

На правах рукописи

Сурков Игорь Васильевич

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И ТОЧНОСТИ
ОБРАБОТКИ НА ТОКАРНЫХ СТАНКАХ С ЧИСЛОВЫМ
ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ЗА СЧЕТ УЧЕТА
ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРОЦЕССА НА СТАДИИ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ

Специальность 05.02.08 - "Технология машиностроения"

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск 1995

Работа выполнена на кафедре "Технология машиностроения"
Челябинского государственного технического университета

Научный руководитель - заслуженный деятель науки и
техники РСФСР, доктор технических
наук, профессор Корчак С. Н.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Митрофанов В. Г.;

кандидат технических наук
Налеин В. А.

Ведущее предприятие Челябинский автоматизированный
завод.

Зашита диссертации состоится 20 июня 1995 года, в 12 часов,
в ауд. 502 на заседании диссертационного совета Д 053.13.05 в Че-
лябинском государственном техническом университете по адресу:
454080, Челябинск, пр. им. В. И. Ленина, 76.

Просим Вас принять участие в заседании диссертационного со-
вета или прислать по указанному адресу отзыв в двух экземплярах,
заверенных печатью.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Челябинского
государственного технического университета.

Автореферат разослан "—" 1995 года.

Ученый секретарь специализированного совета *Баев*,
доктор экономических наук, профессор *И. А. Баев*

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Опыт промышленной эксплуатации станков с ЧПУ показывает, что наибольший экономический эффект может быть получен при обработке на них сложных деталей, имеющих много точных поверхностей, в том числе фасонных. Тела вращения с коническими, сферическими поверхностями, а также с поверхностями, имеющими более сложную форму в продольном сечении широко используются в узлах и механизмах, выпускаемых на предприятиях машиностроительного комплекса и авиационно-космической промышленности.

При этом, операции, выполняемые на станках с ЧПУ, часто являются окончательными, то есть обработка должна обеспечить получение конечных, достаточно жестких требований чертежа по точности и шероховатости. Это особенно важно при обработке фасонных поверхностей, так как отклонение формы, полученное при обработке, оказывает влияние на работоспособность соединения (конического или сферического) в механизме или узле. Например, в топливозапорной аппаратуре важным для герметичности соединения является точность прилегания конуса вала и отверстия.

При обработке фасонных поверхностей на станках с ЧПУ к нестационарности процесса, обусловленной исходной неравномерностью припуска из-за колебаний размеров заготовки добавляется влияние следующих факторов:

1. Форма исходных заготовок (прокат) обычно не совпадает с формой готовой детали, что характерно для серийного производства, где в основном применяются станки с ЧПУ. При обработке таких заготовок широко применяются стандартные многоходовые циклы с автоматическим разбиением на рабочие хода, что связано с простотой программирования и значительным уменьшением длины управляющих программ. Предварительные рабочие хода для удаления напуска в этих циклах выполняются по схеме "прямоугольная петля" и только один или два завершающих рабочих хода эквидистанты конечному контуру. Это приводит к появлению ступенчатого припуска (каждая ступень треугольной формы) перед заключительными рабочими ходами, что вызывает значительные колебания силы резания и обуславливает отклонение формы в продольном сечении из-за копирования ступеней.

2. При движении вершины резца вдоль криволинейной образующей обрабатываемой поверхности происходит постоянное изменение направления контурной подачи, что приводит к изменению активной клины режущей кромки, кинематических углов в плане и площади сечения среза, то есть к изменению составляющих сил резания (их величины и направления).

Анализ показал, что на производстве, чтобы обеспечить заданное качество обработки, подготовку управляющей программы производят в 2 этапа. На 1-м этапе в управляющей программе задаются начальные ("стартовые") параметры многоходового цикла, исходя из рекомендаций по обеспечению прочности инструмента (для черновой стадии) и шероховатости обрабатываемой поверхности (для чистовой). На 2-м этапе проводятся пробные обработки детали с многочисленными корректировками параметров многоходового цикла (изменяется уровень режимов для черновой обработки, вводятся дополнительные получистовые и чистовые рабочие хода). Сравнение "стартовых" и внедренных в производство управляющих программ показало, что время выполнения (то есть производительность) различается в 1,5...2 раза, что свидетельствует о низкой эффективности проектной методики, применяемой на 1-м этапе.

Высокие требования к точности поверхностей и переходные процессы на чистовых рабочих ходах (из-за переменности глубины резания) обусловили необходимость разработки методов управления режимами резания на стадии проектирования управляющих программ для обработки фасонных поверхностей, с учетом динамических свойств процесса точения и ориентированных на возможности современных устройств с ЧПУ.

Цель работы: Разработка методики проектирования многоходовых циклов с автоматическим разделением на рабочие хода для токарных станков с ЧПУ с учетом динамических свойств процесса точения для повышения точности и производительности токарной обработки.

Основные задачи: 1. Разработать аналитические силовые зависимости для контурной обработки деталей на токарных станках с ЧПУ, учитывающие наличие радиуса при вершине резца и изменение направления контурной подачи при обработке фасонных поверхностей.

2. Описать процесс контурного точения с помощью уравнений динамики и получить зависимость изменения силы резания от изменения параметров срезаемого слоя с учетом инерционности технологической системы. Разработать расчетно-аналитическую методику определения постоянной времени процесса точения, как основной динамической характеристики токарной обработки.

3. Сформировать методику и алгоритм расчета параметров высокопроизводительных многоходовых циклов точения с автоматическим разделением на рабочие хода, обеспечивающих заданную точность и учитывающих динамические свойства процесса точения, для применения в системах автоматизированного проектирования технологических процессов.

4. Разработать измерительно-вычислительный стенд и выполнить на нем комплекс экспериментов по проверке адекватности моделей.
5. Дополнить существующие общемашиностроительные нормативы режимов резания для станков с ЧПУ методикой расчета параметров многоходовых циклов токарной обработки с автоматическим разделением на рабочие хода и необходимыми нормативными картами.
6. Внедрить разработанные методики на производственных предприятиях и в учебный процесс.

Методы исследования. Теоретические исследования проводились на базе научных основ технологий машиностроения, теории резания металлов, законов механики, аналитической геометрии и теории автоматического управления.

Достоверность результатов аналитических решений проверялась экспериментально на специально разработанном измерительно-вычислительном стенде, обеспечивающем автоматизированные комплексные экспериментальные исследования процесса точения. Обработка экспериментальных данных проводилась методами математической статистики. Вычисления и математическое моделирование выполнялось на ЭВМ ТИМ РС.

Научная новизна. 1. На основе закона механики о равенстве активных и реактивных сил, а также основных законов теории пластичности, разработаны аналитические силовые зависимости для контурной обработки деталей на токарных станках с ЧПУ, учитывающие наличие радиуса при вершине резца и изменение направления контурной подачи при обработке фасонных поверхностей.

2. Получена аналитическая зависимость изменения силы резания от изменения параметров срезаемого слоя с учетом инерционности технологической системы. Разработана расчетно-аналитическая методика определения постоянной времени, как основной динамической характеристики процесса точения.

3. Исследовано влияние динамических характеристик процесса контурного точения на результирующую погрешность обработки. На этой основе сформирована методика и алгоритм расчета параметров высокопроизводительных многоходовых циклов точения с автоматическим разделением на рабочие хода, обеспечивающих заданную точность и учитывающих динамические свойства процесса точения, для применения в системах автоматизированного проектирования технологических процессов.

Практическая ценность и промышленная реализация работы. Впервые разработаны, прошли промышленную апробацию на 30 предприятий и изданы в 1990 году "Общемашиностроительные нормативы врем-

мени и режимов резания для нормирования работ, выполняемых на универсальных и многоцелевых станках с ЧПУ. Часть 11. Нормативы режимов резания". В главе "Точение и растачивание" (вид обработки - точение продольное и подрезание торцов) приведены карты выбора подачи и поправочных коэффициентов на подачу, полученных при использовании разработанных аналитических зависимостей сил резания. В нормативах решена задача обеспечения расчетно-обоснованного минимального основного времени обработки в зависимости от точности заготовки и необходимой точности обработки только для деталей, обработка которых осуществляется последовательным снятием с заготовки слоев материала рабочими ходами, эквидистантными обрабатываемой поверхности.

Поэтому, используя полученные расчетные модели, описывающие взаимосвязь получаемой при токарной обработке на станке с ЧПУ точности размеров и формы деталей с режимами резания на каждой стадии многоходового цикла точения и учитывающие динамические свойства процесса точения, разработана методика расчета параметров многоходовых циклов и необходимые нормативные карты, которые дополняют изданные нормативы режимов резания и обеспечивают разработку управляющих программ наибольшей производительности.

По заказу ЦБНТ ГОСКОМТРУДА СССР и других предприятий разработана автоматизированная система проектирования и нормирования операций для станков с ЧПУ, ориентированная на различные типы ЭВМ.

Результаты исследований в виде руководящих технических материалов и систем автоматизированного проектирования и нормирования операций внедрены на 2 предприятиях. Их промышленное использование на ряде операций показало, что учет динамических характеристик процесса точения повысил эффективность разработки управляющих программ, содержащих многоходовые автоматические циклы, и позволил сократить время их отладки в среднем на 30%, а производительность обработки (при той же точности) повысить на разных операциях от 10 до 40%.

Разработанные САПР нормирования операций используются в курсовом и дипломном проектировании студентами специальности 1231.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены и обсуждены на научно-технических конференциях (НТК) и научно-методических семинарах (НМС): на НМС "Внедрение микропроцессорных средств в машиностроении", Челябинск, 1987 г.; на Республиканской НТК "Опыт создания и эксплуатации гибких автоматизированных производственных систем механической обработки", Киев, 1987, 1988

1989 гг.: на Всесоюзной НТК "Технологическое и нормативное обеспечение станков с ЧПУ и ГПС", Челябинск, 1988 г.: на Всесоюзном НМС "Работы и ГПС", Челябинск, 1988 г.; на Республиканском НМС "Автоматизация контроля качества в ГПС", Севастополь, 1989 г.; на Всесоюзном НМС "Новое в метрологическом обеспечении машиностроения", Москва, 1989 г.; на зональной НТК "Совершенствование процессов резания и средств автоматизации для повышения производительности гибких станочных систем", Курган, 1990 г., на ряде НТК Челябинского государственного технического университета 1987-1993 гг.

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в 12 публикациях и в 4 отчетах по НИР.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 107 страницах машинописного текста, содержит 49 рисунков, 7 таблиц, список литературы из 99 наименований и 9 приложений на 52 страницах. Общий объем работы 223 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Из работ Балакина Б. С., Соломенцева Ю. Н., Базрова Б. М., Митрофанова В. Г. и ряда других исследователей известно, что наибольшее влияние на точность обработки деталей оказывают колебания сил резания и вызываемые ими взаимные упругие отжатия инструмента и детали, на которые и приходится большая доля погрешности обработки, так называемая погрешность динамической настройки.

Поэтому известные методики аддитивного управления точностью и производительностью токарной обработки основываются на зависимостях для расчета составляющих силы резания. Большинство существующих методик основано на эмпирических зависимостях и учитывает узкий диапазон варьирования параметров резания.

На основе использования формул Корчака С. Н. Гузеев В. И. предложил аналитические зависимости для определения составляющих сил резания при точении фасонных деталей для случаев обработки с глубинами, значительно большими радиуса при вершине резца. Ефимов Е. Ю. получил зависимости для расчета составляющих сил резания, в которых учитывается наличие радиуса при вершине инструмента, но в них отсутствует учет изменения активной длины режущей кромки, ки-

нематических углов в плане и площади сечения среза при обработке фасонных поверхностей.

Общий недостаток этих моделей - система сил рассматривается в статике (для установившегося процесса), без учета инерционности технологической системы. То есть, считается, что ступенчатое (мгновенное) изменение глубины резания вызывает мгновенное изменение силы резания и погрешности динамической настройки. Если для цилиндрической поверхности доля врезаний и выходов инструмента в общем времени резания невелика, то при точении фасонной поверхности со ступенчатым припуском эта доля переходных процессов значительна и из-за неучета динамики процесса резания разница между расчетными и реальными величинами силы резания и погрешностями обработки в этих случаях может оказаться существенной.

Для учета динамических характеристик задача проектирования управляющей программы для токарных станков с ЧПУ представлена как задача управления, при решении которой необходимо описание объекта управления с помощью уравнений динамики. В работах Кудинова В. А., Подураева В. Н., Левина А. И., Тверского И. И. предложены различные варианты таких уравнений. Входящие в эти уравнения постоянные времени и коэффициенты передачи являются обобщенными динамическими параметрами, определяющими связь между входными воздействиями (подача S , глубина резания f) и выходными параметрами (точность и производительность). Их общими недостатками следует считать то, что силовые эмпирические зависимости, положенные в основу этих моделей имеют узкий диапазон применения. Кроме того сведения о постоянной времени процесса резания (T_p) в научной литературе крайне ограничены и противоречивы. Ее определяют в основном экспериментально. Это затрудняет использование таких моделей для проектирования операций в широком диапазоне условий обработки на токарных станках с ЧПУ.

В большинстве исследований, посвященных точности обработки на токарных станках с ЧПУ, рассматриваются случаи, когда все рабочие кода эквидистантны обрабатываемым поверхностям, что характерно для обработки детали из близкой по форме заготовки. Обработка делится на стадии: черновую, получистовую, чистовую, отдельочную. Считается, что на каждой стадии происходит уточнение обрабатываемых поверхностей с определенным коэффициентом уточнения. В этом случае основным возмущающим воздействием, порождающим динамическую погрешность обработки, является колебание размеров заготовки, которое уменьшается на каждой стадии. При расчете режи-

мов резания. динамическая погрешность от упругих перемещений ограничивается определенной долей от допуска на размер.

Как уже отмечалось, при обработке многоступенчатых деталей из проката на станках с ЧПУ используются стандартные многоходовые циклы. При этом, после чернового удаления напуска по схеме "прямоугольная петля" на фасонных поверхностях возникают ступени, которые приводят к колебанию глубины резания на получистовом эквидистантном рабочем ходе. Величина этого колебания зависит от глубины резания на черновой стадии и значительно превышает колебание глубины резания от неточности заготовки. Упругие деформации при получистовой обработке приводят к появлению погрешности формы в продольном сечении перед чистовой обработкой. Величина этой погрешности часто оказывается значительной и окончательный (чистовой) рабочий ход не обеспечивает требуемую точность размеров и формы из-за наследования погрешности формы в продольном сечении от предыдущих стадий обработки.

Эту задачу можно решить разработкой соответствующей методики для расчета параметров многоходовых циклов точения, обеспечивающих максимальную производительность при заданной точности с учетом динамических свойств процесса точения в связи с его силовой нестабильностью.

2. ВЗАИМОСВЯЗЬ СОСТАВЛЯЮЩИХ СИЛ РЕЗАНИЯ С ДИНАМИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ПРОЦЕССА ТОЧЕНИЯ.

Для вывода силовых зависимостей был применен подход, основанный на законе механики о равенстве активных и реактивных сил, а так же на основных положениях теории больших пластических деформаций.

При определении составляющих силы резания для случая применения резцов с радиусом при вершине, которые обычно и используются при обработке фасонных контуров, отдельно рассмотрим прямолинейный и радиусный участок режущей кромки инструмента. Используя формулы С. Н. Корчака, описывающие равновесие активных и реактивных сил для элементарного участка режущей кромки, определены элементарные составляющие силы резания, действующих на задней $dP_{x_{утр}}$, $dP_{y_{тр}}$ и передней поверхности ($dP_{x_{рез}} dP_{y_{рез}}$), прилегающих к этому участку. После интегрирования этих выражений, получены зависимости для определения сил, возникающих на передней ($P_{x_{рез}}, P_{y_{рез}}$, $P_{x_{рез}} P_{y_{рез}}$) и задней поверхностях ($P_{x_{тр}}, P_{y_{тр}}, P_{x_{утр}}, P_{y_{утр}}$), при-

легающих к прямолинейному (индекс ПУ) и радиусному (индекс РУ) участкам режущей кромки.

После суммирования и соответствующих преобразований получена система расчетных зависимостей составляющих сил резания:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_z = \frac{\cos \beta}{\sin \beta} \cdot \sigma_i \cdot S \cdot (t - 2(1 - \cos(\varphi_i + \omega))) + \mu \cdot \frac{\sqrt{3}\pi}{12} \cdot \sigma_i \times \\ \times \frac{\sin \beta}{\sin(\beta + \beta_i)} \cdot \ell_3 \cdot \left(\frac{t}{\sin(\varphi - \omega)} + 2 \cdot (2 \cdot \sin \frac{\varphi + \varphi_i}{2} - \operatorname{tg} \frac{\varphi - \omega}{2}) \right); \\ P_y = \frac{\sin \beta}{\sin \beta_i} \cdot \sigma_i \cdot S \cdot (t \cdot \cos(\varphi - \omega) + \frac{7}{2}((1 - \cos(\varphi - \omega))^2 - \\ - \sin^2(\varphi_i + \omega))) + \frac{\sqrt{3}\pi}{12} \cdot \sigma_i \cdot \frac{\sin \beta}{\sin(\beta + \beta_i)} \cdot \ell_3 \cdot \left(\frac{t}{\operatorname{tg}(\varphi - \omega)} + \right. \\ \left. + 2(\sin(\varphi - \omega) + \sin(\varphi_i + \omega) - \frac{1 - \cos(\varphi - \omega)}{\operatorname{tg}(\varphi - \omega)}) \right); \\ P_x = \frac{\sin \beta}{\sin \beta} \cdot \sigma_i \cdot S \cdot (t \cdot \sin(\varphi - \omega) + \frac{5}{2}(\varphi + \varphi_i - \\ - 2 \cdot \sin(\varphi - \omega) + \sin(\varphi - \varphi_i - 2 \cdot \omega) \cdot \cos(\varphi + \varphi_i))) + \\ + \frac{\sqrt{3}\pi}{12} \cdot \sigma_i \cdot \frac{\sin \beta}{\sin(\beta + \beta_i)} \cdot \ell_3 \cdot (t - 2(1 - \cos(\varphi_i + \omega))), \end{array} \right. \quad (1)$$

где σ_i - интенсивность напряжений в движущемся объеме деформируемого металла; β , β_i - угол действия и угол сдвига; S - радиус при вершине резца; ω - угол наклона обрабатываемой поверхности; φ , φ_i - главный и вспомогательный углы в плане; ℓ_3 - величина фаски затупления. μ - коэффициент трения.

Полученные аналитические зависимости описывают закономерности изменения силы в зависимости от режимных (S и t) и геометрических параметров (S , φ , φ_i , ω и т. д.). В результате появилась возможность расчетно-аналитического количественного определения влияния этих факторов на силы резания, их нестабильность и в дальнейшем на точность обработки.

Для теоретических исследований полученных зависимостей была составлена программа расчета на ЭВМ. Результаты моделирования для P_y представлены на рис. 1 в виде сплошных линий.

Для экспериментальной проверки полученных зависимостей и проведения других экспериментов разработан измерительно-вычислительный стенд (ИВС) на базе серийно- выпускаемого токарного станка с ЧПУ модели 16К20ФЗС32 (система ЧПУ ЗР22). Этот станок дополнительно оснащен рядом датчиков (винт-датчик для измерения силы резания, индикаторы контакта для контроля размеров детали и положения режущих кромок инструмента), которые наряду со штатными измерительными приборами через модули стандартного интерфейса КАМАК подключены к шине ЭВМ IBM PC. Функциональная схема ИВС приведена

на рис. 2. Математическое обеспечение устройства 2Р22 расширено для управления дополнительным оборудованием. Аппаратная часть стендла разработана исходя из требований универсальности. Конкретные группы экспериментов проводятся на ИВС за счет расширения его программного обеспечения. ИВС выполняет функции: сбор результатов измерений и вывод их в ЭВМ; первичная обработка информации; визуальное и графическое отображение информации; сортировка, накопление и хранение информации; автоматическое регулирование технологических параметров; программно-логическое управление приводами и механизмами станка для физического моделирования заданного режима исследования.

Экспериментальные исследования (точки на рис. 1) подтвердили справедливость полученных аналитических силовых зависимостей. Среднеквадратичное отклонение экспериментальных и теоретических значений составило не более 10%.

На основе выведенных силовых зависимостей, учитывая изменение режимных параметров во времени (t) и влияние упругих перемещений элементов технологической системы вдоль осей X и Y на площадь сечения среза (т.е. обработки по следу), была получена общая динамическая модель процесса точения. В этой модели было учтено влияние упругой системы станка, описанной линейной системой обык-

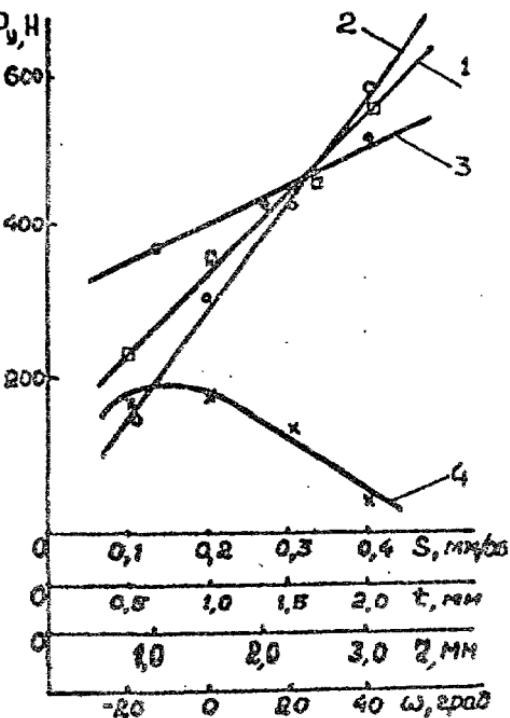


Рис. 1. Взаимосвязь составляющей силы резания P_y с параметрами точения:
1 - влияние подачи S (•); 2 - влияние глубины резания t (○); 3 - влияние радиуса при вершине ζ (◐);
4 - влияние угла наклона ω (×).

Магистраль крейта КАМАК

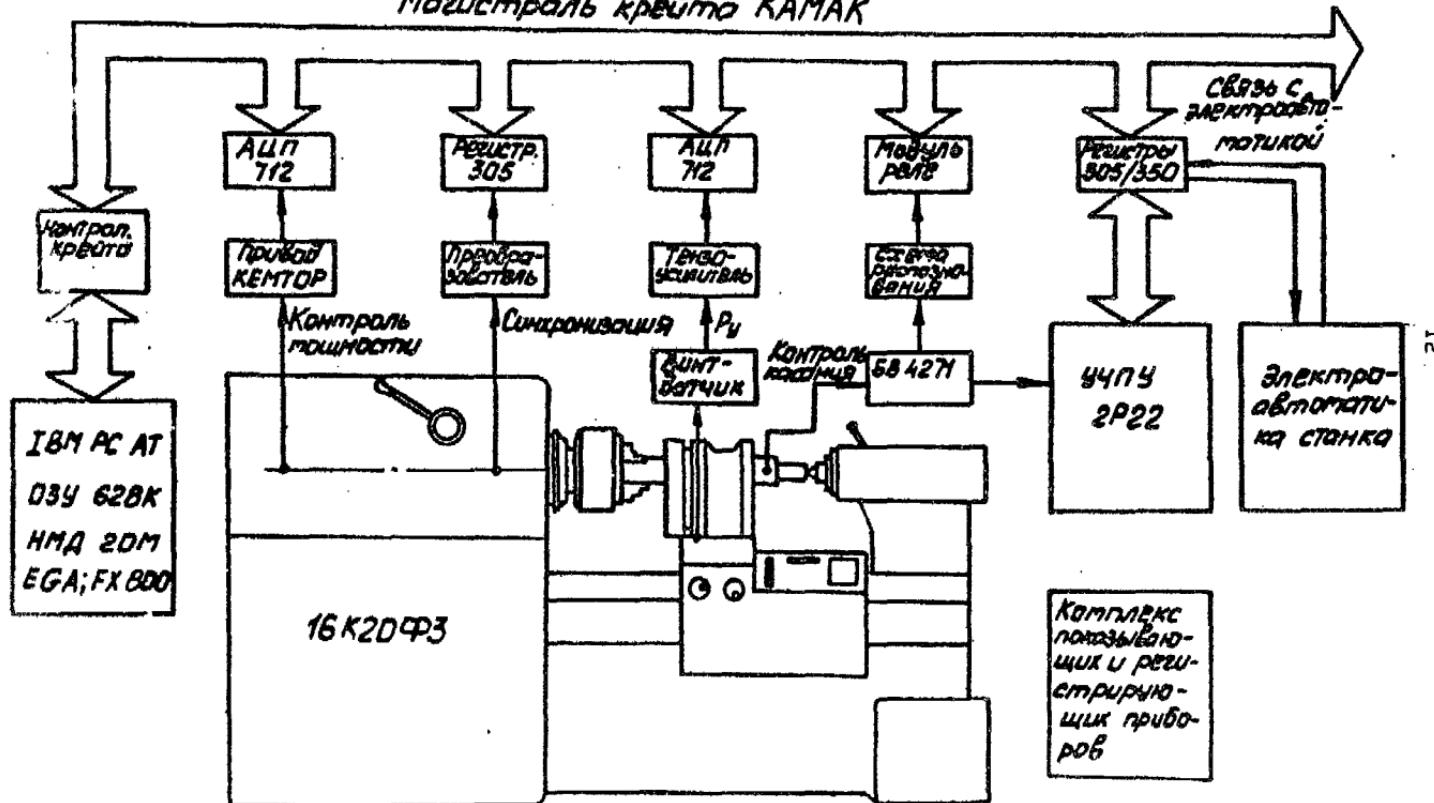


Рис. 2. Функциональная схема ИВС

новенных дифференциальных уравнений и выражение через передаточные функции W_y и W_x :

$$\begin{cases} P_y(\tau) = (K_y \cdot S(\tau) + K_{y3}) \cdot t(\tau) + K_{y2} \cdot S(\tau) + K_{y4}; \\ P_x(\tau) = (K_x \cdot S(\tau) + K_{x3}) \cdot t(\tau) + K_{x2} \cdot S(\tau) + K_{x4}; \\ t(\tau) = \Delta t(\tau) - (y(\tau) - K_p \cdot y(\tau - \tau_0)); \\ Q(\tau) = S(\tau) - (X_{yn}(\tau) - X_{yn}(\tau - \tau_0)); \\ y(\tau) = W_y(p) \cdot P_y(\tau); X_{yn}(\tau) = W_x(p) \cdot P_x(\tau), \end{cases} \quad (2)$$

где Δt - текущее изменение глубины резания; τ_0 - время одного оборота; $y \cdot X_{yn}$ - упругие деформации технологической системы по осям y и x ; K_p - коэффициент перекрытия следа; $P \in \frac{d}{dt}$ - оператор дифференцирования; $K_{y1\dots 4}, K_{x1\dots 4}$ - аналитические коэффициенты, зависящие от $\beta_i \cdot \beta, \beta, \gamma \cdot \omega \cdot \varphi \cdot \varphi, \ell_3, \mu$ (введены из-за громоздкости полных выражений составляющих силы резания в (1)).

Для исследуемой контурной обработки фасонных поверхностей на станках с ЧПУ, когда в кадре управляющей программы скорость подачи неизменна, непостоянство срезаемого слоя связано с колебаниями фактической глубины резания. Рассматривая отклонения составляющей силы резания при $S = \text{const}$ и $t \neq \text{const}$ и используя функцию запаздывающего аргумента, получим следующее выражение, описывающее влияние нестационарности глубины резания на составляющую силы P_y :

$$\Delta P_y(\tau) = \frac{K_{y1} \cdot S + K_{y3}}{1 + (K_y \cdot S + K_{y3}) \cdot W_y(p) (1 - K_p \cdot e^{-p\tau_0})} \cdot \Delta t(\tau) \quad (3)$$

Заменяя выражение экспоненты рядом Тейлора и учитывая, что в большинстве исследований упругая система станка представлена как одномассовая, получим следующую формулу для передаточной функции процесса резания, которая позволяет оценить реакцию процесса резания, выражющееся в изменении силы резания, на ступенчатое изменение глубины резания:

$$W_{\text{рез}}(p) = \frac{Q_4 p^4 + Q_3 p^3 + Q_2 p^2 + Q_1 p + Q_0}{B_4 p^4 + B_3 p^3 + B_2 p^2 + B_1 p + B_0} \quad (4)$$

где $Q_4 = (K_y \cdot S + K_{y3}) \cdot T_1^2 \cdot \tau_0^2$; $Q_3 = (K_y \cdot S + K_{y3}) (6T_1^2 \tau_0 + T_2 \cdot \tau_0^2)$;
 $Q_2 = (K_y \cdot S + K_{y3}) (12T_1^2 + 6T_2 \cdot \tau_0 + \tau_0^2)$; $Q_1 = (K_y \cdot S + K_{y3}) \times (12T_2 + 6\tau_0)$; $Q_0 = 12 \cdot (K_y \cdot S + K_{y3})$;
 $B_4 = T_1^2 \cdot \tau_0^2$; $B_3 = 6T_1^2 \cdot \tau_0 + T_2 \cdot \tau_0^2$; $B_2 = (K_y \cdot S + K_{y3}) \times K_y \cdot (1 - K_p) + 12 \cdot T_1^2 + 6 \cdot T_2 \cdot \tau_0 + \tau_0^2$;
 $B_1 = 6\tau_0 \cdot K_y \cdot (K_y \cdot S + K_{y3}) \cdot (1 + K_p) + 12 \cdot T_2 + 6 \cdot \tau_0$;
 $B_0 = 12 \cdot (K_y \cdot S + K_{y3}) \cdot K_y \cdot (1 - K_p) + 12$;

K_y, T_1, T_2 - статический коэффициент передачи и постоянные времени передаточной функции упругой системы станка.

Для дальнейшего исследования точности обработки процесс точения, как динамическое звено, может быть описан дифференциальным уравнением 1-го порядка, которому соответствует передаточная функция

$$W_{\text{рез}}(P) = \frac{K_p}{1 + T_p \cdot P}, \quad (5)$$

где K_p - статический коэффициент передачи звена; T_p - постоянная времени процесса точения, характеризующая его инерционность, которая выражается в отставании изменения силы резания, относительно вызвавшего это изменение глубины резания.

На основе этого разработана методика определения постоянной времени процесса точения T_p - основной динамической характеристики процесса, которая состоит из:

- 1) построения переходной функции по передаточной функции (сплошные линии на рис. 3);
- 2) аппроксимации полученной переходной функции решением дифференциального уравнения первого порядка (штриховые линии);
- 3) получения значения постоянной времени процесса по аппроксимированной функции известными математическими методами (штрих-затирками).

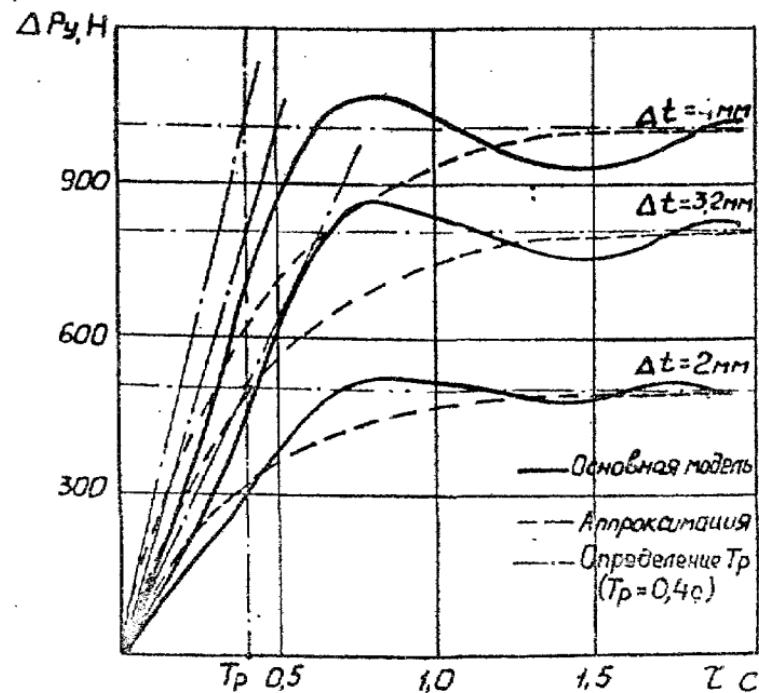


Рис. 3. Реакция силы резания P_y на ступенчатое изменение глубины резания (сталь 45, Т15К6, $\Psi = 93^\circ$, $\lambda = 20^\circ$, $Z = 0,2$ мн, $S = 0,2$ мм/об)

пунктирные линии иллюстрируют метод построения касательных к аппроксимированной кривой для определения T_p .

Аналогично были проведены исследования для составляющей силы резания в направлении X.

Эксперименты, выполненные с использованием ИВС, показали, что расхождение экспериментальных и теоретических данных не превышает 15...17%.

3. МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ МНОГОХОДОВЫХ ЦИКЛОВ ТОЧЕНИЯ

Для вывода модели управления точностью и производительностью в многоходовых циклах обработки получено выражение, описывающее взаимосвязь динамической составляющей погрешности обработки фасонной поверхности (отклонения формы в продольном сечении) с вызывающим эту погрешность изменением глубины резания (с учетом динамических свойств процесса точения):

$$\Delta_g(\tau) = -\frac{K_p \cdot A_t \cdot \tau}{J \cdot \tau_t} + \left(\frac{K_p \cdot A_t \cdot T_p}{J \cdot \tau_t} + \frac{K_p \cdot A_t}{J} \right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{K_p \cdot A_t}{T_p \cdot J} \cdot \tau} \right), \quad (6)$$

где $A_t = \max\{\Delta t(\tau)\}$; τ_t - время действия возмущающего воздействия ($\tau_t = l/s \cdot n$, рис. 4).

Решение дифференциального уравнения при нулевых начальных условиях позволило получить формулу для определения максимальной погрешности обработки:

$$\Delta_g^{\text{max}} = \Delta_g(\tau_{\text{max}}); \tau_{\text{max}} = -T_p \cdot \ln \frac{T_p}{T_p + \tau_t}. \quad (7)$$

Предложенные зависимости были использованы для разработки методики расчета наиболее производительных циклов многоходовой обработки, обеспечивающих заданную точность. Разработанная система аналитических уравнений описывает взаимосвязь погрешностей на каждой стадии обработки с режимными параметрами многоходового цикла.

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta_3 = \frac{K_{y1} \cdot S_3 \cdot (t_3 + \Delta_2 - \Delta_{2g}) + K_{y2} \cdot S_3 + K_{y3} \cdot (t_3 + \Delta_2 - \Delta_{2g}) + K_{y4} + \\ \quad + \frac{K \cdot \Delta_{2g}}{J} + \frac{\sqrt{1+2\tilde{\tau} T_p^2 \cdot S_3 \cdot n \cdot \sin \omega / t_3}}{J}; \\ \Delta_2 = \frac{K_{y1} \cdot S_2 \cdot (t_2 + \Delta_1) + K_{y2} \cdot S_2 + K_{y3} \cdot (t_2 + \Delta_1) + K_{y4} + \Delta_{2g}}{J}; \\ \Delta_1 = \frac{K_{y1} \cdot S_1 \cdot (t_1 + \Delta_0 \cdot i \cdot K_i) + K_{y2} \cdot S_1 + K_{y3} \cdot (t_1 + \Delta_0 \cdot i \cdot K_i) + K_{y4}}{J}, \end{array} \right. \quad (8)$$

где $\Delta_1...3 \cdot S_1...3 \cdot t_1...3$ - погрешность обработки, подача и глубина резания на черновой (1), получистовой (2), чистовой стадии цикла (3); Δ_0 - погрешность заготовки; $\Delta_{2g} = \Delta_g(\tau_{\text{max}})$ при $A_t = t_1 \cdot \cos \omega$

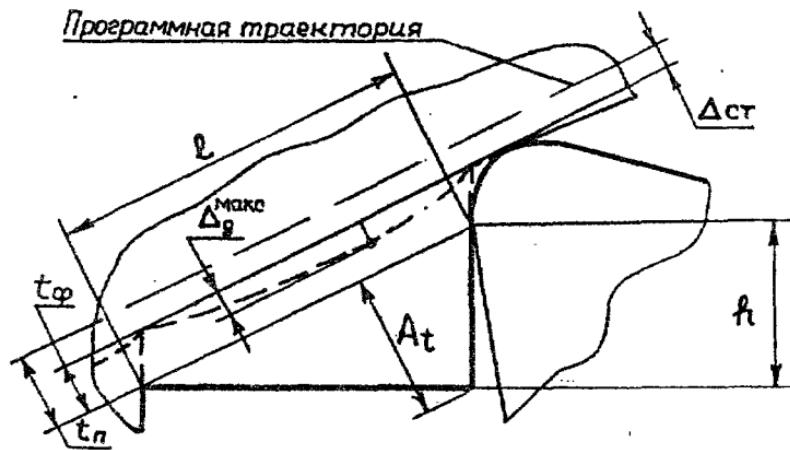


Рис. 4. Влияние изменения глубины резания на погрешность формы в продольном сечении:

$\Delta_{ст}$ - статическая составляющая погрешности; h - высота ступени после черновой стадии; t_n, t_ϕ - программная и фактическая глубина резания

и $S = S_i$; i - число рабочих ходов на черновой стадии; K_i - коэффициент уточнения погрешности.

В этой системе, во-первых, учтены подача и глубина резания на каждой стадии цикла, состоящего из различных по геометрии рабочих ходов, а во-вторых, учтено влияние черновой обработки по схеме "петля" на результирующую погрешность обработки.

Для оценки производительности многоходового цикла разработана формула, описывающая взаимосвязь суммарного времени цикла с режимными параметрами на каждой стадии обработки:

$$\bar{T}_{\Sigma} = \frac{(1 + \frac{\bar{T}_{cm}}{T_{4i}}) \cdot K_{gi} \cdot \frac{t_4 - t_2 - t_3}{t_i \cdot S_i} \cdot l_1(t_2 - t_2 - t_3) + l_2}{S_2} + \frac{(1 + \frac{\bar{T}_{cm}}{T_{43}}) \cdot l_3}{S_3}, \quad (9)$$

где \bar{T}_{cm} - время на смену инструмента; T_{4i}, T_{43} - периоды стойкости инструмента; l_1, \dots, l_3 - длины рабочих ходов; n_1, \dots, n_3 - частота вращения шпинделля; K_{gi} - коэффициент укорочения длины рабочего хода.

Задача расчета параметров многоходовых циклов решается методом динамического программирования, когда последовательно для каждой стадии цикла выбираются параметры управления (подача и глубина резания), удовлетворяющие технологическим ограничениям, таким образом, чтобы обеспечить минимальное значение времени цикла (9). Стандартные технологические ограничения (по прочности инструмента, привода подач, шероховатости и т. д.) были дополнены

разработанными ограничениями по точности обработки с использованием многоходового цикла.

Для цилиндрической поверхности:

$$\alpha_1 \cdot \delta \geq \Delta_3. \quad (10)$$

Для фасонной поверхности: $(0,125 \dots 0,5) \cdot \alpha_2 \cdot \delta \geq \Delta_3$,

где α_1, α_2 - коэффициенты, выражающие долю погрешности обработки от упругих перемещений в суммарной погрешности; δ - величина поля допуска выполняемого размера; Δ_3 - определяется из системы (8); $(0,125 \dots 0,5)$ - выбор зависит от степени геометрической точности детали.

Все необходимые расчеты были произведены на ЭВМ.

Описанная методика позволила дополнить издание в 1990 году общемашиностроительные нормативы режимов резания для станков с ЧПУ разделом для определения параметров высокопроизводительных многоходовых циклов и расчета норм времени.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. На основании использования закона о равенстве активных сил (резания) и реактивных сил (сил сопротивления металла пластической деформации), а также основных законов теории пластичности, получены аналитические зависимости, которые описывают закономерности изменения составляющих силы резания при контурной обработке на токарных станках с ЧПУ, в зависимости от режимных (подача и глубина резания), геометрических параметров (радиус при вершине инструмента, активная длина режущей кромки, кинематические углы в плане и т. д.) и физико-механических свойств детали.

2. Пропесс контурной обработки описан дифференциальным уравнением первого порядка, как связь изменения составляющих силы резания от колебания глубины резания. Коэффициенты этого уравнения отражают свойства процесса точения и использованы как его динамическая характеристика при исследовании влияния ступенчатого припуска при обработке фасонного профиля на результатирующую погрешность формы в продольном сечении. Впервые получена расчетная методика определения постоянной времени, как основной динамической характеристики процесса точения.

3. С использованием динамических характеристик точения разработана эффективная методика проектирования многоходовых автоматических циклов контурного точения, учитывающая технологические ограничения (по точности обработки, шероховатости поверхности, прочности инструмента и т. д.). Эта методика использована в режим-

ных блоках систем автоматизированного проектирования операций для станков с ЧПУ, а также может быть использована в виде подпрограмм математического обеспечения станочных микроЭВМ нового поколения (проектирующе-управляющих).

4. Разработаны необходимые для расчета параметров многоходовых циклов токарной обработки карты, дополняющие действующие общемашиностроительные нормативы.

5. Создан измерительно-вычислительный стенд, на котором выполнен комплекс необходимых экспериментов по проверке адекватности разработанных моделей.

6. Промышленное использование разработанных на основе проведенного исследования нормативных материалов показало, что учет динамических характеристик процесса точения повысил эффективность разработки управляющих программ и позволил сократить время их отладки в среднем на 30%, а производительность обработки (при той же точности) повысить на разных операциях от 10 до 40%. Годовой экономический эффект составил 789,3 тыс. рублей по ценам до 1991 года.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. В. А. Иоголевич, И. В. Сурков. Использование микропроцессорной техники в системах автоматизированного контроля // Внедрение микропроцессорных средств в машиностроении: Тез. докл. - Челябинск: ЧПИ, 1987. - С. 32-33

2. И. В. Сурков. Управление точностью обработки на токарных станках с ЧПУ // Технологическое и нормативное обеспечение станков с ЧПУ и гибких производственных систем: Тез. докл. Всесоюзной науч. технич. конф. - Челябинск, 1988. - С. 5.

3. С. Н. Корчак, В. И. Гузеев, И. В. Сурков и др. Назначение режимов резания при точении и фрезеровании концевыми фрезами с учетом точности обработки, включая алгоритмическое оснащение микропроцессоров: Методические рекомендации. - М.: ВНИИТЭМР, 1987. - 36 с.

4. Разработка исходных данных по учету точностных параметров в нормативах режимов резания для токарных и фрезерных станков с ЧПУ: Отчет о НИР (заключит.) /ЧПИ; Руководитель С. Н. Корчак. - № ГР 01840019208: инв. № 02870032745. - Челябинск, 1987. - 97 с.

5. Разработка САПР технологических процессов на базе СМ и ЕСДМ. Автоматизация подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ: Отчет о НИР (заключит.) /ЧПИ; Руководитель С. Н. Корчак. - № ГР 01. 85. 0033689: инв. № 02880022657. - Челябинск, 1987. - 103 с.

6. Гузеев В. И., Йоголевич В. А., Сурков И. В. и др. Измерительные устройства на базе индикаторов контакта для станков с ЧПУ. Информ. листок № 527-88. 1988.
7. Сурков И. В. Испытания систем автоматического контроля на точность и надежность // Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки. - Челябинск. ЧПИ. 1988. - С. 111-113.
8. Сурков И. В., Йоголевич В. А. Внедрение индикаторов контакта на токарных станках с ЧПУ // Новое в метрологическом обеспечении машиностроения: Материалы семинара. - М. 1989. - С. 47-48.
9. Йоголевич В. А., Сурков И. В. Расширение технологических возможностей станков с ЧПУ // Автоматизация контроля качества в ГПС: Тез. докл. - М., 1989. - С. 11-12.
10. Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания для технического нормирования работ на универсальных и многоцелевых станках с числовым программным управлением. Ч. II. - Нормативы режимов резания. - М.: Экономика. 1990. - 473 с.
11. Йоголевич В. А., Сурков И. В. Использование индикаторов контакта в системах ЧПУ // Совершенствование процессов резания и средств автоматизации для повышения производительности гибких станочных систем: Тез. докл. - Курган. 1990. - С. 11-12.
12. Сурков И. В. Расчетное проектирование многопроходных циклов обработки фасонных поверхностей на токарных станках с ЧПУ // Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки. - Челябинск: ЧГТУ. 1993. - С. 79-80.
13. Сурков И. В. Измерительно-вычислительный стенд для автоматизации исследования процесса точения // Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки. - Челябинск: ЧГТУ. 1995. - С. 55-58.
14. Гузеев В. И., Йоголевич В. А., Сурков И. В. Общемашиностроительная система автоматизированного проектирования и нормирования операций для станков с ЧПУ. Информ. листок № 434-93. 1993.
15. Разработка и внедрение компонентов САПР ТП применительно к изделиям предприятия: Отчет о НИР/ ЧПИ; Руководитель Гузеев В.И.: № ГР 01.88.0006633. - Челябинск: ЧПИ, 1990. - 97с.
16. Разработка системы автоматизированного нормирования работ на универсальных и многоцелевых станках с ЧПУ. Рекламно-техническое описание. Шифр 88007, № ГР 01880006619. Челябинск, ЧГТУ, 1990. - 36 с.



Издательство Челябинского
государственного технического университета

ЛР №020364. 20.01.92. Подписано в печать 15.05.95. Формат
60x84 I/16. Печать офсетная. Усл.печ.л. 0,93. Уч.-изд.л. 0,97.
Тираж 100 экз. Заказ 156/238.

УОП издательства. 454030, г. Челябинск, пр.им. В.И. Ленина, 76.