

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»  
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

*С.Р. АБУЛЬХАНОВ, А.Н. ЖИДЯЕВ*

## СИСТЕМЫ ЧПУ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» в качестве учебного пособия для обучающихся по основным образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 15.03.01 Машиностроение и 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств; 24.03.05 Двигатели летательных аппаратов и 24.05.02 Проектирование авиационных и ракетных двигателей

САМАРА  
Издательство Самарского университета  
2020

ISBN 978-5-7883-1555-3

© Самарский университет, 2020

УДК 621.7(075)+004.9(075)  
ББК 34.63-5я7  
А177

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. В. А. Михеев;  
д-р техн. наук, проф. Н. В. Носов

*Абульханов, Станислав Рафаелевич*

**А177 Системы ЧПУ металлорежущих станков:** учебное пособие / С.Р. Абульханов, А.Н. Жидяев; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Самарский университет. – Самара: Издательство Самарского университета, 2020. – 1 CD-ROM (626 Мб). – Загл. с титул. экрана. – Текст: электронный.

**ISBN 978-5-7883-1555-3**

Рассмотрены существующие классификации систем ЧПУ, особенности конструкций различных узлов и агрегатов ЧПУ, а также обязанности обслуживающего персонала станков ЧПУ. Кроме того, проведён анализ технологических возможностей различных CAD/CAM-систем, генерирующих управляющие программы для ЧПУ. Проведён анализ возможности конвертации форматов, используемых различными CAD/CAM-системами. Приведены примеры написания программ для систем ЧПУ в режиме ручного программирования (*Manual Programming Techniques*) и программирование на стойке ЧПУ (*Shop-floor*).

Пособие предназначено для студентов-бакалавров, магистров и специалистов, обучающихся по следующим направлениям подготовки: 15.03.01 Машиностроение и 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств; 24.03.05 Двигатели летательных аппаратов и 24.05.02 Проектирование авиационных и ракетных двигателей.

Подготовлено на кафедре технологий производства двигателей Самарского университета.

УДК 621.7(075)+004.9(075)  
ББК 34.63-5я7

**Минимальные системные требования:**

PC;

процессор Intel Pentium D / Celeron G / Core i3 и выше;

или AMD Sempron 2xxx и выше / Athlon X2 / X3 / X4 / AMD A6 и выше / Ryzen;

с тактовой частотой не менее 1300 МГц;

Microsoft Windows 7/8/8.1/10;

мышь; дисковод CD-ROM;

Adobe Acrobat Reader 9 / X / DC.

Редактор Н.С. Куприянова  
Компьютерная верстка И. П. Ведмидской

Подписано для тиражирования 10.11.2020.  
Объем издания 626 Мб.  
Количество носителей 1 диск.  
Тираж 10 дисков.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА»  
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)  
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

---

Издательство Самарского университета.  
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ СОКРАЩЕНИЯ .....	5
СТРУКТУРА ПОСОБИЯ .....	7
ВВЕДЕНИЕ .....	8
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ.....	9
2. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ И ОРГАНИЗАЦИОННЫХ РЕШЕНИЙ ОБОРУДОВАНИЯ С ЧПУ .....	16
2.1. Снижение доли человеческого фактора в производственном процессе .....	17
2.2. Программный интерфейс в системах ЧПУ .....	21
2.3. Унификация условий эксплуатации систем ЧПУ .....	22
3. ВИДЫ СИСТЕМ ЧИСЛОВОГО ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ .....	24
3.1. Классификация по типу и количеству управляемых координат .....	24
3.2. Настройка (характеризация) систем ЧПУ .....	33
4. НАПИСАНИЕ И ГЕНЕРАЦИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ ДЛЯ СИСТЕМ ЧПУ ....	35
4.1. САМ-системы.....	35
4.2. САД/САМ/САЕ-системы .....	37
4.3. Сравнительный анализ некоторых САД/САМ-систем .....	39
5. СИСТЕМЫ ЧПУ .....	48
5.1. Системная структура ЧПУ .....	57
6. ОБСЛУЖИВАНИЕ СТАНКОВ С СИСТЕМАМИ ЧПУ .....	64
7. СПОСОБЫ НАПИСАНИЯ ИЛИ ГЕНЕРАЦИИ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ.....	78
7.1. Ручное программирование .....	78
7.2. Программирование на пульте системы СПУ .....	79
7.3. Проблемы, связанные с программированием на пульте системы СПУ .....	80
7.4. Базовые понятия пользовательских программ систем ЧПУ .....	82
7.5. Назначение системы ЧПУ типа 4С и его возможности .....	84
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	103
СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИНФОРМАЦИИ .....	104
ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ ИНФОРМАЦИИ .....	108
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 .....	112
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 .....	113
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 .....	114
ПРИЛОЖЕНИЕ 4.....	115
ПРИЛОЖЕНИЕ 5 .....	116

## ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

- АЛУ – арифметико-логическое устройство (англ. *Arithmetic Logic Device*).
- БПУ – бюро программного управления, подразделения на заводах, где пишут программы обработки деталей.
- ВУ – внешние устройства (англ. *External Devices*).
- ГАУ – гибкий автоматизированный участок (англ. *Mini-FMS, Minisystem, Modular Cell Unit*).
- ГПК – гибкий производственный комплекс (англ. *Flexible Production Complex*).
- ГПМ – гибкий производственный модуль (англ. *Flexible Production Module*).
- ГПС – гибкая производственная система (англ. *Flexible Production System*).
- ЕСТПП – единая система технологической подготовки производства.
- ИО – интерполяция по огибающей (англ. *Involute*).
- КД – конструкторская документация (англ. *Design Documentation*).
- КИ – круговая интерполяция (англ. *Circular Interpolation*).
- КТПП – конструкторско-технологическая подготовка производства.
- КША – кодовая шина адреса (англ. *Address Code Bus*).
- КШД – кодовая шина данных (англ. *Data Code Bus*).
- КШИ – кодовая шина инструкций (англ. *Instruction Code Bus*).
- ЛИ – линейная интерполяция (англ. *Linear Interpolation*).
- МП – микропроцессор (англ. *Microprocessor*).
- МПП – микропроцессорная память (англ. *Microprocessor Memory*).
- НГМД – накопитель на гибких магнитных дисках (англ. *Floppy Drive*).
- НЖМД – накопитель на жестких магнитных дисках (англ. *Hard Disk Drive*).
- ОЗУ – оперативное запоминающее устройство (англ. *Random Access Memory*).
- ОП – основная память (англ. *Main Memory*).
- ПВВ – порты ввода – вывода (англ. *Input-Output Ports*).
- ПЗУ – постоянное запоминающее устройство (англ. *Read Only Memory*).
- ПИ – полиномиальная интерполяция (англ. *Polynomial interpolation*).
- ПК – персональный компьютер (англ. *Personal Computer*).
- РТК – расчетно-технологическая карта.
- САП – система автоматизированного программирования.
- САПР – система автоматизированного проектирования.
- СИ – спиральная интерполяция (англ. *Helical interpolation*).
- СОЖ – смазывающе-охлаждающая жидкость.
- СПИ – сплайновая интерполяция (англ. *Spline interpolation*).
- СЧПУ – система числового программного управления (совокупность специализированных устройств, методов и средств, необходимых для осуществления ЧПУ станками).
- ТД – технологическая документация (англ. *Technical Documentation*).
- ТП – технологический процесс (англ. *Technological Process*).
- ТУ – технические условия (англ. *Technical Conditions*).
- УП – управляющая программа (англ. *Controlling Program*).
- УУ – устройство управления (англ. *Control Device*).
- УЧПУ – устройство числового программного управления (англ. *Device CNC*).
- ЧПУ – числовое программное управление (англ. *CNC – Computer Numerical Controls*).
- ШВП – шарико-винтовая пара (англ. *Ballscrew*).

*ADEM* – российская интегрированная CAD/CAM/CAPP система (англ. *Automated Design Engineering Manufacturing*).

*Block Machining Time* – время обработки блока команд из 1024 кадров.

*Block Processing Time* – продолжительность обработки блока из 1024 кадров.

*Block Transfer Rate Time* – время, необходимое на загрузку команд из 1024 кадров.

*CAD* – система компьютерных технологий в проектировании (англ. *Computer Aided Design*).

*CAE* – система поддержки инженерных расчетов (англ. *Computer-Aided Engineering*).

*CAM* – система компьютерной поддержки изготовления (англ. *Computer-Aided Manufacturing*).

*CNC* – компьютерное числовое управление (англ. *Computer Numerical Controls*).

*CAPP* – автоматизированная система технологической подготовки производства (англ. *Computer Aided Process Planning*).

*CLU* – замкнутая система управления (англ. *Control Loop Unit*).

*CPU* – центральное процессорное устройство (интерполятор или внутренний процессор) (англ. *Central Processing Unit*).

*DCU* – модуль обработки данных (англ. *Data Processing Unit*).

*DNC* – групповое (распределённое) числовое управление от общей ЭВМ (англ. *Distributed Numerical Control*).

*EPD* – стандарт «Определение электронного продукта» (англ. *Electronic Product Definition*).

*HNC* – устройство ЧПУ с ручным вводом информации (англ. *Hand NC*).

*ICNC* – промышленный компьютер (англ. *Industrial Computer Numerical Controls*).

*ISO* – международная организация по стандартизации (англ. *International Organization for Standardization*), которая регламентирует международную систему кодирования управляющих программ (УП) для станков с ЧПУ.

*MCU* – блок управления станком (англ. *Machine Control Unit*).

*MNC* – устройство ЧПУ с памятью для хранения различной информации (англ. *Memory NC*).

*MPT* – *Manual programming techniques* – программирование в ручном режиме.

*NC* – цифровой контроллер (англ. *Numerical control*).

*NURBS* интерполятор – аппроксимация некоторой поверхности с помощью полинома заданного порядка, например,  $n = 6$  или  $n = 8$  (англ. *Non-uniform rational B-spline*).

*PCNC* – персональный компьютер (англ. *Personal Computer Numerical Controls*).

*PP* – интерфейс, переводящий CAM-модель на язык кодов, используемой системы ЧПУ определенного типа станков (англ. *Post Processor*).

*REP* – «твердотельные» системы моделирования, которые можно рассматривать как расширение каркасной модели. REP-способ представления твердого тела как совокупность взаимосвязанных элементов поверхности (англ. *Boundary REPresentation*).

*Shop-floor* – программирование у стойки ЧПУ.

*SNC* – устройство ЧПУ с памятью для хранения различной информации (англ. *Speiher NC*).

## СТРУКТУРА ПОСОБИЯ

В пособии семь глав, некоторые из которых состоят из параграфов. Нумерация параграфов, рисунков и таблиц десятичная и сквозная в пределах каждой главы.

Сноски имеют сквозную нумерацию по всему пособию.

Выбор источников информации осуществлялся исходя из наиболее интересных и актуальных, по мнению автора, публикаций. Список источников информации состоит из двух частей.

Первая часть списка источников информации имеет сквозную нумерацию и содержит ссылки, упоминаемые в тексте пособия.

Вторая часть имеет ссылки на зарубежные первоисточники и состоит из источников информации, которые не упоминаются в тексте пособия, но могут быть интересны для студентов, желающих повысить свою квалификацию, выходящую за рамки пособия.

В приложениях пособия размещены следующие медиафайлы:

- динамики движения исполнительных органов трипод-станка;
- симуляция процесса обработки контура *2D*-модели детали на токарно-фрезерном центре *INDEX R300 – INDEX TRAUB* со стойкой ЧПУ *Fanuc 0i-TB* (два варианта);
- симуляция процесса обработки *3D*-модели детали на *3D*-модели токарно-фрезерного центра *INDEX R300 – INDEX TRAUB* со стойкой ЧПУ *Fanuc 0i-TB*.

В трёх последних медиафайлах приведена обработка детали из главы 7 пособия (рис. 7.8).

В приложении также приводится управляющая программа (УП), которая была сгенерирована для токарно-фрезерного центра *INDEX R300 – INDEX TRAUB* со стойкой ЧПУ *Fanuc 0i-TB*.

## ВВЕДЕНИЕ

Современные высокотехнологичные металлообрабатывающие станки невозможны без числового программного управления (далее ЧПУ). Эффективное использование станков с ЧПУ возможно при новой организации металлообрабатывающих производств.

Современный стандарт качества ISO 9000 регламентирует все функции деятельности предприятия по достижению бездефектного производства. В соответствии с принципами ИСО 9000 повышение качества производимой продукции достигается через снижение участия человека в производственном процессе.

Широкое использование оборудования с ЧПУ в производстве и в дальнейшем объединение такого оборудования в единую информационную сеть есть организационные этапы снижения доли участия человека в производстве.

Достижение такого уровня автоматизации производства возможно при сотрудничестве специалистов различных технических направлений. Такие специалисты оперируют своими устоявшимися терминами и понятиями. По этой причине специалисты, эксплуатирующие оборудование с ЧПУ, должны быть способны сформулировать техническую задачу перед представителями, например, компьютерных наук, а также должны быть способны понять предлагаемые пути решения поставленной задачи. Такого рода сотрудничество между специалистами различных технических направлений позволяет успешно впоследствии модернизировать отдельный станок или сеть станков с ЧПУ.

В пособии определены основные начальные понятия, связанные с эксплуатацией оборудования с ЧПУ. Указаны необходимые специалисты для обеспечения устойчивой работы станка с ЧПУ. Приведены примеры разграничения обязанностей между специалистами различных технических направлений, включая регламентные осмотры оборудования.

Во многих случаях эксплуатации систем с ЧПУ невозможна без использования специализированного программного обеспечения. Масштаб автоматизации производства требует различное математическое и программное обеспечение. Рассмотрены некоторые параметры, которые могут определять эффективность объединения станков с ЧПУ в информационную сеть. Для малых и средних предприятий приведены примеры решения различных технических задач с помощью САМ-систем, с помощью ручного программирования, а также с помощью программирования с пульта (консоли) станка с ЧПУ.

Авторы выражают благодарность за техническую поддержку в подготовке к изданию учебного пособия ведущему программисту лаборатории «Дифракционная оптика» ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН Смагину Сергею Валентиновичу.



## 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Современное металлообрабатывающее производство – это целый комплекс производственных стратегий (доктрин), компьютерных программ, технологий, станков и инструментов, а также методов контроля качества, методик обучения персонала и нормирования трудовых операций. Это целая система действий и различных мероприятий, которые позволяют добиваться создания конкурентного производства, основная задача которого – с наименьшими затратами в кратчайшие сроки выводить на рынки новые изделия. Главным принципом современного производства, которое часто называют «умным» или интеллектуальным, является его гибкость, т.е. способность создавать новую конкурентоспособную продукцию.

Тяжелое положение отечественного машиностроения, приведшее к фактической остановке ведущих станкостроительных предприятий России, и открытие внутреннего рынка для иностранных производителей привели к наплыву зарубежных станков, а отсутствие свободных средств и длинных, недорогих кредитов определило ценовую политику поставщиков этого оборудования. Цена нового станочного оборудования импортного производства для большинства отечественных заводов без государственной поддержки является до настоящего времени неприемлемой.

В советские годы отечественные станкостроители производили станочное оборудование, как правило, со сроками окупаемости не более 2-х лет. Это являлось одной из основных причин, которой в первую очередь руководствовались покупатели металлообрабатывающего оборудования. При таком небольшом сроке окупаемости станков невозможно было создавать высокотехнологичную технику, соответствующую уровню лучших образцов мирового станкостроения. Вторая причина, способствовавшая отставанию советской станочной промышленности, состояла в том, что, выбирая между высокотехнологичными обрабатывающими центрами и универсальным оборудованием, советский покупатель отдавал приоритет последнему.

С 1999 – 2000 годов с ростом мировых цен на энергоносители в России начался относительно быстрый рост по таким направлениям, как авиационная промышленность, энергетический комплекс, ВПК. На этот момент станочный парк в этих отраслях не обновлялся уже около 15 лет, а физический износ станков любого крупного завода составлял по разным оценкам от 70 до 85 %. Станки эксплуатировались уже по 20–30 лет, что еще больше усугубляло ситуацию.

Всё это вместе с неэффективным управлением производственными процессами, длительными сроками переналадки универсальных станков и технологической инертностью приводило к вынужденным отказам от выгодных контрактов. Повысить эффективность производства могло технологическое перевооружение, т. е. переход к высокоэффективным и высококорентабельным технологиям, способствующим выпуску конкурентоспособной продукции.

В современных рыночных условиях производственное предприятие не выживет, если не будет высокоэффективным и высококорентабельным. В свою

очередь, этого можно достичь, только имея современное высокотехнологичное оборудование. Поэтому основные тенденции развития мирового станкостроения – это создание оборудования, которое позволяет изготавливать деталь с высокой точностью<sup>1</sup>, скоростью и качеством.

Одной из основных составляющих резерва снижения машинного времени обработки детали является увеличение значения верхней границы диапазона величин подач (рабочих подач), используемых при обработке поверхности детали. Вместе с этим сложившийся ранее конструкторский и технологический опыт указывает, что с увеличением значения подач обработки детали уменьшается качество обработанной поверхности. Тем не менее, например, японская компания *Kitamura* на своём станочном оборудовании контролирует рабочие подачи на скоростях до 50 000 мм/мин [1], используя оригинальную технологию высокоскоростной обработки данных *AI Nano Contour Control II*. При этом точность позиционирования достигает 0,001 мм (рис. 1.1).

А на станках японской компании *Wasino* уже при «холодном старте» (без использования программных корректоров) достигается точность позиционирования 0,002 мм и округлость 0,0005 мм [2] (рис. 1.2).

Другой составляющей резерва снижения машинного времени обработки детали является сокращение времени холостых перемещений рабочих органов станка. Так, на фрезерных центрах *Kitamura* скорость холостых ходов достигает более 50 000 мм/мин [1].



Рис. 1.1. Фрезерный центр модели *Mycenter HX300iF* японской фирмы *Kitamura*

---

<sup>1</sup> Существует ряд международных стандартов (*ISO, ANSI, JIS* и т. д.), которые описывают, как вычислить точность машины *CNC*. Точность отечественных станков определяют в соответствии с методиками Экспериментального научно-исследовательского института металлорежущих станков (ЭНИМС).

Большие величины рабочих подач и скоростей холостых ходов приводят к значительным инерционным силам, способным деформировать узлы станочного оборудования, в результате чего снижается точность обработки детали. В этом случае обеспечить необходимую точность обработки может повышение жёсткости конструкции станка. Для этого применяют специальные материалы для станин – например, чугун марки *Meehanite* [3] или полимерный бетон *Mineralit* [4], обладающие высокими демпфирующими свойствами. Помимо этого, с целью повышения вибростойкости, например станины станка, используя программные пакеты САПР, в конструкции станины выбирают место и форму пустот, которые заполняют специальными полимерными составами, имеющими высокий декремент затухания колебаний.



Рис. 1.2. Фрезерный центр модели JJ3 японской фирмы *Kitamura Wasino*

Другое направление повышения жесткости станка – повышение жесткости направляющих путём использования специальных, высокоскоростных опорок с трехплоскостной системой контакта, например *3 Lock System* фирмы *Nikken* [5] (рис. 1.3). В этом случае накладки на направляющие могут быть выполнены из специальных сплавов или керамики.

Традиционно точность механической обработки повышают уменьшением количества установок детали, обеспечиваемой в настоящее время применением многофункционального оборудования. Современные обрабатывающие центры совмещают в себе функции токарной и фрезерной обработки. Различают два вида многофункциональных обрабатывающих центров. Это – токарно-фрезерные центры на базе токарных станков с полноценным фрезерным шпинделем и фрезерно-токарные центры на базе фрезерного станка, оснащенного токарным шпинделем с планшайбой.

Одним из ярких представителей, производящих фрезерно-токарные центры, является немецкая фирма *Mates* [6]. Модель *Mates-30 HV/K* оснащена планшайбой, поворотным столом с токарной функцией (рис. 1.4). При оснаще-

нии станка поворотным, управляемым системой ЧПУ фрезерным шпинделем, получается полноценный 5-координатный фрезерно-токарный обрабатывающий центр.

Такой станок способен решать большинство задач современного металлообрабатывающего производства и особенно задачи обработки изделий с геометрически сложными формами. Этот станок незаменим в авиационной промышленности и в инструментальном производстве.

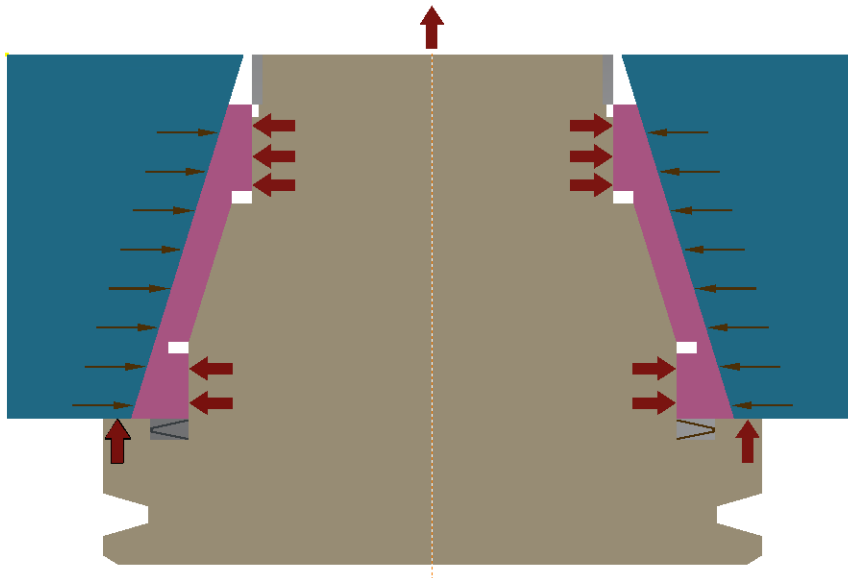


Рис. 1.3. Высокоскоростная оправка с трехплоскостной системой контакта



Рис. 1.4. Фрезерно-токарный центр модели *Matec-30 HV/K* немецкой фирмы *Matec*

Еще одно направление развития современного машиностроения – это создание станков модульной конструкции. Взяв за основу базовую модель станка, фирма-производитель дополнительно оснащает его теми рабочими органами и необходимыми опциями, которые в максимальной мере отвечают технологическим требованиям заказчика. Так, подавляющее большинство обрабатывающих центров компании *Matec* изготавливается на заказ, исходя из индивидуальных запросов заказчиков. Тех же принципов придерживается и станкостроительная компания *Unior* (Словения) [7], которая выпускает гибкие автоматизированные производственные модули<sup>2</sup> (ГПМ) под конкретные задачи клиентов (рис. 1.5).



Рис. 1.5. Гибкий автоматизированный производственный модуль станкостроительной компании *Unior* (Словения)

Модульная концепция станков *Unior* позволяет совместить высокую степень автоматизации и производительности с широкой гаммой обрабатываемых изделий. Специальные станки *Unior* широко используются ведущими производителями автомобилей *BMW, Ford, Mercedes, Volkswagen, Skoda*.

По тому же принципу производятся агрегатные станки фирмы *Pfiffner* (Швейцария) [8] серии *Hydromat*® с поворотным столом, который оснащают рабочими станциями (самостоятельными модулями с режущим инструментом, который вращается вокруг детали). Такие станции при необходимости можно достаточно быстро заменить другими, настроенными для изготовления следующей партии деталей. Еще более гибкий с точки зрения переналадки и управления – это автоматический, управляемый системой ЧПУ, 10-14-позиционный (координатный) станок *Pfiffner AT*, предназначенный для высокоточной обработки деталей точением, фрезерованием и сверлением.

---

<sup>2</sup> Гибкий автоматизированный модуль объединяет несколько технологических операций на одном станке с ЧПУ. Например, операции точения и фрезерования.

В соответствии с проведёнными аналитическими обзорами [9, 10] можно утверждать, что настоящее и ближайшее будущее мирового станкостроения – это производство высокоточных, многофункциональных станков, совмещающих в себе максимальное количество видов обработки, и создание гибких производственных модулей с возможностью встраивания в гибкое автоматизированное производство. В инновационных разработках ведущих станкостроительных компаний прослеживаются следующие тенденции:

- во всем мире растет спрос на высокоточное оборудование. Высокая точность достигается высококачественным изготовлением основных узлов, самыми передовыми системами измерения и позиционирования. Не менее важна жесткость станка и снижение температурных деформаций;

- все больше востребованы многофункциональные обрабатывающие центры, способные осуществлять полный цикл обработки за одну установку заготовки. Это позволяет повысить точность и снизить время обработки;

- возможность подключения оборудования к локальным (*Ethernet*<sup>3</sup>) и внешним (*Internet*) сетям;

- современное оборудование должно обладать возможностью интегрирования в системы автоматизированного производства, т.е. работать совместно с автоматизированными системами загрузки и выгрузки деталей и роботами;

- создание оборудования, способного к быстрой переналадке на изготовление различных партий деталей;

- возможность реконфигурации станков, построенных на основе модульного принципа;

- постоянное совершенствование систем ЧПУ.

Большинство компаний вкладывают значительные средства в разработку специальных программно-аппаратных средств. Например, станкостроительная компания *Nakamura-Tome* [11] опционально оснащает станки превентивной системой безопасности, которая автоматически в режиме реального времени осуществляет проверку на возможные столкновения рабочих органов станка и инструмента, что значительно сокращает риск их возникновения, особенно на этапе настройки станка в результате неквалифицированных действий оператора или ошибки в управляющей программе. Также производитель стандартно оснащает свое оборудование целым рядом функций, использующих постоянный контроль усилий на приводах, что позволяет ориентировать заготовку на станке без применения дорогостоящей оснастки, контролировать усилие резания.

Все более широкое применение в различных отраслях промышленности завоевывают композитные материалы. Одним из самых крупных потребителей композитов является, конечно же, авиационная промышленность. Например, в конструкции пассажирского лайнера *Sukhoi Superjet 100* ЗАО «Гражданские самолеты Сухого» уже применяются композитные материалы. В настоящее время доля композитов в конструкции планера пока не так велика: из них изготавливают элероны, рули, носовой обтекатель, обтекатель стыка крыла с фюзеляжем и

---

<sup>3</sup> Сеть Ethernet – технология пакетной передачи данных между устройствами для компьютерных и промышленных сетей.

еще ряд деталей. В дальнейшем на этом самолете впервые в России будет установлено крыло, полностью изготовленное из композитов. Для справки: *Boeing-787 Dreamliner* на 60-75 % состоит из композитных материалов [9, 10].

Изготовление деталей из углестеклонаполнителей требует не только применения специального оборудования для намотки и выкладки, но и специальных режущих инструментов для последующей обработки. Производит подобного рода оборудование мировой лидер в металлообработке и изготовлении станков для намотки и выкладки композитов американская корпорация *MAG* [12, 13]. Следует отметить, что доля композитных материалов в различных изделиях с каждым годом увеличивается. Композиты находят применение как в космической технике, так и в наземных транспортных средствах, а также судостроении.

## 2. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ И ОРГАНИЗАЦИОННЫХ РЕШЕНИЙ ОБОРУДОВАНИЯ С ЧПУ

Глобализация мировой экономики ведет к интернационализации проблем металлообрабатывающей промышленности. Это в первую очередь нехватка квалифицированного персонала, способного работать на современном станочном оборудовании. Происходит это по разным причинам. В индустриально развитых странах молодые люди не желают работать, по их мнению, в грязных и тяжелых отраслях промышленности. В небогатых странах, где, как правило, избыток незанятых рабочих рук, нет образовательных структур, которые были бы способны обучать молодых людей работе на современном станочном оборудовании. Причин этому много: низкая грамотность населения, отсутствие достаточных материальных средств и др.

Авторы работ [14, 16], считают, что нехватка рабочих в металлообрабатывающих отраслях продолжится во всем мире, более того дефицит квалифицированного персонала будет расти. Произойдет это не только по уже названным причинам, но и потому, что растет сложность станочного оборудования и сложность обрабатываемых на них деталей. Работа на современных станках невозможна без использования компьютеров, оснащенных специализированным математическим обеспечением. Это ведет к повышению требований к обслуживающему персоналу, который должен уметь не только выбирать режимы обработки, разрабатывать технологию, но и уметь составлять (генерировать) программы, а также корректировать составленные ранее. Помимо этого рабочий должен иметь представление о работе электроавтоматики и электроники станка. Сложность современного станочного оборудования может привести к ситуациям, которые не предусмотрены никакими инструкциями. Таким образом, современный станок предъявляет высокие требования не только к интеллектуальным качествам обслуживающего персонала, но и к личностным, т.е. человек должен быть способен принимать правильные решения в неординарных ситуациях. Система ценностей современного человека является субъективной причиной снижения занятых в металлообрабатывающих отраслях промышленности. Существуют и другие причины уменьшения количества желающих работать в металлообрабатывающих отраслях экономики. Практика подготовки работников (высшего звена) на станках с ЧПУ в Германии состоит из нескольких этапов [17, 18]. Первый этап – подготовка специалистов в технических университетах (специалитет). Второй этап: обучение специалистов в корпоративном университете, созданном на средства ведущих немецких станкостроительных предприятий. В течение 2-х лет в корпоративном университете учат молодых специалистов и повышают квалификацию рабочих, техников и инженеров, эксплуатирующих новейшее технологическое оборудование. Третий этап обучения состоит в работе на станке с ЧПУ в качестве ученика под руководством опытного мастера. Этот этап может длиться до года (общий итог обучения работе на современном ЧПУ составляет  $4 + 2 + 1 = 7$  лет). Речь идет о специалистах, способных эксплуатировать новейшие станки с ЧПУ и организовывать автоматизированные производства, включая решение следующих задач:



- генерация с помощью САМ-систем управляющих программ для обработки детали;
- удаленный доступ для осуществления удаленной технической поддержки и сервисных услуг (удаленной диагностики и ремонта станка силами производителя);
- хранение информации (обеспечивать организацию защищённого соединения для безопасного взаимодействия во время выполнения операций с хранимыми файлами; обеспечивать защищённую доступности и целостности исполняемой управляющей программы; защита от сетевых атак в рамках цеховой локальной вычислительной системы и сегмента сети Интернет);
- контроль работоспособности (система оповещения о фактической работе станка, необходимости прохождения техобслуживания и др.);
- мониторинг параметров работы и др.

Подготовка операторов, эксплуатирующих станки с ЧПУ, требует значительно меньшего времени.

Ситуация в России в настоящее время такова. Оборудование, эксплуатируемое со времён Советского Союза, физически изношено. Станкостроительные заводы России выпускают оборудование, которое по многим техническим параметрам морально устарело. В станочном парке России преобладают универсальные станки. Ощущается дефицит рабочих высокой квалификации. На таком оборудовании при дефиците квалифицированных кадров невозможно гарантировать ни качество, ни сроки выполнения заказов. Процесс производства становится в таких условиях практически неуправляемым. Ситуации усложняется ещё тем, что руководство большинства российских предприятий часто делает выбор в пользу налаженного производства и годами отлаженного технологического процесса (ТП), ценою колоссальных затрат на содержание огромного количества станков и площадей. Это был и остаётся достаточно сложный выбор. С одной стороны, огромный дефицит на рынке труда квалифицированных операторов и наладчиков станков с ЧПУ, с другой – низкая рентабельность предприятия и, как следствие, нехватка оборотных средств.

## **2.1. Снижение доли человеческого фактора в производственном процессе**

Участие в производственном процессе большого количества людей неизбежно приводит к снижению качества выпускаемой продукции.

Статистические исследования показывают, что человек в производстве является источником брака, ошибок и аварий. Технологические процессы, в которых велико участие человека, в технологической практике, а позднее в технической литературе [19, 21], стали именоваться «негарантированной технологией». Таким образом, сам человек является объективной причиной снижения человеческого фактора в металлообрабатывающей отрасли.

Мировая производственная практика разрешает противоречие, состоящее в снижении занятых людей в промышленности и в одновременно растущих требованиях к качеству и номенклатуре изделий машиностроения, следующим образом:

- автоматизация технологических процессов, при которой участие человека в ТП сводится к минимуму;
- автоматизация ТП, при которой человек полностью высвобождается из технологического процесса.

В обоих случаях предполагается широкое использование в производстве станочного оборудования, оснащенного системами числового программного управления (ЧПУ). Важной особенностью автоматизации процесса обработки на металлорежущих станках с помощью устройств программного управления является сохранение станками широкой универсальности. Это дает возможность производить на них обработку всей номенклатуры деталей, которая может быть произведена на универсальных станках соответствующих типов.

Программное управление позволяет:

- автоматизировать процесс обработки;
- сократить время подготовки станка к работе, включая наладку инструмента, подготовку заготовки для обработки и отладку программы на станке;
- организовать многостаночное обслуживание в серийном и мелкосерийном производстве;
- повысить производительность труда, культуру производства и качество обработанных деталей.

Первый станок с электронным числовым управлением (англ. *NC – Numerical Control*) был создан в компании *Parsons Inc.*, выпускавшей в конце Второй мировой войны пропеллеры для вертолётов.

Станок с ЧПУ отличается от обычного наличием блока управления станком (англ. *MCU – Machine Control Unit*), состоящего из модуля обработки данных (англ. *DCU – Data Processing Unit*) и замкнутой<sup>4</sup> системы управления (англ. *CLU – Control Loop Unit*). Модуль *MCU* считывает информацию в ПЗУ (хронологически это были перфокарты, перфоленты, магнитные носители (НГМД, НЖМД)). После чего *DCU* преобразует их в сигналы управления станком. С появлением микросхем и микропроцессоров (МП) эта архитектура была преобразована в современную схему управления внешним устройством (ВУ) с помощью интегрированного в устройство контроллера и внешнего компьютера.

Блок управления в настоящее время реализуется с помощью МП, который имеет встраиваемую систему и программируемый логический контроллер. Информация, необходимая для работы МП, хранится в микропроцессорной памяти (МПП). Для простейших систем с ЧПУ (учебные станки, станки-автоматы и др.) блок управления реализуется с помощью арифметико-логического устройства (АЛУ англ. *Arithmetic Logic Device*). Такие системы имеют ограниченные возможности программирования или работают по жесткой программе без возможности изменения управляющей программы.

Минимизация размеров компьютеров позволила ввести их в схему управления станком, который в этом случае стал называться станком с компьютерным числовым управлением (англ. *CNC – Computer Numerical Control*). ЧПУ имеет основную память (ОП, англ. *Main Memory*) – это запоминающее устройство,

---

<sup>4</sup> Замкнутая система управления имеет в своей структуре обратную связь

напрямую связанное с процессором и предназначенное для хранения выполняемых программ и данных непосредственно участвующих в операциях. Она имеет достаточное быстродействие, но ограниченный объем. Основная память делится на различные виды, основными из которых являются оперативная память (ОЗУ) и постоянное запоминающее устройство (ПЗУ).

Станок с *CNC* ориентирован на решение прежде всего следующих технологических задач:

- минимизация трудоёмкости обработки детали;
- обеспечение длительной и безотказной обработки деталей с заданной производительностью;
- обеспечение точности и шероховатости обработанной поверхности при минимальной стоимости эксплуатации станков;
- выбор схемы (стратегии) обработки;
- динамическое управление режимами обработки детали в процессе выполнения ТП и др.

Современный станок с *CNC* способен скоординировано управлять до десятка и более координат (движений исполнительных органов станка). При этом движения могут быть линейными, круговыми, дискретными, непрерывными и т.д. Каждая координата станка с ЧПУ может управляться в определённых пределах (метрических границах). Такая координата называется степенью свободы. У станков с одной степенью свободы инструмент может двигаться только вдоль одной прямой или вдоль одной дуги. Две степени свободы позволяют инструменту динамически повторять любую плоскую кривую, три – пространственную кривую, а четыре и большее количество – еще и управлять нормалью оси инструмента по отношению к обрабатываемой поверхности. Число степеней свободы металлообрабатывающего станка определяет сложность поверхностей, с которыми может работать оборудование с ЧПУ.

В современных производственных цехах все компьютеры, контролирующие станки с ЧПУ, соединены в сеть под командой центрального компьютера, с которого и происходит непосредственное управление всем цехом, включая загрузку данных на конкретный станок. Подобная схема называется распределённым числовым управлением (англ. *DNC – Distributed Numerical Control*).

По заданной программе с помощью ЧПУ можно управлять регулированием направления и скорости перемещения исполнительных органов станка, циклом работы станка, сменой инструмента и т.д. Помимо этого компьютер ЧПУ позволяет оператору (рабочему) с помощью вводимых с клавиатуры команд управлять движением по выбору одной или несколькими координатами. Управление состоит в задании координат точки начала движения и координат точки конца движения, кроме того указывается скорость движения, которая может быть задана в различных системах измерения (например мм/мин, мм/об, дюйм/мин, питч/об и т.д.). Движения могут осуществляться с высокой точностью – рабочие движения. На холостых ходах перемещения инструмента происходят с меньшей точностью. Каждое движение регламентируется (определяется) операторами *ISO* (англ. *ISO – International Organization for Standardization*), которые интернациональны для

ЧПУ любого производителя. Построение операторов в определенную временную последовательность для достижения движения, например, инструмента по некоторой траектории с заданной точностью и скоростью, называется написанием программы. Составление программы требует определенной квалификации и использования кроме операторов *ISO* вспомогательных операторов. Вспомогательные операторы могут выполнять следующие операции:

- определяют направление вращения шпинделя;
- остановка вращения шпинделя;
- остановка выполнения программы;
- включения водяной помпы СОЖ и др. [22].

Следует отметить, что в недавнем отечественном прошлом организация работы станка с ЧПУ помимо оператора, наладчика, электрика, электроника, системного программиста обеспечивалась также программистом – пользователем и технологом. Технолог разрабатывал технологическую схему (стратегию) обработки детали, программист реализовал её на языке ЧПУ высокого уровня (англ. *High – level language*)<sup>5</sup>. Существовали специальные документы, где фиксировалась технологическая карта обработки детали и программа ЧПУ, реализующая данную т/карту. Эти документы подписывались разработчиками и хранились далее в архивах. Архивирование таких документов осуществлялось в соответствии с нормативными документами (ГОСТ, ОСТ, заводская нормаль и т. д.) [22]. Такую организацию работ со станком с ЧПУ можно встретить и сейчас на ряде предприятий РФ.

Мировая практика в настоящее время состоит в развитии электронного документооборота и широкого использовании САПР (систем автоматизации проектных работ), в результате чего большая часть работ, связанных с обслуживанием станков с ЧПУ, была делегирована системам ЧПУ. Роль человека в этом случае сведена к роли консультанта (эксперта). В результате нехватки квалифицированных рабочих приходится привлекать к работе на станках с ЧПУ людей, которые не имеют навыков написания программ. Участие в работе специально подготовленных специалистов увеличит накладные расходы и себестоимость единицы изделия. Возможность использования неквалифицированного персонала позволит решить система ЧПУ, если она возьмет на себя большую часть обязанностей оператора и программиста. Для этого в систему ЧПУ должна быть импортирована 3D-модель детали, выполненная в соответствии с конструкторской документацией (КД, англ. *Design Documentation*). После чего система может, например, составить технологию (стратегию) обработки детали. Далее система может предложить выбор инструмента, необходимого для обработки детали, а также предложит режимы резания, сверления или фрезерования с учетом материала детали. При этом система общается с оператором в диалоговом режиме, то есть окончательное решение принимает человек (оператор), а все предложения системы носят рекомендательный характер.

---

<sup>5</sup> Язык программирования, понятия и структура которого удобны для восприятия человеком (ГОСТ 19781-90).

## 2.2. Программный интерфейс в системах ЧПУ

Общение системы с оператором может достигаться только с помощью специальной управляющей программы, которая называется совместно с определенными стандартами электрических сигналов и с определенными электрическими схемами интерфейса<sup>6</sup>. Та часть интерфейса, которая состоит только из управляющей программы, называется программным интерфейсом, а другая часть, которая состоит из электрических схем (из «железа»), называется аппаратным интерфейсом. Оператор, как правило, общается только с программной частью интерфейса. Чем больше обязанностей оператора берет на себя управляющая программа (УП), тем дружелюбней считается интерфейс.

Глобализация мировой экономики ставит перед разработчиками систем ЧПУ задачи, которые часто не совпадают с маркетинговой политикой этих фирм. Речь идёт о том, что на одном предприятии могут стоять станки с различными системами ЧПУ (при организации современных производств не рекомендуются такие ситуации), которые, возможно, обслуживает один человек. У этого специалиста не должно быть сложностей с адаптацией при практически мгновенном переходе от одной системы числового управления к другой. Для этого все команды, доступные оператору, должны иметь один и тот же смысл и иметь одно и то же обозначение, то есть должны соответствовать определенному стандарту. Пока до разработки единого стандарта дело не дошло, но понимание необходимости единых правил организации рабочего меню систем ЧПУ у большинства производителей есть.

Особенно хорошо это видно на программных интерфейсах новейших систем числового управления.

Разные фирмы производят разные модели своих систем ЧПУ, имеющие различные технологические возможности и различный по возможностям программный интерфейс, а также различную стоимость. Каждая модель ЧПУ находит своего покупателя, а это означает, что существует рабочий, который имеет навыки работы на конкретной системе ЧПУ и не имеет этих навыков для системы этого же производителя более поздней модели. Производители борются с этим явлением путем поддержания определенной преемственности в организации управляющих программ (программного интерфейса), однако чем больше временной разрыв между разработкой двух моделей ЧПУ одного производителя, тем больше отличий. Это приводит к необходимости переобучения обслуживающего персонала, а значит к дополнительным затратам, и это обстоятельство часто определяет при покупке выбор системы ЧПУ. Зачастую покупается система, обладающая меньшими технологическими возможностями, но более знакомая, а это ведет к технологическому отставанию и в дальнейшем к повышению стоимости единицы производимого изделия.

Помимо этого маркетинговая политика фирмы производителя ЧПУ часто приводит к необходимости переучивания персонала. Речь идет, прежде всего, о

---

<sup>6</sup> Совокупность средств, методов и правил взаимодействия (управления, контроля и т.д.) между элементами системы ЧПУ.

дополнительных покупках определенных опций (возможностей) системы ЧПУ, заявленных в рекламных материалах. Дело обстоит следующим образом: производитель продает не все возможности системы числового управления, а только те, которые считает необходимыми для себя покупатель. В дальнейшем по мере эксплуатации системы ЧПУ пользователь начинает понимать целесообразность расширения возможностей системы и докупает дополнительные опции. В результате такой модернизации системы числового программного управления возникает необходимость повышения квалификации обслуживающего персонала, что ведет к временным издержкам и зачастую к материальным затратам. По этим причинам покупатель может остановить свой выбор на системе менее продвинутой, но не требующей в дальнейшем дополнительных затрат.

### **2.3. Унификация условий эксплуатации систем ЧПУ**

Чтобы выбор покупателя определялся не только стоимостью системы ЧПУ, но и пониманием тех технологических возможностей, которые предоставляет новая система, большинство производителей технологических управляющих программ стремятся к унификации мнемонических обозначений (например, режимы работы основных органов управления на пульте ЧПУ), терминов, обозначений и назначений операторов *ISO* и т.д. Особенно это заметно на новейших системах ЧПУ. Таким образом, можно ожидать в ближайшем времени, что отличия и особенности работы для пользователя (оператора) на системах ЧПУ различных производителей будут незначительными, то есть не требующими переобучения персонала.

Современные системы ЧПУ преимущественно графическо-диалоговые. Это означает, что на мониторе системы ЧПУ оператору предлагается выбрать необходимую на взгляд управляющей программы операцию. Например, рекомендовано включить охлаждение. В случае согласия оператора он должен поставить галочку в меню против пункта «Охлаждение вкл/выкл». В более ранних системах ЧПУ оператору следовало помнить, что вспомогательная команда *M8* означает включение системы водяного охлаждения, а *M9* – отключение (и это касается всех команд группы *M* и *G*). Вместе с этим в настоящее время не сформировалось единого мнения, что проще и быстрее – набирать команду или наводить сенсорную мышку, или перемещаться курсором. Однако каждая новая модель системы ЧПУ по сравнению с более ранними моделями нагляднее и удобнее в работе, т.к. имеет более адаптированный интерфейс к работе оператора.

Возможности современных новейших ЧПУ определяются в настоящее время не системными особенностями и вычислительными мощностями используемых процессоров и других компонент компьютера, а определяются структурой разработанной программы, позволяющей оптимально использовать имеющиеся вычислительные возможности компьютера. Таким образом, технологические возможности современных ЧПУ определяются в настоящее время не столько «железом», сколько программным обеспечением («софтом»).

Термин система ЧПУ в настоящее время начинает вытесняться понятием «промышленный компьютер» (англ. *ICNC – Industrial Computer Numerical Controls*). Промышленный компьютер имеет более сложное устройство управления (УУ), чем ЧПУ.

Стоимость промышленных компьютеров приближается к стоимости самых новых систем ЧПУ, при этом вычислительные возможности, объём памяти, аппаратный интерфейс и т. д. по своим возможностям многократно превосходят необходимые требования для систем ЧПУ. В результате этого система числового программного управления перемещается в плоскость программного обеспечения, обеспечивающего скоординированное движение исполнительных узлов группы высокотехнологического станочного оборудования.

Все чаще для организации эффективного управления производством, в том числе станками с ЧПУ, требуется создание единого информационного пространства. Современное оборудование должно иметь возможность интеграции в сети с удаленным доступом для дистанционного мониторинга процессов обработки, передачи управляющих программ на станки, снятия контрольно-измерительных данных по обрабатываемым деталям – и все это в режиме реального времени.

Единое информационное пространство позволяет объединять в группу несколько единиц станочного оборудования. Скоординированную работу такой группы оборудования обеспечивает гибкая производственная система (ГПС), в структуру которой входит *ICNC*. Производственный процесс, реализуемый с помощью ГПС, называют автоматизированным.

Автоматизация производственного процесса может иметь различный охват производственного цикла.

ГАУ – гибкий автоматизированный участок (англ. *Mini – FMS, Minisystem, Modular Cell Unit*) предполагает объединение в единую автоматизированную систему нескольких станков с ЧПУ.

Объединение в единую автоматизированную систему всего станочного оборудования цеха или предприятия возможно, когда все станки с ЧПУ образуют гибкий производственный комплекс (ГПК, англ. *Flexible Production Complex*).

### 3. ВИДЫ СИСТЕМ ЧИСЛОВОГО ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ

В недалёком прошлом системы ЧПУ, как программируемые контроллеры, делились (классифицировались) по ряду признаков, характерных для компьютеров, а именно:

- количество разрядов в регистрах процессора;
- скорость обмена информации в буфере компьютера;
- объём памяти ОЗУ;
- объём памяти внешних носителей и другие параметры.

Однако с развитием микроэлектроники и снижением в связи с этим стоимости электронных компонент современные системы ЧПУ превратились в промышленные компьютеры, вычислительные возможности которых избыточны для решения существующих технологических задач. По этой причине классификация существующих в настоящее время систем ЧПУ может быть осуществлена с помощью количества управляемых системой координат.

Поскольку процесс автоматизации промышленных работ является объективным, то системами ЧПУ могут оснащаться самые различные станки – от простейших до самых сложных.

#### 3.1. Классификация по типу и количеству управляемых координат

По количеству управляемых перемещений различают системы двух-, трёх-, четырёх-координатные и т.д. (например, перемещения в направлении осей координат  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ , повороты и т.д.). Самая простейшая система ЧПУ может управлять двумя координатами, например токарного станка, то есть поперечной (координата  $X$ ) и продольной подачами (координата  $Z$ ). Такая система ЧПУ называется 2-координатная.

Координату, работающую лишь при отсутствии перемещений по остальным координатам, называют половиной координаты. Так, систему называют системой с 2,5 координатами, если, например, перемещения по осям  $X$  и  $Y$  могут осуществляться одновременно, а по оси  $Z$  лишь при отсутствии перемещений по осям  $X$  и  $Y$  (такое наименование управляемых координат имеет место на фрезерных станках устаревших моделей, например, 6М13ГН-1 Савёловского машзавода). Если токарному станку сообщить еще управление с помощью системы числового управления координатой «С» (используется при нарезании многозаходной резьбы), то есть сообщить приводу основного движения возможность поворачиваться с задаваемой скоростью на требуемый угол, то в этом случае необходима система ЧПУ с 2,5 управляемыми координатами<sup>7</sup>. Горизонтально-фрезерный станок 6Р13Ф3 с ЧПУ марки 4СК (г. Санкт-Петербург, производитель ЗАО 4С) имеет 2,5 управляемые координаты. В этом

---

<sup>7</sup> Токарные станки с координатой «С» могут быть с 3-мя одновременно управляемыми координатами.



случае стол передвигается по координатам «*X*» и «*Y*», а фрезерный шпиндель имеет возможность перемещаться по вертикальной оси «*Z*» только при неподвижных координатах «*X*» и «*Y*».

Трёхкоординатная система ЧПУ обеспечивает возможность скоординированной работы одновременно трех управляемых координат станочного оборудования при условии, что больше станок не имеет управляемых координат. Примером такого станка является вертикальный обрабатывающий центр *S450* (г. Стерлитамак), представленный на рис. 3.1.



Рис. 3.1. Вертикальный обрабатывающий центр *S450*  
(производитель ООО «НПО «Станкостроение» г. Стерлитамак)

Примером четырехкоординатной системы ЧПУ может быть фрезерный обрабатывающий центр марки *EXTRON* (г. Воткинск), оснащенный поворотным столом, сопряженным через интерфейс с системой числового программного управления. На рис. 3.2. приведён внешний вид станка *EXTRON*.



Рис. 3.2. Фрезерный обрабатывающий центр марки *EXTRON*  
(производитель ОАО «Торговый Дом «Воткинский завод» г. Воткинск)

Поворот стола с заданной скоростью на заданный угол по командам оператора и есть еще одна координата системы ЧПУ помимо координат по осям «X», «Y» и «Z». Станком с 4-мя управляемыми координатами с помощью ЧПУ является фрезерный вертикальный обрабатывающий центр *S500U* (г. Стерлитамак) (рис. 3.3).

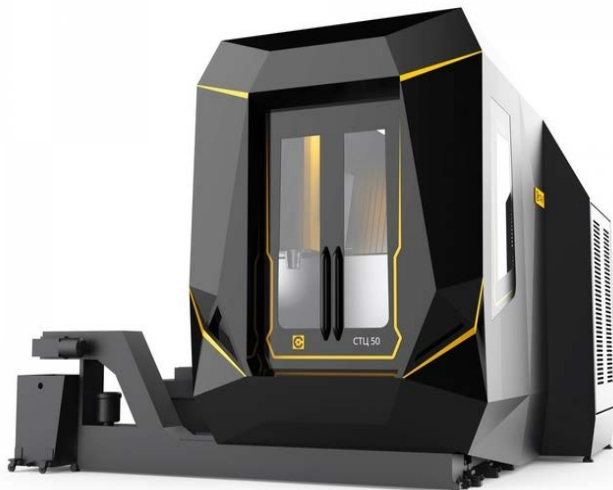


Рис. 3.3. Фрезерный вертикальный обрабатывающий центр *S500U* (производитель ООО «НПО «Станкостроение» г. Стерлитамак)

Пятикоординатными системами ЧПУ, как правило, оснащаются высокотехнологические обрабатывающие центры. В этом случае имеют место координаты по осям «X», «Y» и «Z», а также координата поворотного стола и координата, позволяющая, например, поворачивать на заданный угол с заданной скоростью шпиндель фрезерной головки в вертикальной плоскости. Такими технологическими возможностями обладают, например, станки *SPINNER* мод. *D5-630/D5-800* (г. Воронеж, компания «Современные Технологии металлообработки»). На рис. 3.4 показан внешний вид станка *SPINNER* мод. *D5-630*.



Рис. 3.4. Вертикально-фрезерный обрабатывающий центр *D5 SPINNER* (производитель *SPINNER GmbH*, Германия)

Если система ЧПУ позволяет скоординированно управлять сразу, например, пятью координатами, то говорят, что система ЧПУ 5-координатная. Таким станком является Ивановский обрабатывающий центр марки (рис. 3.5) «Супер-центр ИС800-Глобус» (г. Иваново ОАО «ИЗТС»).

Если из пяти координат станка скоординированно (синхронно, одновременно) можно управлять только четырьмя координатами, а пятая координата может работать при остановке работы четырех координат, то в этом случае говорят, что система ЧПУ 4+ координатная.



Рис. 3.5. Супер-центр ИС800-Глобус (производитель ОАО «ИЗТС» г. Иваново)

На рис. 3.6 показана одна из возможных схем движения исполнительных органов станка, управляемых 5-координатной системой ЧПУ.

Шести координатные системы ЧПУ могут использоваться, например, в токарных станках с двумя шпинделями. На рис. 3.7 изображён фрагмент станка с ЧПУ, оснащенного двумя револьверными головками и двумя шпинделями. Координаты  $X_1$  и  $Y_1$  соответствуют линейным перемещениям поперечного суппорта станка; координаты  $X_2$  и  $Y_2$  соответствуют линейным перемещениям контршпинделя; координаты  $X_3$  и  $Y_3$  соответствуют линейным перемещениям револьверной головки.

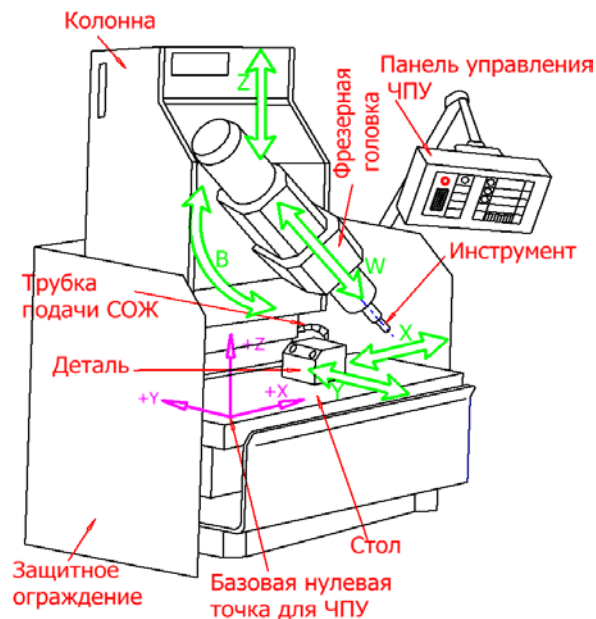


Рис. 3.6. Возможная схема движений исполнительных органов станка при использовании пятикоординатной системы ЧПУ. На рисунке приняты обозначения:  $X, Y, Z$  – линейные перемещения в Декартовой системе;  $W$  – линейная координата вдоль оси вращения шпинделя станка;  $B$  – угловая координата поворота шпинделя в плоскости  $zOx$

Отметим, что станок может быть оснащён дополнительными координатами:  $Z_1$ -осевое перемещение главного суппорта;  $Z_3$ -осевое перемещение револьверной головки; координата  $C_1$  главного суппорта (координатой  $C$  поворачивает ось шпинделя на заданный угол в заданном направлении с заданной угловой скоростью).

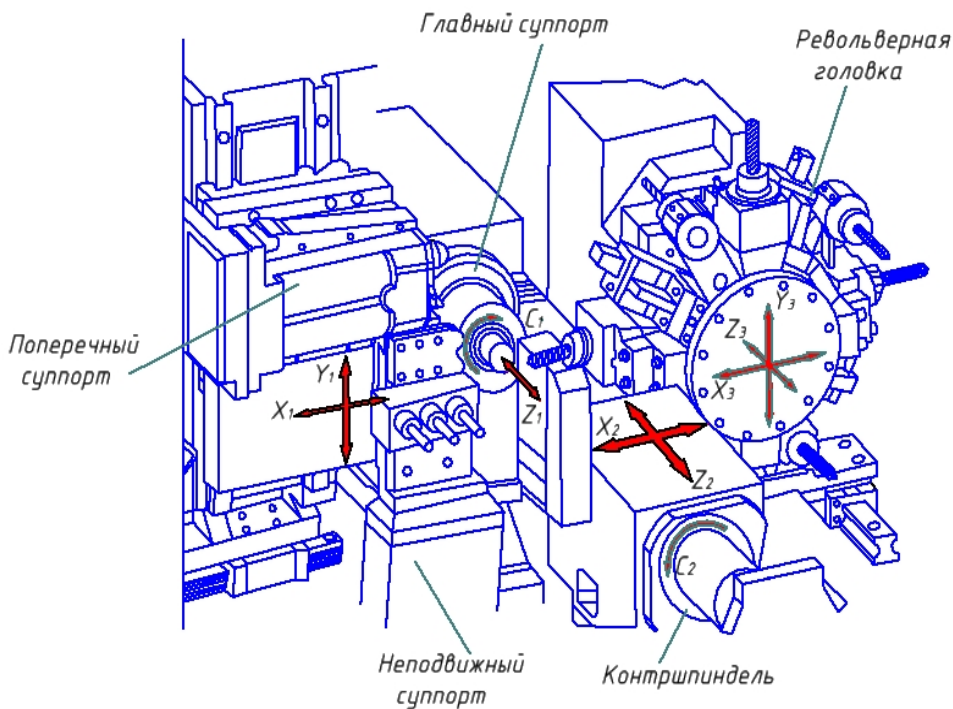


Рис. 3.7. Возможная схема движений исполнительных органов станка при использовании шестикоординатной системы ЧПУ

Семи и выше-координатные системы ЧПУ используются обычно в специальных станках. Десяти координатные системы ЧПУ востребованы, например, на станках-триподах (гексаподах, станок с параллельной кинематикой). На рис. 3.8 показан фрезерный станок с параллельной кинематикой.

Впервые станок-трипод был представлен на выставке *IMTS'94* в Чикаго. Советские станкостроители спроектировали и изготовили гексапод уже в 1992 г. [23, 24]. В Приложении 1<sup>8</sup> приведена анимированная кинематическая схема работы станка-гексапода.



Рис. 3.8. Фрезерно-сверлильный станок *XMini* с параллельной кинематикой (производитель *Ezechon, GmbH*, Германия)

На Самарском станкозаводе ЗАО «Стан-Самара» спроектирован (гл. конструктор Филиппов В.Н.), изготовлен и продается вертикальный координатно-шлифовальный станок особой точности мод. Аэрошлиф 400 с количеством управляемых координат 8 (рис. 3.9). Использование отечественной системы ЧПУ «Маяк» (производитель – ООО «Ижпрэст», г. Ижевск) позволяет одновременно управлять любыми четырьмя из восьми управляемых координат. Также на этом станке скоординированно могут работать любые 3 или 2 координаты из восьми [25].

Управлять одновременно всеми координатами не позволяет элементная база, которую используют отечественные системы ЧПУ.

---

<sup>8</sup> Медиафайл приведён из книги «Обрабатывающее оборудование нового поколения. Концепция проектирования» [23].



Рис. 3.9. Вертикальный координатно-шлифовальный станок особой точности мод. Аэрошлиф 400(производитель ЗАО «Стан-Самара» г. Самара)

России не продают элементную базу, необходимую для создания ЧПУ, способных одновременно управлять более, чем четырьмя координатами.

Следует отметить: в паспорте системы ЧПУ указывается – сколькими координатами система может управлять одновременно. Однако это не означает, что эта система ЧПУ не может работать на станке, имеющем меньшее количество координат. Количество управляемых координат в техническом паспорте системы числового программного управления указывает на наибольшее количество координат, которыми система ЧПУ может управлять. При этом движения исполнительных органов могут быть все линейными или все круговыми. Кроме того, движения могут быть непрерывными, дискретными и с равным ускорением.

Анализ производимого в мире станочного оборудования с ЧПУ (на момент 2018 г.) позволил установить следующее.

Одним из безусловных лидеров мирового станкостроения, производящих токарно-фрезерные центры, является японская станкостроительная компания *Nakamura-Tome*. В своей линейке компания имеет станки с 15-ю управляемыми осями (модель *WTW-150*). Новейшая разработка фирмы – токарно-фрезерный центр *Super NTMX*. Обработывающий центр оснащен 9-ю управляемыми осями, а для сокращения времени смены инструмента в инструментальном шпинделе – двумя магазинами – одним для обработки в левом шпинделе, а другим для обработки в правом токарном шпинделе. Величина перемещения по оси *Y* в этом станке является одной из самых больших в своем классе – 200 мм (рис. 3.10).

Ежегодно появляются сообщения от производителей систем ЧПУ о новых возможностях при управлении исполнительными органами станка или группы станков.

Для обеспечения общности методов подготовки программ для ЧПУ существуют рекомендации комитета *ISO*, а также национальных стандартов, которые регламентируют обозначения и направления осей координат рабочих органов станка [26].

Систему координат станка, выбранную в соответствии с рекомендациями *ISO 841:1974* (Международной организации по стандартизации) принято называть стандартной. Стандартная система координат представляет собой правую прямоугольную декартову систему координат, в которой положительные направления осей координат определяются правилом правой руки: большой палец указывает положительное направление оси абсцисс  $X$ , указательный – оси ординат  $Y$ , и средний – оси аппликат  $Z$ . Особенность системы в том, что ось координат  $Z$  принимают всегда параллельной оси главного шпинделя станка независимо от того, как он расположен – вертикально или горизонтально.



Рис. 3.10. Токарно-фрезерный центр модели *Super NTMX* японской компании *Nakamura-Tome*

Эта особенность позволяет при ЧПУ для наиболее распространенной плоской обработки использовать в программах обозначения координат через  $X$  и  $F$  независимо от расположения шпинделя.

В качестве положительного направления оси  $Z$  принимают направление от заготовки к инструменту. Ось  $X$  – всегда горизонтальна. Дополнительные движения, параллельные осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  обозначают соответственно  $U$ ,  $V$ ,  $W$  (вторичные) и  $P$ ,  $Q$ ,  $R$  (третичные). Вращательные движения вокруг осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  обозначают соответственно буквами  $A$ ,  $B$ ,  $C$ . Положительные направления вращений  $A$ ,  $B$ ,  $C$  вокруг координатных осей  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  показаны на рис. 3.11. Для вторичных угловых перемещений вокруг специальных осей используются буквы  $D$  и  $E$ .

Начало стандартной системы координат станка обычно совмещается с базовой точкой узла, несущего заготовку и зафиксированного в таком положении,

при котором все перемещения рабочих органов станка описываются в стандартной системе положительными координатами. Следует отметить, что это условие не является обязательным.

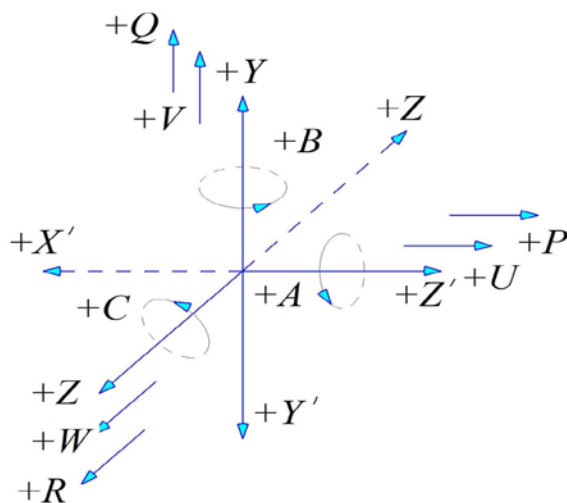


Рис. 3.11. Правая прямоугольная система координат станка

Например, системой координат токарного станка служит двухкоординатная система  $X, Z$ . Начало этой системы принимается в базовой точке шпиндельного узла. Положительные направления осей системы координат токарного станка определяются расположением основного рабочего диапазона перемещений инструмента (рис. 3.12 *а, б*).

Для станков сверлильной, сверлильно-расточной и фрезерной групп применяется трехкоординатная система  $X, Y, Z$ . Начало этой системы координат принимается преимущественно в базовой точке стола, расположенного в одном из крайних положений. Направления координатных осей этой стандартной системы связаны с конструкцией станка (рис. 3.12 *в, г*).

Движения рабочих органов станка задаются в программе координатами или приращениями координат базовых точек в системе координатных осей.

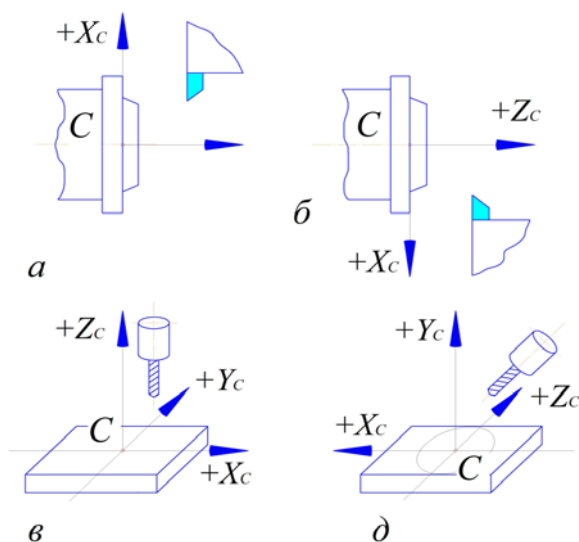


Рис. 3.12. Направления стандартной системы координат станка



Система координатных осей рабочих органов станка представляет собой совокупность отдельных управляемых по программе координат, каждая из которых закреплена за конкретным рабочим органом станка и имеет индивидуальное обозначение, направление и начало отсчета.

### 3.2. Настройка (характеризация) систем ЧПУ

Система ЧПУ перед началом работы на станке конфигурируется системным программистом. Эта операция необходима для того, чтобы, на станке было объявлено по определению движение подачи с минутной скоростью или со скоростью на оборот. Первое движение используется обычно на фрезерных станках. Минутная подача и подача на оборот используются на станках токарной группы. Кроме того, в системном блоке определяют скорость холостого хода, контроль температуры СОЖ и другие опции. Помимо этого системный программист характеризует в системе ЧПУ конфигурацию станка. Это означает, что каждой управляемой координате сообщается её обозначение, понятное как пользователю, так и системе. Так, например, на токарном станке с ЧПУ поперечное движение обозначается через «X», а продольное через «Y». Для фрезерного станка с ЧПУ (с вертикальным шпинделем) вертикальное движение шпинделя обозначается как «Z» продольное перемещение стола – через «X» и поперечное движение стола – через «Y». Кроме этого шпиндель токарного и фрезерного станка может по команде оператора с заданной скоростью поворачиваться на заданный угол – эта координата обозначается как координата «C». Использование программируемого поворотного стола добавляет новую координату, которая может быть при характеристике системы обозначена через, например, «B» и т.д.

Наиболее продвинутые системы ЧПУ оснащаются различными новыми, не свойственными им ранее опциями. Большое значение для точности обработки имеет величина отклонения от номинального размера при обработке больших партий деталей. Каждая фирма-производитель решает эту задачу по-своему. Например, борясь с температурными деформациями станка, практически все ведущие мировые производители металлообрабатывающего оборудования предлагают покупателям комплектации станков с системами охлаждения шарико-винтовых пар, шпинделя, а также с системами температурной стабилизации СОЖ.

Так, американская компания *Hardinge* [27] для минимизации отклонений обработки предлагает пакет опций *Thermal Package*. При установке данного пакета на токарных станках *Hardinge GS42* и *GS51* при обработке больших партий деталей достигается повторяемость обрабатываемого диаметра до 0,005 мм (*ISO 230-2*). Как видно из графика (рис. 3.13), в диапазон 0,005 мм попадают детали уже с «холодного старта» (после простоя станка во время его включения система ЧПУ сканирует все датчики системы, которые, не достигнув опреде-

ленной температуры, могут какое-то время блокировать работу станка; проблема «холодного старта» может быть устранена использованием программных корректоров), а начиная с 3-й детали диапазон сужается до 0,003 мм.

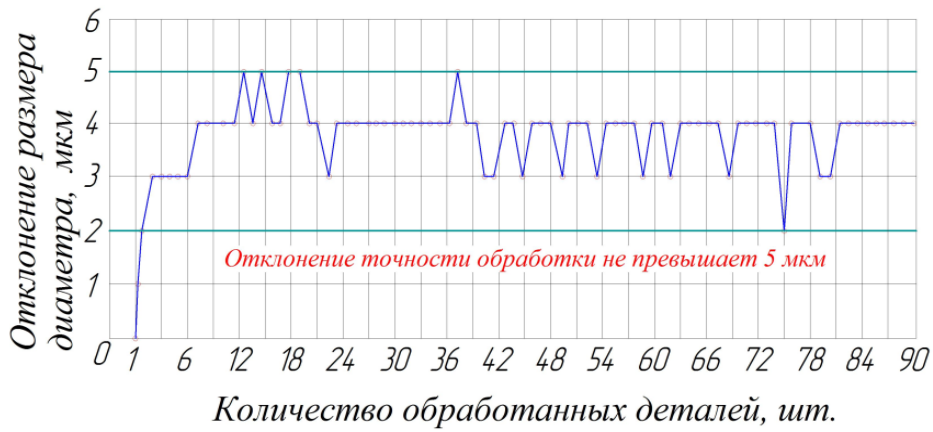


Рис. 3.13. Допуск на изготовление детали, определяемый количеством обработанных деталей

## 4. НАПИСАНИЕ И ГЕНЕРАЦИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ ДЛЯ СИСТЕМ ЧПУ

Для скоординированных движений исполнительных органов станка с ЧПУ необходима управляющая программа (УП), с помощью которой осуществляют в заданные моменты времени и с заданной скоростью (частотой) основные и вспомогательные (холостые) движения узлов и агрегатов станка.

Для мелких серий несложных деталей написание УП целесообразно выполнять с пульта (консоли) ЧПУ. В технической литературе такой режим создания УП называют *Shop-floor*. В таком режиме могут изготавливаться несложные фланцы, штуцеры, шайбы и т.д. Пишет такую программу обычно оператор станка ЧПУ или наладчик. Такому режиму создания УП характерна низкая стоимость, малое время разработки и отладки, отсутствие необходимости привлечения сторонних специалистов. Количество управляемых координат в этом случае не более 2.

Для более сложных деталей УП программа может быть предварительно написана на бумаге или на компьютере в формате *.txt*. В качестве примера такой детали можно рассмотреть пресс-форму для доньшка ПЭТ бутылки. Недостатком такого способа написания УП является длительный процесс написания и отладки программы. Однако при этом нет необходимости в привлечении сторонних специалистов, но требуется высокая квалификация программиста и технолога, оператора или наладчика. Количество управляемых координат в этом случае не более трех. В технической литературе такой режим написания КП называется *Manual Programming Techniques*.

Следует отметить, что программа, написанная в ручном режиме, обычно наиболее эффективно организована с точки зрения использования оперативной памяти ЧПУ и быстродействия обработки детали.

Генерацию УП для обработки сложных деталей, например поверхность пера лопатки ГТД, осуществляют с помощью специального программного обеспечения. Такой способ генерации УП достаточно дорог, требует привлечения сторонних специалистов. Сгенерированная программа не всегда оптимальна с точки зрения использования оперативной памяти системного блока ЧПУ и времени обработки детали.

Генерация управляющих программ с помощью специализированного программного обеспечения используется в том случае, когда для обработки поверхности детали требуется более трех одновременно управляемых координат.

### 4.1. САМ-системы

Система автоматизации программирования (САП) представляет собой совокупность программных и аппаратных средств, предназначенных для автоматизации одного из наиболее важных этапов разработки – этапа программирования, то есть перевода исходных алгоритмов автоматизированного управления на машинный язык, используемый в системе ЧПУ.

Одним из инструментов написания управляющей программы для станка ЧПУ являются САМ-системы. При этом следует отметить, что написание управляющих (пользовательских) программ, то есть программ, которыми пользуются операторы, возможно без участия компьютера для 2-х, 3-х и в некоторых случаях для 4-координатных систем ЧПУ. Для управляющих систем, ориентированных на количество координат более трех, написание пользовательской программы без использования специального программного обеспечения невозможно.

САМ-системы (англ. САМ – *Computer-Aided Manufacturing*) предназначены для проектирования обработки изделий на станках с числовым программным управлением (ЧПУ) и выдачи программ для этих станков (фрезерных, сверлильных, эрозионных, пробивных, токарных, шлифовальных и др.). САМ-системы входят, как структурный элемент в единую систему технологической подготовки производства (ЕСТПП)<sup>9</sup>. В настоящее время САМ-системы являются практически единственным способом для изготовления сложнопрофильных деталей и сокращения цикла их производства. В САМ-системах используется твердотельная трехмерная модель детали, созданная в одной из САД-систем (англ. САД – *Computer Aided Design*).

САД-системы принято делить на «легкие», «средние» и «тяжелые». Первые из них предназначены преимущественно на 2D графику, сравнительно дешевы и менее требовательны в отношении вычислительных ресурсов. «Тяжелые» системы ориентированы на геометрическое моделирование (3D), более универсальны, дороги, оформление чертежной документации в них обычно осуществляется с помощью предварительной разработки трехмерных геометрических моделей.

В качестве примера таких САМ-систем из зарубежных можно назвать CATIA, Applied Production Pro Elite, Camtek PEPS, Cubictek V-CNC, EDGE CAM, FEATURECAM INCL SOLID PLUGIN, EZ-EDM4X, Master CAM, Esprit CAM и многие другие. Из отечественных САМ-систем можно назвать следующие системы: GEMMA 3D, ТЕХТРАН, ADEM, SAPR200 и др.

Работа с САМ-системами осуществляется следующим образом. На персональном компьютере (PCNC) с установленной САД-системой строится контур обрабатываемой детали, если речь идет о токарном станке с ЧПУ, или загружается через носитель информации электронный вид обрабатываемой поверхности детали. Далее САМ-система разрабатывает несколько стратегий обработки детали. После чего либо сама система выбирает стратегию, либо система предлагает выбрать стратегию обработки оператору. Затем САМ-система генерирует управляющую программу ЧПУ, соответствующую выбранной стратегии обработки. Далее УП необходимо адаптировать для конкретной стойки ЧПУ. Процесс адаптации называют постпроцессированием созданной управляющей программы. Реализует процесс адаптации постпроцессор (специальная программа (англ. *Post Processor*)), входящая в пакет САМ-системы), преобразует рассчитанные

---

<sup>9</sup> ГОСТ 14.004-83 Технологическая подготовка производства. Термины и определения основных понятий.

в САМ-системе (формат *APT/CL*) данные о положении режущего инструмента в коды конкретного станка (*G/M*-коды) с учетом особенностей его кинематики.

Современные САМ-системы оснащены набором обобщенных постпроцессоров (*CATIA* от *Dassault Systems*, *Mastercam* от *CNC Software Inc.*) или имеют редактор постпроцессоров (*Pro/Engineer* от *PTC*, *Delcam-PowerMill* от *Delcam*). По этой причине проблем с постпроцессорованием стоек ЧПУ *Sinumerik*, *Haidenhain*, *FANUC* и других распространенных систем ЧПУ не возникает. Для отечественных систем ЧПУ *2C42-65*, *2C42*, *2R22*, *2Y22*, которые ещё используются на российских предприятиях (для обработки простых деталей), пишется индивидуальный постпроцессор для конкретного станка. Для этого используют специальный язык программирования (обычно это *C++*). Для ряда отечественных станков (не для всех) отечественные САМ-системы (*GEMMA*, *ТЕХ-ТРАН*) предлагают постпроцессоры для стоек ЧПУ *2C42-65*, *2C42*, *2R22*, *2Y22*.

Любая САМ-система имеет графический редактор, который позволяет оператору наблюдать за обработкой детали на мониторе компьютера и по мере необходимости вносить в процесс обработки коррективы. После того, как процесс обработки окончательно выверен, программа обработки передается на блок системы ЧПУ станка. Передача информации может быть осуществлена любым носителем, который имеет место на блоке числового программного управления. Если система ЧПУ объединена в сеть с другими компьютерами, то передача программы обработки детали может быть осуществлена через каналы связи.

В настоящее время практически все системы ЧПУ оснащены средствами визуализации процесса движения инструмента по выбранной траектории. Наблюдение за движением инструмента может осуществляться в *2D* проекции или в *3D*. Системы ЧПУ могут оснащаться специальными опциями по визуализации процесса обработки (с различной степенью достоверности), которые позволяют оператору более точно управлять и настраивать траекторию движения обрабатываемого инструмента [28]. В специальной литературе о ЧПУ процесс виртуальной визуализации механической обработки детали называют верификацией<sup>10</sup>.

## 4.2. CAD/CAM/CAE-системы

Основными факторами успеха в современном промышленном производстве являются: сокращение срока выхода продукции на рынок, снижение ее себестоимости и повышение качества. Достижение указанных целей обеспечивает конструкторско-технологическая подготовка производства (КТПП), которая занимается модернизацией структуры предприятия с учетом его производственной мощности и технологических возможностей.

К числу наиболее эффективных технологий, позволяющих комплексно решить указанные выше задачи, относятся *CAD/CAM/CAE*<sup>11</sup>-системы (системы

---

<sup>10</sup> Верификация – способ подтверждения каких-либо теоретических положений, алгоритмов, программ и процедур путём их сопоставления с опытными (эталонными или эмпирическими) данными, программами и алгоритмами

<sup>11</sup> Англ. *CAE – Computer-Aided Engineering*

автоматизированного проектирования, технологической подготовки производства и инженерного анализа) [29, 30].

Функции *CAE*-систем разнообразны, поскольку связаны с проектными процедурами анализа, моделирования, оптимизации проектных решений. В состав машиностроительных *CAE*-систем прежде всего включают программы для следующих процедур:

- моделирование полей физических величин, в том числе анализ прочности, который чаще всего выполняется в соответствии с МКЭ;
- расчет состояний и переходных процессов на макроуровне;
- имитационное моделирование сложных производственных систем на основе моделей массового обслуживания и сетей Петри.

Начиная с 90-х годов прошлого века функциональные возможности *CAD/CAM/CAE*-систем стали таковы, что производство могло быть высокотехнологичным при условии активного использования систем автоматизированного проектирования, технологической подготовки производства и инженерного анализа.

Наиболее известны следующие *CAD/CAM/CAE*-системы в машиностроении. «Тяжелые» системы (в скобках указана фирма, разработавшая или распространяющая продукт): *NX* (EDS Unigraphics); *Solid Edge* (Intergraph); *Pro/Engineer* (PTC — *Parametric Technology Corp.*), *CATIA* (Dassault Systemes), *EUCLID* (Matra Datavision), *CADDS.5* (Computervision, ныне входит в PTC) и др.

«Легкие» системы: *AutoCAD* (Autodesk); АДЕМ; *bCAD* (ПроПро Группа, Новосибирск); *Caddy* (Ziegler Informatics); Компас (Аскон, С.Петербург); Спрут (*Sprut Technology*, Набережные Челны); Кредо (НИВЦ АСК, Москва).

Системы, занимающие промежуточное положение (средне-масштабные): *Cimatron*, *Microstation* (Bentley), *Euclid Prelude* (Matra Datavision), *T-FlexCAD* (Топ Системы, Москва) и др. С ростом возможностей персональных ЭВМ грани между «тяжелыми» и «легкими» *CAD/CAM*-системами постепенно стираются.

Приведём несколько примеров эффективного использования *CAD/CAM/CAE*-систем.

Широко известен проект разработки компанией *Shorts Brothers* [31] фюзеляжа для самолета бизнес-класса *Learjet 45* при помощи современных *CAD/CAM/CAE*-систем. Результаты выполнения проекта впечатляют.

Ранее компания *Shorts* использовала в проектно-конструкторских работах проволоочное моделирование деталей. В создаваемых *Shorts Brothers* фюзеляжах самолетов обычно насчитывалось до 9500 структурных деталей. Подобные проекты могли потребовать более 440000 человеко-дней (до 4-х лет для завершения проекта).

Фюзеляж *Learjet 45* оказался не только наиболее сложным среди существующих, но и был разработан в значительно меньшие сроки (на 40 %), чем его предшественники. Кроме того, примерно в 10 раз было улучшено качество деталей и самой сборки фюзеляжа, а общее число деталей сокращено на 60 % (при снижении объема основных переделок на 90 % по сравнению с предыдущими

проектами). В целом компания *Shorts* смогла уменьшить число компонентов с 9500 до 3700 (на 60 %). Полное время на проектирование и технологическую подготовку производства было сокращено до 125000 человеко-дней. Общее время разработки и технологической подготовки производства – до 60000 человеко-дней, а весь цикл разработки типового фюзеляжа сократился с 4-х лет до 1,5-2 лет.

За почти 30-летний период существования *CAD/CAM/CAE*-систем сложилась их общепринятая международная классификация:

- чертежно-ориентированные системы, которые появились первыми в 70-е гг. (и успешно применяются в некоторых случаях до сих пор);

- системы, позволяющие создавать трехмерную электронную модель объекта, которая дает возможность решения задач его моделирования вплоть до момента изготовления;

- системы, поддерживающие концепцию полного электронного описания объекта – *EPD* (англ. *EPD – Electronic Product Definition*). Это технология, которая обеспечивает разработку и поддержку электронной информационной модели на протяжении всего жизненного цикла изделия, включая маркетинг, концептуальное и рабочее проектирование, технологическую подготовку, производство, эксплуатацию, ремонт и утилизацию. При применении *EPD*-концепции предполагается замещение компонентно-центрического последовательного проектирования сложного изделия на изделие-центрический процесс, выполняемый проектно-производственными командами, работающими коллективно. Вследствие разработки *EPD*-концепции и появились основания для превращения автономных *CAD*-, *CAM*- и *CAE*-систем в интегрированные *CAD/CAM/CAE*-системы.

### 4.3. Сравнительный анализ некоторых *CAD/CAM*-систем

Компания *CNC Software* является разработчиком *CAD/CAM*-системы *MasterCam*, которая позволяет просто и быстро создавать траектории движения инструмента при различных видах обработки (токарной, фрезерной, шлифовальной, электроэрозионной и т.д.). Система позволяет в отличие от многих других аналогичных *CAM*-систем отслеживать оставшийся припуск на поверхности обрабатываемой детали. Помимо этого *MasterCam Lathe* имеет удобный и логически понятный в пользовании верификатор. В 2012 г. компания *CNC Software* объявила, что версия *MasterCam X5* получила сертификат на совместимость с *CAD*-системой *Autodesk Inventor* (одна из лидирующих в мире *CAD/CAM/CAPP*-система среди «средних» подобных систем).

В состав программной среды *MasterCam* входят библиотеки инструмента фирм *Sandvik*, *Kennametal*<sup>®</sup>, *Iscar*<sup>®</sup>, *Valenite*<sup>®</sup>.

*ADEM* (англ. *Automated Design Engineering Manufacturing*) – российская интегрированная *CAD/CAM/CAPP*-система, предназначенная для автоматизации конструкторско-технологической подготовки производства (КТПП).

Разработка системы была начата двумя основными группами разработчиков из Москвы (конструкторский САПР «CherryCAD» и из Ижевска (технологический САПР «Катран»).

*ADEM* был создан как единый продукт, включающий в себя инструментарий для проектировщиков и конструкторов (*CAD*), технологов (*CAPP*) и программистов ЧПУ (*CAM*). Поэтому он содержит нескольких различных предметно-ориентированных САПР под единой логикой управления и на единой информационной базе.

Компания «СПРУТ-Технология» объединяет центры разработки и внедрения в Набережных Челнах и в Москве, работы в которых ведутся с 1990 г. Одним из разрабатываемых программных продуктов ЗАО «СПРУТ-Технология» является ПО *SprutCAM* – программное обеспечение для разработки управляющих программ для оборудования с ЧПУ.

*SprutCAM* по мнению специалистов имеет наиболее удачную интерфейсную часть среди существующих мировых аналогов («легкий» уровень). Для того чтобы приступить к работе с программой по заявлениям разработчиков, технологу более чем достаточно пройти однодневный курс обучения, при этом обучаемый не обязательно должен иметь предварительный опыт работы в области ЧПУ-обработки.

*SprutCAM* – единственная российская *CAM*-система и одна из немногих среди зарубежных (до 2010 г.), поддерживающая разработку УП для многокоординатного, электроэрозионного и токарно-фрезерного оборудования с учетом полной кинематической 3D-модели всех узлов.

ЗАО «СПРУТ-Технология», является одним из ведущих российских разработчиков программного обеспечения на рынке *CAD/CAM/CAE/САПР ТП/MES*-систем для автоматизации конструкторской и технологической подготовки, планирования, диспетчеризации и контроля производства.

В г. Жуковском Московской области специалистами ЦАГИ, начиная с 90-х годов прошлого века, была разработана *CAM*-система геометрического моделирования и программирования обработки для станков с ЧПУ – *ГЕММА-3D*. Центральной задачей, на решение которой была ориентирована система, является получение эффективных программ обработки наиболее сложных деталей на станках с ЧПУ. ПО *ГЕММА-3D* была одна из первых отечественных *CAD/CAM*-систем. По этой причине ПО *ГЕММА-3D* является одной из наиболее известных *CAD/CAM*-систем в РФ. Специалисты НТЦ «ГЕММА», начиная с первых версий ПО, ставили перед собой задачу построения с помощью ПО *ГЕММА* математических моделей деталей и агрегатов любой степени сложности, а также доработки математических моделей в соответствии с требованиями технологического процесса обработки конкретным инструментом на определенном оборудовании с ЧПУ. Дружелюбный интерфейс ПО *ГЕММА* делает эту *CAD/CAM*-систему популярной у рабочих, работающих непосредственно на станках с ЧПУ (операторы, наладчики, цеховые технологи). Принцип её работы простой: в режиме графического редактора чертится контур обрабатываемой детали, после чего *ГЕММА-3D* формирует управляющую программу (УП) для систем ЧПУ (особенно полезное качество при контурном фрезеровании).



ГЕММА-3D состоит из нескольких модулей, обеспечивающих в совокупности полный сервис для работы технолога-программиста или оператора станка с ЧПУ. Кроме того, ПО ГЕММА-3D способно осуществлять подготовку технологических эскизов и технологических карт.

Компания «НИП-Информатика», основанная в 1990 г. в г. Санкт-Петербурге, являлась одним из ведущих в РФ разработчиком программного обеспечения в области технологической подготовки производства. Компанией разрабатывается и широко внедряется программный комплекс для станков с ЧПУ ТЕХТРАН. Деятельность «НИП-Информатика» направлена на внедрении высокотехнологичных программных продуктов известных зарубежных и Российских компаний, ориентированных как на крупные предприятия, так и на средние, а также на малые.

Отличительной особенностью ТЕХТРАНа среди российских CAD/CAM-систем является предоставление пользователю технологических документов на бумажном носителе, максимально адаптированных к уже существующему документообороту.

Программа ТЕХТРАН (V5.3) известна среди пользователей (операторов ЧПУ) как ПО для проектирования управляющих программ 2.5-координатной ЧПУ. Сложные, дорогостоящие CAD/CAM-системы не смогли существенно повлиять на технологию подготовки программ для большинства 2,5-координатных станков: применение эффективных и недорогих CAM-систем, обеспечивающих широкий спектр технологий и открытых для пользователей, по-прежнему актуально. Последние версии ТЕХТРАНа поддерживают пятикоординатную обработку.

Создатели ПО (программного обеспечения) ТЕХТРАН разработали программный интерфейс таким образом, чтобы автоматизировать всю рутинную работу по программированию обработки детали. Вместо этого требуется построить геометрическую модель детали, ввести данные об инструменте и задать ряд параметров, характеризующих методику обработки.

Современные «твердотельные» системы моделирования основаны на поверхностном моделировании с граничным представлением твердых тел – *REP* (*Boundary REPresentation*) [32].

В граничном представлении твердое тело описывается как набор поверхностей, соотношения между которыми задаются параметрами. Для удобства работы параметрические модели представляются в виде логического дерева построения. В файлах коммерческих систем параметрического моделирования геометрическое изображение сохраняется в виде огромного количества треугольников для аппроксимации криволинейных участков поверхностей.

В результате эти файлы имеют внушительные размеры. Из-за систематического обновления версий CAD/CAM/CAE-системы нет никакой уверенности в том, что эта информация может быть прочитана спустя годы.

Компании, которые занимаются разработкой трансляторов, обеспечивающих обмен параметризованной геометрией между различными системами, используют закрытые, разработанные для внутренних целей форматы хранения

данных. В табл. 4.1 приведены форматы, которые используют для твердотельного моделирования.

Разработка трансляторов, обеспечивающих двусторонний обмен информации между различными версиями *CAD/CAM/CAE*-системы с сохранением дерева построения, и параметризации моделей, коммерчески не выгодны фирмам-разработчикам разнообразного программного обеспечения для твердотельного моделирования. По этой причине всегда указываются форматы или расширения файлов, являющихся приемлемыми для различных *CAD/CAM/CAE*-систем [29-30, 33].

Программная среда *Parasolid*<sup>®</sup> работает с файлами, имеющими расширение *.iges* (формат *IGES*); программная среда *ACIS solid* работает с файлами, имеющими расширение *.sat* (формат *SAT*); программная среда *AutoCAD*<sup>®</sup> работает с файлами, имеющими расширения *.dxf*, *.tma* и *.dwg* (форматы *DXF*, и *DWG*); программные среды *Solid Works*<sup>®</sup> и *Solid Edge* работают с файлами, имеющими расширения *.idf*; *.cadt*; *.stl*; *.vda*; *.asc* (форматы *CADL*, *STL*, *VDA* и *ASCII*); а также формата *STEP* (программных сред *Catia*<sup>®</sup> и *Pro-E*<sup>®</sup>).

Для простых задач, например раскрытия плоских заготовок, система ЧПУ в качестве входной информации может использовать текстовый файл в формате обмена данными – например *DXF* или *HPGL*.

Для пользователя системы ЧПУ тип используемого формата *3D* модели означает следующее:

- формат определяет количество информации о модели;
- чем больше информации несет формат, тем больше места в памяти системы занимает *3D*-модель детали;
- чем больше информации о *3D* модели детали, тем больше возможностей у оператора редактировать *3D*-модели (например, редактирование модели непосредственно во время обработки детали);
- тип формата может определять характер обработки (например, *2D* раскрой листового материала или обработка сложной пресс-формы).

В табл. 4.2 приведены особенности аппаратного и программного интерфейса использования *CAM*-систем.

Возможности программного интерфейса заключаются в следующем:

– *CAM*-система предлагает технологу (оператору) на выбор несколько стратегий обработки<sup>12</sup> детали (режим «Мастер»). Технолог имеет возможность либо согласиться с одной из предлагаемых стратегий обработки детали, либо предложить свою стратегию;

– при отработке (отладке) стратегии обработки детали *CAM*-система сохраняет все внесенные ранее коррективы. Такую возможность предоставляют некоторые системы ЧПУ, например *FANUK*;

– *CAM*-система при генерации управляющей программы (УП) использует вложенные циклы, которыми располагает предварительно выбранная системы ЧПУ (стойка). Все вложенные циклы образуют библиотеку;

---

<sup>12</sup> Стратегия обработки включает выбор оптимальных инструментов, режимов их использования, а также временную последовательность выполнения необходимых технологических операций.

– *САМ*-система при генерации УП учитывает форму и размеры заготовки. В этом случае инструмент на рабочих режимах обрабатывает только те участки детали, где имеет место припуск. Кроме того, *САМ*-система таким образом организует траекторию движения инструмента на холостых ходах, чтобы машинное время, затрачиваемое на холостые хода, было минимальным;

– *САМ*-система имеет возможность работать с *3D* и с *2D* моделями (последнее необходимо при генерации УП для станков плазменной или гидравлической резки);

– *САМ*-система при генерации УП рекомендует определённые режимы обработки детали, которые оператор либо принимает, либо изменяет, исходя из собственного опыта;

– *САМ*-система должна предусматривать возможность проверки точности изготовления детали с помощью электронного щупа из магазина инструментов станка, а также возможность самодиагностики (по регламенту или случайно) состояния трущихся поверхностей используемого станка. Для этого в *САМ*-системе должны быть *3D*-модели детали и станка определённого производителя. В обоих случаях на геометрические размеры *3D*-моделей должны быть указаны допустимые отклонения размеров;

– *САМ*-система должна выбирать инструмент из имеющегося инструмента в магазине станка или в револьверной головке. Если с помощью имеющегося инструмента деталь не может быть обработана, тогда система должна сообщить об этом (некоторые *САМ*-системы предлагают на выбор несколько необходимых инструментов);

– *САМ*-система должна обеспечивать возможность отладки и контроля работы УП в режиме реального времени и на любой стадии обработки. Например, внесения корректив в УП в процессе выполнения вложенного цикла (до 2010 г. такую возможность предоставляли некоторые модификации ЧПУ фирмы *FANUC*).

*САМ*-системы позволяют разрабатывать технологические стратегии обработки детали, которые используют различные технологические операции (табл. 4.3). В сгенерированной стратегии могут использоваться последовательно и параллельно несколько различных операций за один установ детали. Вместе с этим не существует универсальных *САМ*-систем, которые в стратегии обработки детали используют любые известные технологические операции. *САМ*-системы различных разработчиков могут предоставлять дополнительные возможности при разработке стратегии обработки детали.

Таблица 4.1. Возможности моделирования твердотельных объектов и поверхностей с помощью различных САМ-систем

№ п/п	Наименование системы	Модель объекта			Реновация знаний <sup>13</sup>	Двухтуррентная обработка <sup>14</sup>	Наличие библиотек	Конвертация и чтение форматов										
		Слайдовая	Полигональная	Параметризация раз-меров				IGES	SAT	DXFTMA	DWG	CADL	STL	VDA	ASCII	STEP	Pro-E	DXF
1	MasterCam	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
2	ADEM	+	+		+	+	+											
3	Sprut			+			+	+				+	+			+		+
4	GEMMA	+	+		+		+	+					+			+	+	+
5	ТЕХТРАН	+	+	+		+	+	+					+	+		+	+	

Таблица 4.2. Особенности аппаратного и программного интерфейса использования САМ-систем

№ п/п	Наименование системы	Выбор стратегии обработки	Сохранение всех предыдущих корректив	Библиотека вложенных циклов <sup>15</sup>	Ассоциативность геометрии и траектории движения инструмента	Работа с плоской геометрией	Расчет режимов резания	Эталон для контроля точности и качества <sup>16</sup>	Библиотека инструмента	Отладка и контроль работы управляющей программы в режиме реального времени и на любой стадии обработки
1	MasterCam	+	+	+	+				+	
2	ADEM			+		+	+	+		+
3	Sprut	+		+	+	+	+		+	+
4	GEMMA	+	+	+				+	+	+
5	ТЕХТРАН	+	+	+		+		+		+

<sup>13</sup> Реновация знаний – работа со сканированными чертежами и старыми программами ЧПУ.

<sup>14</sup> Двухтуррентная обработка используется в станках, имеющих два суппорта, участвующих одновременно в обработке детали.

<sup>15</sup> Вложенные циклы: обточка, расточка, глубокое сверление, нарезание резьбы и др.

<sup>16</sup> Система позволяет измерять разницу между математической моделью и обработанной деталью.

Таблица 4.3. Технологические возможности обработки деталей

№ п/п	Наименование системы	Начало обработки детали в любой точке модели	Совмещение чистовой и черновой обработки диаметров	Чистовая контурная обработка	Выбор величины подачи	Врезание под любым углом с многократными переходами	Задание глубины и ширины врезания, углов поднутрения, углового радиуса и фаски	Встроенная функция резьбонарезания при наличии таблицы резьб и нарезания многозаходной резьбы	Задание разного припуска на вертикальные и горизонтальные участки	Обработка контура с использованием временной начальной точки	Предотвращающая возможные врезания инструмента в ограждения, деталь и шпиндель и т.д.	Контроль за состоянием режущей кромки инструмента
1	MasterCam	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
2	ADEM		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
3	Sprut	+	+	+	+			+	+	+	+	+
4	GEMMA		+	+	+	+	+	+		+	+	+
5	ТЕХТРАН	+	+	+	+			+	+	+	+	+

В табл. 4.4 приведены возможные и стандартные опции (возможности) САМ-систем при генерации управляющей программы для токарной и фрезерной обработки.

Таблица 4.4. Особенности программирования токарной и фрезерной обработки

№ п/п	Наименование системы	2; 2,5; 3; 5 координатное фрезерование	Контроль остаточного припуска отдельно для внешних и внутренних границ конструктивного элемента	Автоматический подбор необработанных зон для 2-, 2,5- и 3-координатного фрезерования	Моделирование элементов приспособлений с контролем нарезание	Автоматический расчет точки врезания	Врезание по нормали, линейное с наклоном, радиусное с наклоном, по спирали предварительное засверливание	Формирование подхода и отхода по нормали, линейного или радиусного <sup>17</sup>	Формирование траектории с учетом либо глубины резания, либо числа проходов	Обработка с постоянной высотой гребешка	Реализация программного управления шпинделем, СОЖ	Формирование нескольких вариантов маршрута обработки в рамках одного проекта	Контроль обработки сопряжений <sup>18</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	MasterCam		+		+	+	+	+	+		+	+	+
2	ADEM		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
3	Sprut		+									+	
4	GEMMA		+		+	+	+	+	+	+	+	+	+
5	ТЕХТРАН		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	

Продолжение табл. 4.4

№ п/п	Наименование системы	Многопроходная обработка по Z координате на основе плоской геометрической модели, параметрическое задание литейных углов, галтелей и профиля стенки без трехмерного моделирования	Контроль аппроксимации траектории движения инструмента, как для всего проекта, так и для конкретного перехода	Сохранение петель эквидистанты в процессе отладки УП	Работа с радиусной коррекцией как эквидистантной, так и контурной с контролем длин отрезков касательного или перпендикулярного направления	Использование инструмента всех типов: фрезы концевые, конические, угловые, диско-вые, со скруглением или сферические	Создание библиотеки инструментов	Применение пользовательских команд для формирования специальных кадров	Контроль ширины разрыва поверхности при обработке трехмерной модели
1	2	15	16	17	18	19	20	21	22
1	MasterCam								
2	ADEM	+	+	+	+	+	+	+	+
3	Sprut		+			+	+	+	+
4	GEMMA	+			+	+	+	+	+
5	ТЕХТРАН		+	+	+	+	+	+	+

<sup>17</sup> Формирование подхода и отхода: по нормали, линейного (с контролем длины и угла) или радиусного (с контролем радиуса и угла разворота).

<sup>18</sup> Контроль обработки сопряжений – контроль сопряжений, выполненных по радиусу или по фаске и т.д.

№ п/п	Наименование системы	Формирование переходов: центровать, сверлить, развернуть, зенкеровать, расточить, нарезать резьбу	Полное программирование оси «С»	Контурная обработка торцов и боковых поверхностей детали	Торцевое и боковое сверление, включая возможность сортировки точек по или против часовой стрелке	Зонная обработка с использованием как плоской, так и объемной модели	Возможность обработки с постоянной плоскостью (Z-level) <sup>19</sup>	Автоматического расчета режимов резания и времени обработки
1	2	23	24	25	26	27	28	29
1	MasterCam		+		+			
2	ADEM	+			+	+	+	+
3	Sprut	+	+	+				
4	GEMMA		+	+	+	+	+	
5	ТЕХТРАН	+	+			+		+

Таблица 4.5. Использование CAD/CAM/CAE-систем для различных видов обработки

№ п/п	Наименование системы	Токарная	Фрезерная	Электроэрозионная	Лазерная	Координатно-расточная	Шлифовальная	Плазменная резка	Газовая резка	Гидроабразивная резка	Штамповка	Сборка	Сварка	Гальваника	Покраска	Термообработка
1	MasterCam	+	+			+		+	+	+			+		+	
2	ADEM	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
3	Sprut	+	+	+	+	+		+	+							
4	GEMMA	+	+	+	+	+	+		+	+	+		+		+	
5	ТЕХТРАН	+	+	+	+	+		+	+	+	+		+		+	

Технологические и конструкторские возможности CAD/CAM/CAE-системы, приведённые в табл. 4.1-4.5, составлялись авторами на основе информации, доступной в Интернете на конец 2018 г. По этой причине приводимые данные могут быть неполными.

Рекомендуемые проприетарные<sup>20</sup> платные и свободные бесплатные программы для проектирования САПР для Windows (системы CAD CAM CAE, программы для моделирования, черчения и визуализации) приведены на сайте [34].

<sup>19</sup> Возможность обработки с постоянной плоскостью (Z-level) означает, что черновая и чистовая обработка объемных моделей на 2,5-координатных станках может осуществляться при помощи задания количества проходов на каждом уровне.

<sup>20</sup> Проприетарное ПО – программное обеспечение, являющееся частной собственностью авторов или правообладателей и не удовлетворяющее критериям свободного ПО (наличия открытого программного кода недостаточно). Правообладатель проприетарного ПО сохраняет за собой монополию на его использование, копирование и модификацию, полностью или в существенных моментах. Существуют так называемые *freeware*-программы, которые являются частными, но по определенным причинам их владельцы не берут платы за использование данных ПО (к примеру, драйверы для некоторых устройств).

## 5. СИСТЕМЫ ЧПУ

Система числового программного управления (СЧПУ) – совокупность специализированных устройств, методов и средств, необходимых для осуществления числового программного управления (ЧПУ) станками.

Устройство ЧПУ (УЧПУ) станками – это часть СЧПУ, выполненное как единое целое с ней и осуществляющее управляющее воздействие по заданной программе.

В международной практике приняты следующие обозначения ЧПУ:

*NC* (англ. *Numerical control*) – ЧПУ предусматривает использование жестко заданных схем управления обработкой – например, задание программы с помощью штекеров или переключателей, хранение программ на внешних носителях. Каких-либо устройств оперативного хранения данных, управляющих процессоров не предусматривалось.

*HNC* (англ. *Hand NC*) – разновидность устройства ЧПУ с заданием программы оператором с пульта с помощью клавиш, переключателей и т. д.

*SNC* (англ. *Speiher NC*) или *MNC* (англ. *Memory NC*) – устройство ЧПУ, имеющее память для хранения всей управляющей программы.

*CNC* (англ. *Computer numerical control*) – автономное управление станком с ЧПУ, содержащее мини-ЭВМ или процессор.

*DNC* (англ. *Direct NC*) – групповое управление станками от общей ЭВМ.

В настоящее время СЧПУ типа *NC*, *HNC* в чистом виде используются главным образом в учебных целях на различных симуляторах.

Перечисленные устройства можно разделить на две группы: с постоянной структурой с вводом программы от перфоленты, магнитной ленты или с клавиш (типа *NC*, *HNC*) и с переменной структурой, у которых основные алгоритмы работы задаются программно и могут изменяться. Устройства класса *CNC* и *SNC* построены на основе мини-ЭВМ. Мини-ЭВМ – небольшая ЭВМ с упрощенной структурой и ограниченным набором операций. Она имеет внешние устройства (ВУ), обеспечивающие связь с технологическим оборудованием и обслуживающим персоналом, а также может иметь связь с ЭВМ более высокого ранга. Мини-ЭВМ позволяет формировать нестандартные циклы обработки, что упрощает подготовку и редактирование программ.

В настоящее время на мировом рынке можно выделить несколько наиболее крупных и известных фирм, занимающихся разработкой и производством систем ЧПУ. Это, прежде всего, «*Siemens*» (Германия), «*DELEM*» (Голландия), «*Heidenhein*» (*DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH*, Германия) [75], «*Fagor*» (Испания), «*FANUC*» (Япония), «*Mitsubishi*» (Япония). Существует большое количество других менее крупных и известных фирм производителей ЧПУ. Из отечественных фирм производителей ЧПУ можно назвать «Балт-систем», НПО «Электронмаш» (Санкт-Петербург), *FMS 3000* производитель ООО «Модмашсофт» (Нижний Новгород), «Маяк-600» – ООО «Ижпрэст» (Ижевск), «Размер-4» [35] – разработчик НИИКон, производитель НПО «Полюс» (Новосибирск), «Микрос-12» – производитель ЗАО «Микрос» (г. Ногинск, Московская обл.) и т.д. (табл. 5.1).



Следует отметить, что отечественные управляющие системы отличаются от своих зарубежных конкурентов и технологическими возможностями, и дружелюбностью интерфейса. К несомненным достоинствам отечественных систем ЧПУ можно отнести их стоимость, которая пока уступает зарубежным аналогам. Однако учитывая то обстоятельство, что «железо» (микросхемы, крейты и т. д.) и отечественных и зарубежных системы ЧПУ собирается в континентальном Китае, то в ближайшем будущем следует ожидать выравнивания цен отечественных и зарубежных управляющих программ. Это приведет к ужесточению конкуренции и разорению ряда производителей систем числового программного управления.

Следует отметить, что более мелкие зарубежные производители систем ЧПУ разрабатывают управляющие программы, как правило, для специализированных станков или другого промышленного оборудования (деревообрабатывающие, электроэрозионные станки).

Таблица 5.1. Отечественные разработчики и производители систем ЧПУ, представленные на рынке РФ

№ п/п	Производитель ЧПУ	Модель ЧПУ	Примечание
1	2	3	4
1	ООО «ИжпрЭст», г. Ижевск	Маяк-400 Маяк-500 Маяк-600	Предназначены для комплектации новых станков с ЧПУ и модернизации старых
2	ООО «БалтСистем», г. СПб	NC-110 NC-210 NC-220 NC-230 NC-201 NC-202	ЧПУ адаптируется для самых сложных объектов ЧПУ до 4-х управляемых осей ЧПУ до 4-х управляемых осей ЧПУ до 5-х управляемых осей ЧПУ для токарных станков ЧПУ для токарных станков
3	ЗАО «4С», г. СПб	4СКFF 4СК FFCx3 FF	ЧПУ до 5-х управляемых осей ЧПУ для 2-х станков 16A20Ф3С132
4	ООО «Модмаш», г. Н. Новгород	FMS-3000/3100 FMS-3000/3100 FMS-3200	ЧПУ серии standart ЧПУ серии comfort
5	ПО «Контур», г. Томск	2С42-65-16 2С42- 65М-02 2R22 2R22М-01	ЧПУ с фотоимпульсными датчиками ЧПУ с фотоимпульсными датчиками ЧПУ для станков 16А20Ф3 ЧПУ для станков 16А20Ф3
6	ЗАО «Микрос», г. Ногинск	Микрос 12Т Микрос 12ТС-1 Микрос 12Ф Микрос 10	ЧПУ для токарных станков ЧПУ для сверхточных токарных станков ЧПУ для фрезерных станков ЧПУ для электроэрозионных станков
7	ООО «НПК Дельта-Тест», г. Фрязино	Арта-7	ЧПУ для электроэрозионных станков
8	ОАО «Сарапульский радиозавод» г. Сарапул	САР 3000	ЧПУ серии FMS-3000

1	2	3	4
9	ООО «ДГТ», г. Фрязино	ДГТ-735 ДГТ-735Л  ДГТ-735Т ДГТ-735П	ЧПУ для искровых вырезных станков 2 или 5 координат ЧПУ для лазерных и фрезерных станков ЧПУ для токарных станков (ТРК-125) ЧПУ для искровых прошивных станков
10	НПО «Криста», г. Рыбинск	КРТ4-00	
11	ООО «Джест», г. Иваново	<i>JNC-T01</i>	ЧПУ для станков токарной группы
12	ООО «Станко Центр», г. Москва	<i>Integral</i>	Основной системы ЧПУ (СЧПУ, CNC) является контроллер движения на базе DSP – процессора <i>Motorola</i> или процессора <i>Texas Instruments</i>
13	ООО «Модель НПП», г. Н. Новгород	<i>NC 3.5</i> <i>NC 2000</i> <i>NC 2T</i>	ЧПУ на одном процессоре Распределённая система управления Удешевлённая система ЧПУ для токарных и сверлильных станков
14	ООО «Рубикон-Инновация НПО», г. Смоленск	Феникс	ЧПУ до 8-и управляемых осей ЧПУ до 3-х управляемых осей одновременно
15	ОАО «Савма», г. Кимры	<i>Flex NC</i>	ЧПУ до 5-ти управляемых осей
16	ООО «Вест Лабс Лтд НПФ», г. Харьков	<i>WL5M</i> <i>WL4T</i> <i>WL4M</i>  <i>WL3M</i> <i>WL3i</i>	Система ЧПУ для фрезерных станков ЧПУ для 2-х координат + шпиндель ЧПУ для 3-х координат + шпиндель для фрезерных станков ЧПУ для 3-х координат + шпиндель Самая дешёвая система ЧПУ
17	ОАО «Энимс», г. Москва	ПАС Э 2000 <i>CNC</i>	CNC рабочая станция оператора
18	ООО «Автоматика Плюс», г. Пенза	<i>Auto P NC</i>	Настраиваемая система ЧПУ
19	<i>Siemens</i>	<i>Sinumerik 802C</i> <i>Sinumerik 802D</i> <i>Sinumerik 802S</i>  <i>Sinumerik 810D</i> <i>Sinumerik840C</i> <i>Sinumerik 840D</i>	<i>CNC</i> с аналоговым приводом <i>CNC</i> с цифровым приводом <i>CNC</i> с шаговым приводом (привод +двигатели) <i>CNC</i> с цифровым встроенным приводом <i>CNC</i> с аналоговым приводом <i>CNC</i> с цифровым приводом (привод +двигатели)

На большом количестве отечественных заводов работают станки, оснащенные такими системами ЧПУ, как «Электроника НЦ-31» (Зеленоградское НПО «Электроника», позднее ОАО «Смоленский завод радиодеталей»), 4СК (Ленинградское НПО «Электронмаш»), 2R22, (с 1981 по 1989 годы Томское ПО «Контур», с 1987 по 1989 годы Ленинградское НПО «Электронмаш»), *FMS 300 Comfort* фирмы «Модмаш-Софт», 2У22, 2С42, МС2109, «Маяк-600». Не все из перечисленных выше производителей ЧПУ сумели выдержать испытание временем. Продукция многих из них устарела не только морально, но и физически.

Некоторые из них уже не производятся («Электроника НЦ-31» (Зеленоградское НПО «Электроника»)), позднее ОАО «Смоленский завод радиодеталей»), 4СК (Ленинградское НПО «Электронмаш»), другие производятся только на малых предприятиях ограниченными сериями. Продолжение эксплуатации этих систем в промышленности обрекает последнюю на технологическое отставание, тем не менее, в советские годы этих систем ЧПУ было выпущено огромное количество, поэтому вывести эти системы из производства за короткое время не предоставляется возможным. Ситуация осложняется еще тем, что операторы станков с ЧПУ привыкли к работе на устаревших управляющих программах, по этой причине внедрение новых систем ЧПУ сдерживается и человеческим фактором. К основным недостаткам таких систем, как «Электронмаш НЦ-31» (Зеленоградское НПО «Электроника», позднее ОАО «Смоленский завод радиодеталей») и 2R22, позднее, 2S22 (в г.г. Ленинград, Краснодар, Смоленск, Томск, Новосибирск) является малая оперативная память (ОЗУ), что существенно снижает их технологические возможности. Например, программа на «Электронмаш НЦ-31» может состоять из 450 кадров (операторов), что для современных технологических задач чрезвычайно мало. Система 4 СК производилась на государственном предприятии (Ленинградское НПО «Электронмаш»), которое не выдержало рыночных условий и разорилось. Его в прошлом дочерняя, Санкт-Петербургская фирма «Балт-Систем» выпускает системы НЦ-210, НЦ-230. Систему 4СК отличает недостаточно тщательная проработка отдельных вложенных циклов<sup>21</sup>. Вложенные циклы могут выполнять операции расточки или обточки по контуру, организацию различных циклов, менять начальную нулевую точку и т.д. В качестве примера недоработки системы ЧПУ «Балт-Систем» можно указать резьбонарезающий вложенный цикл *FIL(...)*, который может самостоятельно вносить произвольно коррекцию в угол нарезаемой резьбы. Существуют и другие претензии. Вместе с этим следует отметить, что в сравнении с системами «НЦ-31» (Зеленоградское НПО «Электроника», позднее ОАО «Смоленский завод радиодеталей») и 2R22, позднее 2S22 (в г.г. Ленинград, Краснодар, Смоленск, Томск, Новосибирск) система 4СК в свое время была большим шагом вперед отечественных систем ЧПУ.

Следует остановиться на возможностях, которые предоставляют новейшие системы ЧПУ зарубежных производителей. Тема эта чрезвычайно обширна, поэтому остановимся на общих тенденциях. Повсеместно современные системы ЧПУ могут объединяться в сеть, поэтому несколько станков могут управляться одним процессором, при этом каждый станок может обрабатывать свою деталь.

Локальная система, предназначенная для подключения группы станков с ЧПУ к персональному компьютеру и передачи на них управляющих программ по проводным линиям связи, называется системой прямого управления станками с ЧПУ – *DNC (Distributed Numerical Control)*. *DNC*-система, как правило, используется в экспериментальных цехах с единичным характером производства деталей сложной формы.

---

<sup>21</sup> Вложенный цикл – это некоторый оператор, который обуславливает определенную совокупность команд ISO.

Несколько станков с ЧПУ могут объединиться в гибкую автоматизированную производственную систему (ГПС), которая, в свою очередь, может быть дополнена гибким автоматизированным участком (ГАУ) и войти в состав автоматической линии (производства масштаба участка либо цеха).

Современные системы числового программного управления могут воспринимать информацию через *USB*-порт (ПВВ) от, например, ноутбука (мобильного компьютера), допускается использование и других стандартов передачи информации. Кроме того, возможна передача информации через *Flash*-память и через Интернет. Мировая производственная практика показывает, что наиболее интересен и перспективен обмен информации через Интернет.

Если чертеж детали, которую необходимо изготовить на станке, выполнен на бумажном носителе, то его можно через сканер перевести в электронный вид и после этого ввести в определённом формате в систему ЧПУ, которая сама сможет сгенерировать управляющую программу и предложит на выбор несколько технологических стратегий обработки детали, а также система ЧПУ будет рекомендовать оператору установить определенный набор инструментов. В этом случае система ЧПУ представляет собой индустриальный компьютер.

В настоящее время ряд производителей станков с ЧПУ осуществляют передачу информации с датчиков на систему ЧПУ не с помощью большого количества информационных кабелей, а с помощью одной шины, по которой передаётся с помощью частотно-временного модулирования информационный сигнал. Создаваемые таким образом информационные потоки могут передаваться со скоростью (особенно для высокоскоростных станков) до 1 Гбит/с. Управляют такими потоками информации специальные устройства-маршрутизаторы. В качестве маршрутизатора может быть использован программируемый контроллер, промышленный компьютер, сервер и т.д.

При этом по общей шине<sup>22</sup> может передаваться, таким образом, свыше 100 информационных сигналов. Эта технология позволяет значительно экономить электропровод (до нескольких килограммов) и существенно повысить помехоустойчивость сигналов и системы в целом.

В реальном производстве обычно используют практически все виды передачи информации – проводные и беспроводные (см. рис. 5.1).

Эффективность современного машиностроительного предприятия определяется не только уровнем автоматизации производственного процесса, но и величиной налоговой нагрузки.

Известен японский опыт «вынесенного производства», когда каждый рабочий становится частным предпринимателем. Станочное оборудование, на котором он работает, арендуется с правом выкупа у фирмы-работодателя или у банка. При этом станок размещают рядом с домом рабочего в специальном боксе. Таким образом, делегируется часть налоговой нагрузки предприятия на рабочих. При такой организации производства единственной возможностью оперативно передавать любую информацию, в том числе и технологическую, является Интернет. Поскольку квалификация рабочего может быть недостаточ-

---

<sup>22</sup> КШД – кодовая шина данных (англ. *Data Code Bus*).

ной для работы с САМ-системами, то с базового компьютера головного офиса фирмы-работодателя через Интернет в компьютер ЧПУ вводятся предварительно сгенерированная управляющая программа (УП). После этого станок готов к работе.

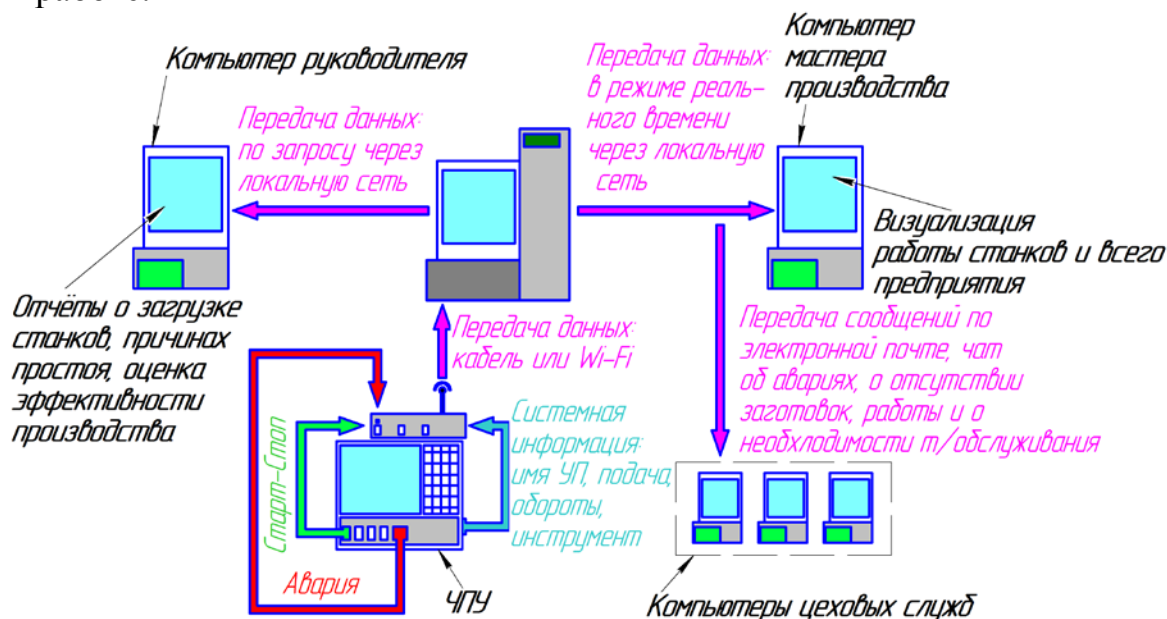


Рис. 5.1. Организация локальной системы передачи информации в масштабах предприятия

В этом случае возможность совершить ошибку в написании программ сводится к минимуму.

Немецкий опыт организации малых предприятий в машиностроении показывает: малое предприятие может быть рентабельным в том случае, если количество станков с ЧПУ на единицу больше количества работников предприятия, включая директора, бухгалтера и т.д.

Экономические потребности (малые партии) и технологические требования (например, малая жесткость деталей) могут быть трудновыполнимы настолько, что решение поставленной задачи будет затруднительно даже с помощью современных САД/САМ-систем и Интернет. Рассмотрим случай, когда необходима обработка малой партии деталей, изготовление которых связано со значительными технологическими сложностями. В этом случае сгенерированная с помощью одной из САМ-систем управляющая программа (УП) может не обеспечить обработку всех геометрических элементов твердотельной модели. Система не найдёт в библиотеке подходящего инструмента и режимов, по этой причине данный геометрический элемент может быть просто не выполнен.

Помочь в этом случае может практический опыт оператора. Рассмотрим пример, когда в штуцере из стали 12Х18Н9Т (ЭЯ1Т) было необходимо выполнить канавку шириной  $0,8^{+0,2}$  мм и глубиной 2,5 мм. Возможно, в мире существуют производители канавочных резцов, способных выполнить такой паз. Но в данном случае речь идет о небольшой партии деталей, себестоимость изготовления которых не должна быть высокой, а сроки изготовления должны быть разумными. Для генерации управляющей программы была использована программная среда GEMMA (V8), которая предложила выполнить рассматриваемый паз с помощью отрезного (канавочного) резца при постоянной подаче врезания.

Первые попытки изготовить канавочный резец из отрезного резца с напаянной пластиной из твердосплавного материала ВК8 оказались неуспешными.

Поскольку твердосплавная пластина имела конкретную толщину, то это накладывало ограничение на углы поднутрения боковых кромок отрезного резца ( $\alpha_{1,2} \leq 1 - 1,5^\circ$ ) – столь малые углы требуют особо высокой точности при выставлении канавочного резца. Практика показала, что очень сложно было заточить такой резец, ввиду малой толщины режущая кромка ломалась при заточке, при привязке к координатам и при врезании в обрабатываемую поверхность. Решение было найдено следующее. В качестве резца было выбрано поломанное сверло  $\varnothing 4$  мм из инструментальной стали Р6М5 («быстрорез»). Этот материал более упругий и вязкий в сравнении с ВК8, но менее стоек при обработке хромосодержащих сталей. В связи с этим для формирования канавки был использован вложенный цикл G83, соответствующий глубокому сверлению с периодическим выводом сверла из выполняемого отверстия. В команде G83 был изменён параметр, обозначающий координату выполнения операции: взамен ось Z была указана ось X. Это позволило осуществить выполнение канавки с периодическим выводом резца из уже сформированного паза, в результате чего охлаждалась и освобождалась от стружки режущая кромка.

Рассмотрим пример нарезания канавки по оси «X» глубиной 3 мм на поверхности цилиндра  $\varnothing 20$  мм на расстоянии 30 мм от начала торца детали, соответствующему  $Z=0$  с помощью вложенного цикла G83.

Подходим с минутной подачей к точке X 24 мм и Y -30

**G1 G94 G09 X24 Z-30 F600**

Здесь G1 – оператор линейной интерполяции (ЛИ) (перемещения);

G94 – перемещения осуществляются с минутной скоростью, т. е. величина скорости перемещения не зависит от частоты оборотов шпинделя;

G09 – замедления скорости перемещения в конце исполнения оператора;

F600 – величина минутной скорости составляет 600 мм/мин.

Далее объявляем подачу на оборот (G95). Это означает, что все движения после этого оператора будут осуществляться только с подачей на оборот

**G 95**

Объявляем оператор глубокого сверления

**G83 X14 R18 Q 2.0 F0,1**

Здесь X14 соответствует диаметру дна канавки, который получается следующим образом:  $\varnothing 20 - 2 \cdot 3 = \varnothing 14$  мм; R – начальная точка (врезания) цикла, т. е. расстояние от исходной точки до точки; Q – глубина одного врезания (в рассматриваемом случае глубина одного врезания 2 мм); F – скорость рабочей подачи на оборот 0,1 мм/об.

Объявляем окончание исполнения вложенного цикла глубокого сверления

**G80**

Такой режим выполнения канавки позволяет при стойкости, характерной инструментальному сплаву Р6М5, выполнять кольцевой паз на цилиндрической поверхности из стали 12Х18Н9Т. Указанная выше информация не могла содержаться во вложенных библиотеках САМ-системы. Решение рассматривае-

мой технологической задачи возможно было в приемлемые сроки и затраты только в результате использования опыта технолога.

Отсутствие связи ЧПУ по Интернету с головным компьютером, болезнь технолога или программиста, желание рабочего сэкономить – все эти обстоятельства могут привести к программированию оператором ЧПУ обработки детали непосредственно с пульта ЧПУ (программирование на стойке ЧПУ, режим *Shop-floor*). В этом случае оператор, руководствуясь некоторыми правилами, по чертежу детали описывает обрабатываемый контур детали. Геометрические характеристики контура оператор вводит через клавиатуру в управляющую программу (например, система ЧПУ «*Fagor*» (Испания)). После чего оператор выбирает инструмент, необходимый для обработки конкретной детали.

Для облегчения описания профилей деталей, особенно тех, которые имеют точки сопряжения, например, точка касания окружности с наклонной прямой или точка касания двух окружностей, фирмы – разработчики ЧПУ предлагают несколько решений. Одно из них – создание специализированных языков, позволяющих оперировать с графическими объектами. Такие языки позволяют находить координаты точек касания, пересечения, отдельно стоящих точек, находить радиус окружности, координаты его центра и т.д. В качестве примера такого языка можно рассмотреть язык *GTL* [36], входящий в ядро алгоритмического языка таких систем, как 4СК, *NC-210* и др. Следует отметить, что предлагаемый путь поиска точек сопряжений контура недостаточно очевиден, требует достаточно высокой квалификации программиста и трудоемок. Если рядом с оператором имеется компьютер, с каким-либо графическим пакетом, то отыскание необходимых точек контура серьезно облегчается. Сложность этого варианта состоит в том, что в цехе, как правило, нет компьютера с необходимой *CAD*-системой. Кроме того, оператор может не иметь навыков работы с графическим программным пакетом.

В настоящее время наиболее часто встречается следующий подход к построению самого контура и определения координат необходимых точек сопряжения. Так, например, система ЧПУ фирмы «*Heidenhain*» предлагает для построения контура использовать графический редактор системы, который позволяет строить первоначально подобный требуемому контур, а затем, представляя с помощью системы размеры, получить необходимую кривую. Возможна модификация этого метода, а именно: первоначальный подобный контур строится на мониторе с помощью «стило» (специальный карандаш), а затем эта кривая привязывается к системе координат и указываются необходимые размеры. Читая инструкцию по использованию современных систем ЧПУ, может создаться впечатление, что приобретение навыков работы с управляющей программой достаточно сложный и трудоёмкий процесс, однако программный интерфейс обычно настолько дружелюбен, что вероятность ошибки сведена к минимуму. Не так давно одним из основных преимуществ системы ЧПУ фирмы «*Heidenhain*» было наличие встроенного симулятора (2D или 3D виртуальные и динамические модели обработки детали) и развитое макропрограммирование. Однако всеобщее и повсеместное внедрение *CAM*-систем делает указанные выше преимущества систем ЧПУ «*Heidenhain*» невостребованными. Объём инструкции по использованию ЧПУ обычно связан с большим количеством тех-

нологических возможностей, предоставляемых системой управляющих программ. Следует отметить, что в обоих случаях системе предварительно следует указать размер заготовки. Это необходимо для того, чтобы при обработке профиля с припуском исключить движение инструмента с рабочей подачей на участках, где нет материала заготовки. Особенно часто сталкиваешься с этим явлением, когда используешь вложенные циклы.

В техническом отношении современные системы (наиболее продвинутые) ЧПУ для решения абсолютного большинства известных технологических задач безупречны. Их технологические возможности могут сдерживаться только маркетинговой политикой фирмы изготовителя системы ЧПУ. Так фирма *Siemens* продает не всю систему, а только набор её возможностей. Первая продажа имеет привлекательную цену, но дальнейшая модернизация купленной системы приведёт к значительным затратам. Фирма *FANUK* продает сразу всю систему без усечений, но ЧПУ этой фирмы одни из самых дорогих. Другие производители систем управляющих программ используют модернизации или комбинации той или иной маркетинговой тактики. Таким образом, технологические системы ЧПУ имеют возможности, которые определяются не только технической квалификацией разработчиков, но и маркетинговой политикой фирм-производителей.

Принято считать, что производительность даже морально устаревших ЧПУ зарубежного производства выше, чем у отечественных аналогов, как минимум в два раза.

Станки, оснащенные зарубежными системами ЧПУ, предназначенными для обработки деталей с точностью наиболее востребованной в настоящее время большинством машиностроителей, показывают более высокую производительность в сравнении со станками, оснащенными отечественными системами ЧПУ, по ряду причин. Первая из них – зарубежные системы обладают более продуманным и дружелюбным интерфейсом, что позволяет оператору более легко и оперативно реагировать на возникающие ситуации при обработке деталей. Помимо этого зарубежные системы ЧПУ могут оснащаться дополнительными опциями. Британские компании – *Delcam* и *Renishaw* помогают множеству компаний повысить качество своей продукции в сегодняшней конкурентной производственной среде. *Delcam* и *Renishaw* – это компании, получившие всемирное признание в качестве лидеров производителей метрологических систем. Эти компании кроме прочего предоставляют услуги в производстве оснастки, прецизионной обработке деталей на станках, где параметры качества поверхностного слоя деталей должны соответствовать наивысшим стандартам качества. Речь идёт, прежде всего, об автоматической привязке инструмента к координатам, измерителей вылета инструмента и т.д., которые существенно снижают время настройки станков перед началом работы, и многими другими. В связи с этим следует отметить, что привязка инструмента у «*Siemens*» возможна с одного касания по нескольким координатам, а у системы фирмы «*FANUK*» для каждой координаты операция привязки повторяется. У ЧПУ фирмы «*FANUK*» нет конечных выключателей-ограничителей – эта информация хранится в оперативной памяти (ОЗУ) системы. Это обстоятельство, с одной стороны, увеличивает



надежность системы в процессе её эксплуатации, а с другой стороны – приводит к необходимости перезагрузки всей системы в случае системного сбоя.

При рассмотрении системы ЧПУ, предназначенной для обработки поверхностей деталей с особо высокой точностью (до 0,1 мкм), производительность системы определяется количеством используемых разрядов при расчетах (16-, 32- и 64-разрядные шины), при привязке к координатам и мощностью установленного в системе процессора. Из отечественных систем ЧПУ, предназначенных для обработки особо высокоточных поверхностей, можно упомянуть систему «Электрон», разработанную в НИИКон и производимую в НПО «Полус» (Новосибирск). Однако с 90-х годов прошлого века об этой системе ничего не известно.

Обмен информацией между процессором и остальными устройствами ЧПУ выполняет системная шина, которая включает в себя кодовую шину данных (КШД, англ. *Data Code Bus*), кодовую шину адреса (КША, англ. *Address Code Bus*) и кодовую шину инструкций (КШИ, англ. *Instruction Code Bus*).

КШД обеспечивает параллельную передачу всех разрядов числового кода (машинного слова) операнда, в том числе и кода команд управляющей программы.

КША необходима для параллельной передачи всех разрядов кода адреса ячейки основной памяти (англ. *Main Memory*) или порта ввода-вывода внешнего устройства, например, эвакуатор стружки, внешняя память, а также ЭВМ высшего ранга или локальная вычислительная сеть и др.

КШИ обеспечивает передачу инструкций (управляющих сигналов, импульсов) во все блоки ЧПУ, например, включение помпы для подачи СОЖ, блокировка дверей щитов защиты при включенном станке ЧПУ и др.

Большую роль в повышении производительности станка, оснащенного ЧПУ, играет механика. Быстрые холостые ходы (до 25000 мм/мин), гидравлические, пневматические и электромеханический и цанговые патроны, шариковые пары (ШВП), подшипники шпиндельных узлов, устойчиво работающие длительное время при частоте от 3000 об/мин, устройства подачи прутка в зону обработки, инструмент с повышенной стойкостью – все эти обстоятельства существенно увеличивают производительность станка, оснащенного ЧПУ зарубежного производства, по сравнению со станками с отечественными ЧПУ. Вместе с этим отечественные системы ЧПУ, например НЦ-31, используемые на станочном оборудовании, обрабатывающем мелкосерийные партии деталей (до 20–50 деталей), позволяют настраивать станок быстрее, чем при использовании систем ЧПУ зарубежного производства. Однако при обработке партий деталей от 200 и более отечественные числовые системы управления не могут конкурировать с зарубежными ЧПУ.

## 5.1. Системная структура ЧПУ

Системы числового программного управления (железная часть) представляет собой простейший компьютер, ориентированный на решение определенных задач. Как любой компьютер блок ЧПУ имеет алгоритмические языки двух уровней. Первый уровень (самый простейший) предназначен для организации

структуры самого компьютера, а второй уровень представляет язык более высокого уровня, ориентированный на пользователя системы числового программного управления. Язык первого уровня предназначен для системного программирования, которое осуществляется специалистами, следящими за исправным функционированием самой системы ЧПУ. Как правило, языком первого уровня в системе ЧПУ является *ASSEMBLER*. Работа с этим языком требует определенной подготовки и навыков. С языками первого уровня работают специально подготовленные программисты, а не операторы ЧПУ. К задачам этих языков можно отнести экономию оперативной памяти (ОЗУ) системы ЧПУ, характеризацию структуры станка, приоритетность выполнения команд, определение зоны безопасности.

Языки второго уровня предназначены для написания пользовательских программ, то есть программ, которые пишет программист или оператор ЧПУ и которые предназначены для управления исполнительными органами станка при обработке детали. Программы, написанные с помощью языков второго уровня, должны предоставлять возможность программисту или оператору вносить коррективы в тело программы в процессе технологической обработки детали. При этом человек, осуществляющий такие изменения в программе, не должен быть высококвалифицированным специалистом. Это достижимо в том случае, если язык второго уровня имеет программный интерфейс максимально дружелюбный по отношению к пользователю. Такие языки есть в большом количестве. Практически каждая фирма, производящая системы ЧПУ, либо разрабатывает свой узкоспециализированный язык второго уровня, либо использует алгоритмический язык уже известный и хорошо зарекомендовавший себя при решении аналогичных задач. К отличительным особенностям таких языков второго уровня можно отнести большой расход оперативной памяти (ОЗУ) системы ЧПУ.

Современные станки с числовым программным управлением представляют собой сложные механотронные системы. Для обслуживания подобной техники необходимы высококвалифицированные специалисты как во время наладки и запуска оборудования, так и на этапе эксплуатации. Специалисты такого уровня обычно находятся в удаленных сервисных центрах. Таким образом, потребность в диагностическом программном обеспечении, с помощью которого возможно заниматься дистанционным анализом входных и выходных сигналов электроавтоматики, располагая конфигурацией и результатами измерений, достаточно велика. Система диагностики должна уметь считывать сигналы, запоминать результаты измерений вместе с результатами конфигурации измерений, выполнять разнообразные операции над измеренными сигналами, распечатывать в удобном виде осциллограммы измерений. Помимо этого, результаты диагностирования должны быть запротоколированы с помощью генерации отчетов (протоколов) для печати сигналов и конфигураций измерений системы диагностики. На практике это означает следующее.

Каждый станок с ЧПУ представляет собой устройство, оснащенное сложной электроавтоматикой, у которой в процессе эксплуатации станка возможны обрывы проводов, окисление контактов, выход из строя датчиков и т. д. Обнаружение таких неисправностей – процесс очень трудоёмкий и может быть связан с демонтажом электрошкафов станка.

Для того, чтобы минимизировать возможный ущерб станку при поиске неисправности, был разработан программный комплекс SIPROM (для систем ЧПУ производства «Балт-Системс») [36, 37], который позволяет методом эмуляции<sup>23</sup> системы автоматизированного проектирования, технологической подготовки производства и инженерного анализа проверять все основные соединения между элементами электроавтоматики станка. Управляющая программа (УП) по требованию оператора создает некий управляющий импульс, соответствующий инициализации<sup>24</sup>.

Приём в программировании, когда некоторая ресурсоёмкая операция (создание объекта, вычисление значения) выполняется непосредственно перед тем, как будет использован её результат. Таким образом, инициализация выполняется «по требованию», а не заблаговременно. Аналогичная идея находит применение в самых разных областях: например, компиляция «на лету» и логистическая концепция «Точно в срок». Частный случай ленивой инициализации – создание объекта в момент обращения к нему – является одним из порождающих шаблонов проектирования (например, использование стандартных элементов из библиотек САМ-систем). Как правило, он используется в сочетании с такими шаблонами как фабричный метод (англ. *Factory Method*), также известный под названием виртуальный конструктор. В этом случае используют только интерфейс, не прибегая к конкретным включениям системы. Работа некоторого элемента электро-автоматики станка, например датчика, привода задней пиноли токарного станка, привода вентилятора и др. только симулируется, сам элемент электроавтоматики не включается в силовую сеть. В этом случае программный комплекс *SIPROM* выводит на монитор (фиксирует на жестком диске, *Flash*-памяти и т.д.) информацию о том, дошел ли управляющий сигнал до необходимого исполнительного элемента электроавтоматики. Такая диагностика позволяет существенно повысить достоверность поиска неисправностей и снизить время их поиска. Точность диагностики неисправности станка определяется количеством датчиков, которые позволяют выявить неисправный узел и блокирующие ситуации (ошибка в тексте программы, поломка инструмента и т. д.), которые могут привести к поломке станка.

Таким образом, программный комплекс *SIPROM* есть программа управления электроавтоматикой, представляющая собой интерфейс, реализующий логический протокол (связь) между базовым (железным) протоколом и логическим протоколом. Интерфейс есть комплекс программных и железных (элементы электроавтоматики) средств, осуществляющих связи между, например, оператором станка ЧПУ и исполнительными органами станка.

Для понимания работы автоматизации и телеметрии станка с ЧПУ, а также для диагностики возможных поломок электрики (обрывы, окисление, выход из строя датчиков и т.д.) на станках, оснащенных стойками Siemens, предусмотрена программа *Step 7 90* [38, 39], работающая по жесткому алгоритму и позволяющая определять произошедшие поломки. Программа *Step 7* может быть

---

<sup>23</sup> Эмуляция (англ. *emulation*) – воспроизведение программными или аппаратными средствами либо их комбинацией работы других программ или устройств.

<sup>24</sup> Отложенная (ленивая) инициализация (англ. *Lazy initialization*).

приобретена как дополнительная опция, или входит в базовую конфигурацию системы ЧПУ. Помимо этого, стойки ЧПУ Siemens старых моделей могут оснащаться программами визуализации технологического процесса обработки, на новых версиях ЧПУ Siemens программы визуализации технологического процесса входят в базовую комплектацию системы ЧПУ.

Аналогичные средства диагностирования состояния всего комплекса ЧПУ имеют место и на системах ЧПУ других производителей «DELEM» (Голландия), «Heidenhein» (DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH, Германия), «Fagor» (Испания), «FANUC» (Япония), «Mitsubishi» (Япония).

Языки высокого уровня предназначены для общения пользователя (оператора) с системой ЧПУ. Языки высокого уровня позволяют оператору станка с ЧПУ разрабатывать и осуществлять технологию обработки деталей различной сложности. Эти языки позволяют оператору разветвлять программу в зависимости от промежуточных результатов обработки деталей, осуществлять редактирование программы с помощью графического редактора, поддерживать постоянными режимы резания, использовать организуемые оператором и вложенные циклы, существенно снижающие объем управляющих программ и время их написания и отладки. Именно алгоритмический язык определяет степень дружелюбности системы к пользователю, то есть программный интерфейс. В качестве примера можно привести ситуацию, связанную с возникновением некоторой конфликтной ситуации в обслуживании станка или в организации управляющей программы. Ошибка, останавливающая выполнение управляющей программы или останавливающая работу станка (на некоторых зарубежных системах ЧПУ такая ошибка сопровождается предварительным сообщением в виде «ALARM»<sup>25</sup>). Далее в меню монитора появляется расшифровывающее ошибку сообщение. Это может быть, например, текст: «Проверьте журнал обслуживания» либо «Осуществите такую-то операцию обслуживания». У каждого производителя систем ЧПУ форма сообщения (комментария) может отличаться по форме, но быть одинаковой по смыслу. Такая осмысленная забота о состоянии станка со стороны системы ЧПУ помогает оператору станка следить за вверенным ему оборудованием и свести к минимуму привлечение к обслуживанию станка других специалистов, например механиков, электриков и электронщиков. Одним из возможных вариантов поддержания со стороны системы ЧПУ в работоспособном состоянии станка можно рассматривать мониторинг (слежение) за состоянием масляного фильтра. Станок не может измерять загрязненность фильтров сам, эта функция работает как календарное напоминание, подобно тому, как в принтере выводится сообщение, например: «Закончились чернила в черном картридже». Отметим, что эта функция слежения за состоянием станка может быть предусмотрена в системе ЧПУ, но её может и не быть. Например, на системе ЧПУ «Siemens Sienumerick 810 C» она имеет место, а на более ранней системе этого же производителя «Sienumerick 810 D» этой функции нет.

Фирмы разработчики систем ЧПУ создают всё более изощренные программные интерфейсы, чтобы сделать свою продукцию более конкурентной.

---

<sup>25</sup> Сообщение на мониторе стойки (консоли) ЧПУ об ошибке в системе.

Речь идет, прежде всего, о создании программных средств (интерфейса), которые позволили бы свести к минимуму ошибки оператора при программировании процесса обработки детали и обслуживания станка. В этом случае система разрабатывает без участия человека технологию обработки конкретной детали, что обеспечивает низкую трудоёмкость при необходимом качестве обработки. Различные фирмы производители и разработчики систем ЧПУ решают названные проблемы по-разному. Однако, несмотря на различия в программных реализациях и в алгоритмах, все разработчики систем ЧПУ создают свой вычислительный комплекс или используют *CAD* и *CAM*-системы, получившие уже благоприятные отзывы пользователей. Для работы на таком вычислительном комплексе инженеры-конструкторы предварительно готовят чертежи и эскизы, содержащие информацию о точках и позициях в трехмерной системе координат. По этим значениям эти чертежи компилируются (переводятся) в машинный код для гибких производственных линий (ГПЛ) и вводятся в память системы ЧПУ. При этом компиляция графической информации о детали может быть преобразована в цифровой вид с помощью сканера, если чертеж детали выполнен в определенном стандарте. В настоящее время чаще графическая информация о детали преобразуется в цифровую модель путем определения точек или линий пересечения, касания, перегиба и т.д. некоторых канонических линий или поверхностей (плоскости, канонической или цилиндрической, сферической или винтовой поверхностей и др.).

Координаты таких линий и точек определяют с помощью *CAM*-системы. Далее *CAD*-система вычислительного комплекса разрабатывает технологию обработки детали и преобразует *3D* модель в определенную последовательность движений, используемых при обработке инструментов.

Выработанная технология, полученная с помощью *CAM*-системы, включает в себя выбор инструментов, режимы обработки, количество перестановок и т.д. Разрабатываемая технология обработки детали с помощью *CAD*-системы может учитывать размеры заготовки и жесткость детали. Вместе с этим окончательное принятие решения о выборе той или иной технологии обработки детали вычислительный комплекс доверяет человеку. Стоимость таких вычислительных комплексов весьма значительна (может достигать до 100000 евро). Появление таких вычислительных комплексов, как обязательный атрибут станков с ЧПУ, объясняется не только сложностью изготавливаемых деталей, но и возросшей ценой на электроэнергию. Проведенные исследования показали, что изготовление деталей из металла требует большого количества станков и э/энергии. В случае изготовления этой же детали прессованием количество используемой электроэнергии значительно меньше, но в этом случае требуется изготовление качественной пресс-формы. Именно для изготовления пресс-форм с помощью станков с ЧПУ требуются вычислительные комплексы, использующие *CAM* и *CAD*-системы. В заключение отметим, что вычислительные комплексы разрабатывают технологические программы обработки деталей на станках, использующих различные схемы и физические принципы съема материала детали (токарных, фрезерных, электроэрозионных, горизонтальных резервных, вертикальных токарных станках, координатно-расточных станках, обрабатывающих центрах и т.д.).

Визуализация процесса обработки на компьютере *PC*, технологическая доработка сгенерированной *CAD*-системой управляющей программы на компьютере *PC*, передача файлов, полученных в результате сканирования чертежей в систему ЧПУ, и многие другие операции требуют специальных интерфейсов между человеком, компьютером *PC* и системой ЧПУ. Доработка сгенерированной программы включает в себя возможные изменения режимов обработки, а также изменения последовательности выполнения той или иной технологической операции. Такие изменения проводят на основе имеющегося практического опыта. На станках с ЧПУ могут быть применены различные виды адаптивного управления, обеспечивающие оптимальное значение одного или нескольких параметров (составляющая силы резания; температуры инструмента или детали; шероховатость обработанной поверхности; оптимальные режимы резания; уровень шумов, вибраций и др.).

Такие интерфейсы, обеспечивающие визуализацию и корректировку сгенерированной управляющей программы, разработаны многими фирмами разработчиками и изготовителями систем числового программного управления. Приведем в качестве примера такого рода интерфейс, официально поставляемый в Россию фирмой *Siemens*.

Система *Simatic Win CC (Windows Control Center)* [40] – это компьютерная система человеко-машинного интерфейса, работающая под управлением операционных систем *Windows 2000/XP*. Система *Simatic Win CC* разработана для решения задач визуализации и оперативного управления в различных областях промышленного производства. Система оснащена мощным интерфейсом для связи с процессом, пригодна для работы со всем спектром продуктов (изделий) *Simatic (Siemens)*, обеспечивает парольный доступ к управлению процессом, обладает высокой производительностью. Базовая конфигурация системы обладает высокой универсальностью и может быть использована для построения систем управления самого разнообразного назначения.

На основе *Win CC* могут создаваться как простейшие системы человеко-машинного интерфейса с одной станцией оператора, так и мощные многопользовательские системы, включающие в свой состав десятки станций. Поддержка стандартных интерфейсов *OLE*, *ODBC*, *OLE* и *SQL* обеспечивает универсальность и открытость *Win CC*, позволяет использовать ее в сочетании с любым другим программным обеспечением. Базовая конфигурация системы включает в свой состав набор функций, позволяющих выполнять событийно управляемую сигнализацию, архивирование результатов измерений, регистрировать технологические данные и параметры настройки конфигурации, функции управления и визуализации. Целый ряд функций может быть реализован с помощью встроенных *ANSIC* компилятора и *Visual Basic – script*. Кроме того, базовая система может дополняться опциональными пакетами *Win CC* и *Win CC Addons*. *Win CC* легко интегрируется во внутреннюю информационную сеть использующей её компании. Это снижает затраты на ее внедрение и повышает гибкость информационной системы.

Форматы или расширение некоторых файлов используются для импорта или экспорта определённой информации из одной программной среды в другую. Например, в одной из *CAM*-систем была сгенерирована управляющая

программа (УП), после чего пользователю необходимо увидеть симуляцию процесса обработки детали. Для этого сгенерированная программа из программной среды САМ-систем должна быть экспортирована в программную среду визуализации траектории движения инструмента. Каждая из используемых программных сред (САМ-систем и программное обеспечение визуализации или САД-система и САМ-система) работает с файлами определённого формата. Для понимания файла одной программной среды в другой программной среде существуют специальные программные средства, называемые конвертором. Конвертор преобразует формат файла, сформированного в одной программной среде в некоторый нейтральный формат, например *.iges* или *.step*, которые могут быть прочитаны (восприняты) другой программной средой. Обычно любые САД/САМ-системы имеют встроенные конверторы, возможности которых, вообще говоря, ограничены.

В связи с этим возникает вопрос, почему не существует одного универсального формата, который был бы приемлем для любого программного продукта. Здесь несколько причин. Одна из них состоит в том, что программные обеспечения могут решать настолько разные по своему назначению задачи, что разработка универсального формата либо слишком сложна, либо связана с большими финансовыми затратами, либо совсем невозможна. Рассмотрим графические форматы для растровых картинок (фотографий): *BMP, DjVu, GIF, HD Photo, ICO, ILBM, JBIG, JBIG2, JPEG, JPEG 2000, JPEG-LS, OpenEXR, PCX, PNG, PSD, Portable anymap, RAW, TGA, TIFF, WBMP, XCF*. Для рисунков в виде схем, диаграмм, чертежей используются статичные векторные форматы: *AI, EMF, EPS, PDF, XPS, PostScript, SVG, WMF, CDR*. Если создаётся рисованный мультфильм, то используются растровые анимационные форматы: *APNG, GIF, MNG, AVI*. Для визуализации движения некоторой точки, например вершины режущей кромки инструмента, используют векторные анимационные форматы: *SVG, SWF*.

Каждый из этих форматов имеет свои достоинства и недостатки, но для решения конкретной задачи.

В таком случае возникает вопрос: почему нет единого формата для программных продуктов, разработанных для решения аналогичных или родственных задач, например, для САД-системы, используемых для твёрдотельного моделирования? В отсутствие такого формата заинтересованы фирмы-разработчики программных продуктов. Если пользователь приобрёл какое-либо программное обеспечение, то для модернизации впоследствии этого программного продукта он будет вынужден обратиться к его разработчику, т.е. к фирме, продавшей ему данное ПО.

Тем не менее, существуют форматы, которые являются приемлемыми для большинства программных сред. Среди них наиболее часто упоминаются *.iges, .stl, .dxf, .step*, которые часто называются обменными форматами. Задачей этих форматов является обеспечение ввода математических моделей, подготовленных в любых известных САПР, включая твердотельные. Достоинством этих форматов является безошибочный импорт (без потерь) информации [29].

## 6. ОБСЛУЖИВАНИЕ СТАНКОВ С СИСТЕМАМИ ЧПУ

Обслуживание станков во многом совпадает с обслуживанием универсальных станков в той части, которая касается обслуживания механики. После работы станка его необходимо тщательно вытереть чистой ветошью. Направляющие станка необходимо после этого смазать маслом. Там, где есть пресс-маслёнки (футурки), полить их с помощью масленки также маслом.

Оборудование с блоком ЧПУ более требовательно к условиям эксплуатации, а именно к влажности, температуре и запыленности помещения, где находятся станки.

Большое количество подготовительных операций, предшествующих работе на станке, проводит оператор станка с ЧПУ. Особенность эксплуатации станков с ЧПУ состоит еще в так называемом рекуррентном режиме (другое название – «поиск нулевой точки»). Смысл его состоит в том, что для успешного функционирования блока ЧПУ системе управляющих программ необходимо указать точку отсчета всех возможных перемещений. Для этого на станке установлены специальные линейки с закрепленными на них упорами, которые входят в соприкосновение с конечными выключателями. Часть упоров на линейке, соответствующей некоторой оси системы, ограничивают наибольшие перемещения в положительном и отрицательном направлениях, а один среди них предназначен для указания системе внутреннего «нуля» (для выхода в ноль). Таким образом, после подключения станка к рабочему напряжению, загрузки оператором системного блока ЧПУ системой управляющих программ какого-либо производителя, необходимо для каждой оси, используемой в работе станка, указать точку отсчета. Эту операцию, как правило, делает оператор. Для этого он должен вывести в ручном режиме рабочий орган станка в некоторое заранее определенное положение (находящееся перед конечным выключателем, соответствующим нулевой точке данной координаты) после чего ему необходимо на пульте управления нажать специальную кнопку, соответствующую координате, по которой должен будет указан ноль системы. После этого оператор нажимает кнопку, соответствующую операции вывода системы в ноль, и затем – на кнопку «Пуск». Далее по алгоритму, зашитому (введенному) в системную часть программ ЧПУ, начинается движение рабочего органа станка по предварительно указанной координате станка. В результате этого движения упор на линейке, соответствующей выбранной координате, входит в соприкосновение с контактным датчиком. Сигнал с этого датчика и сообщит системе ЧПУ о нуле выбранной координаты. Такая операция проводится для каждой координаты станка (в том числе для координат, осуществляющих круговое движение, например координата «С»). На новейших системах ЧПУ управляющая программа (УП) сама в определенной очередности осуществляет выход в ноль всех координат станка. Однако в этом случае рабочие органы станка должны быть предварительно выведены в определенное положение. На старых системах ЧПУ, например на «Электронмаш НЦ-31», операция выхода в ноль (рекуррентный режим) отсутствует. Ноль на этой системе определен в системе, то есть электронным образом. Такой метод задания



рекуррентной точки (нуля системы) менее точен и помехоустойчив в сравнении с заданием нуля системы с помощью конечных выключателей. Любое колебание напряжения в силовой сети, электромагнитные паразитные поля могут изменить положение точки системного нуля, что в свою очередь может привести к потере точности обработки.

Помимо оператора станок ЧПУ обслуживает наладчик, его обязанности также определяют регламентирующими документами [41-46]. При работе на отечественных станках ЧПУ, оснащенных отечественными системами управляющих программ, наладчик должен уметь вывести систему в ноль (в рекуррентный режим) при включении станка, заменить изношенный или сломавшийся режущий инструмент. Если предстоит замена резца, то наладчик должен выставить резец, затем привязать его по координатам, ввести необходимые коррективы в систему ЧПУ. Выставить резец – означает установить его в револьверной головке таким образом, чтобы вершина резца находилась в горизонтальной плоскости, проходящей через ось вращения шпинделя станка. Делается это с использованием рейсмуса, который предварительно настроен на размер, соответствующий высоте оси шпинделя над основанием направляющих. Рейсмус устанавливается на плоскость направляющих и после этого с помощью прокладок вершина резца совмещается с указателем рейсмуса. Следующий этап замены резца состоит в его привязке по координатам «X» и «Z». Смысл этой операции состоит в следующем. Протачивается деталь, после чего резец отводят от детали по оси «Z» не меняя координату «X», затем останавливают вращение шпинделя и с необходимой точностью измеряют диаметр проточенной детали. Измеренный размер вводят как коррективу по оси «X» с помощью специальных команд в файл характеристики этого инструмента. Аналогичным образом вводят коррективу по оси «Z». Отличие состоит в том, что протачивается торец детали, после чего данному положению резца присваивается конкретное значение на координате «Z», формируемое датчиком. Отметим, что замена резца может произойти и до его поломки. Известно, что резцы с напаянной режущей пластиной имеют коммерческую стойкость, приблизительно равную 60 минутам. Любая современная система ЧПУ имеет опцию (возможность) останавливать процесс обработки детали до того, как некоторый инструмент исчерпает свою коммерческую стойкость. Работа прерывается до тех пор, пока не будет заменен инструмент. Это делается для того, чтобы сломавшийся инструмент не испортил обрабатываемую деталь. В том случае, если используется режущий инструмент со сменными режущими пластинами, операции выставления резца и его привязки к заданным координатам могут не производиться. Объясняется это тем, что сменные пластины выполняются с высокой точностью, поэтому их замена не меняет в определенном поле допуска привязки по координатам и не требует необходимости выставить резец. В более поздних системах ЧПУ привязка инструментов осуществляется с помощью специального электронного блока, в основу которого может быть положен оптический, индукционный, пневматический принципы [47, 48]. Тело резца со сменными пластинами выполнено с высокой точностью, в связи с этим выставлять резец с помощью пластин нет необходимости. По этим причинам

необходимость в наладчике при установке и привязке к координатам резца отпадает. Вместе с этим в условиях цеха, где имеет место большое количество станочного оборудования с ЧПУ, наладчик необходим. Его квалификация такова, что он способен в процессе обработки детали корректировать программу обработки, останавливать её выполнение, менять какие-либо параметры обработки (подачи, частоту обработки и т. д.). Следует отметить, что на практике нет жесткого распределения обязанностей между наладчиком и оператором. Часто и наладчик, и оператор способны написать и программу обработки детали, но на предприятиях, продукция которых используется на особо ответственных изделиях (космос, оборонная промышленность, авиация и т. д.), пользовательские программы пишут специальные люди, несущие ответственность за свою программу. Если в связи с этим упомянуть новейшие системы ЧПУ, то идеология последних управляющих систем такова, что система сама разрабатывает технологию обработки детали и сама пишет пользовательскую программу, поэтому надобность в программистах, пишущих пользовательские программы, отпадает. В связи с этим следует сказать, что пользовательские программы, написанные системой управляющих программ, чаще всего не оптимальны с точки зрения трудоемкости обработки. Однако снижение трудоемкости в этом случае обеспечивается за счет режимов обработки деталей. На современных станках шпиндель вращается с частотой свыше 3000 об/мин, а скорость холостых ходов исполнительных механизмов составляет 15000 – 18000 мм/мин. По этой причине увеличение трудоемкости обработки детали за счет неоптимальной организации пользовательской программы системой ЧПУ компенсируется с большим запасом режимами обработки, которые обеспечиваются новыми инструментами, подшипниками, ШВП (шарики-винтовые пары), новыми материалами (интегранные станины, полые керамические шарики подшипников) и т. д.

Станок с ЧПУ является сложным изделием машиностроения, для успешной работы на нём необходимо привлекать к его обслуживанию ряд квалифицированных специалистов. Как ранее уже было выяснено, необходимы программисты пользователи и системные программисты. Непосредственно на станке с числовым программным управлением работает рабочий, называемый оператором станка с ЧПУ (на современных станках с ЧПУ такой рабочий зачастую имеет высшее образование). Многие производители немецкого высокотехнологичного оборудования считают, что для работы на современном станочном оборудовании недостаточно знаний без дополнительной подготовки и университетского образования. В круг его обязанностей входит в первую очередь установка заготовки детали на стол или в патрон, далее оператор запускает программу обработки детали (управляющую программу) и после окончания программы, если это не делает, например, рука-манипулятор или робот, снимает обработанную деталь. Кроме того, оператор, если это не делает периодически система ЧПУ, вносит в файлы характеристики коррективы на износ режущего инструмента, делает это он по мере изменения контрольного размера обрабатываемой детали. В том случае, если обработка детали требует использования двух программ, то оператор должен уметь по мере надобности вызы-

вать одну или другую программу. Все обязанности операторов станков с ЧПУ регламентируются специальными документами, формируемыми на конкретном производстве. Уровень требований определяется станочной базой и номенклатурой изделий, которые выпускает предприятие. Обычно оператор станка может обслуживать один или несколько (до трех) станков.

При серийном изготовлении на станках с ЧПУ деталей с заданной и гарантированной точностью, а также с заданными качественными параметрами поверхностного слоя написание управляющей программы регламентируется расчетно-технологической картой (РТК). При использовании САМ-систем РТК генерирует сама система (в режиме «Мастер»). Далее программист совместно с технологом могут скорректировать предложенный системой вариант РТК. В более продвинутом варианте программист совместно с технологом сами организуют в рамках САМ-системы РТК. Информация о РТК хранится в САМ-системе, может быть распечатана на бумажном носителе информации или скопирована на любой другой носитель информации.

К обязанностям программиста, обслуживающего управляющую (пользовательскую) программу, относится разработка необходимых операций и движений исполнительных органов станка, необходимых для обработки детали в соответствии с требованиями чертежа. Программа, которую пишет программист учитывает, имеющийся в наличии инструмент, оснастку, квалификацию и пристрастия<sup>26</sup> оператора, материал заготовки и многие другие обстоятельства, связанные с обслуживающим персоналом и технологическими возможностями используемого станочного оборудования. При обработке особо ответственных деталей текст используемых программ хранился в технологическом паспорте каждой детали [49]. При этом текст программы подписывался программистом, который её разрабатывал. С появлением САД и САМ-систем такая процедура в настоящее время практически не встречается. Практика показала, что для создания качественной управляющей программы лучше использовать хорошо зарекомендовавшие себя САД и САМ системы. Вместе с этим следует отметить, что написание пользовательских программ программистом (без участия средств автоматизации) ведет к созданию программного продукта, более оптимально организованного в сравнении с УП, полученной с помощью САД и САМ систем. При серийном производстве и работе операторов со сдельной оплатой труда УП предпочитают писать «вручную», то есть с помощью программиста. Правда, в этом случае станок может работать на границе своих технологических возможностей, декларируемых паспортом используемого станочного оборудования. Современный производственный опыт показывает рост участия станков с ЧПУ как в серийном, так и в мелко- и среднесерийном производстве. По этой причине для написания УП будущее за использованием САД/САМ-систем.

---

<sup>26</sup> В отношении пристрастий оператора можно вспомнить поговорку программистов о том, что легче написать новую программу, чем разобраться в программе, написанной кем-то другим.

Для производства, где приоритетом является не снижение трудоёмкости, а повышение качества обработанной детали, важнее не время, затраченное на обработку, а качество обработки, применяют международный стандарт качества *ISSO 9000*. В основу этого стандарта положено качество обработки деталей и лишь потом – трудоёмкость их обработки. Бездефектное производство актуально в настоящее время и по той причине, что мировая экономика вступила в эпоху дефицита ресурсов.

Обслуживание станков с ЧПУ невозможно осуществлять без системных программистов, которые настраивают систему ЧПУ на определенную конфигурацию станка (токарный – фрезерный, горизонтальный или вертикальный токарный станок и т.д.) и режимы работы. Участие в работе новейших станков с ЧПУ системных программистов сведено к минимуму, т.к. система числового программного управления имеет выход в локальную компьютерную сеть или в Интернет, что позволяет настраивать (конфигурировать, характеризовать) систему из головного центра без участия человека. Головной компьютер сети не только настраивает систему, но и осуществляет регулярно диагностику станка, таким образом заранее предупреждая возможные ошибки. Конечно, и в таком случае полностью исключить работу системного программиста нельзя, но она происходит не на уровне конкретной системы ЧПУ, а на уровне головного компьютера сети.

Ориентируясь на отечественные станки и системы ЧПУ, можно утверждать, что в круг обязанностей системных программистов входит в первую очередь настройка самой системы, которая может включать в себя определение, например, скоростей движения на холостых ходах, времени эксплуатации инструмента, зон допустимых движений узлов станка, способов документации (ТД) и передачи информации, организации рабочего пространства экрана монитора системы и многие другие возможности. Особо нужно сказать об определении так называемых зон «ОК». Эти зоны определяют чувствительность датчиков положения по каждой из осей системы, то есть это определенный допуск на перемещения рабочих органов станка. Величина этого допуска зависит от паспортной точности станка, а также от степени износа его рабочих органов. Системный программист определяет зону «ОК» для того, чтобы привести в соответствие точность механики станка и точность измерения перемещений датчиками системы. В противном случае система ЧПУ может возбуждаться и в дальнейшем отключаться в аварийном режиме.

Обслуживание станков с ЧПУ предполагает использование электриков и специалистов в электронике. Эти специалисты часто работают вместе с системным программистом или выполняют сами частично обязанности системного программиста (диагностируют систему ЧПУ и исполнительные органы станка с помощью функции *SIPROM*). После обнаружения неисправности, к числу которых можно отнести замену севших резисторов и высохших конденсаторов в схемах электроавтоматики, настройку приводов постоянного тока, настройку контактных датчиков-ограничителей и т.д. Использование в станке с ЧПУ приводов, использующих электродвигатели постоянного тока, ставит обслуживающий персонал станочного оборудования с ЧПУ перед необходимостью при-

глашать электриков и специалистов в электронике как минимум раз в полгода. Это объясняется тем, что используемые магниты в электродвигателе со временем меняют свои свойства, по этой причине для стабильной работы привода станка необходимо налаживать схемы электроавтоматики, что и осуществляет электрик или электроник. К поломкам электроавтоматики, встречающимся достаточно периодически в отечественных условиях эксплуатации станков с ЧПУ, можно отнести поджог контактов силовой электропроводки. Объяснений тому может быть много. Это, во-первых, колебания напряжения в силовой электросети, использование устаревших моделей коммутационных устройств и т. д. Поджог контактов силовой электросети происходит, как правило, одновременно с выходом из строя плат или платы электроавтоматики. В этом случае, например для приводов болгарского производства «КЕМТОР», в схемах электроавтоматики заменяют выгоревшие ёмкости, резисторы, операционные усилители и т. д.

В настоящее время на территории РФ работает немало станков полностью импортного производства. Обслуживание этого оборудования серьёзно отличается от обслуживания станочного оборудования отечественных производителей. Схемы и датчики электроавтоматики импортного оборудования отличаются высокой надёжностью и в случае выхода из строя они не ремонтируются, а заменяются новыми, при этом обслуживание электроавтоматики доверяется только специалистам, прошедшим сертификацию. Такого рода специалистов нет среди местных национальных кадров. Это означает, что, если сломался японский станок, его придется ремонтировать японец, а если сломался станок немецкого производителя, ремонтировать его будет немец. Мало того на станках импортных производителей часто устанавливают различного рода защиты, препятствующие несанкционированному проникновению в станок. Если такое проникновение будет обнаружено, то фирма производитель отказывается обслуживать такой станок. Здесь уместно заметить, что в станках импортного производства давно не используются привода с электродвигателями постоянного тока, как морально устаревшие [50, 51]. Взамен им пришли высокомоментные электродвигатели с цифровым частотным управлением.

Помимо электрических комплектующих станков с ЧПУ из строя выходит также механика. К числу поломок, встречающихся наиболее часто на станках отечественного производства, связанных с механическими узлами и агрегатами, можно отнести следующие: износ ШВП, направляющих, износ используемых зубчатых зацеплений, поломка револьверной головки, нарушение настройки задней пиноли и т. д. Возможны также протечки используемого сжатого воздуха и масла. В последнем случае для устранения поломки привлекают помимо механика и гидравлика. На производственных участках со станками ЧПУ обычно существует служба механика, которая следит и поддерживает работоспособность станков с ЧПУ. Механики следят также за наличием масла в системе смазки, за наличием СОЖ в системе полива, за качественной уборкой станка после смены. Помимо этого в паспорте каждого станка указаны сроки и объёмы регламентных работ. Эти работы также должен осуществлять механик, прикрепленный к данному станку.

Для станков с ЧПУ зарубежного производства характерно то, что механические узлы и агрегаты ведущих производителей отличаются повышенным качеством, поэтому поломки случаются значительно реже при условии выполнения всех требований эксплуатации, оговоренных в паспорте станка. Помимо этого, система ЧПУ сама следит за временем и объёмом профилактических работ, которые должен выполнить механик. В случае нарушения регламента система может заблокировать работу станка с ЧПУ.

В связи с этим можно упомянуть о концепциях эксплуатации станка, которые закладываются в его конструкцию. Например, станки фирмы Haas предназначены для эксплуатации в три смены в течение двух лет. По истечении этого времени могут произвести по заявке собственника ремонт станка, но реализация такого ремонтного оборудования на территории США запрещена законодательно. Станки ряда немецких производителей ориентированы на длительный срок эксплуатации и допускают в дальнейшем ремонт, однако ряд немецких производителей станочного оборудования начинают исповедовать японский принцип конструирования станков, который заключается в строго оговоренном сроке эксплуатации станка, в течение которого он гарантированно сохраняет заявленные в паспорте технические характеристики. После истечения гарантированного срока эксплуатации станочного оборудования начинаются поломки сразу целого ряда узлов и агрегатов, что делает нерентабельным ремонт такого станка. Дешевле купить новый. В этом случае работа механиков сводится к минимуму. Тем не менее и этот минимум осуществляют сертифицированные специалисты – представители страны изготовителя станочного оборудования. Такого рода обслуживание импортного оборудования часто осуществляют в условиях, когда никто не может наблюдать за процедурой ремонта механических узлов и агрегатов.

Сравнение станков с ЧПУ, производимых в настоящее время в РФ и в индустриально развитых странах (Южная Корея, Япония, объединенная Европа, США) показывает, что производительность отечественных станков при обработке одной и той же детали и при прочих равных условиях уступает станкам зарубежным (даже не новым) почти на 100%. Причин тому много: мощность, скорость, крутящий момент приводов станка, поддержка форматов *HSM*, *HTML*, *MHTML*, кинематика, конструкция станка, конструкция рамы, жесткость и т. д., точность позиционирования. Рассмотрим каждую из этих причин более подробно:

- на импортных станках (даже не новых) число оборотов шпинделя, равное 3000 – 6000 об/мин, является рекомендуемым производителем, а не экстремальным, как на отечественных станках;

- оперативно вносятся в конструкцию станков конструкторские и технологические изменения, хорошо зарекомендовавшие себя на станках других производителей. Например, рама фрезерного станка «*Dugard Eagle VMC 1000*» почти идентична раме вертикальных центров «*Schaublin*», качество которых широко известно во всем мире;

- широко используются методы математического моделирования, позволяющие оптимизировать вес, например станины станка. Масса станины «*Deckel Maho DMC V 1035V*» более чем на полторы тонны легче такого же класса вер-

тикального фрезерного «*Dugard Eagle VMC 1000*», при этом точность обработки у обоих станков одинакова. Это стало возможно благодаря использованию методов математического моделирования. На американской фирме *Haas* пошли ещё дальше. У обрабатывающих центров, изготавливаемых этой фирмой, станина представляет из себя сварную конструкцию из гнутого профиля. Эта конструкция гарантированно обеспечивает в течение не менее двух лет жесткость обрабатывающего центра, соответствующую классу точности, заявленному в паспорте станка. Этот результат стал возможен также благодаря использованию методов математического моделирования конструкции сварной станины;

– холостые ходы, совершаемые исполнительными органами импортных станков, имеют минутную подачу не меньшую по величине 15000 мм/мин, на отечественных станках работа с минутной подачей более 9000 мм/мин приводит к ослаблению натяга гайки на ШВП, что сразу существенно снижает точность станка. Помимо этого, по мнению конструкторской группы КСПО, АО «Солитон» и ЗАО «Стан-Самара» [25] использование отечественных ШВП на холостых режимах со скоростями выше 6000 мм/мин нежелательно по следующей причине – низкая точность исполнения винта и гайки ШВП, особенно недостаточная точность выполнения шага винтовых канавок. Если шаг винта будет выполнен с допуском 4 мкм, а шаг гайки – с допуском 3 мкм, то при движении со скоростями больше 6000 мм/мин на поверхности винтовых канавок со стороны шариков будут воздействовать силы, превосходящие по величине предел текучести металла винта и гайки. Это в свою очередь приведёт к исчерпанию пластических свойств поверхностного слоя металла ШВП, включая и шарик, что станет впоследствии причиной выщелачивания контактирующих поверхностей. Образующиеся в зоне контакта микрочастицы способствуют ускоренному износу винтовых канавок и шариков ШВП. Отмечается также низкое качество отечественных сталей (обычно сталь 40X), имеется в виду неоднородный химический состав проката в пределах даже одной плавки;

– инструмент ведущих мировых производителей имеет коммерческую стойкость (выпускаются шпиндельные узлы и инструмент, в которых СОЖ подается по телу инструмента непосредственно в зону резания), позволяющую получать качественную поверхность на режимах резания не доступных отечественному инструменту, изготавливаемому даже на импортном оборудовании;

– зажим заготовок на импортном станке осуществляется с помощью гидро-, пневмо-, вакуумных, электростатических и электромеханических патронов, прутковых податчиков, отечественное станочное оборудование оснащалось в прошлом веке по заявке покупателя электромеханическими патронами отечественного производства;

– в базовой комплектации зарубежных станков имеется опция автоматической привязки и настройки инструмента, в 90-х годах прошлого века наша промышленность поставляла по заявке покупателя устройство для автоматической привязки инструмента, к которой было много претензий со стороны практиков;

– поиск неисправностей и диагностика станочного оборудования импортного производства отличается доброжелательным интерфейсом, для поиска не-

исправностей и их устранения на отечественном оборудовании часто нужны специалисты (механик, электрик, электроник и системный программист);

- зарубежный станок в базовой комплектации может быть оснащен системами слежения за качеством и периодичностью смазывания трущихся поверхностей и за качеством используемого масла (за состоянием масляных фильтра и магистралей) и СОЖ;

- помимо этого система ЧПУ напоминает оператору о необходимости проведения регламентных работ в соответствии с журналом ТО (технического обслуживания), в котором указана периодичность и список необходимых работ, как правило, после 8 часов работы, суток, недели, месяца, полгода и года работы станка. Химический состав зарубежного СОЖ не наносит экологического вреда окружающей среде, длительное время не скисает, не используя при этом ядовитых составляющих, имеет возможность к регенерации (например, *Castrol* производства Великобритании; *Blayser* (наиболее дорогая) [52] – СОЖ швейцарского производства, представляет собой водный раствор минерала шумгит, размолотого до фракции, имеющей размер частиц, соизмеримый с группой молекул этого минерала. Таким образом, СОЖ не ядовита, возможна её регенерация путем фильтрации через мембранные фильтры, а уникальные антисептические, трибологические и теплопоглощающие свойства шумгита позволяют длительное время эффективно использовать такую смазывающую – охлаждающую жидкость. Производители станочного оборудования рекомендуют в своих спецификациях, в руководствах по эксплуатации марку используемой СОЖ, которая может быстро высыхать и при этом способствовать качественной уборке станка методом самоомывания). На территории РСФСР СОЖ производили ПО «Ангарскнефте-оргсинтез», ПО «Горькнефтеоргсинтез», АО «Ивхимпром», Новокуйбышевский и Ярославский НПЗ, Оренбургский, Ростовский и СПб ОНПЗ и др. [53];

- использование мощных высокомоментных приводов, которые в РФ не производятся;

- использование широко новых материалов (синтегран, материалы, полученные с применением нанотехнологий);

- направляющие станков зарубежного производства выполняются из спецсталей, термообрабатываются и шлифуются. Направляющие отечественных станков, как правило, изготавливаются из чугунов, после чего шлифуются или, в случае ремонта, шабрятся;

- поддержание форматов *HSM*, *HTML*, *MHTML* означает, что управляющая программа (УП), предназначенная для конкретного станка, может быть сгенерирована и доработана вне системы ЧПУ, а затем полученная УП, преобразованная в указанные форматы (форматы электронных документов) через внешние носители может быть передана в систему ЧПУ.

Оснащение станков отечественного производства агрегатами и узлами зарубежных фирм повышает технологические возможности станочного оборудования и его стоимость до недоступных величин для российских потребителей. Такое положение вещей объясняет технологическое отставание Российской станкостроительной отрасли от мировых лидеров. В связи с этим можно ука-



зять и на то, что в течение нескольких десятилетий не проводились ни научные, ни исследовательские работы, более того – была разрушена сама инфраструктура, занимающаяся разработкой новой техники в станкостроении.

Рост цен на энергоносители привел к пониманию того обстоятельства, что обработка изделий большими сериями с применением токарного, фрезерного, зубонарезного и другого металлообрабатывающего оборудования существенно повышает их себестоимость. По этой причине экономически целесообразно изготавливать детали литьем или прессованием. Для этого необходимо изготавливать пресс-формы на обрабатывающих центрах. Для получения качественных изделий, получаемых прессованием, необходимо, чтобы качество поверхностного слоя пресс-формы было на порядок выше требуемых качественных параметров изготавливаемых деталей (прежде всего, это касается уровня шероховатости поверхности). Шероховатость поверхности обрабатываемой детали, а также точность сложной формы пресс-формы определяется быстродействием системы ЧПУ, а также теми технологическими возможностями, которыми эта система располагает.

Трудоемкость обработки деталей на станках с ЧПУ определяется не только конструкцией механической части станка, но и возможностями стойки ЧПУ. Механическая часть станка должна иметь возможность реализовать все опции программного обеспечения ЧПУ. Помимо этого, должно учитываться время обработки двоичной тысячи (1024) команд языка низшего уровня (коды) программного обеспечения ЧПУ. Но и здесь нет единого понимания какая система более быстродействующая. Например, фирменная инструкция стойки *Siemens 810D* сообщает, что время обработки блока команд из 1024 команд (англ. *Block machining time*) составляет 0,25 с, а у аналогичной по возможностям системе ЧПУ «*Heidenhain 530*» – 3,6 с.

Время, необходимое для расчёта у обеих систем ЧПУ промежуточной точки, в пределах одного кадра, более чем достаточное. Вместе с этим производственная практика показала: при финишной обработке прецизионных деталей предпочтительно выбрать систему *Siemens* (из двух рассматриваемых).

При минимальном расстоянии между кадрами в управляющей программе (УП), равном 0,01 мм, скорость по траектории составит у «*Heidenhain 530*» – 2,8 мм/с или 171 мм/мин ( $0,01/(3,6/1024) = 0,0005 = 2,8$  мм/с), а у *Siemens 810D* – 50 мм/с или 3000 мм/мин. Предварительная обработка деталей (например, пресс-форм) осуществляется с припуском, поэтому обеспечиваемая точность при предварительной обработке может быть меньше требуемой, а это позволяет увеличить минимальное расстояние между кадрами УП и снизить трудоёмкость обработки. Приведённый анализ показывает, что предварительную обработку деталей целесообразно осуществлять с использованием системы ЧПУ «*Siemens*».

Получистовую и чистовую обработку деталей из стали на сегодняшний день можно производить при хорошем инструменте на подачах до 3000 мм/мин. Для обеспечения таких подач у «*Heidenhain 530*» при *Block processing time* (время необходимое на загрузку 1024 кадров) – 0,5 мс, расстояние между кадрами УП должно быть – 0,25 мм, а у «*Siemens 810D*» при *Block processing*

*time* – 0,25 мс расстояние между кадрами должно быть – 0,5 мм. Здесь можно сказать, что использование системы ЧПУ «*Heidenhain*» на финишных операциях с минутной подачей 3000 мм/мин приведет к увеличению трудоёмкости обработки, но при этом будет обеспечена большая точность обработки деталей. Система ЧПУ «*Siemens*» при минутной подаче 3000 мм/мин на финишных операциях обеспечивает меньшую точность обработки (за счёт увеличения расстояния между кадрами), но обеспечивает меньшее время обработки детали.

При этом стойки «*Heidenhain*» не считаются медленными, по данным форумов в Интернет мнения специалистов и практиков разделились поровну при оценке быстродействия систем ЧПУ «*Heidenhain*» и «*Siemens*».

Любая современная система числового программного управления содержит многочисленные интерполяции (движение по прямой, окружности или по кривой). Все они необходимы для получения низкого уровня шероховатости сложных криволинейных поверхностей. Обрабатываемый материал, используемый инструмент часто определяют уровень шероховатости обработанной поверхности. Для обеспечения требуемого качества поверхностного слоя с помощью используемого инструмента необходимо выбрать метод интерполяции. Выбор определяется опытом оператора или в результате сравнительных экспериментов. *CAM*-система составляет управляющую программу (УП) обработки некой сложной формообразующей с использованием вида интерполяции, который определен в системе ЧПУ как необходимый, по умолчанию. Выбор оптимального метода интерполяции либо не может осуществить *CAM*-система, либо может использовать очень ограниченный набор возможностей из предоставляемых системой ЧПУ опций. Учитывая это обстоятельство, разработчики систем ЧПУ часто некоторые возможности своих стоек, например сплайновая интерполяция, предполагают использовать преимущественно в режиме ручного программирования (англ. *Manual Programming Techniques*). Хотя появившиеся в последнее время версии *CAM*-систем способны генерировать управляющие программы, использующие интерполяцию сложных поверхностей с использованием сплайнов и других методов аппроксимации. Например, оператор *ISO G05* экстраполирует траекторию движения инструмента на двадцать пять кадров вперед, в результате чего движение инструмента от кадра к кадру происходит без уменьшения скорости движения инструмента по команде *G09*. Это ведёт к снижению уровня шероховатости обработанной поверхности. Однако стоимость такого программного продукта достаточно велика, по этой причине при покупке *CAM*-системы её возможности должны быть согласованы с теми технологическими задачами, которые предполагается решать с помощью некоторой (имеющейся) стойки ЧПУ. Привлечение к разработке управляющей программы для обработки сложных поверхностей *CAM*-систем, способных генерировать технологические программы с привлечением различных методов аппроксимации сложных поверхностей с учетом обрабатываемого материала и используемого инструмента, существенно увеличивает трудоемкость обработки детали. При этом, надо отметить, что качество обработанной поверхности не всегда оправдывает ожидания.

В этом случае снижение трудоемкости обработки детали может быть достигнуто при использовании стоек ЧПУ, имеющих меньшее время обработки двоичной тысячи (1024) команд. Однако экономия времени здесь будет не очень заметной. Снижение трудоемкости обработки будет несомненной при оптимальном сочетании возможности стойки ЧПУ, используемых на станке приводов и возможностей механики станка.

Поскольку мировая экономика представляет огромный выбор любых комплектующих узлов и агрегатов станочного оборудования, то для достижения необходимой производительности обработки сложных поверхностей целесообразно привлечь консалтинговые фирмы, специализирующиеся на этих вопросах, которые помогут выбрать станок и необходимые его опции. Это неизбежно приведет к дополнительным финансовым затратам собственника станка, тем не менее это общемировая практика. В настоящее время активно обсуждается вопрос о создании некоторых контрольных деталей, после изготовления которых на различных станках можно комплексно судить о возможностях того или иного станочного оборудования. Однако уже сейчас можно сказать, что не следует ожидать появления таких контрольных деталей, форма и размеры которых будут регламентированы нормативными документами. Этим критерием оценки возможностей станочного оборудования будут пользоваться только практики.

Для выбора оптимальной стойки ЧПУ применительно к одному и тому же станку и обработке деталей одного типа (например, пресс-форм) необходимо оценить время обработки информации системой. Это время можно поделить на две составляющие: *Block Machining Time* – это время обработки блока кадров (обычно 1024) в интерполяторе или внутреннем процессоре (*CPU*), где могут быть *mbjdst* команды, а также битовые и словные команды, и *Block Transfer rate Time* – время, необходимое на загрузку 1024 кадра, к примеру – с жесткого диска или *Flash*. Существует ещё понятие *Block Processing Time* – это время, которое затрачивает интерполятор на расчет следующей промежуточной точки в пределах одного кадра. Производители ЧПУ в паспортах своих систем часто не указывают все временные параметры или указывают их отнесенными к различным основаниям.

Параметр *Block Processing Time* характеризует время, необходимое на загрузку 1024 кадра, к примеру – с жесткого диска или *Flash*. Часто возникает вопрос – зачем загружать информацию в систему ЧПУ быстрее, чем она может её обработать. Если система поддерживает стандарты *HSM*, *HTML*, *MHTML*, т.е. может работать в режиме электронной документации (ТД), когда чертеж детали может быть введен в систему через Интернет, то в это время *Block Processing Time* может существенно определять трудоемкость обработки детали. Для систем ЧПУ, поддерживающих стандарты *HSM*, *HTML*, *MHTML*, трудоемкость обработки детали должна быть как минимум не хуже, чем у системы ЧПУ, не поддерживающей *HSM*, *HTML*, *MHTML*. Это возможно при высоких скоростях передачи входящей от внешних носителей в систему информации, т. е. при малом времени *Block Processing Time*.

Время *Block Processing Time*, затрачиваемое интерполятором или внутренним процессором (*CPU*), складывается из интервалов времени, необходимых

для выполнения битовых и пословных команд. Из этого следует, что, не зная объёма (размера) и структуры используемых команд внутренней управляющей программой в системе ЧПУ, нельзя оценить время, затрачиваемое системой на выполнение УП. Для того, чтобы оценить порядок времени, необходимого для выполнения битовых и пословных команд, приведем информацию из паспорта системы «*Siemens Sinumerik S7*» [54].

*Machining time, typically in ms/KI for bit operations – 0,1;*

*Machining time, typically in ms/KI for word operations – 0,25.*

В заключение можно сказать, что развитие микроэлектроники позволит ожидать появления систем ЧПУ, позволяющих существенно снижать время обработки управляющих программ. В том, что касается механики, прогресс здесь менее очевиден. Уверенным можно быть только в одном, что для обеспечения рабочих подач величиной более 3000 мм/мин необходимо использование новых конструкций исполнительных органов, например, линейный электродвигатель [55].

Международный стандарт качества *ISO 9000* утверждает, что участие человека в производственном процессе ведет к гарантированному проценту брака, величина которого не может быть уменьшена в силу физиологических и психических особенностей человека. По этой причине развитие мировой экономики в условиях дефицита ресурсов диктует необходимость создания производств без участия человека. Продукция таких предприятий должна быть практически бездефектной. Для реализации этих целей разрабатываются стандарты качества, создаются принципиально новые станки, предлагаются принципиально новые инженерные решения, используемые ранее, например, в авиации. Предпринимаются попытки придать станочному оборудованию искусственный интеллект, выражающийся в придании станку помимо прочих функций, например, эмоций. Станок «боится» сделать брак, поэтому, подобно аккуратному механику, производит регулярно диагностику всех своих узлов и агрегатов. Отличие от человека в этом случае есть частота и количество самодиагностики, которые производит станок самостоятельно. По этим причинам брак, обусловленный поломкой отдельных узлов и агрегатов станочного оборудования, практически исключен.

Большое количество станков, как отечественных, так и импортных, в настоящее время имеют подвижные бронированные шины, в которых уложены силовые и информационные кабели. Постоянное перемещение суппорта станка приводит через определенное время к поломке медных жил проводов шины станка. Это в свою очередь ведет к потере работоспособности станочного оборудования. Ремонт в этом случае трудоёмок и связан с большими финансовыми и материальными затратами. Повышение надежности проводов шины станка было осуществлено путем использования технологии сжатия информации, разработанной для авиации. По одному информационному проводу могут передавать на разных частотах до 100 информационных каналов (например, от различных датчиков). В этом случае большое количество информационных проводов может быть заменено одним. Аналогичным образом осуществляют и силовую разводку по станку. Такое техническое решение позволит перемещаться исполнительным устройствам станка с более высокой скоростью, чем у станка с бронированной шиной.

Скорость, с которой появляются новые инженерные решения, часто вызывает чувство дезориентации. Устоявшиеся технические решения, которые до недавнего времени считались незыблемыми, могут чрезвычайно быстро стать не просто устаревшими, они могут стать анахронизмами. Одним из контрольных вопросов на зачете студентов является просьба указать принципиальное отличие в механике универсальных станков и станков с ЧПУ. Ожидается ответ – у станков с ЧПУ есть ШВП. Последние выставки металлообрабатывающего оборудования показывают, что ШВП доживают свои последние дни. На смену им приходят линейные электродвигатели, которые более надежны, более динамичны, более точны. Список преимуществ можно продолжать, пока широкое использование линейных двигателей сдерживается их высокой ценой, пока есть существенный нагрев (до 60 ° С) и большая по величине коэрцитивная сила, способная выломать чугунное основание, на котором находится линейный привод.

Следует ожидать в ближайшее время оснащение систем ЧПУ интерфейсом, который позволяет оператору общаться с системой в диалоговом аудиорежиме. Процесс обработки детали оператор может наблюдать в режиме 3D.

В заключение можно с уверенностью сказать: в ближайшем будущем станочное оборудование изменится настолько, что узнать в нём привычные сейчас фрезерный, токарный, шлифовальный или расточной станок будет сложно [22-24].

## 7. СПОСОБЫ НАПИСАНИЯ ИЛИ ГЕНЕРАЦИИ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ

Существует три основных способа разработки управляющих программ: ручное программирование (англ. *Manual Programming Techniques*), программирование на стойке ЧПУ (англ. *Shop-floor*) и программирование при помощи САМ-систем.

Для ручного программирования характерно использование G-кодов ISO [22, 56]. Умелое использование приемов ручного программирования позволяет использовать станочное оборудование в нестандартных режимах и таким образом расширить технологические возможности станка.

В качестве примера можно рассмотреть технологическую задачу, когда было необходимо нарезать резьбу на поверхности отверстия вполборота, т.е. на  $180^\circ$ . Станок корейского производства *MCV 1020BA* фирмы *DAH LIN*, оснащённый системой ЧПУ *Fanuc Series 21i-MB*, эту задачу выполнить не смог. Произошло это по причине того, что в базовой комплектации этот станок не оснащается координатой «С». Резьба была нарезана на отечественном станке 24K40, оснащённом системой ЧПУ НЦ31. Технологическая задача была решена на морально и физически устаревшей системе ЧПУ. Во многом это произошло благодаря искусству и опыту оператора-программиста, который работал в режиме ручного программирования (англ. *Manual Programming Techniques*).

Второй пример. На тонкостенном стакане длиной 70 мм необходимо было нарезать винтовую канавку, имеющую прямоугольное сечение. Шаг винта составлял 946 мм. В распоряжении имелся токарный станок 16K20 с системой ЧПУ 4СК и чешский токарный станок *SPU 20 CNC* (фирма *MAS*) с системой *Haidenhain CNC PILOT*. Трудности начались с того, что система *Haidenhain* не воспринимала шаг винта величиной 946 мм. По этой причине был выбран отечественный станок с системой 4СК. В резцедержатель был установлен на свою боковую поверхность «петушковый» отрезной резец, режущая кромка которого была предварительно сформирована на заточном станке таким образом, чтобы задние углы  $\alpha$  боковых поверхностей резца составляли  $2-3^\circ$ . После этого была написана программа в ручном режиме (англ. *Manual Programming Techniques*), позволяющая работать резцу в режиме долбяка (глубина резания составляла 0,1 мм). Был использован оператор G83. Канавка глубиной 2,5 мм была успешно нарезана. Данная технологическая задача была решена с помощью искусства ручного программирования и опыта оператора-программиста.

### 7.1. Ручное программирование

Ручное программирование (англ. *Manual Programming Techniques*) требует определённых навыков и таких черт характера, как настойчивость, сосредоточенность и много терпения. Для успешной работы на станках с ЧПУ все программисты-технологи обязаны иметь хорошее понимание техники ручного программирования независимо от того, используют ли они её в своей работе.

В России существует немало предприятий, на которых применяют исключительно ручное программирование для станков с ЧПУ. Действительно, если в компании используется несколько станков с ЧПУ, а изготавливаемые детали достаточно просты, то грамотный технолог-программист с великолепной техникой ручного программирования будет способен превзойти по производительности труда опытного программиста-технолога, использующего САМ-систему. Если предприятие использует свои станки для выполнения ограниченной и постоянной номенклатуры изделий и для их обработки уже существуют предварительно написанные и отлаженные управляющие программы (УП), то в этом случае ручное программирование для ЧПУ наиболее экономически целесообразно.

В случае применения САМ-системы нередко возникает потребность коррекции кадров УП вследствие обнаружения ошибок на этапе верификации (отладки). Кроме того, общепринятой является коррекция кадров УП после ряда первых пробных прогонов на станке с ЧПУ. Если для выполнения этих корректировок программист должен опять использовать САМ-систему, то это неоправданно удлинит процесс подготовки производства.

## 7.2. Программирование на пульте системы СПУ

Этот метод программирования стал весьма популярен в последние годы. Управляющие программы пишутся и вводятся непосредственно со стойки системы ЧПУ, используя клавиатуру, дисплей, а также систему графических пиктограмм и меню. Оператор или программист может немедленно верифицировать кадры УП путем использования графического редактора, имитирующего виртуально обработку детали на экране монитора стойки. Комплекс средств отладки УП, например для ЧПУ, производимых Санкт-Петербургской фирмой «Балт-систем» [57], включает в себя вложенный оператор *UCG* (графический редактор – средство верификации) [58] или, например, язык геометрического программирования *GTL* [35]. В задачу программной среды *GTL* входит распознавание чертежа в формате *DXF* (наиболее широко, используемый формат в САД-системах), отображение детали и динамики её обработки на мониторе системы ЧПУ, формирование профиля обработки и многие другие задачи. Системы диалогово-графического проектирования (*CAD/CAM*-системы) существенно различаются между собой. В большинстве случаев любая из них является одноцелевой системой, предназначенной для автоматизации программирования определенного типа обработки на определенном оборудовании. Мало того, некоторые модели, особенно уже снятые с производства, были рассчитаны только на ручной ввод управляющей программы и тем самым не могли обеспечить технологию удаленного программирования при помощи САМ-системы. Однако более современные модели могут работать как в диалоговом режиме, так и имеют устройства для ввода G-кодов, сгенерированных другими САМ-системами. Вместе с этим следует отметить, что на многих современных системах ЧПУ присутствует возможность программирования в ручном режиме (англ. *Manual Programming Techniques*), в режиме с пульта, а также существует возможность ввода с порта (ПВВ) предварительно сгенерированной с помощью САМ-системы УП.

Как правило, режим программирования с пульта связывают с использованием вложенных циклов. В этом режиме оператор работает не с направлением и величиной перемещения инструмента, а с операциями. Например, операция обтачивания или растачивания по контуру (*CDL, SPA, SPP, SPPA* [57-59]), глубокое сверление, зенкерование или развертывание (*G81-83*), а также нарезание различных видов резьбы (*FIL* [58, 59]) или выполнение радиусной кромки и т.д.

### **7.3. Проблемы, связанные с программированием на пульте системы СПУ**

Некоторые производители в разработанных ими системах ЧПУ используют исключительно метод программирования на стойке (*Shop-floor*). Другие рассматривают такой метод экономически неэффективным.

Производственные организации, использующие ограниченное число наемных рабочих и выпускающие широкий ассортимент деталей, склонны использовать метод программирования непосредственно у станка с ЧПУ. В таких фирмах один работник может использоваться для выполнения разнообразных задач, связанных с обслуживанием нескольких станков с ЧПУ. Например, на многих малых заводах оператор станка с ЧПУ занимается установкой заготовки; ее креплением; вводом УП; проверкой и оптимизацией УП, наконец, он фактически следит за обработкой. В этом случае метод программирования «у стойки с ЧПУ» весьма оправдан и более эффективен, чем оплата услуг некоего «удаленного» программиста-технолога. Надо отметить, что работа в режиме «карусель», когда один оператор обслуживает несколько станков с ЧПУ, возможна и на станках, работающих в режиме ручного программирования (англ. *Manual Programming Techniques*). Так в советские годы сдельщики-операторы обслуживали сразу несколько станков с ЧПУ (опыт 4ГПЗ, 9ГПЗ показал, что один оператор может обслуживать до 6-ти станков).

В более крупных производственных фирмах основная цель состоит в максимальной загрузке станка с ЧПУ. Этот тип компаний использует уже целый штат сотрудников, поддерживающих максимальную загрузку станков и бесперебойное изготовление деталей на каждом станке. Независимо от причины, время простоя станка будет приводить к экономическим потерям. Один человек может устанавливать инструменты для изготовления следующей детали в то время, как обрабатывается текущая деталь. Другой сотрудник (оператор) зажимает деталь. Остальные работники в этот момент загружают УП и верифицируют их. В этом случае оператор станка только устанавливает заготовки и снимает готовые детали. Штат поддержки минимизирует потери времени, связанные с установкой и наладкой, а также разгрузкой станка, выполняя главную задачу – минимизировать время, в течение которого станок простаивает. При указанных обстоятельствах производство не заинтересовано в разработке УП непосредственно у станка, поскольку это приведет к значительным издержкам машинного времени.

Существуют два других фактора, влияющих на выбор ручного метода программирования или метода написания УП у стойки. Первый имеет отношение к стимулированию оператора станка с ЧПУ. Человек, выполняющий диалоговое проектирование УП, должен иметь более высокую оплату труда и мотивацию.



Этот работник вносит существенный вклад в качество обработанных изделий и в снижение затрат машинного времени. Имея такие стимулы, оператор может превзойти «обычного» программиста-технолога, пишущего и отлаживающего УП вдалеке от цеха. Таким образом, в маленьких производственных фирмах сотрудник, разрабатывающий управляющую программу на стойке с ЧПУ, напрямую заинтересован в успехе компании.

Другой фактор, влияющий на выбор метода программирования, это номенклатура изготавливаемых деталей, для которых нужно написать управляющие программы. Если номенклатура значительная, то программирование в ручном режиме и программирование у стойки будут неэффективными.

Рассмотрение отличий между ручным программированием и программированием с пульта при написании УП для ЧПУ тема достаточно широкая и достойная отдельного разговора.

В заключение для понимания отличий ручного программирования от программирования с пульта приведём пример. Нарезание резьбы с пульта осуществляется с помощью вложенного цикла *FIL(...)*, в списке параметров которого указан шаг резьбы, её наклон, наружный и внутренний диаметр, наружная это или внутренняя резьба, длина резьбы, количество проходов, тип выхода режущей кромки резца из нарезаемой резьбы. В задачу оператора входит только грамотно внести параметры в список цикла *FIL(...)*. Грамотность здесь подразумевает разделение целой части от дробной для численных параметров через точку или запятую (как того требует оператор *FIL*), необходимость того, чтобы наружный диаметр наружной резьбы был больше диаметра впадин ниток резьбы и т. д. Именно в этом и заключается квалификация оператора-программиста, работающего в режиме написания программы с пульта.

При нарезании резьбы с помощью программы, написанной в ручном режиме, оператор-программист пишет всю программу сам, т.е. он сам определяет тип холостых ходов режущей кромки, её скорость, возможность на финише выхаживания поверхности зубчиков резьбы. В этом случае процесс написания программы более трудоёмок и длителен, но впоследствии может иметь место существенное снижение машинного времени. В качестве примера можно привести задачу нарезания конической резьбы нефтяного сортамента, имеющей глубину зубчика 7,5 мм. При такой глубине зубчика и конструкции упорного буртика ниппеля отсутствует возможность нарезания резьбы гребёнкой. Ниппель выполнен из стали 40X (*HRC* 40-45), в этом случае режущая пластина может быть выполнена из материала Т30К5, Т30К6 и других аналогичных. Этот твердосплавный материала отличается хрупкостью. По этой причине глубина врезания режущей пластины должна быть небольшой. Конструкция ниппеля предполагает нарезание резьбы с использованием люнета. Это означает, что частота вращения шпинделя не может быть больше 100 – 120 об/мин. Все эти обстоятельства должен учитывать оператор при написании программы в ручном режиме, т. е. написание программы в ручном режиме требует от оператора большого опыта и технологических знаний. Всё это впоследствии может существенно снизить машинное время и повысить качество обработанных деталей.

В заключение можно сказать, что ручное программирование (англ. *Manual Programming Techniques*) позволяет оптимизировать процесс обработки детали, но при этом от оператора-программиста требуется высокая квалификация как программиста, так и технолога. Использование программирования с пульта позволяет решать технологическую задачу в рамках технологических возможностей, предоставляемых вложенными циклами используемой системы ЧПУ.

#### 7.4. Базовые понятия пользовательских программ систем ЧПУ

Рассмотрим пример написания управляющей программы в ручном режиме.

При наличии технологической карты на изготовление некоторой детали на ряде предприятий практикуется ручное программирование (англ. *Manual Programming Techniques*). В этом случае координаты движения вершины режущего инструмента (например, при токарной обработке) определяет не система, а человек-программист, который в соответствии с данными технологической карты сообщает инструменту на каждом фрагменте детали тип движения, скорость и синхронность (скоординированность) нескольких движений одновременно, если в этом есть необходимость, и т.д.

Наиболее распространенный язык программирования ЧПУ для металлорежущего оборудования описан документом *ISO 6983* Международного комитета по стандартам и называется «G-код» [22, 56]. В отдельных случаях, например, системы управления гравировальными станками, язык управления принципиально отличается от стандарта. Для простых задач, например раскроя плоских заготовок, система ЧПУ в качестве входной информации может использовать текстовый файл в формате обмена данными, например *DXF* или *HPGL*. В языке технологического программирования ЧПУ допускаются следующие типы кадров<sup>27</sup>:

- кадры-комментарии;
- кадры *ISO*;
- кадры присвоения;
- кадр с трехбуквенными операторами.

Кадр-комментарий дает возможность программисту вводить в программу объясняющую информацию, делая таким образом программу более читаемой. Такой кадр не учитывается при отработке программы, а только визуализируется. Он состоит из последовательности алфавитно-цифровых символов, из которых первым в обязательном порядке должен быть символ – «;» (для 4СК, *NC* – 200-230).

Кадры *ISO* – это кадры, операторы которых предусмотрены стандартом *ISO*.

а). Оператор *G*, определяемый в соответствии с [22, 56, 58] как «адрес» или «подготовительная функция», может быть запрограммирован либо неявным способом при помощи параметров *E*, либо явным. Параметр, используемый в неявном виде программирования, является типа – байт. При описании формата кадра будут встречаться следующие знаки:

---

<sup>27</sup> Кадр – последовательность слов, определяющих операции, которые необходимо выполнить

– все элементы, заключенные в [---] должны рассматриваться как необязательные;

– все элементы, заключенные в (---) должны рассматриваться как альтернативные;

– кадры присвоения позволяют пользователю непосредственно из УП (управляющей программы) определить величину нескольких системных переменных. Впоследствии эти переменные могут быть использованы в других кадрах того же или другого класса. В зависимости от этих переменных кадры присвоения могут быть подразделены на 3 класса:

– кадры присвоения с переменными вычисления, например:  $E3 = 2.14$ ;

– кадры присвоения с геометрическими переменными, например:  $P2 = X1 Y22$ ;

– кадры присвоения с переменными системы, например:  $UOV = 1.5$ .

Кадры с трехбуквенными кодами – это кадры, в которых тип операции, выполнение которой предусмотрено, определен трехбуквенным кодом, согласованным со стандартом *EIA 586 B* [20].

Пример: (*URT*, 45) – кадр соответствует временной задержке выполнения УП на 45 с.

б). Вложенные циклы. Системный блок ЧПУ *NC-210* или *NC-230* содержит в управляющей программе ряд вложенных программ, которые позволяют по требованию оператора обрабатывать криволинейный (наружный или внутренний) контур с определенным припуском, который может быть эквидистантным или дискретным по осям *X* и *Z*. Использование подобных операторов существенно уменьшает время подготовки управляющей программы. Вместе с этим использование вложенных программ в версии ЧПУ *NC-210* (200; 220; 230) не учитывает формы заготовки. Это означает, что при обработке с эквидистантным припуском наружного контура инструмент может обрабатывать на рабочей подаче участки контура, где нет металла заготовки. Это значительно увеличивает трудоемкость обработки заготовки.

Во время семинара на промышленном салоне 2008 г. в Самаре, фирма «БалтСистем» (ЧПУ *NC-210*; 200; 220; 230), разработчикам со стороны пользователей представляемого продукта было указано на неэффективную работу отдельных вложенных циклов системы. На что разработчики резонно возразили, что вложенные циклы предназначены для обработки единичных деталей или малой серии деталей. Кроме того, слушателям семинара было сообщено, что в готовящейся новой версии системы ЧПУ *NC-230* вложенные циклы будут иметь в качестве входных параметров помимо числа циклов, указания оси, вдоль которой будет осуществляться обработка, величины припусков по осям *X* и *Z*, будут указываться размеры деталей. Вложенный цикл в этом случае проходит обрабатываемый контур на участках, где нет металла, с рабочей подачей, что существенно снижает трудоемкость обработки детали. Однако работа на *NC-230* последней версии показала, что обработка деталей с помощью вложенных операторов не позволяет учитывать форму заготовки.

На блоках ЧПУ «Siemens» (Германия), «Bosch» (Германия), «Heidenhain» (Швейцария), «Fagor» (Испания), «Fanuc» (Япония), «Mitsubishi» (Япония) такой проблемы нет. Все вложенные операторы требуют указать помимо прочих параметров также размеры детали, которые могут включать длину, а также наружный и внутренний диаметры заготовки.

### 7.5. Назначение системы ЧПУ типа 4С и его возможности

ЧПУ типа NC-200 (NC-210, NC-220, NC-230) предусматривает возможность задания информации для 17-ти управляемых осей (для ЧПУ типа 4СК – для 4-х управляемых осей): 8 осей при линейной интерполяции, 8 осей при перемещении от точки к точке, 1 – ось шпинделя (координата «С»). Одновременно может задаваться управление 10-ю осями, из которых 8 – непрерывных (участвующих в интерполяции) и 2 – от точки к точке. Плоскость интерполяции может принадлежать любой паре осей. Возможно сочетание круговой интерполяции (КИ, англ. *Circular Interpolation*) с линейной (ЛИ, англ. *Linear Interpolation*).

Физический смысл интерполяции заключается в следующем. Допустим необходимо переместить вершину резца по прямой, которая не параллельна ни одной из осей станка. Для этого система ЧПУ должна построить между начальной и конечной точками перемещения резца множество опорных точек, которые аппроксимируют необходимый отрезок перемещения. Аппроксимация имеет ступенчатый характер, поскольку исполнительные органы станка двигаются дискретно. Это означает, что для перемещения по прямой необходимо попеременно включать подачу то по одной оси, то по другой. При этом нужно поддерживать такое соотношение скоростей движения по осям, чтобы траектория перемещения соответствовала заданной траектории. Расчет промежуточных опорных точек выполняет центральное процессорное устройство (интерpolator или внутренний процессор) (англ. *Central Processing Unit, CPU*). CPU обеспечивает связь между опорными точками и оценивает отклонения от заданной траектории. При этом процессорное устройство минимизирует количество опорных точек. Ступенчатая аппроксимация имеет некоторое отклонение (погрешность) от заданной траектории перемещения.

Наиболее часто используют линейную интерполяцию и круговую. Различные производители систем ЧПУ предлагают как дополнительные опции стойки ЧПУ или как стандартные возможности стойки следующие виды интерполяции: по огибающей (ИО, англ. *Involute*), полиномиальная (ПИ, англ. *Polynomial interpolation*), спиральная (СИ, англ. *Helical interpolation*), сплайновая интерполяция (СПИ, англ. *Spline interpolation*), экспоненциальная (ЭИ, англ. *Exponential interpolation*), эвольвентная (ЭИ, англ. *Involute interpolation*) и др.

ЧПУ предусматривает нарезание резьбы с постоянным и переменным шагами, коническую и цилиндрическую (внутреннюю и наружную), а также торцевую резьбу.

Перемещения могут программироваться в миллиметрах или дюймах посредством вспомогательных функций G71 или G70 в пределах от +(-) до +(-) 99999.9999 в абсолютной или в относительной системе отсчета, задаваемое

функциями *G90* или *G91*. При программировании размеров нули в начале и в конце числа могут быть опущены. При этом десятичная точка разделяет целую и дробную части. Знак + тоже может быть опущен (пример: *X-20.275* или *Y60*).

Во время характеристики системы любая ось может быть определена как ось вращения. При этом диапазон изменения угла поворота оси (программируемое значение) изменяется от  $+(-) 0.0001$  до  $+(-) 99999.9999$  градусов.

## 7.6. Построение технологической схемы (стратегии) обработки детали

Для понимания этой главы пособия предполагается, что читатель либо имеет предварительный опыт работы на станках с ЧПУ, или располагает книгами [57-59], которые может использовать, как справочник. На многих заводах управляющие программы генерируются САМ-системами или пишутся опытными технологами (обычно бывшими операторами и наладчиками). Происходит это в заводском подразделении (службе), которая называется БПУ (бюро программного управления). Как показывает опыт наиболее эффективные программы в ручном режиме пишут люди, которые имели практический опыт работы на станках с ЧПУ.

Приведем пример ручного программирования токарной обработки детали, изображенной на рис. 7.1. Можно выделить ряд этапов программирования, которые являются общими для различных УП и которые облегчают запись, отладку и понимание подготовленной управляющей программы. Некоторые из указанных этапов рассмотрены ниже.

Для согласования системы координат детали перед началом ввода программы в систему ЧПУ, а также настройки и привязки инструмента к координатам, необходимо вывести станок в рекуррентный режим, т. е. вывести каждую координату станка в ноль. Ноль станка (ноль по каждой используемой координате) – это некоторый внутренний «ноль» системы, адаптированный к системной организации программного обеспечения ЧПУ [60, 61]. Все последующие координаты, вводимые оператором в систему, в результате характеристики инструмента система ЧПУ пересчитывает в свои внутренние координаты. В связи с этим можно сказать, что оператор, работающий на станке с ЧПУ, практически никогда не сталкивается с внутренними координатами системы.

Отметим: при токарной обработке протяжённых деталей, установленных, например, в люнет, возникают ситуации, когда смена окончена, а деталь до конца не обработана. В этом случае дежурный мастер по цеху отключает станок. На другой день для начала работы на станке с ЧПУ необходимо вывести координаты в механический «ноль». С выводом в рекуррентный режим поперечной координаты «X» трудностей не возникает, а выводу в рекуррентный режим продольной координаты «Z» мешает либо люнет, либо задняя бабка, либо обрабатываемая деталь. Деталь снять из патрона нельзя, поскольку выставить деталь в патрон впоследствии в то же положение не удастся. В этом случае применяется программируемый вывод в «ноль», который осуществляется в кадре функцией *G92*. Функция *G92* выполняется без перемещения рабочих органов станка. Тем не менее, оператору необходимо подвести вершину резца до

касания к поверхности с известными координатами «X» и «Z», после чего ввести в систему через корректоры известные значения координат.

Существуют и другие методы объявления координат вершины резца без перемещения исполнительных органов станка. При характеристике системы ЧПУ станка обычно системный программист зашивает в память систему информации о том, что все координаты детали являются абсолютными относительно некоторой выбранной точки (G90). Однако оператор может с помощью команды G91 переназначить систему координат как относительную. В результате этого любая новая координата некоторой точки на контуре детали может задаваться как приращение относительно координат предыдущей точки. Такая относительная система отсчётов координат широко использовалась на системах ЧПУ ИЦ-31, 2R22, 2C42-65 [61-63], т.е. на ЧПУ в настоящий момент практически не выпускаемых. Относительная система координат может использоваться при обработке сложных контуров, имеющих регулярную структуру, например винтовые балясины. При обработке таких деталей с помощью специальной, предварительно полученной функции вычисляют приращение по каждой из управляемых координат, после чего эти приращения сообщаются исполнительным органам станка. В этом случае существенно уменьшается количество операторов программы, что позволяет легко её отладить и перенастроить на другие геометрические параметры.

Рассмотрим деталь, изображённую на рис. 7.1.

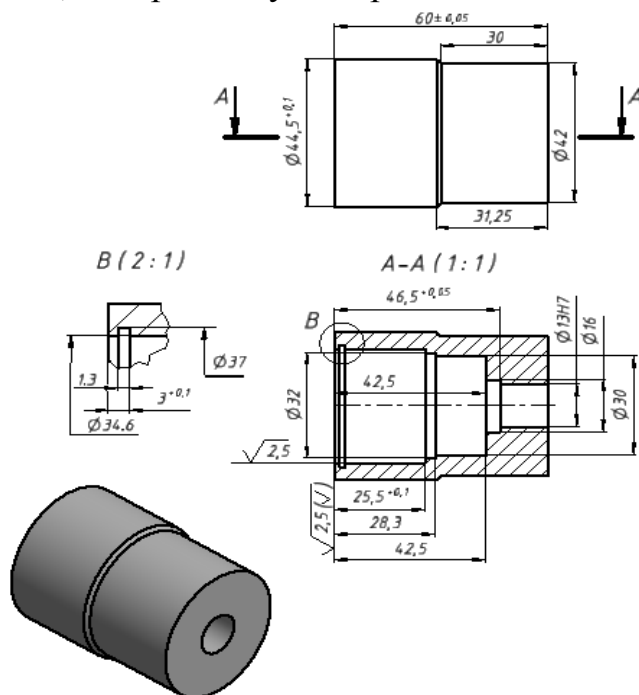


Рис. 7.1. Эскиз обоймы

Это – обойма, используемая в дозировочном насосе, изготавливаемом на Самарском насосном заводе. Обойма выполнена из стали 40X, поверхность детали должна иметь  $R_z = 12,5$  мкм. Это говорит о том, что в качестве режущего инструмента предпочтительно использовать следующие материалы: BK8 или T15K10 (предпочтительней). Поскольку деталь имеет довольно сложный наруж-

ный и внутренний профили, то обрабатываться они будут с «перестановом». Это означает, что деталь будет обработана сначала с одной стороны, а затем с другой, для чего деталь дважды будет устанавливаться в патроне станка. При составлении технологии обработки детали мы ориентируемся на отечественные станки (16К20 или 16Б16 и другие). Будем считать, что детали, изображенная на рис. 7.1, будет обрабатываться на токарном отечественном станке с ЧПУ.

Не указанные размеры на эскизе рис. 7.1 выполняются с учетом технических условий<sup>28</sup> (ТУ) выполнения детали.

Подберем тип резцов, необходимый для обработки детали во время первой установки. Будем считать, что в этом случае «ноль» оси  $Z$  расположен на торце обоймы, имеющей  $\varnothing 42$  мм. Здесь нам потребуется следующий инструмент:

- отрезной резец;
- проходной упорный резец (подрезной);
- центровка;
- сверло  $\varnothing 12,5$  мм;
- расточной резец, способный расточить отверстие  $\varnothing$  до 13 мм;
- упор.

Итак, имеем пять резцов, среди которых есть стержневые и расточные инструменты и резцы для наружной обработки. Если эти резцы выполнены с напаянными пластинами, то их надо выставить. Это означает, что в патрон устанавливается заготовка, которая протачивается на конус, после этого все режущие инструменты выставляются так, чтобы вершина режущей кромки совпадала с вершиной проточенного конуса, отклонения могут составлять не более 0,1–0,3 мм. При этом расточной резец должен быть выше на 0,1–0,2 мм конуса. Это объясняется тем, что при расточке резец изгибается и такая установка резца компенсирует погрешности, связанные с изгибом тела резца. Стержневой инструмент, т.е. сверло и центровка, выставляются таким образом, чтобы вершины проточенного конуса и инструмента совпадали. Если резцы выполнены со съёмными пластинами, то их выставлять не надо. Они выполнены таким образом, что при их установке в револьверной головке они уже выставлены.

После того, как инструмент выставлен, его надо привязать по координатам. Начнем с координаты «X». В патрон станка устанавливается некоторая заготовка, протачивается, штангелем или микрометром измеряется диаметр проточенной части заготовки. После этого к вращающейся части проточенной части заготовки подводятся вершины резцов до образования стружки.

Как только появляется стружка, проводят характеристику этого резца. Коснувшись поверхности вращающегося проточенного цилиндра, мы знаем размер координаты  $X$ . Чтобы такая характеристика была по возможности более

---

<sup>28</sup> Технические условия – документ, устанавливающий технические требования, которым должно соответствовать конкретное изделие, материал, вещество и пр. или их группа. Кроме того, в них должны быть указаны процедуры, с помощью которых можно установить, соблюдены ли данные требования.

точная, к вращающейся части цилиндра инструмент подводится с помощью опции «JOC» (рис. 7.2) с шагом 0,01 или 0,1.

Шаг выбирается в зависимости от назначения резца или от требуемой точности, которую должен обеспечить этот резец. Если речь идет о стержневом инструменте, то его характеристика проводится во время его выставления. Когда вершина проточенного конуса совпадает с вершиной инструмента (сверло или центровка), проводится характеристика инструмента.

Под характеристикой понимается следующее: оператор в ручном режиме набирает команду  $\downarrow$ \_, X20.5. После этого оператор нажимает кнопку «Послать». Координата X20.5 сообщается вершине резца, номер которого указан в операторе  $\downarrow$ \_. Аналогичным образом резцы привязываются и по оси Z. Следует отметить, что номер резца здесь совпадает с номером позиции в револьверной головке, где установлен характеризующийся инструмент (хотя это не обязательно).

Применительно к универсальным станкам процесс характеристики резца на токарном станке с ЧПУ аналогичен касанию резца детали и выставлению нониуса микрометрического винта на ноль. После чего оператор по нониусу выставляет ту глубину резания, если речь идет об оси X, которую он считает необходимой и начинает обработку детали.

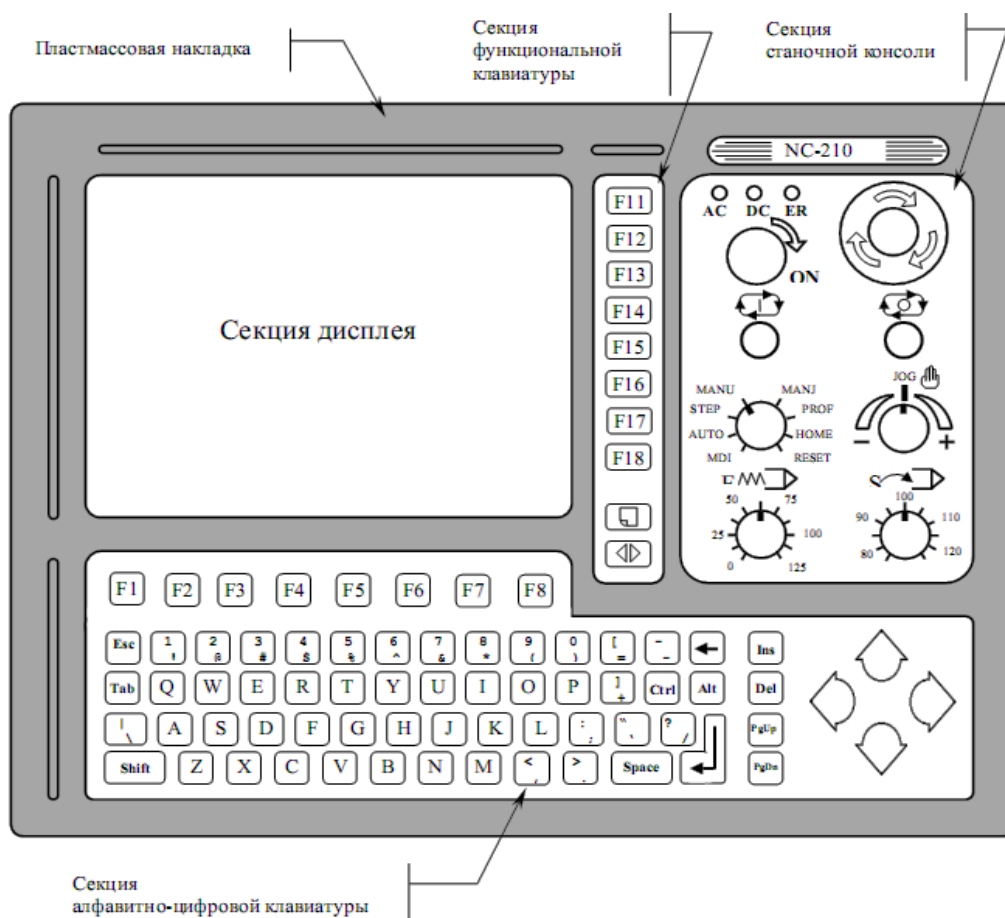


Рис. 7.2. Панель пульта управления



Таким образом, оператор работает в относительной системе измерений, поскольку назначает не абсолютный размер, а разницу (приращение) к тому значению диаметра, к которому он предварительно коснулся. В станках с ЧПУ при касании резца некоторой детали с помощью определенных операций в память системы заносится абсолютное значение размера. В связи с этим нельзя не отметить, что системы ЧПУ предусматривают характеризацию инструмента и при относительном измерении некоторого размера. Такого рода характеризация, например, используется при обработке протяженных или маложестких деталей.

В отношении характеризации инструмента по оси  $Z$  следует сказать следующее. Характеризацию инструмента производят на поверхности, соответствующей поверхности детали с некоторым припуском. Объясняется это тем, что во время привязки на поверхности детали остаются небольшие следы от резания, а это может испортить товарный вид детали.

Режимы резания выбираются из справочной литературы, но чаще всего режимы назначаются на основании личного опыта оператора.

Перейдем к написанию управляющей программы.

Программирование системы ЧПУ выполним в ручном режиме *MPT* (англ. *Manual Programming Techniques*). Это означает, что программа будет написана предварительно на бумаге оператором (программистом), затем программа набирается в определенном формате (часто *.txt*) на персональном компьютере. После этого программа с помощью одного из носителей информации (в настоящее время флешка) или с помощью кабеля от персонального компьютера (англ. *Personal Computer*) размещается в оперативной памяти ЧПУ. Отладка программы в этом случае выполняется с пульта (с консоли) ЧПУ.

Первоначально присвоим ей имя, которое связано либо с заказчиком, либо с деталью. Необходимость в этом объясняется тем, что в памяти ЧПУ может содержаться большое количество программ, оператор часто забывает их назначение. Чтобы этого не случилось программе лучше дать имя, чем-либо напоминающее её назначение, хотя это условие не является обязательным. Начнем с присвоения программе имени:

### **; ПРОГРАММА 1**

Символ «;» перед оператором обозначает, что этот оператор не подлежит выполнению. Его используют для комментариев внутри тела программы или для исключения из работы какого-либо оператора.

Далее указываем используемую в программе нулевую точку. Отметим, что нулевая рабочая точка объявлена по определению. Если вы в дальнейшем в теле программы будете использовать другие начальные точки, то, чтобы не путаться, объявим в начале программы нулевую рабочую точку:

### **(UAO, 0)**

Вводим в работу графический редактор, который очень облегчит нам этап отладки программы:

### **(UCG,1, Z-80 Z80, X-80 X80)**

Здесь *Z-80 Z80* и *X-80 X80* диапазон изменения координат  $X$  и  $Z$  на экране графического редактора. На рис. 7.3 изображено меню операции *UCG*.

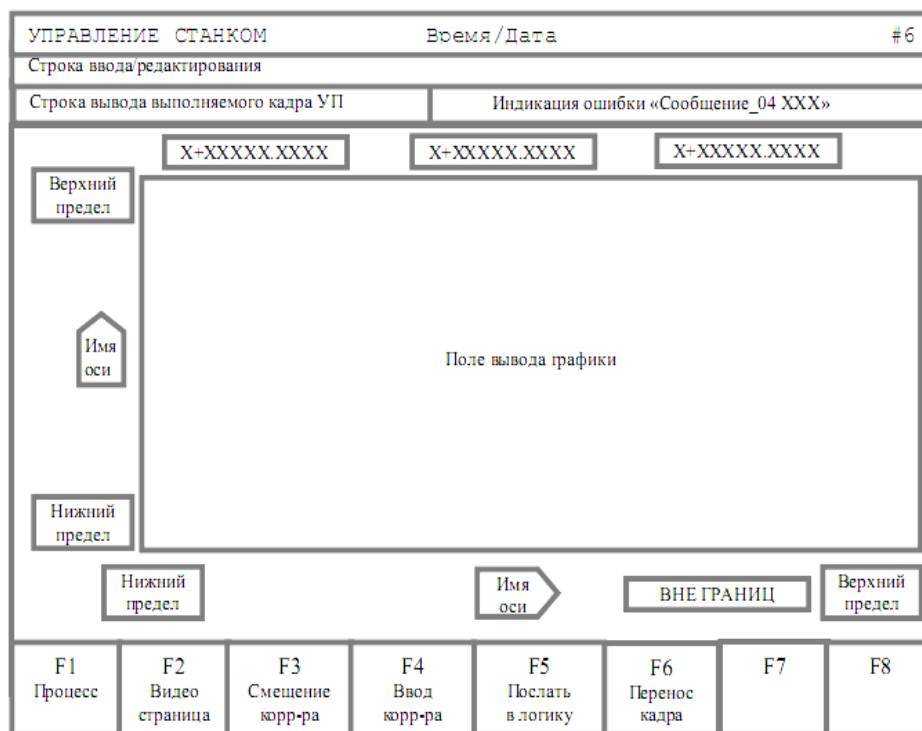


Рис. 7.3. Видеостраницы графического редактора *UCG* на мониторе системы ЧПУ

Графический редактор позволяет на мониторе системы ЧПУ увидеть скоординированное движение исполнительных органов станка для двух выбранных оператором координат без включения силовых приводов станка, т. е. без включения самого станка.

Теперь мы должны отвести револьверную головку от патрона и зажатой в ней заготовки на безопасное расстояние для смены инструмента. Это означает, что, когда происходит смена инструмента, ни один из инструментов в револьверной головке не коснется заготовки. Для этого объявим характеристику самого длинного по оси *Z* инструмента и отведем инструмент от нуля заготовки по оси *Z* на расстояние, например 100 (обычно не менее 50) мм. Такая мера необходима для того, чтобы при повороте револьверной головки станка ни один стержневой элемент не задел обрабатываемую деталь, патрон, вторую револьверную головку и т. д. Пусть наиболее длинный стержневой инструмент имеет № 3.

### **T.3 GO Z100**

После этого назначаем в рабочую позицию поворотного диска резцедержки упор (рис. 7.4), который необходим для того, чтобы выдвинуть из патрона заготовку на необходимую длину для обработки.

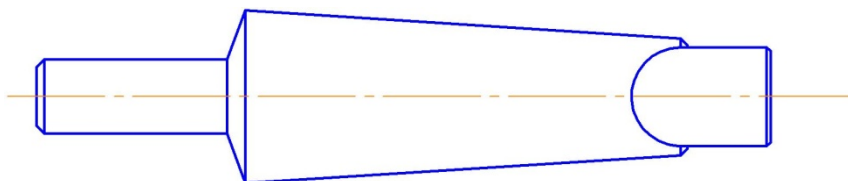


Рис.7.4. Конструкция упора

Пусть упор находится в позиции 1 револьверной головки. Отметим, что упор также проходит характеризацию, как и весь инструмент.

После объявления в рабочей позиции револьверной головки упора подведем его к координатам  $X$  и  $Z$ , соответствующим торцу детали, но координата по  $Z$  при этом должна быть сдвинута в плюс на, например, 0.5 мм под чистовую обработку. Упор должен быть сдвинут по оси  $X$  так, чтобы при касании торца заготовки упор не мог коснуться выступа на торце детали, оставшегося от, например, отрезного резца. Итак, имеем:

**T1.1**  
**GO X25**  
**Z0.5**

Далее останавливаем выполнение программы:

**M01**

После этого можно напомнить оператору, что пора выдвинуть заготовку из патрона до касания с упором.

**(DIS, «Выстави деталь»)**

Как только деталь выдвинута оператором, должна быть нажата кнопка «Пуск», в результате чего выполнение программы продолжится. Упор должен отъехать от заготовки в зону безопасности для смены инструмента.

**T.3**  
**GO Z100**

Следующим этапом выполнения программы является объявление проходного упорного резца, например № 2, необходимого для обработки наружного профиля. При этом включим опцию, поддерживающую постоянной скоростью резания, равную, например 50 м/мин и ограничивающую наибольшую частоту вращения заготовки величиной, например, 800 об/мин.

**T 2.2**  
**M4 S400**  
**SSL = 800**  
**G96 S50**

Теперь наступила очередь определить наружный контур детали, присвоим этому контуру № 1 (напомним, что ноль по  $Z$  находится на чистовом торце детали).

**(DFP,1)**  
**GO Z0,8 X10**  
**G1 Z0 F.1**  
**X40 F.08**  
**Z-1 X 42 F0.05**  
**Z-30 F.1**  
**X45 Z- 31.5 F0.05**  
**Z-68 F.1**  
**X 50 F0.05**  
**(EPF)**

Подведем резец к детали таким образом, чтобы можно было включить трехбуквенный код *SPA*. Для этого используем минутную подачу.

**G1 G94 G09 X52 F6000  
Z1.5 F8000**

Здесь *G94* показывает, что линейное движение осуществляется с минутной скоростью: по оси *X* – подача 6000 мм/мин, по оси *Z* – 8000 мм/мин. *G09* показывает, что в конце работы оператора *G1*, происходит уменьшение величины подачи (замедление движения).

Включим код *SPA*. Этот код имеет следующие входные параметры:

- 1) по какой координате происходит обточка, в нашем случае по оси *Z*;
- 2) какой номер имеет контур, по которому производят обточку (№ 1);
- 3) сколько проходов расточки должно быть совершено (*L*\_\_);
- 4) какой припуск должен быть оставлен по оси *X*;
- 5) какой припуск должен быть оставлен по оси *Z*.

Перед объявлением кода *SPA*, следует объявить минутную подачу.

**G95 F0.12  
(SPA, Z, 1, L7, X0.2, Z0.2)**

Теперь нужно обточить контур вчистовую, для этого объявим код *CLP*, предварительно подойдя к точке начала контура от *Z0*.

**G1 G94 G09 X50 F6000  
Z2 F8000  
X8 F3000  
G95  
(CLP)**

Обращаем ваше внимание, что перед кодом *CLP* не указана величина подачи на оборот. Во время обработки назначаются величины подач, указанные в определении профиля через (*DFP*). Это особенность работы кода *CLP*.

После обточки следует отвести инструмент в безопасную зону для смены инструмента. Последовательность действий, необходимых для решения этой задачи, уже рассматривалась ранее, поэтому подробно на этом останавливаться не будем.

**G1 G94 G09 X50 F6000  
T.3  
Z100 F8000**

Настала очередь выполнить отверстие. Для этого предварительно торцы детали нужно «зацентрировать». Поскольку центрирование совершается вдоль оси *Z*, то нужно отменить опцию «постоянная скорость резания», затем объявить установку в рабочую позицию револьверной головки центровку (например, № 6) и, наконец, назначить частоту правого вращения детали.

**T6.6  
G97  
M4 S600**

Выведем центровку на ось вращения и подведем ее к торцу детали на расстоянии 2 мм.

**G1 G94 G09 X0 F6000  
Z2 F8000**

Далее отменим минутную подачу и включим подачу на оборот с указанием конкретной её величины, после чего назначим вложенный цикл глубокого сверления. Делается это с целью увеличить стойкость инструмента. В программном исполнении это выглядит следующим образом:

**G95 F0.12**  
**G83 R2 Z-5 I4 K0.9 J2**  
**X0**  
**G80**

Оператор глубокого сверления *G83* показывает, что центровка проникает вглубь детали на расстояние – 5 мм. Центровое отверстие выполнено, настал черед отвести центровку в безопасную зону для смены инструмента.

**T.3**  
**G1 G94 G09 Z100 F8000**

Пусть сверло имеет номер позиции 5, в таком случае надо назначить частоту вращения детали, величину подачи на оборот и произвести глубокое сверление на глубину 15 мм, затем отвести сверло в безопасную зону, пригодную для смены инструмента.

**T3.3**  
**G1 G94 G09 X0 F6000**  
**Z2 F8000**  
**M4 S200**  
**G95 F0.1**  
**G83 R2 Z-15 I7 K0.9 J4**  
**X0**  
**G80**  
**G1 G94 G09 Z100 F8000**

Более подробно узнать особенности работы оператора *G83* можно в инструкциях по программированию ЧПУ 4СК или *NC 200* (*NC-210*, *NC-220*, *NC-230*). Следует отметить, что опытные операторы станков с ЧПУ, с целью снижения трудоемкости, совмещают операции центрирования и сверления. Достигается это особым видом заточки сверла.

Теперь полученное отверстие нужно расточить под развертку. Пусть расточной резец имеет № 4.

**T4.4**  
**M4 S500**  
**G1 G94 G09 X12.85 F6000**  
**Z2 F8000**  
**G95 Z-14.5 F.1**  
**Z-14 X12**  
**Z1 F2**  
**T.3**  
**G1 G94 G09 Z100 F8000**

Настала очередь провести отрезание заготовки. Пусть отрезной резец имеет № 5, его толщина, допустим, равна 5 мм ( $E50 = 5$ ). Этот фрагмент программы выглядит следующим образом:

**T5.5**  
**SSL = 800**  
**G96 S45**  
**G1 G94 G09 X50 F6000**  
**E50 = -E50 – 60**  
**ZE50 F8000**  
**X46 F3000**  
**G95 X45 F.5**  
**X0 F0.02**  
**G94 G09 X50 F6000**  
**T.3**  
**Z100 F8000**  
**M30**

В заключение следует отметить, что обработка должна быть осуществлена с поливом, т. е. с использованием СОЖ. Для этого необходимо включить оператор *M70*. Заметим, что обозначение вспомогательных операторов (*M*) определяется настройкой системы, поэтому на разных станках с одной системой УЧПУ обозначения одних и тех же вспомогательных операторов может отличаться. Помимо этого, практически в каждой системе ЧПУ предусмотрены дополнительные вспомогательные операторы *H*, которые могут быть объявлены системным программистом. Кроме того, средствами программирования можно организовать возможность компенсации износа режущей кромки резца.

Система позволяет также вести учет времени, в течение которого конкретный инструмент находился в работе. Это необходимо, когда обрабатывается ответственная деталь, и поломка инструмента во время обработки недопустима.

Процесс отрезания заготовки тоже можно организовать иначе. Если наблюдать за работой токаря на универсальном станке, то можно заметить, что он совершает отрезным резцом во время отрезания возвратно-поступательное движение. Такие движения можно организовать программно. Очевидно, что это увеличит стойкость отрезного резца и в конечном итоге снизит трудоемкость. Опытные операторы станков с УЧПУ говорят, что программа становится безупречной после 50-й детали. Следует также отметить, что после этапа отладки программы графический редактор должен быть отключен, поскольку во время изготовления серии деталей он будет только мешать. Отключение осуществляется следующим образом:

**; (UCG, 1, Z-80 Z80, X-80 X80)**

Еще одно обстоятельство, о котором следует сказать, ноль оси *Z* расположен на чистовом торце детали.

Второй установ. Рассмотрим теперь обработку заготовок с другого торца (стороны). Здесь нам потребуются следующие инструменты:

- сверло  $\varnothing 15$  мм;
- сверло  $\varnothing 28$  мм;
- расточной резец, способный расточить отверстие  $\varnothing 16$  мм;
- резец толщиной 1,7 мм для нарезания внутренних канавок;
- развертка  $\varnothing 13$  мм.

Материал стержневого инструмента (сверла, развертки, центровки), как правило, сталь Р6М5. Этот сплав наиболее дешёвый. Выбор инструментального материала для других резцов производится так же, как это было сделано ранее. Выбор режимов резания делается также на основании справочной литературы и личного опыта токаря. Все резцы, как ранее, должны быть выставлены и привязаны по координатам.

Определим опять нулевую точку:

**(UAO, 0)**

и вызовем графический редактор, который необходим для этапа отладки программы.

**(UCG, 1, Z-80 Z80, X-80 X80)**

Далее отходим в зону безопасности, которая определяется наибольшей длиной стержневого инструмента (это сверло  $\varnothing 15$  мм) плюс 100 мм. Пусть сверло  $\varnothing 15$  мм имеет № 1.

**T.1**

**G1 G94 G09 Z100 F8000**

Теперь определим в рабочую позицию револьверной головки сверло, имеющее №, допустим, 2. Назначаем частоту вращения инструмента, например, правое вращение с частотой 400 об/мин. Выводим инструмент в координату X0 и Z3 с минутной подачей. И далее, отключив минутную подачу и назначив величину подачи наоборот, вызываем процедуру глубокого сверления. После того, как сверление будет закончено, отведем инструмент в зону безопасности для смены инструмента. Внимательный читатель обратит внимание – почему здесь мы не использовали центровку перед процессом сверления? Объяснений может быть два. Первое – сверло  $\varnothing 15$  мм может быть небольшой длины, по этой причине оно будет достаточно жестким, чтобы выполнять одновременно две функции: и центровки, и сверла. Второе – сверло заточено так, что оно может быть и центровкой, и сверлом. Правда, и в этом случае длина сверла также должна быть небольшой. Итак,

**T1.1.**

**M4 S280**

**G1 G94 G09 X0 F6000**

**Z3 F8000**

**G95 F0.12**

**G83 R2.5 Z-40 I12 K0.9 J8**

**X0**

**G80**

**G1 G94 G09 Z100 F8000**

Этим рассверливанием мы подготавливаем внутреннюю поверхность обоймы для растачивания поверхности  $\varnothing 16$  мм. Теперь нужно рассверлить внутренность обоймы под растачивание поверхности  $\varnothing 30$  мм. Эта задача полностью аналогичная задаче, рассматриваемой на предыдущем фрагменте программы. Поэтому, полагая, что сверло  $\varnothing 28$  мм имеет № 2, получаем:

**T2.2**

**M4 S200**

**G1 G94 G09 X0 F6000**  
**Z3 F8000**  
**G83 R2.5 Z-24 I12 K0.9 J8**  
**X0**  
**G80**  
**T.1**  
**G1 G94 G09 Z100 F8000**

Заметим, что частота вращения сверла  $\varnothing 28$  мм несколько меньше, чем частота вращения сверла  $\varnothing 15$  мм. Это объясняется тем, что диаметр сверла в первом случае таков, что он обеспечивает большую скорость резания, чем у сверла  $\varnothing 15$  мм, поэтому, чтобы скомпенсировать эту разницу, уменьшают частоту вращения инструмента, имеющего больший диаметр. Если этого не делать, то режущие кромки у сверл больших диаметров будут «пригорать», а это ведет к снижению ресурса инструмента. Аналогичным образом обстоит дело и с подачей на оборот. Переходим к работе расточного резца. Допустим, что он имеет № 3. Введем опцию постоянной скорости резания при левом вращении шпинделя. Она нам будет необходима для подрезки торца детали до  $\varnothing 34$  мм. Далее осуществлять торцовку нецелесообразно, поскольку эта поверхность будет растачиваться (рис. 7.5).

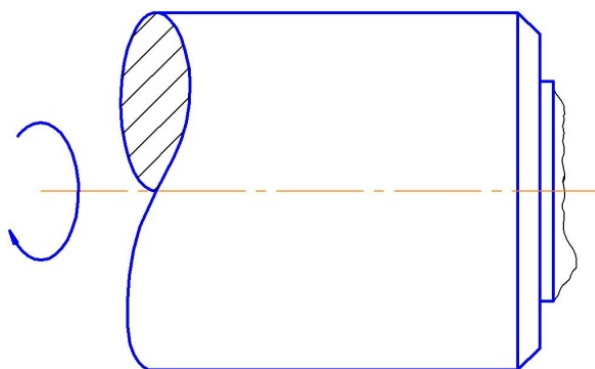


Рис. 7.5. Операция подрезки торца

Кроме того, необходимо сделать фаску на сопряжении цилиндрической и торцевой поверхностей. Итак, имеем:

**T3.3**  
**M3 S350**  
**G1 G94 G09 X-48 F6000**  
**Z-4 F8000**  
**G95 X-47 Z-2 F.5**  
**X-43 Z0 F0.05**  
**X-33 F0.07**  
**Z-2 F1**

Затем необходимо начать растачивание отверстия. Для этого введем расточной резец № 3 в глубь отверстия  $\varnothing 13$  мм (напомним, с противоположной



стороны детали выполнено отверстие  $\varnothing 12$  мм) на глубину, не доходящую до заборного конуса сверла  $\varnothing 15$  мм, выполнившего отверстие глубиной 40 мм. Пусть это будет глубина Z–34 мм (рис. 7.6).

Теперь в нашу задачу входит удалить материал, оставшийся от заборного конуса сверла  $\varnothing 15$  мм. Это можно сделать, например, двумя способами. Первый – использует код SPA, однако этот способ ведет к достаточно большим затратам времени. Второй способ, использующий операторы ISO, в программном исполнении более длинный, чем первый способ, но он менее трудоемок.

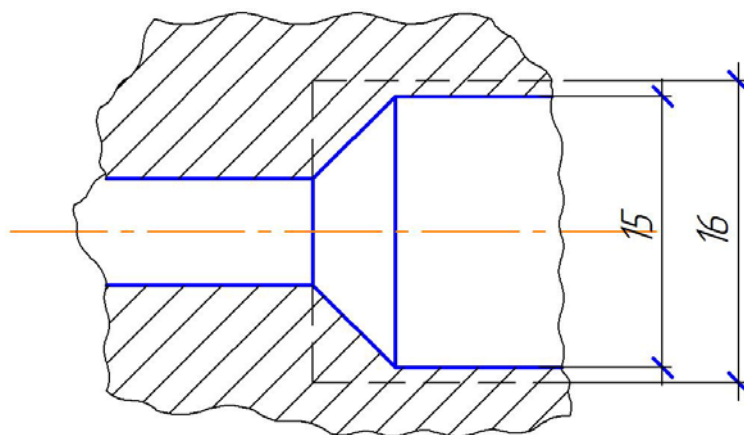


Рис. 7.6. Расточка отверстия  $\varnothing 16$  мм

Рассмотрим фрагмент программы, соответствующий удалению материала, оставшегося от заборного конуса сверла  $\varnothing 15$  мм.

```
M4 S350  
SSL = 8000  
G96 S50  
G1 G94 G09 X13 F6000  
Z-42 F600  
G95 Z-46.4 F.1  
Z-41.5 F.2  
X14  
Z-46.4 F.1  
Z- 40 F.2  
X15  
Z-46.4 F.1
```

Только что мы выполняли дно отверстия  $\varnothing 16$  мм и остановились на  $\varnothing 15$  мм. Чтобы расточить отверстие до  $\varnothing 16$  мм, нам необходимо поднять резец на расстояние по Z, соответствующее заборному конусу сверла  $\varnothing 28$  мм (рис. 7.7).

```
Z-46 X14  
Z-37.5 F.2  
X16  
Z-46.4 F.1
```

Теперь «почистим» доньшко отверстия  $\varnothing 16$  мм.

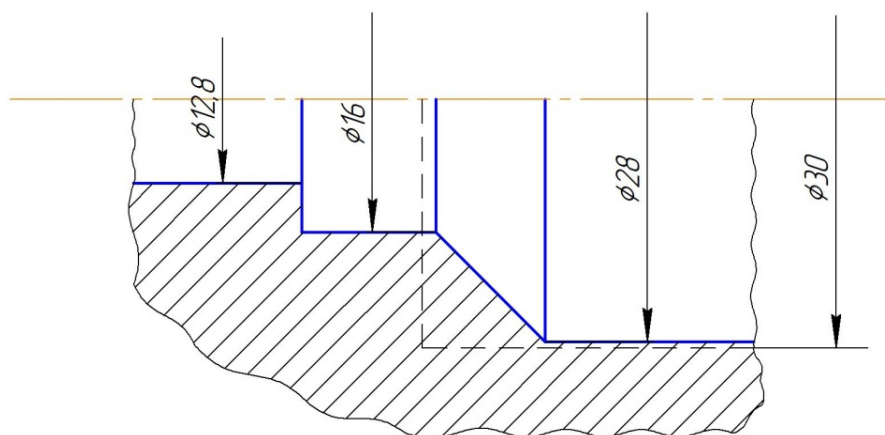


Рис. 7.7. Расточка отверстия  $\varnothing 28$  мм

**Z-45.4 X14 F.2**

**X11 F.4**

**Z-45.5 F.1**

**X16 F0.05**

**Z-44.4 X14 F.2**

Теперь выберем материал, оставшийся от заборного конуса сверла  $\varnothing 28$  мм. Будем формировать дно отверстия  $\varnothing 30$  мм с припуском 0,1 мм.

**Z-37**

**X17**

**Z-42.4 F.1**

**Z-41.9 X16 F.2**

**Z-36.5**

**X18**

**Z-42.4 F.1**

**Z-41.9 X17 F.2**

**Z-36**

**X19**

**Z-42.4 F.1**

**Z-41.9 X18 F.2**

**Z-35.5**

**X20**

**Z-42.4 F.1**

**Z-41.9 X19 F.2**

**Z-35**

**X21**

**Z-42.4 F.1**

**Z-41.9 X20 F.2**

**Z-34.5**

**X22**

**Z-41.9 F.1**

Z-41.9 X21 F.2  
Z-34  
X23  
Z-42.4 F.1  
Z-41.9 X22 F.2  
Z-33.5  
X24  
Z-42.4 F.1  
Z-41.9 X23 F.2  
Z-33  
X25  
Z-42.4 F.1  
Z-41.9 X24 F.2  
Z-32.5  
X26  
Z-42.4 F.1  
Z-41.9 X25 F.2  
Z-32  
X27  
Z-42.4 F.1  
Z-41.9 X24 F.2  
Z-31.5  
X28  
Z-42.4 F.1  
Z-41.9 X26 F.5  
G1 G94 G09 Z3 X25 F4000

Отметим, что здесь мы не «чистили» доньшко отверстия. Эту операцию мы совершим позднее и совершенно другими средствами. Теперь выберем растачиванием металл по внутреннему контуру детали, начиная с  $\varnothing 28$  мм и глубиной 42,5 мм, для этого определим контур:

(DFP, 1)  
G0 Z1 X39  
G1 Z0.5 X38 F.1  
G1 Z-1.3 X35.4 F0.05  
G1 Z-30.5 F.1  
G1 Z-33.3 X33 F0.05  
G1 Z-42.5 F.1  
G1 X28 F0.05  
(FPF)

Включим оператор SPA для расточки внутренности детали по контуру.

G1 G94 G09 X41 Z5 F6000  
G95 F.12  
SPA (Z,1, L14, X0.2, Z0.1)

Обойдем теперь контур № 2 в чистовую без припуска, используя оператор CLP.

G1 G94 G09 Z5 F8000

**X39 F6000**  
**G95**  
**(CLP,1)**

Уходим в зону безопасности для замены инструмента.

**G1 G94 G09 Z100 F8000**

Отметим, что здесь может быть введен еще один резец для обеспечения размера  $\varnothing 16$  мм. Поскольку первый расточной резец работает достаточно интенсивно, его режущая кромка изнашивается, поэтому для компенсации износа и обеспечения размера  $\varnothing 16$  мм можно ввести еще один инструмент или организовать итерационный цикл расточки, если есть калибр – пробка  $\varnothing 16$  мм. Осталось реализовать две операции: выполнить канавку и развернуть отверстие инструментом  $\varnothing 13$  мм.

Приступим к выполнению канавки. Это канавочный резец с номером 4, имеющий толщину, равную ширине канавки на эскизе детали. Итак

**M4 S50**  
**T4.4**  
**G1 G94 G09 X28 F6000**  
**Z1 F8000**  
**G95 Z-3 F.5**  
**X34.3**  
**X34.6 F.2**  
**X37 F0.02**  
**X33 F.1**  
**T.1**  
**G1 G94 G09 Z100 F8000**

Здесь выполнение канавки начинается с внутреннего  $\varnothing 34,6$  мм. Это объясняется тем, что на внутренней поверхности цилиндра оставлен припуск под шлифование.

Наконец, остаётся последняя операция – развертывание отверстия  $\varnothing 12,8$  мм. Её можно организовать, используя различные методы. Первый: использование оператора G82 – нарезание резьбы метчиком или развертывание. Второй способ, который мы будем использовать, оператор глубокого сверления G83. Пусть развертке будет соответствовать № 5.

**T5.5**  
**G1 G94 G09 X0 F6000**  
**Z0 F8000**  
**M4 S70**  
**G95 Z-42.5 F.5**  
**Z-85 F0.025**  
**Z-42 F.1**  
**T.1**  
**G94 G09 Z100 F8000**  
**M30**

M30 – соответствует окончанию программы. В заключение отметим, что предлагаемая программа обработки детали является только примером. Она не

лишена недостатков, в ней присутствует много фрагментов, которые могут быть организованы более эффективно. Каким именно методом – это предстоит решить читателям.

В качестве примера рассмотрим предварительную обработку детали, изображенной на рис. 7.8, с использованием операторов с вложенными циклами.

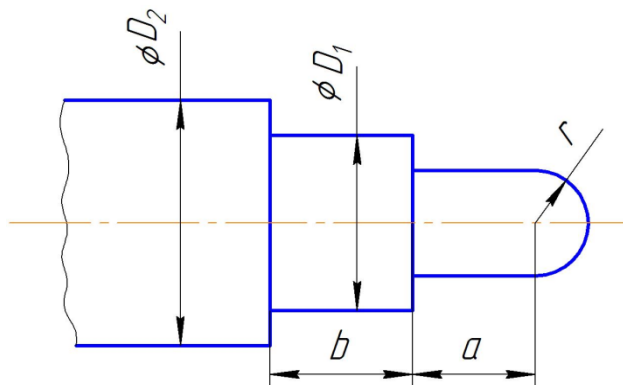


Рис. 7.8. Деталь, подлежащая обработке на станке с ЧПУ

В табл. 7.1 приведены возможные геометрические параметры фрагмента детали, изображенной на рис. 7.8.

Таблица 7.1. Возможные размеры детали

№ n/n	$r$	$a$	$b$	$D_1$	$D_2$
1	3	12	10	10	15
2	8,5	4	10	20	29
3	10	3	18	25	30
4	17	2	20	40	48
5	22	17	15	47	50
6	13,5	19	19	32	40
7	11,8	24	17	50	62

В этом случае необходимая подготовка станка с ЧПУ для обработки любой детали из табл. 7.1 должна включать в себя следующие этапы:

1. Описать контур детали, используя операторы ( $DFP, 1$ ) и ( $EPF$ ).
2. Используя оператор  $SPA$  и  $SPP$ , организовать предварительную обработку детали с различными припусками по  $Z$  и по  $X$ .

В качестве примера рассмотрим рис. 7.8. с численными значениями, соответствующими первой строке табл. 7.1. Итак

```
(DFP,1)
G0 Z1 X0
G1 Z0 X0
G2 Z-5 X10 I-5 J0
G1 Z-15
```

**X18  
Z-25  
X20  
(EPF)**

Далее выбираем проходной упорный резец, который имеет, допустим, № 1 (соответствует номеру характеристики № 1 и установлен в позицию поворотного диска резцедержки с № 1).

Для рассматриваемого случая этот фрагмент программы выглядит следующим образом:

**G1 G94 G09 X22 Z6 F8000  
M4 S500  
G95 F.12  
(SPA, Z, 1, L12, X0.4, Z0.1)  
M30**

Следует отметить, что предлагаемый вариант обработки детали не может рассматриваться как оптимальный, поскольку у каждого программиста и оператора ЧПУ свой взгляд на оптимальность программы, которая определяется практическим опытом, особенностями используемого станка и нормативами на изготовление одной детали.

В Приложениях 2, 3 приведена анимированная симуляция обработки 2D контура детали на рис. 7.1. В приложении 4 приведена анимированная симуляция обработки 3D модели детали на рис. 7.1. В приложении 5 приведен текст УП обработки детали на рис. 7.1, сгенерированная для токарно-фрезерного центра *INDEX R300 – INDEX TRAUB* со стойкой ЧПУ *Fanuc Oi-TB*.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение станков с ЧПУ позволяет значительно повысить производительность обработки и улучшить качество изготавливаемых деталей. Использование в производстве станка с ЧПУ требует от обслуживающего персонала знаний и навыков в механике и в компьютерных науках. Каждая из этих наук оперирует своими терминами и понятиями. Эффективная эксплуатация высокотехнологичных станков возможна, когда между специалистами, обслуживающими станок, существует единое понимание технических задач, в решении которых каждый из них принимает участие. Первым этапом такого сотрудничества является взаимопонимание терминов и понятий, которые использует каждый специалист. Кроме того, для модернизации («апгрейда») оборудования с ЧПУ каждый специалист, обслуживающий станок, должен быть в курсе новинок его технического направления, появившихся на рынке.

В учебном пособии рассмотрены начальные понятия и термины, связанные с организацией кинематики станка, средствами механики, а также термины, связанные с компьютерными системами, обеспечивающими взаимодействие исполнительных органов станка. Рассмотрены особенности программных продуктов, необходимых для эксплуатации высокотехнологичного оборудования. Приведены примеры современных направлений развития станков с ЧПУ.

Пособие ориентировано на эксплуатационников станков с ЧПУ и предназначено для студентов-бакалавров, магистров и специалистов, обучающихся по следующим направлениям подготовки: «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» (код 15.03.15 и 15.04.15), «Двигатели летательных аппаратов» (код 24.03.05 и 24.04.05), «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» (код 24.05.02).

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИНФОРМАЦИИ

1. Kitamura Machining Challenges-Simplified<sup>®</sup> [Electronical Resource]. URL: <https://www.kitamura-machinery.com/> (request date 28.10.2019).
2. DMG MORI. Products. Tuning Centers: WASINO [Electronical Resource]. URL: [https://www.dmgmori.co.jp/en/products/list/contents\\_type=40](https://www.dmgmori.co.jp/en/products/list/contents_type=40) (request date 28.10.2019).
3. Meehanite. Get the EDGE [Electronical Resource]. – URL: <https://meehanitemetal.com/> (request date 28.10.2019).
4. Bernard and Company's blog [Electronical Resource]. – URL: <https://bernardandcompany.wordpress.com/tag/mineralit/> (request date 28.10.2019).
5. 3 LOCK System – metal cutting technology [Electronical Resource]. – URL: <https://www.mct-pl.com.au/MCT%20Byron/Web%20Page%20Documents/Nikken/Specific%20Brochures/3Lock%20System%20-%20Protected.pdf> (request date 28.10.2019).
6. Спецтехнология Новосибирск. Фрезерное оборудование Matec [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.spectehnologia.com/oborudovanie/metalloobr/frezernoe-matec> (дата обращения: 28.10.2019).
7. Unior. Специальные станки [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.solver.ru/products/isprod/unior.asp> (дата обращения: 28.10.2019).
8. Pfiffner Hydromat V. Агрегатный станок с делительно-поворотным столом [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.solver.ru/products/isprod/Pfiffner/pfiffner-v.asp> (дата обращения: 28.10.2019).
9. **Gao, R.** Through life analysis for machine tools: From design to remanufacture / R. Gao, W. Peng // *Procedia CIRP*. – 2017. – Vol. 59. – P. 2-7. – DOI: 10.1016/j.procir.2016.09.027.
10. **Aggogeri, F.** Machine tools thermostabilization using passive control strategies / F. Aggogeri, A. Borboni, A. Merlo, N. Pellegrini // *Advanced Materials Research*. – 2012. – Vol. 590. – P. 252-257. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.590.252.
11. **Лобанов, Д.В.** Технология инструментального обеспечения производства изделий из композиционных неметаллических материалов / Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин. – Старый Оскол: ТНТ, 2015. – 295 с.
12. **Чернышов, Е.А.** Современные технологии производства изделий из композиционных материалов / Е.А. Чернышов, А.Д. Романов // *Современные наукоемкие технологии*. – 2014. – № 2. – С. 46-51.
13. Автоматизированные производства изделий из композиционных материалов / под ред. В.С. Балакирева. – М.: Химия, 1990. – 240 с.
14. **Калгин, А.В.** Перспективы развития производства авиационных деталей из композиционных материалов / А.В. Калгин, Ю.Е. Калинин, А.М. Кудрин, А.В. Малюченков, Ю.В. Панин, А.В. Ситников // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. – 2011. – Вып. 7, № 11-2. – 146-153 с.



15. A theoretical review of skill shortages and skill needs: Evidence report / R. Holt, S. Sawicki, J. Sloan. – UKCES, 2010. – 82 p.
16. European engineering report. VDI in cooperation with Institut der deutschen Wirtschaft Köln. – 2008. – 32 p.
17. Какой оператор станков с ЧПУ нам нужен? [Электронный ресурс]. – URL: [http://t344623.spo.obrazovanie33.ru/sveden/education/Metod\\_Napr\\_17\\_01.09.2016.pdf](http://t344623.spo.obrazovanie33.ru/sveden/education/Metod_Napr_17_01.09.2016.pdf) (дата обращения 08.04.2019).
18. Инженерный клуб. Немецкая система профессиональной подготовки и переобучения работников [Электронный ресурс] / А. Шведов. – URL: <https://enginclub.ru/nemeckaya-sistema-professionalnoj-podgotovki-i-pereobucheniya-rabotnikov/>(дата обращения: 08.04.2019).
19. Regional analytics and Information. Corporate university [Electronical Resource]. – URL: <https://superresearch.ru/?id=318> (request date 08.04.2019).
20. **Фейгенбаум, А.** Контроль качества продукции / А. Фейгенбаум. – М.: Экономика, 1986. – 352 с.
21. Человеческий фактор в управлении / под ред. Н.А. Абрамовой, К.С. Гинсберг, Д.А. Новикова. – М.: КомКнига, 2006. – 496 с. – ISBN: 978-5-484-00391-4.
22. ГОСТ 20999-83. Устройство числового программного управления для металлообрабатывающего оборудования. – М.: Стандарт, 1983. – 12 с.
23. Обработывающее оборудование нового поколения. Концепция проектирования / В.Л. Афонин, А.Ф. Крайнев, В.Е. Ковалев [и др.]; под ред. В.Л. Афолина. – М.: Машиностроение, 2001. – 256 с. – ISBN: 5-217-03093-3.
24. **Астанин, В.О.** Исследование металлорежущего станка нетрадиционной компоновки / В.О. Астанин, В.М. Сергиенко // Станки и инструмент. – 1993. – № 3. – С. 5-8.
25. Завод координатно-расточных станков Стан-Самара [Электронный ресурс]. – URL: <http://stan-samara.ru/> (дата обращения: 28.10.2019).
26. **Бушуев, В.В.** Особенности проектирования оборудования с параллельной кинематикой / В.В. Бушуев, П.В. Подзоров // Станки и инструмент. – 2004. – № 5. – С. 3-7.
27. ГОСТ 23597-79. Станки металлорежущие с числовым программным управлением. Обозначение осей координат и направлений движений. Общие положения (СТ СЭВ 3135-81). – М.: Стандарт, 1983. – 16 с.
28. Hardinge – Turning, milling, grinding and workholding [Electronical Resource]. – URL: <https://www.hardinge.com> (request date 28.10.2019).
29. Vericut [Электронный ресурс]. – URL: <http://vericut.ru> (дата обращения: 28.10.2019).
30. **Ушаков, Д.М.** Введение в математические основы САПР: курс лекций / Д.М. Ушаков. – М.: ДМК-Пресс, 2011. – 208 с. – ISBN: 978-5-97060-278-2.
31. **Ли, К.** Основы САПР (CAD/CAM/CAE) / К. Ли. – СПб.: Питер, 2004. – 560 с. – ISBN: 5-94723-770-9.
32. **Taylor, M.J.H.** Brassey's world aircraft and systems directory 1999/2000 / M.J.H. Taylor. – London: Brassey's, 1999. – ISBN: 1-85753-245-7.

33. **Рутковский, В.** Моделирование сложных форм с компактным представлением 3D-данных [Электронный ресурс] / В. Рутковский. – URL: [http://www.cadcamcae.lv/hot/Compact\\_n18\\_p20.htm](http://www.cadcamcae.lv/hot/Compact_n18_p20.htm) (дата обращения: 28.10.2019).
34. ISO 6983-1:1982. Числовое программное управление станков. Формат программы и определение адресных слов. Часть 1. Формат данных для систем управления позиционированием, прямолинейным перемещением и перемещением по контуру [Электронный ресурс]. – URL: [https://standartgost.ru/g/ISO\\_6983-1:1982](https://standartgost.ru/g/ISO_6983-1:1982) (дата обращения: 28.10.2019).
35. Про свободное программное обеспечение... Рекомендуемые программы для проектирования и моделирования САПР для Windows CAD, CAM, CAE [Электронный ресурс]. – URL: <http://pro-spo.ru/po/cadcamstudy> (дата обращения: 28.10.2019).
36. **Смолин, В.Д.** Устройство и принцип действия УЧПУ «Размер-4»: учеб. пособие к курсовой работе / В.Д. Смолин. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2003. – 171 с.
37. Устройство числового программного управления NC-200, NC-210, NC-220, NC-230. Руководство оператора. – СПб: Балт-Систем, 2018. – 144 с.
38. **Сагателян, Г.Р.** Основные принципы разработки управляющих программ для оборудования с ЧПУ: лекция / Г.Р. Сагателян. – М.: МГТУ им. Баумана, 2004. – 12 с.
39. СТЕЛЛА. SIMATIC программное обеспечение Siemens [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.ste.ru/siemens/software.html> (дата обращения: 28.10.2019).
40. SIMENS. SIMATIC. Программирование с помощью Step 7 V5.3. Руководство (часть пакета документации 6ES7810-4CA07-8BW1, редакция 01/2004). – 2004. – 124 с.
41. Sematic WinCC [Электронный ресурс]. – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Sematic\\_WinCC](https://ru.wikipedia.org/wiki/Sematic_WinCC) (дата обращения: 28.10.2019).
42. **Марголит, Р.Б.** Наладка станков с программным управлением: Учеб. пособие / Р.Б. Марголит. – М.: Машиностроение. 1983. – 253 с.
43. **Сергиевский, Л.В.** Пособие наладчика станков с ЧПУ / Л.В. Сергиевский, В.В. Русланов. – М.: Машиностроение, 1991. – 176 с. – ISBN: 5-217-01019-3.
44. **Корниевич, М.А.** Обработка деталей на станках с ЧПУ: учеб. пособие / М.А. Корниевич, Е.Э. Фельдштейн. – Минск: Новое знание, 2005. – 288 с.
45. **Сотников, В.И.** Программирование и работа на станках, оснащённых системой ЧПУ 2P22: учеб. пособие для вузов / В.И. Сотников – Орёл: Орёл-ГТУ, 2009. – 83 с.
46. **Балла, О.М.** Обработка деталей на станках с ЧПУ. Оборудование. Оснастка. Технология: учебное пособие / О.М. Балла. – СПб.: Лань, 2019. – 368 с.
47. Позиционное устройство ПЗ2-3М [Электронный ресурс]. – URL: <http://delta-grup.ru/bibliot/28/39.htm> (дата обращения: 28.10.2019).
48. Станочные датчики для привязки и измерения компонентов [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.renishaw.ru/ru/machine-tool-probes-for-component-setting-and-inspection-6075> (дата обращения: 28.10.2019).

49. ГОСТ 3.1503-74. Единая система технологической документации (ЕСТД). Правила оформления документации контроля. Паспорт технологический. – М.: Государственный комитет стандартов Совета министров СССР, 1977. – 4 с.
50. **Смолин, В.Д.** Следящий привод станка с числовым программным управлением: учеб. пособие к курсовой работе / В.Д. Смолин. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2002. – 119 с.
51. Современный электропривод станков с ЧПУ и промышленных роботов / под ред. Б.И. Черпакова. – М.: Высшая школа, 1989. – 111 с.
52. Blaser Swisslube AG [Electronical Resource]. – URL: <http://abplanalp.uz/blaser.html> (request date 28.10.2019).
53. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием: справочник / под общ. ред. С.Г. Энтелиса, Э.М. Берлинера. – М.: Машиностроение, 1995. – 496 с.
54. Siemens S7-300 Программируемый контроллер [Электронный ресурс]. – <https://www.siemens-pro.ru/components/s7-300.htm> (дата обращения: 28.10.2019).
55. Линейные двигатели Siemens, тип 1FN [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.promautomatic.ru/products/line-dvigatel.html> (дата обращения: 28.10.2019).
56. ISO 6983-1:2009. Системы автоматизации и интеграции. ЧПУ станков. Формат программы и определения адресных слов [Электронный ресурс]. – URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/611b0512-8b34-4982-bb40-8152a32acf24/iso-6983-1-2009> (дата обращения: 17.11.2020).
57. Балт-Систем. Документация. Системы УЧПУ [Электронный ресурс]. – URL: <https://bsystem.ru/docs2> (дата обращения: 28.10.2019).
58. Устройство числового программного управления NC-200, NC-210, NC-220, NC-230, NC-400, NC-310, NC-301, NC-302. Руководство оператора. Приложение. Режим «КОМАНДА» [Электронный ресурс]. – URL: <https://bsystem.ru/Portals/0/store/docs/CNC/SoftРежим%20КОМАНДА.pdf> (дата обращения: 17.11.2020).
59. **Серебrenицкий, П.П.** Устройства числового программного управления / П.П. Серебrenицкий // Металлообработка. – 2009. – № 5. – С. 47-51.
60. **Шарий, Ю.С.** Подготовка программ для станков с ЧПУ / Ю.С. Шарий. – М.: Машиностроение, 1980. – 144 с.
61. **Сотников, В.И.** Программирование и работа на станках, оснащенных системой ЧПУ «Электроника НЦ-31»: учеб. пособие для вузов / В.И. Сотников. – Орел: ОрелГТУ, 2009. – 91 с.
62. Устройство числового программного управления 2P22. Руководство по эксплуатации. – Нальчик: СКЭП, 1987. – 70 с. – URL: [https://www.studmed.ru/ustroystvo-chpu-2r22-instrukciya-projectspluatacii\\_f8d63338643.html](https://www.studmed.ru/ustroystvo-chpu-2r22-instrukciya-projectspluatacii_f8d63338643.html) (дата обращения: 28.10.2019).
63. Устройство ЧПУ 2C42-65 (Руководство оператора) 2.5748275.00001-03 34 01 [Электронный ресурс]. – URL: [https://www.studmed.ru/ustroystvo-chpu-2s42-65-rukovodstvo-operatora\\_3897c4d6686.html](https://www.studmed.ru/ustroystvo-chpu-2s42-65-rukovodstvo-operatora_3897c4d6686.html) (дата обращения: 28.10.2019).

## ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ ИНФОРМАЦИИ

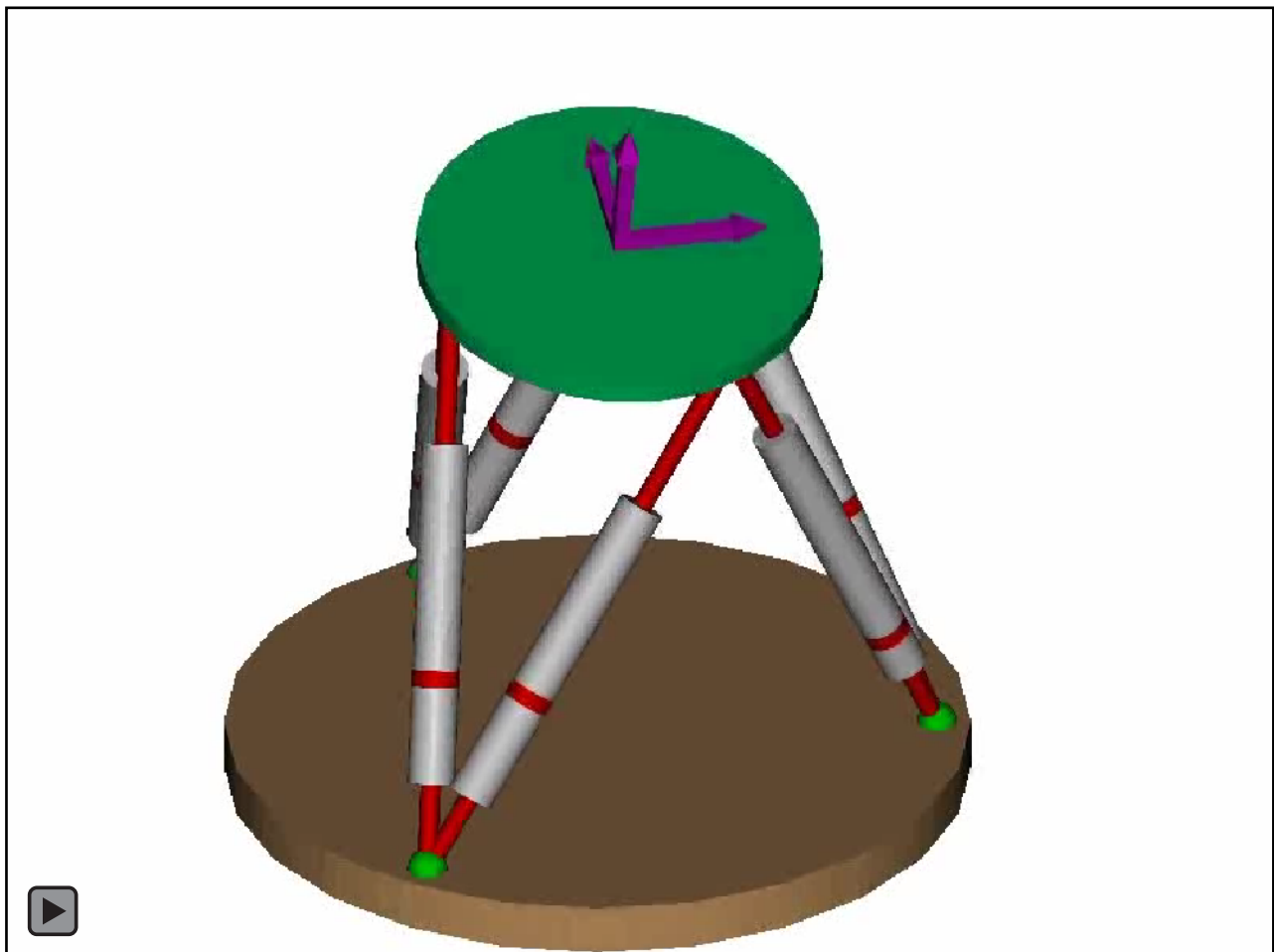
1. **Волков, А.Н.** Станки с ЧПУ: учеб. пособие. Часть 1 / А.Н. Волков, М.Б. Сазонов, В.Н. Трусов. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. – 110 с.
2. Методика ускоренной подготовки технических специалистов для автоматизированной КТПП с ЧПУ. – 2-я ред., доп. – М.: Группа компаний ADEM, 2008. – 71 с.
3. **Схиртладзе, А.Г.** Станочник широкого профиля: учебник для профессиональных учебных заведений / А.Г. Схиртладзе, В.Ю. Новиков. – 3-е изд. – М.: Высшая школа, 2001. – 464 с.
4. **Батаев, В.А.** Программирование обработки на фрезерных центрах компании DMGc устройством ЧПУ HEIDENHAIN 530 / В.А. Батаев [и др.]. – Новосибирск: Новосибирский ГТУ, 2008. – 95 с.
5. Промышленные системы автоматизации SIMATIC [Электронный ресурс]. – URL: <https://new.siemens.com/ru/ru/produkty/avtomatizacia/sistemy-avtomatizacii/promyshlennye-sistemy-simatic.html> (дата обращения: 28.10.2019).
6. Устройство числового программного управления NC-110, NC-301, NC-302, NC-310, NC-400. Руководство оператора. – СПб.: Балт-Систем, 2019. – 162 с.
7. **Черпаков, Б.И.** Технологическая оснастка / Б.И. Черпаков. – М.: Академия, 2003. – 288 с.
8. **Григорьев, С.Н.** Инструментальная оснастка станков с ЧПУ: Справочник / С.Н. Григорьев, М.В. Кохомский, А.Р. Маслов. – М.: Машиностроение, 2006. – 544 с.
9. **Кузнецов, Ю.И.** Оснастка для станков с ЧПУ: Справочник / Ю.И. Кузнецов, А.Р. Маслов, А.Н. Байков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.
10. **Босинзон, М.А.** Современные системы ЧПУ и их эксплуатация / М.А. Босинзон. – М.: Академия, 2008. – 192 с.
11. **Босинзон, М.А.** Современные системы ЧПУ и их эксплуатация: учеб. пособие для нач. проф. образования / М.А. Босинзон; под ред. Б.И. Черпакова. – 4-е изд. – М.: Изд. центр Academia, 2010. – 192 с. – ISBN: 978-5-7695-7351-4.
12. Устройство ЧПУ НЦ-31м. Паспорт. – Севастополь: ДП «Маяк-Сервис». – 10 с.
13. Станок токарный программный с оперативной системой управления НЦ-13-01 (расширенная версия). Инструкция по вводу и настройке параметров 16A20ФЗС39 И110. – М.: Московский станкостроительный завод «Красный пролетарий» им. А.И. Ефремова. 1987. – 16 с.
14. Параметры станка с УЧПУ «Электроника НЦ-31» [Электронный ресурс]. – URL: [http://stanoks.net/index.php?option=com\\_content&view=article&id=403:-31-&catid=101:catalogcnc&Itemid=188](http://stanoks.net/index.php?option=com_content&view=article&id=403:-31-&catid=101:catalogcnc&Itemid=188) (дата обращения: 28.10.2019).
15. **Кошкин, В.Л.** Аппаратные системы числового программного управления / В.Л. Кошкин. – М.: Машиностроение, 1989. – 248 с.
16. **Пятунин, А.И.** САПР управляющих программ: Курс лекций / А.И. Пятунин. – Электросталь: Электростальский политехнический институт, филиал МИСиС, 2006. – 130 с.

17. **Гурьянихин, В.Ф.** Автоматизированная подготовка управляющих программ для станков с ЧПУ: учеб. пособие к практическим и лабораторным работам / В.Ф. Гурьянихин, М.Н. Булыгина. – Ульяновск: УлГТУ, 2001. – 88 с.
18. **Сосонкин, В.Л.** Мультиагентная модель открытой системы ЧПУ типа PCNC / В.Л. Сосонкин, Г.М. Мартинов // Автоматизация в промышленности. – 2007. – № 5. – С. 3-6.
19. **Мазеин, П.Г.** Станки с компьютерным управлением: учеб. пособие. Часть 2 / П.Г. Мазеин, С.С. Панов, С.В. Шереметьев, С.А. Псарев, С.Н. Свиридов, А.А. Савельев. – Челябинск: ЮУрГУ, 2006. – 88 с.
20. **Ловыгин, А.А.** Современный станок с ЧПУ и CAD/CAM система / А.А. Ловыгин, А.В. Васильев, С.Ю. Кривцов. – М.: Эльф ИПР, 2006. – 286 с. – ISBN: 5-900891-60-7.
21. **Сосонкин, В.Л.** Программирование систем числового программного управления: учеб. пособие / В.Л. Сосонкин, Г.М. Мартинов. – М.: Логос, 2008. – 344 с. – ISBN: 978-5-98704-296-0.
22. **Fitzpatrick, M.** Machining and CNC technology / M. Fitzpatrick. – 4<sup>th</sup> ed. – New York: McGraw-Hill Higher Education; 2019. – 864 p.
23. **Сосонкин, В.Л.** Программирование систем числового программного управления. Практикум по программированию систем ЧПУ. Приложение на компакт-диске [Электронный ресурс] / В.Л. Сосонкин, Г.М. Мартинов. – М.: Логос, 2008. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
24. **Сосонкин, В.Л.** Методика программирования станков с ЧПУ на наиболее полном полигоне вспомогательных G-функций [Электронный ресурс] / В.Л. Сосонкин, Г.М. Мартинов. – 101 с. – URL: [https://techno-mash.ru/library/metodika\\_programirovaniya\\_stanko\\_cnc.pdf](https://techno-mash.ru/library/metodika_programirovaniya_stanko_cnc.pdf) (дата обращения: 28.10.2019).
25. **Серебеницкий, П.П.** Программирование для автоматизированного оборудования: учебник для средн. проф. учебных заведений / П.П. Серебеницкий, А.Г. Схиртладзе; под ред. Ю.М. Соломенцева. – М.: Высшая школа. 2003. – 592 с.
26. **Лучкин, В.К.** Разработка управляющих программ для станков с ЧПУ в САПР T-FLEX ЧПУ: метод. указания / В.К. Лучкин. – Тамбов: ТГТУ, 2006. – 52 с.
27. **Морозов, В.В.** Программирование обработки деталей на современных многофункциональных токарных станках с ЧПУ / В.В. Морозов, В.Г. Гусев. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2009. – 236 с. – ISBN: 978-5-89368-979-2.
28. Программирование обработки деталей на станках с ЧПУ: учеб. пособие / С.И. Кормилицин, В.М. Оробинский, В.А. Солодков, А.Г. Схиртладзе, Ю.М. Быков. – Волгоград: ВолгГТУ, 1999. – 92 с. – ISBN: 5-230-03704-0.
29. **Кряжев, Д.Ю.** Фрезерная обработка на станках с ЧПУ с системой ЧПУ FANUC: учеб. пособие, версия 0.1 [Электронный ресурс] / Д.Ю. Кряжев. – СПб, М., Екатеринбург: ЗАО «Ирлен-инжиниринг», 2005. – 40 с. –URL: [http://www.mirstan.ru/files/CNC\\_Literature/frez\\_CNC.pdf](http://www.mirstan.ru/files/CNC_Literature/frez_CNC.pdf) (дата обращения 10.10 2019).

30. Андреев Г.И. Работа на токарных станках с ЧПУ с системой ЧПУ FANUC. СПб., М., Екатеринбург: ЗАО «Ирлен-инжиниринг», 2005. 41с. Источник информации [www.irlen.ru](http://www.irlen.ru) (дата обращения 10.10.2019).
31. Гибридное моделирование компании Delcamplc – успешная комбинация поверхностного, твердотельного и фасетного 3D-моделирования // Сапр и графика. – 2008. – № 9. – С. 60-61.
32. Серия FANUC 16i/160i/160is – модель В; Серия FANUC 18i/180i/180is – модель В; Серия FANUC 21i/210i/210is – модель В. Руководство по техобслуживанию [Электронный ресурс]. – URL: <http://servicetex.ru/wp-content/uploads/lib/cnc/FANUC/16i%2018i%2021i%20-В/Руководство%20по%20техобслуживанию.pdf> (дата обращения: 28.10.2019).
33. Серия FANUC 0i-MB. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]. – URL: <https://gendocs.ru/v20424/?cc=1&view=pdf> (дата обращения 12.11.2020).
34. **Баталин, А.А.** Устройство ЧПУ Э2000CNC и комплексные системы управления станками на его базе / А.А. Баталин, А.Б. Шустов, В.В. Васильев // Инструменты, технология, оборудование. – 2004. – № 2. – С. 61-65.
35. **Геринг, А.** Секреты систем ЧПУ серии Fanuc 6Т/М-А,В,Е / А. Геринг. – Тольятти: Тольятти ГТУ, 2007. – 115 с.
36. Устройство ЧПУ «Маяк-600». Инструкция по составлению программы электроавтоматики станка. ПВСО.303.014 ИМ. Редакция 14.10.2009 [Электронный ресурс]. – 101 с. – URL: <http://www.izhprest.ru/doc/pes600.pdf> (дата обращения: 28.10.2019).
37. Опыт модернизации оборудования с ЧПУ на ОАО «Долгопрудненское научно-производственное предприятие / В. Григоренко, В. Андреев // CAD-master. – 2007. – № 4(39). – С. 38-44.
38. **Константинов, М.Т.** Расчёт программ фрезерования на станках с ЧПУ / М.Т. Константинов. – М.: Машиностроение, 1985. – 160 с.
39. **Павлов, С.** Механика самодельного станка с ЧПУ [Электронный ресурс] / С. Павлов. – URL: [http://www.rcdesign.ru/articles/tools/cnc\\_mechanics](http://www.rcdesign.ru/articles/tools/cnc_mechanics) (дата обращения 10.10.2019).
40. **Филенко, Н.** Станок с ЧПУ своими руками / Н. Филенко. – URL: <http://forum.sibnet.ru/index.php?act=Attach&type=post&id=186907> (дата обращения 10.10.2019).
41. **Вильямс, Дж.** Программируемые роботы. Создаём робот для своей домашней мастерской / Дж. Вильямс; пер. с англ. А.Ю. Карцева. – М.: ИТ Пресс, 2006. – 240 с.
42. **Altafini, C.** Motion on submanifolds of noninvariant holonomic constraints for a kinematic control system evolving on a matrix Lie group / C. Altafini, R. Frezza // Systems and Control Letters. – 2003. – Vol. 50, Issue 3. – P. 241-250. – DOI: 10.1016/S0167-6911(03)00168-3.
43. **Venkata, R.M.** Study on computer numerical control (CNC) machines / R.M. Venkata, M. Srinivasulu, P.N. Mani // International Journal of Advanced Scientific Research. – 2016. – Vol. 1, Issue 1. – P. 13-17.

44. **Balic, J.** Intelligent computer numerical control unit for machine tools / J. Balic // Journal of Intelligent and Robotic System. – 2004. – Vol. 40, Issue 4. – P. 343-358. – DOI: 10.1023/B:JINT.0000042183.02570.7f.
45. **Ansar Md, A.H.** Features and applications of CNC machines and systems / A.H. Ansar Md, M.A. Hussain, S.M. Alamoodi, S. Mahreen, T. Sultana, M.A.R. Uzair // International Journal of Science, Engineering and Technology Research. – 2016. – Vol. 5, Issue 3. – P. 717-726.
46. **Burak, S.** Trajectory generation for CNC machine tools / S. Burak // Journal of the Japan Society for Precision Engineering. – 2013. – Vol. 79, Issue 7. – P. 631-638. – DOI: 10.2493/jjspe.79.631.
47. **Prakash, M.** Automation in CNC code generation and tool path optimization for micro-milling machine / M. Prakash, P. Hariharan, M. Kanthababu // International Journal of Innovative Research and Development. – 2014. – Vol. 3, Issue 5. – P. 447-455.
48. **Lynch, M.** CNC intro-The key concepts of computer numerical control [Electronical Resource] / M. Lynch. – 1997, January 4. – URL: <https://www.mmsonline.com/articles/cnc-intro-the-key-concepts-of-computer-numerical-control> (request date 28.10.2019).
49. **Kuric, I.** Measurement and analysis of cnc machine tool accuracy in different location on work table / I. Kuric, M. Košinár, M. Cisár // Proceedings in Manufacturing Systems. – 2012. – Vol. 7, Issue 4. – P. 259-264.
50. **Bosetti, P.** Enhancing positioning accuracy of CNC machine tools by means of direct measurement of deformation / P. Bosetti, S. Bruschi // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2012. – Vol. 58, Issue 1. – P. 651-662. – DOI: 10.1007/s00170-011-3411-6.

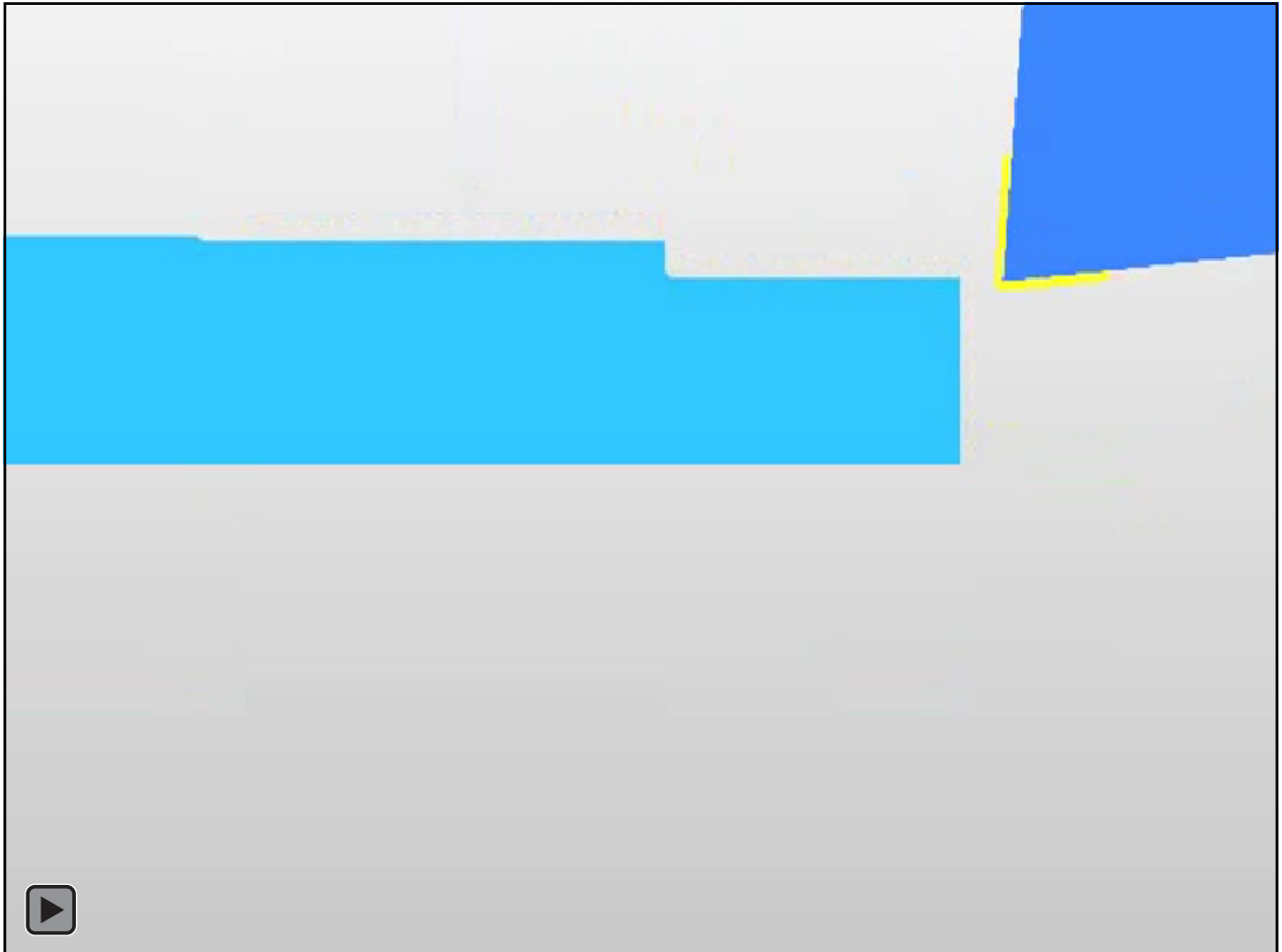
Анимация динамики движения исполнительных органов трипод-станка.



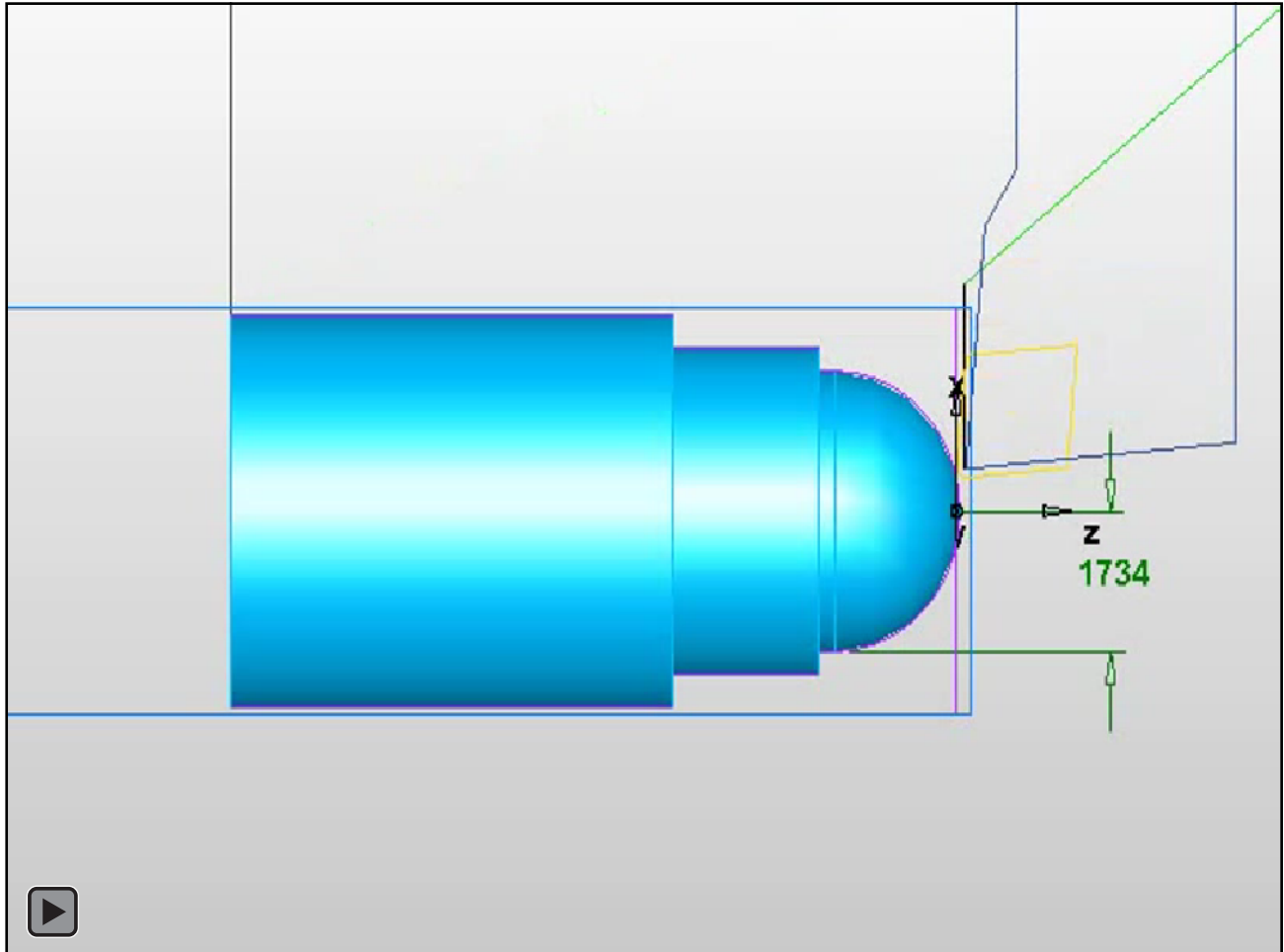


## Приложение 2

Анимированная симуляция процесса обработки контура 2D-модели детали на токарно-фрезерном центре *INDEX R300-INDEX TRAUB* со стойкой ЧПУ *Fanuc Oi-TB* (первый вариант).

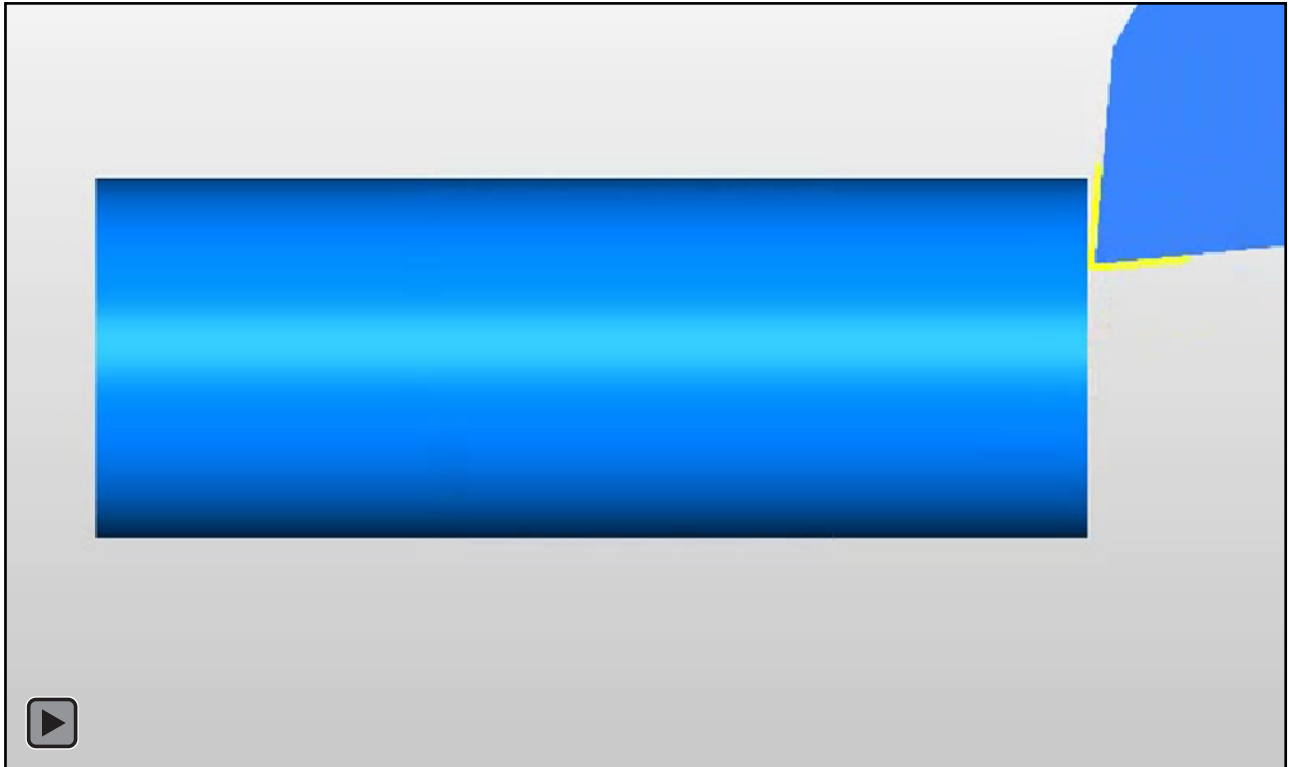


Анимированная симуляция процесса обработки контура 2D-модели детали на токарно-фрезерном центре *INDEX R300-INDEX TRAUB* со стойкой ЧПУ *Fanuc 0i-TB* (второй вариант).

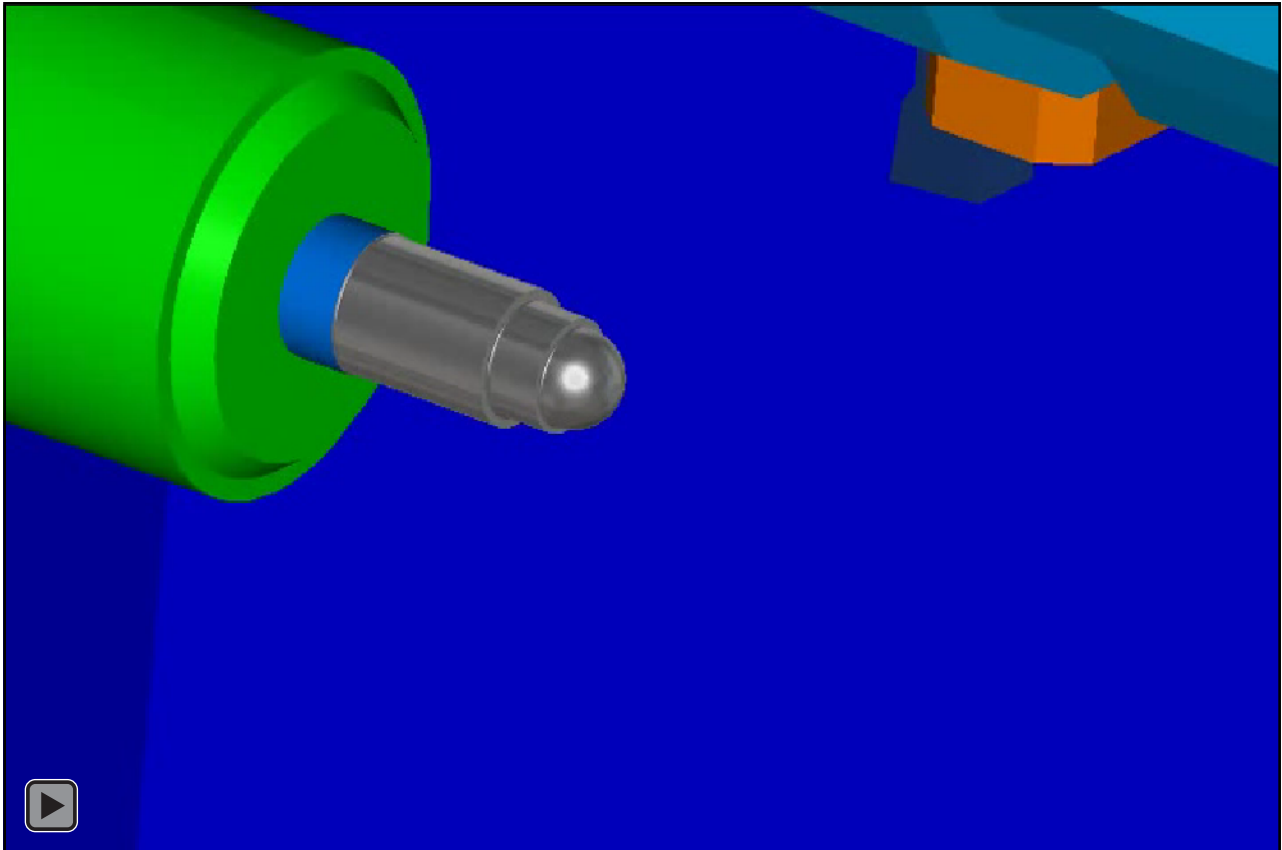


## Приложение 4

Анимированная симуляция процесса обработки 3D-модели детали на 3D-модели токарно-фрезерного центра *INDEX R300-INDEX TRAUB* со стойкой ЧПУ *Fanuc 0i-TB*.



Управляющая программа для изготовления детали на рис. 7.8, сгенерированная для токарно-фрезерного центра *INDEX R300-INDEX TRAUB* со стойкой ЧПУ *Fanuc Oi-TB*



```
%  
O0001 (FM1 10-16-2019)  
N1  
(SW_TURN_80M_RH)  
( ROUGH FACE ТОПЕЦ1 )  
G0 G21 G40 G80 G95  
G92 S3000  
G96 S365 T0101 M3  
X54.0 Z0.1 M8  
G1 X-2.0 F0.381  
Z0.5  
X-1.293 Z0.854  
G0 Z5.0
```

( FINISH FACE ТОРЕЦІ )

G92 S3000  
G96 S487 M3  
X56.0 Z5.0  
Z0.  
G1 X-2.0 F0.152  
X3.657 Z2.828

( ROUGH TURN ТОЧЕНИЕ1 )

G92 S3000  
G96 S365 M3  
X54.0 Z2.828  
X56.0 Z4.451  
X48.624  
G1 Z-100.705 F0.381  
X50.0  
X50.707 Z-100.351  
G0 Z4.451  
G1 X40.624  
Z-38.9  
X46.424  
G3 X48.624 Z-40.0 R1.1  
G1 X49.331 Z-39.646  
G0 Z4.451  
G1 X34.624  
Z-18.9  
X38.424  
G3 X40.624 Z-20.0 R1.1  
G1 X41.331 Z-19.646  
G0 Z4.451  
G1 X25.574  
Z-5.677  
G3 X34.624 Z-17.649 R18.1  
G1 X35.331 Z-17.295  
G0 Z4.451  
G1 X16.524  
Z-1.974  
G3 X25.574 Z-5.677 R18.1  
G1 X26.281 Z-5.323  
G0 Z4.451  
G1 X7.473  
Z-0.124  
G3 X16.524 Z-1.974 R18.1  
G1 X17.231 Z-1.62  
G0 Z4.451

G1 X-1.577  
Z0.451  
G3 X7.473 Z-0.124 R18.1  
G1 X8.181 Z0.23  
G0 Z3.351

( FINISH TURN ТОЧЕНИЕ1 )

G92 S3000  
G96 S487 M3  
X-9.577 Z0.351  
G1 X-1.577 F0.152  
G3 X34.424 Z-17.649 R18.0  
G1 Z-19.0  
X38.424  
G3 X40.424 Z-20.0 R1.0  
G1 Z-39.0  
X46.424  
G3 X48.424 Z-40.0 R1.0  
G1 Z-100.705  
X54.081 Z-97.876  
G0 X56.0  
G0 G28 U0. W0. M9  
T0100 M5  
M30  
%