющих программ. Разработке методик коррекции посвящено большое количество работ - работы Вайсбурга В.А., Челобова А.И., Косенко И.Н., Лазоренко М.И., Литовченко А.К., Ратмирова В.А., Розенберга Ю.А., Сафрагана Р.Э., Сиротенко А.П., Тахмана С.И. и других.

Анализ известных методик показал, что в моделях силового взаимодействия, лежащих в их основе, контурная подача всегда считается перпендикулярной общей нормали к контуру и обрабатываемого контура, что в действительности имеет место только при обработке контуров малой и постоянной кривизны. Влияние износа концевых фрез на силы резания либо не учитывается совсем, либо учитывается в форме непригодной для использования в практических расчетах. Модели силового взаимодействия и податливости техно-

логической системы основываются в большинстве случаев на экспериментальных данных, требуют большого количества эмпирически получаемых коэффициентов и постоянных, имеют высокие 50%+200% относительные погрешности расчета.

Методики разработаны для наиболее простых или вообще конкретных случаев обработки. Коррекция траектории в основном осуществляется путем замены фактической траектории участками прямых и дуг окружностей. Это приводит к низкой эффективности известных методик и с учетом требования большого количества эмпирической информации, делает их непригодными для использования в системах автоматизированной подготовки управляющих программ. На основе проведенного анализа и в соответствии с целью работы определены следующие задачи исследования:

1. Создать математическую модель силового взаимодействия инструмента с обрабатываемой деталью, учитывающую кривизну обрабатываемого контура, влияние износа инструмента и требующую для расчетов минимального количества эмпирической информации.

2. Создать математическую модель податливости технологической системы.

3. Создать методику обеспечения заданной точности контурного фрезерования при обеспечении максимальной технологической производительности.

4. Представить созданную методику в форме программно-технологического обеспечения препроцессора системы автоматизированной подготовки управляющих программ.

5. Определить технико-экономическую эффективность результатов исследований.

В качестве объекта исследования принята технологическая система вертикально-фрезерного станка с ЧПУ в момент выполнения операции контурного фрезерования.

Глава 2. Теоретические основы обеспечения заданной точности контурного фрезерования.

Погрешности контура, обусловленные упругими деформациями технологической системы под действием сил резания, в любой точке контура определяются величинами:

$$\begin{aligned}\delta_v &= P_v \cdot W_v \\ \delta_n &= P_n \cdot W_n.\end{aligned}\tag{I}$$

где σ - погрешность контура; P - составляющая силы резания, W - податливость технологической системы. Индекс V означает действие параметра в направлении общей нормали фрезы и обработанного контура в плоскости стола станка, H - в направлении перпендикулярном нормали в плоскости стола.

При разработке математической модели силового взаимодействия инструмента с обрабатываемой деталью рассматривались 2 случая:

1. Когда мгновенное направление вектора контурной подачи перпендикулярно общей нормали фрезы и обработанного контура, что имеет место при обработке контуров малой и постоянной кривизны.
2. Когда мгновенное направление вектора контурной подачи не перпендикулярно общей нормали - обработка контуров большой кривизны.

В первом случае в основу математической модели положены апробированные общемашиностроительные формулы определения сил резания, в которых была проведена замена глубины фрезерования на более комплексный параметр - угол контакта фрезы с деталью. При встречном фрезеровании деталей из конструкционной стали концевыми быстрорежущими фрезами:

$$\begin{aligned} P_V &= 42,2 \cdot S_z^{0,72} \cdot B \cdot Z \cdot (1 - \cos \theta)^{0,86} \cdot \sin(\theta m - 27^\circ) \cdot K_M \\ P_H &= 42,2 \cdot S_z^{0,72} \cdot B \cdot Z \cdot (1 - \cos \theta)^{0,86} \cdot \cos(\theta m - 27^\circ) \cdot K_M \end{aligned} \quad (2)$$

При попутном фрезеровании:

$$\begin{aligned} P_V &= 44,0 \cdot S_z^{0,72} \cdot B \cdot Z \cdot (1 - \cos \theta)^{0,86} \cdot \sin(\theta m + 31^\circ) \cdot K_M \\ P_H &= 44,0 \cdot S_z^{0,72} \cdot B \cdot Z \cdot (1 - \cos \theta)^{0,86} \cdot \cos(\theta m + 31^\circ) \cdot K_M \end{aligned} \quad (3)$$

где S_z - подача на зуб фрезы; B - ширина фрезерования; Z - число зубьев фрезы; θ - угол контакта фрезы и контура; m - коэффициент углового положения сил; K_M - коэффициент зависящий от материала детали.

Во втором случае введены допущения:

1. Силы резания не имеют переменной составляющей - происходит "равномерное" фрезерование.
2. Механизм привода подачи обладает абсолютно жесткой характеристикой.

3. Удельная работа стружкообразования не зависит от сочетания направления скорости резания и подачи.

Основываясь на работах Грановского Г.И., Грудова П.И. силы резания - параллельная нормали к обработанному контуру P_x и перпендикулярная нормали P_y определены как равнодействующие соответствующих нормальных P_n и тангенциальных P_τ удельных нагрузок:

$$P_x = C \left\{ \frac{\sin(\alpha + \xi) [\cos^M \alpha - \cos^M(\theta - \alpha)]}{M+1} - \cos(\alpha + \xi) \left[f_{M+1}(\theta - \alpha) - f_{M+1}(-\alpha) \right] \right\} \quad (4)$$

$$P_y = C \left\{ \frac{\cos(\alpha + \xi) [\cos^M \alpha - \cos^M(\theta - \alpha)]}{M+1} + \sin(\alpha + \xi) \left[f_{M+1}(\theta - \alpha) - f_{M+1}(-\alpha) \right] \right\}$$

где $C = \frac{\sqrt{\hat{P}_x^2 - \hat{P}_y^2}}{2M}$; $\xi = \arccos \frac{\hat{P}_x}{\sqrt{\hat{P}_x^2 + \hat{P}_y^2}}$

$$M = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^M x \, dx \quad - \text{определяется согласно интегралу Эйлера.}$$

α - угол между мгновенным направлением контурной подачи и нормалью к контуру; θ - угол контакта; M - показатель степени (по Грановскому Г.И.).

$$\hat{P}_x = P_n(\theta = \pi) ; \hat{P}_y = P_\tau(\theta = \pi)$$

Формулы (2); (3); (4) позволяют определить значения составляющих сил резания при любых условиях обработки контурным фрезерованием.

На основе модели силового взаимодействия разработана модель формирования погрешностей, обусловленных упругими деформациями технологической системы под действием сил резания, в форме векторного поля. Суммарная погрешность в любой i точке контура определена вектором $\vec{B}_i$ с модулем:

$$|\vec{B}_i| = \sqrt{(\delta_{\Sigma \varphi i} + \delta_{\varphi \varphi i})^2 + (\delta_{\Sigma \tau i} + \delta_{\tau \varphi i})^2} \quad (5)$$

и углом наклона к общей нормали фрезы и обработанного контура

$$\chi_i = \arctg \frac{\frac{\delta_{\eta i}}{2a\tau} + \frac{\delta_{\eta i}}{2a\tau}}{\frac{\delta_{\xi i}}{2a\tau} + \frac{\delta_{\xi i}}{2a\tau}} \quad (6)$$

где $\delta_{\eta i}$ — погрешности, обусловленные упругими деформациями технологической системы под действием сил P_f и P_n в точке i соответственно для фрезы и заготовки.

Для обеспечения заданной точности контурного фрезерования в условиях действия погрешностей обусловленных упругими деформациями технологической системы необходимо и достаточно, чтобы границы векторного поля указанных погрешностей находились внутри поля допуска.

Обеспечение максимальной технологической производительности достигается за счет гарантированного обеспечения точности обработки на предельно допустимых по стойкости инструмента режимах резания.

Анализ методов уменьшения погрешностей, обусловленных упругими деформациями позволил обосновать выбор параметров инструмента для контурного фрезерования. Установлено, что в большинстве случаев целесообразно обрабатывать контур фрезой радиусом

$R_{\text{фр}} (0,7 \div 0,75) R_{\text{min}}$, где R_{min} — минимальный радиус внутреннего сопряжения контура. Величина контурной погрешности снижается при этом в 2÷6 раз. По производительности данный вариант уступает варианту $R_{\text{фр}} = R_{\text{min}}$ на гладких участках, но более предпочтителен на участках сопряжений.

Наиболее полно погрешности, обусловленные упругими деформациями технологической системы, уменьшаются при использовании расчетной коррекции управляющих программ, проводимой в виде коррекции траектории относительного движения инструмента, либо в виде определения (коррекции) режимов обработки в зависимости от условий обработки и требований к точности. Предложены формулы расчета величины предискажений при эквидистантной и безквдистантной коррекции. Разработана методика определения максимально допустимой по условиям обработки и требуемой точности величины подачи на зуб фрезы с учетом действия либо одной составляющей силы $P_v(P_f)$, либо обеих — $P_v(P_f); P_n(P_n)$. Предложены рекомендации для обеспечения технологической производительности

за счет дифференцированного назначения подачи на различных участках контура.

Глава 3. Исследование модели формирования погрешностей, обусловленных упругими деформациями технологической системы, при контурном фрезеровании.

Цель исследований – проверка и уточнение параметров модели силового взаимодействия и податливости технологической системы.

Экспериментально установлено, что при фрезеровании концевыми фрезами, диаметром меньшим 20 мм, податливость технологической системы на 70% + 80% определяется податливостью инструмента. Разработана методика расчета, позволяющая надежно прогнозировать податливость инструмента и узла его крепления для существующих конструкций фрез в зависимости от диаметра и вылета инструмента. Методика учитывает влияние контактной податливости хвостовика инструмента на податливость узла в целом и основана на работах Решетова Д.Н. и Левинсой З.М. Собственная податливость концевой фрезы:

$$W_{\text{ф}} = \frac{l_{\text{г}}^3 + \alpha_{n1} \left[l_{\text{г}} l_{\text{с}} (l_{\text{г}} + l_{\text{с}}) + \frac{l_{\text{с}}^3}{3} \right] + \alpha_{n2} \left[l_{\text{г}} l_{\text{ч}} (l_{\text{г}} + l_{\text{ч}}) (l_{\text{с}} + l_{\text{ч}} + l_{\text{г}} + l_{\text{ч}}) + \frac{(l_{\text{с}} + l_{\text{ч}})^3}{3} \right]}{E J_{\text{г}}} \quad (7)$$

где $l_{\text{г}}$ – вылет фрезы; $l_{\text{ч}}$ – длина цилиндрической части; $l_{\text{с}} + l_{\text{ч}}$ – длина конуса хвостовика до места контакта, определяемая с учетом погрешности конуса; α_{n1} , α_{n2} – коэффициенты приведения; $J_{\text{г}}$ – момент инерции втулочной части.

Податливость фрезы и узла ее крепления:

$$W_{\text{и}} = W_{\text{ф}} + W_{\text{к}} + W_{7/24} \quad (8)$$

где $W_{\text{к}}$ – податливость хвостовика фрезы; $W_{7/24}$ – податливость конического соединения шпиндельная втулка-шпиндель. На основе расчета составлены таблицы податливости для фрез выполненных по ГОСТ 17026-71. Полученные теоретические и экспериментальные данные позволяют создать модель податливости технологической системы ($W_{\text{т.с.}}$) фрезерных станков с ЧПУ

$$W_{\text{т.с.}(i)} \approx W_{\text{и}} + W_{\text{шп}(i)} + W_{\text{ст}(i)} \quad (9)$$

где $W_{\text{шп}(i)}$ – податливость шпиндельного узла в i направлении, $W_{\text{ст}(i)}$ – податливость стола станка в i направлении.

Установлено, что при расчете упругих деформаций технологической системы:

1. Если диаметр применяемой фрезы меньше 8 мм можно пренебречь податливостью станка.
2. Если диаметр фрезы находится в пределах 8 мм + 22 мм ($W_H = 120 \frac{HМ}{Н} \div 500 \frac{HМ}{Н}$), можно пренебречь непостоянством податливости станка в зависимости от направления.
3. Если диаметр фрезы более 22 мм ($W_H < 120 \frac{HМ}{Н}$) и силы резания при обработке более 1000 Н, необходимо учитывать анизотропию податливости станка.

Экспериментальное исследование влияния износа инструмента на силы резания при контурном фрезеровании проводилось с применением методов теории планирования эксперимента. Получено уравнение регрессии, связывающее коэффициент изменения сил резания K_{Pv} с параметрами режима резания и условиями обработки:

$$K_{Pv} = 8,297 - 3,549t - 21,929s_2 + 0,024v - 0,081G_8 + \quad (10) \\ + 0,059L + 3,98t \cdot s_2 + 0,051t \cdot G_8 + 0,088t \cdot L + \\ + 0,1367s_2 \cdot v + 0,124s_2 \cdot G_8 - 0,007v \cdot L + 0,003G_8 \cdot L,$$

где t - припуск на обработку; s_2 - подача на зуб; v - скорость резания; G_8 - предел прочности; L - длина обработки. Износ концевых фрез приводит к возрастанию сил резания в процессе обработки в 3 + 5 раз. Проверочным экспериментом установлено, что уравнение (10) может быть использовано для прогноза величины K_{Pv} до достижения фрезой износа по задней поверхности 0,3 мм. (по Грановскому Г.И.) с относительной погрешностью 13% + 20%.

Экспериментально уточнены условия изменения знака силы P_v при встречном фрезеровании упоминавшиеся в работах Дязоренко М.И., Ратмирова В.А., Шрёдер К. Полученные зависимости глубины фрезерования (для прямолинейных участков) и угла контакта (для криволинейных участков), при которых $P_v = 0$ используются при назначении условий работы на черновом рабочем ходе, обеспечивающих минимальную погрешность контура. На основе полученных данных проведено уточнение координаты точки приложения результирующей силы резания в разработанной модели силового

взаимодействия.

Разработанные модели силового взаимодействия и податливости технологической системы адекватны описываемым процессам комплексной проверкой установлено, что средняя величина относительной погрешности определения δ_v и δ_n не более 30%.

Глава 4. Методика обеспечения заданной точности и максимальной производительности контурного фрезерования.

Разработана методика обеспечения заданной точности контурного фрезерования при обеспечении максимальной в заданных условиях технологической производительности, основанная на применении разработанных в гл. 2, 3 математических моделей. Методика включает методику выбора параметров инструмента для контурного фрезерования и методику коррекции управляющих программ. Методика расчета коррекции управляющих программ обеспечивает как проведение непрерывной расчетной коррекции, снижающей погрешности, обусловленные упругими деформациями технологической системы под действием сил резания при резком изменении силового взаимодействия инструмента с обрабатываемой деталью, так и введение коррекции через определенный интервал с целью уменьшения указанных погрешностей при изменении сил резания вследствие износа инструмента. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение расчета коррекции траектории относительного движения инструмента и подачи на зуб фрезы при контурном фрезеровании. Разработано программное обеспечение формирования управляющих программ с коррекцией в условиях автоматизированной подготовки последних. На примере системы автоматизированной подготовки управляющих программ "Финалка-М", разработанной на Горьковском станкостроительном производственном объединении, показано использование языка системы для формирования управляющих программ с учетом требований точности. Программы расчета коррекции реализованы на языке Фортран IV ЕС ЭВМ и могут быть использованы в любой системе.

Методика обеспечения заданной точности проверена экспериментально. Использование управляющих программ с коррекцией обеспечивает уменьшение погрешностей контура в $3,5 \pm 12$ раз по сравнению с вариантом без коррекции. Применение методики позволяет устойчиво обеспечивать точность размеров контура в пределах 9 качества **ISO**.

Глава 5. Техничко-экономическое обоснование применения методики обеспечения заданной точности контурного фрезерования.

Сравнение технико-экономических показателей разработанной методики с базовой методикой ЭНИМС (по Ратмирову В.А.) показало ее эффективность. Условно-годовая экономия составила 7,05 тыс. рублей на годовую программу 1000 шт. деталей. Применение разработанной методики позволяет сократить трудоемкость подготовки управляющих программ с коррекцией до 5 раз; снизить себестоимость продукции до 2 раз; исключить доводочные операции после механической обработки; снизить капитальные вложения в средства вычислительной техники и средства подготовки управляющих программ на 25% + 30%.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. На основе анализа точности контурного фрезерования деталей сложной геометрической формы на станках с ЧПУ установлено, что до 80% суммарной погрешности обработки составляют погрешности, обусловленные упругими деформациями технологической системы под действием сил резания. Развитие вычислительной техники и автоматизация подготовки управляющих программ делают наиболее эффективным методом уменьшения суммарной погрешности расчетную коррекцию управляющих программ.
2. Оценка податливости технологической системы при контурном фрезеровании может быть произведена на основе разработанной методики определения податливости инструмента и узла его крепления и результатов проведенных экспериментальных исследований. Относительная погрешность модели податливости не более 15%.
3. В результате экспериментальных исследований установлено, что износ концевых фрез приводит к возрастанию сил резания до 3 + 5 раз, что делает необходимым учет данного явления при разработке операционной технологии контурного фрезерования.
4. При расчете сил резания для случаев контурного фрезерования деталей сложной геометрической формы необходимо учитывать неперпендикулярность направления подачи общей нормали фрезы и контура, а также возрастание сил резания при износе инструмента. Разработанная на основе экспериментальных и теоретических исследований модель силового взаимодействия инструмен-

та с обрабатываемой деталью адекватна описываемому процессу с относительной погрешностью не более 25%.

5. Применение при контурной обработке концевых фрез диаметром $(1,4 + 1,5)$ минимального радиуса сопряжения позволяет снизить погрешность, обусловленную упругими деформациями технологической системы в $2,5 + 6$ раз без коррекции траектории и снижения подачи.
6. Обеспечение заданной точности контурного фрезерования может быть достигнуто путем, введения непрерывной коррекции, учитывающей изменение силового взаимодействия при резком изменении траектории, а также периодической коррекцией с целью компенсации изменений сил вследствие износа инструмента. Разработанные алгоритмы и программное обеспечение расчета коррекции траектории относительного движения инструмента и подачи на зуб фрезы при контурном фрезеровании могут быть использованы в автоматизированных системах подготовки управляющих программ.
7. Применение коррекции управляющих программ позволяет снизить величину контурной погрешности в $3,5 + 12$ раз. Использование разработанной методики обеспечения заданной точности и максимальной производительности контурного фрезерования, основанной на обоснованном выборе параметров инструмента в сочетании с коррекцией в необходимых случаях управляющих программ, позволяет устойчиво обеспечивать точность размеров контура в пределах 9 качества ISO.
8. Применение разработанной методики:
 - обеспечивает условно-годовую экономию не менее 7 тыс. руб. при условной программе выпуска 1000 сложно-контурных деталей в год;
 - сокращает трудоемкость подготовки управляющих программ до 5 раз;
 - позволяет снизить капитальные вложения в средства вычислительной техники и подготовки управляющих программ на 25% + 30%.
9. Разработанная методика исполнована на Горьковском станкостроительном производственном объединении и внедрена в производство на Краснодарском станкостроительном заводе имени Садина.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Кондаков А.И., Мельников Г.Н., Определение жесткости концевых фрез. - Известия вузов. Машиностроение, 1976, № II, с. 157-161.

2. Корсаков В.С., Кондаков А.И., Мельников Г.Н. К вопросу о выборе диаметра концевой фрезы для обработки деталей сложной формы на фрезерных станках с ЧПУ. - Тезисы докладов научно-технического совещания Контактная жесткость в машиностроении. Куйбышев, 1977, с. 158-160.

3. Мельников Г.Н., Кондаков А.И. Об изменении сил резания при износе концевых фрез. - Известия вузов. Машиностроение, 1978, № 10, с. 158-162.

4. Мельников Г.Н., Кондаков А.И., Пашинцев А.И. Влияние глубины резания при контурном фрезеровании на силы резания. - Известия вузов. Машиностроение, 1979, № 2, с. 130-133.

5. Мельников Г.Н., Кондаков А.И. Технологическое обеспечение качества сложноконтурных деталей при фрезеровании на станках с ЧПУ. - Тезисы докладов Всесоюзной конференции Технологическое управление качеством обработки и эксплуатационными свойствами деталей машин. Киев, 1980, с. 120-123.

6. Кондаков А.И., Курбатов А.П., Пашинцев А.И. Податливость технологической системы при контурном фрезеровании на станках с ЧПУ. - Известия вузов. Машиностроение, 1980, № 10, с. 155-157.