

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

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, 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств, 24.03.05 Двигатели летательных аппаратов и специальности 24.05.02 Проектирование авиационных и ракетных двигателей

САМАРА
Издательство Самарского университета
2021

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

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. В. А. М и х е е в;
д-р техн. наук, проф. Н. В. Н о с о в

Абульханов, Станислав Рафаелевич

А177 **Системы ЧПУ металлорежущих станков: учебное пособие /**
С.Р. Абульханов. – Самара: Издательство Самарского университета,
2021. – 72 с.

ISBN 978-5-7883-1622-2

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 обучающихся по направлениям подготовки 15.03.01 Машиностроение, 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств, 24.03.05 Двигатели летательных аппаратов и специальности 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

ISBN 978-5-7883-1622-2

© Самарский университет, 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ СОКРАЩЕНИЯ	4
СТРУКТУРА ПОСОБИЯ	6
ВВЕДЕНИЕ	7
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ.....	8
2. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ОБОРУДОВАНИЯ С ЧПУ	13
2.1. Снижение доли человеческого фактора в производственном процессе	13
2.2. Программный интерфейс в системах ЧПУ	16
2.3. Унификация условий эксплуатации систем ЧПУ	17
3. ВИДЫ СИСТЕМ ЧИСЛОВОГО ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ	19
3.1. Классификация по типу и количеству управляемых координат	19
3.2. Настройка (характеризация) систем ЧПУ.....	25
4. НАПИСАНИЕ И ГЕНЕРАЦИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ ДЛЯ СИСТЕМ ЧПУ	27
4.1. САМ-системы.....	28
5. СИСТЕМЫ ЧПУ	31
5.1. Системная структура ЧПУ	32
6. ОБСЛУЖИВАНИЕ СТАНКОВ С СИСТЕМАМИ ЧПУ	34
7. СПОСОБЫ НАПИСАНИЯ ИЛИ ГЕНЕРАЦИИ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ.....	38
7.1. Базовые понятия пользовательских программ систем ЧПУ	38
7.2. Назначение системы ЧПУ типа 4С и его возможности	40
7.3. Построение технологической схемы (стратегии) обработки детали.....	41
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	61
СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИНФОРМАЦИИ	62
ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ ИНФОРМАЦИИ	65
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	69

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.
- ЛИ – линейная интерполяция (англ. *Linear Interpolation*).
- МП – микропроцессор (англ. *Microprocessor*).
- МПП – микропроцессорная память (англ. *Microprocessor Memory*).
- ОЗУ – оперативное запоминающее устройство (англ. *Random Access Memory*).
- ОП – основная память (англ. *Main Memory*).
- ПЗУ – постоянное запоминающее устройство (англ. *Read Only Memory*).
- ПИ – полиномиальная интерполяция (англ. *Polynomial interpolation*).
- ПК – персональный компьютер (англ. *Personal Computer*).
- РТК – расчетно-технологическая карта.
- САПР – система автоматизированного проектирования.
- СИ – спиральная интерполяция (англ. *Helical interpolation*).
- СОЖ – смазывающе-охлаждающая жидкость.
- СПИ – сплайновая интерполяция (англ. *Spline interpolation*).
- СЧПУ – систем 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*).
- АДЕМ – российская интегрированная CAD/CAM/CAPP система (англ. *Automated Design Engineering Manufacturing*).
- CAD – система компьютерных технологий в проектировании (англ. *Computer Aided Design*).
- 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 – модуля обработки данных (англ. *Data Processing Unit*).

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

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*).

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

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.

ВВЕДЕНИЕ

Современные высокотехнологичные металлообрабатывающие станки невозможны без числового программного управления (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 *ISO 9000* повышение качества производимой продукции достигается через снижение участия человека в производственном процессе.

Широкое использование оборудования с ЧПУ в производстве есть организационный этап снижения доли участия человека в производстве.

Автоматизация производства на современном этапе возможна при сотрудничестве специалистов различных технических направлений. Такого рода сотрудничество между специалистами различных технических направлений позволяет успешно 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.

Эксплуатация современных систем с ЧПУ невозможна без использования специализированного программного обеспечения. Масштабная автоматизация производства требует привлечения САД и САМ-систем. 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.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Современное металлообрабатывающее производство – это целый комплекс производственных стратегий, компьютерных программ, технологий, станков, оснастки и инструментов, а также методов контроля качества, методик обучения персонала и нормирования трудовых операций. Основным принципом организации современного производства является его гибкость, т.е. способность быстро адаптироваться к условиям изменяющегося рынка.

Поэтому основные тенденции развития мирового станкостроения – это создание оборудования, которое позволяет изготавливать деталь с высокой точностью¹, 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. 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). 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).
- сокращение времени холостых перемещений рабочих органов станка. 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*

¹ 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, что снижает точность обработки детали. По этой причине достижение необходимой точности обработки возможно через увеличение жёсткости конструкции станка. Например, применение специальных материалов для изготовления станин: чугуна марки *Meehanite* [3], полимерного бетона *Mineralit* [4], повышают демпфирующие свойства конструкции станка. Стойкость к воздействию вибраций конструкции станка достигается выполнением в корпусных деталях пустот, которые заполняются полимерными составами, имеющими высокий декремент затухания колебаний.



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

Известен способ повышения жесткости станка через повышение жесткости направляющих путём использования специальных, высокоскоростных оправок с трехплоскостной системой контакта, например, *3 Lock System* фирмы *Nikken* [5] (рис. 1.3). При этом накладки на направляющие выполнены из специальных сплавов или керамики.

Точность механической обработки повышают уменьшением количества установок детали. Поэтому современные обрабатывающие центры совмещают в себе функции токарной и фрезерной обработки. Различают токарно-фрезерные центры на базе токарных станков с полноценным фрезерным шпинделем и фрезерно-токарные центры на базе фрезерного станка, оснащенного токарным шпинделем с планшайбой.

Немецкая фирма *Matec* [6] производит фрезерно-токарные центры. Модель *Matec-30 HV/K* оснащена планшайбой, поворотным столом с токарной функцией и фрезерным шпинделем (рис. 1.4) и имеет 5-ть управляемых координат. Такие технологические возможности востребованы в авиационной и в инструментальной промышленности.

Модульный принцип проектирования конструкции станков расширяет тех-

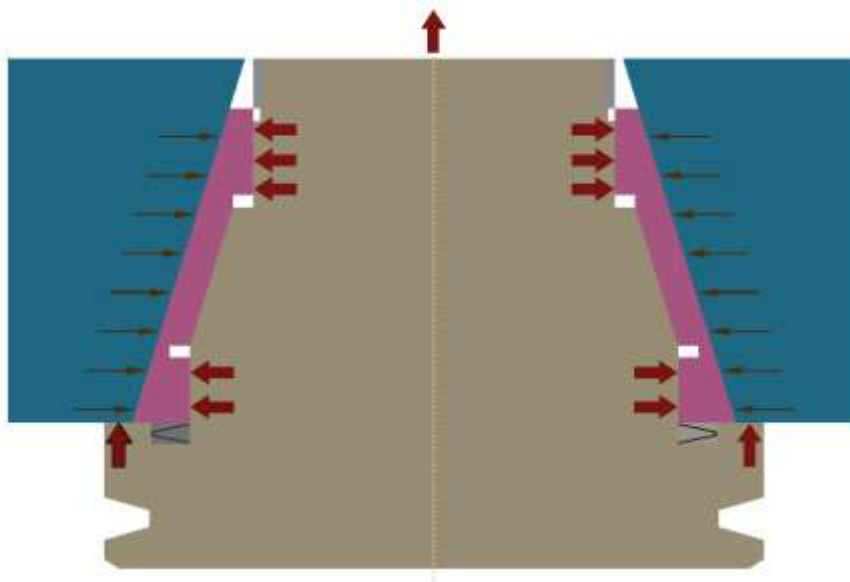


Рис. 1.3. Высокоскоростная оправка с трехплоскостной системой контакта



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

нологическую гибкость оборудования. Возможность оснащения станка дополнительно рабочими органами и опциями позволяет оптимально соответствовать возникающим технологическим задачам. Немецкая компания *Matec* изготавливает станочные центры на основе индивидуальных требований покупателей. Модульный принцип использует станкостроительная компания *Unior* (Слове-

ния) [7], которая выпускает гибкие производственные модули² (ГПМ) под конкретные задачи клиентов (рис. 1.5).



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

По аналогичному принципу производятся агрегатные станки фирмы *Pfiffner* (Швейцария) [8] серии *Hydromat*®.

Аналитические обзоры [9, 10] показывают – будущее машиностроения за высокоточными, многофункциональными станками, объединенные в гибкие производственные модули. По этой причине в ближайшем будущем необходимо решать следующие задачи:

1. Повышение точности изготовления узлов станков через использование передовых систем измерения и позиционирования;
2. Повышение жесткость станка и исключение влияния на деформации тепловых источников;
3. Обеспечение многофункциональности обрабатывающего центра для выполнения обработки детали за одну установку заготовки;
4. Возможность подключения систем ЧПУ к локальным (*Ethernet*³) и внешним (*Internet*) сетям;
5. Наличие аппаратного и программного интерфейса для интегрирования систем ЧПУ в систему автоматизированного производства;
6. Разработка оборудования, способного сокращать издержки и потери при переналадке станочного оборудования (бережное производство);

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

³ Сеть *Ethernet* – технология пакетной передачи данных между устройствами для компьютерных и промышленных сетей.

7. Возможность реконфигурации станков с модульной конструкцией;
8. Регулярное программное и аппаратное обновление систем ЧПУ.

Станкостроительная компания *Nakamura-Tome* [11] оснащает станки средствами постоянного контроля усилий на приводах, контроля сил резания. В обоих случаях, снижаются затраты на дорогостоящую оснастку.

Современный самолет *Boeing-787 Dreamliner* на 60-75 % состоит из композитных материалов [9, 10]. Композитные материалы активно используются в различных отраслях промышленности. Лидером в производстве оборудования по изготовлению и обработке деталей из армированных полимеров является американская корпорация *MAG* [12, 13].

2. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ОБОРУДОВАНИЯ С ЧПУ

Металлообрабатывающая промышленность индустриально развитых стран остро нуждается в рабочих. Негативная ситуация на рынке труда в металлообрабатывающих отраслях продолжится, нехватка кадров с высоким уровнем квалификации будет только расти [14-16]. Причины этих процессов следующие: рост сложности станочного оборудования и сложность обрабатываемых на них деталей; высокие требования к операторам современного оборудования с ЧПУ.

Практика подготовки работников (высшего звена) на станках с ЧПУ в Германии состоит из следующих этапов [17, 18]: подготовка студентов в технических университетах; обучение специалистов в корпоративном университете, созданном на средства ведущих немецких станкостроительных предприятий; работа на станке с ЧПУ в качестве ученика под руководством опытного мастера. Общий итог обучения работе на современном станке с ЧПУ составляет $4 + 2 + 1 = 7$ лет. Специалисты с такой подготовкой способны решать следующие задачи:

1. Генерация с помощью САМ-систем УП для обработки детали;
2. Удаленный доступ для осуществления удаленной технической поддержки и сервисных услуг (удаленной диагностики и ремонта станка силами производителя);
3. Хранение информации (обеспечивать организацию защищённого соединения для безопасного взаимодействия во время выполнения операций с хранимыми файлами; обеспечивать защищённую доступности и целостности исполняемой УП; защита от сетевых атак в рамках цеховой локальной вычислительной системы и сегмента сети Интернет);
4. Контроль работоспособности (система оповещения о фактической работе станка, необходимости прохождения техобслуживания и др.);
5. Мониторинг параметров работы и др.
6. Выбирать режимы технологической обработки, разрабатывать технологию (стратегию) обработки детали.

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

2.1. Снижение доли человеческого фактора в производственном процессе

Статистические исследования показывают, что человек в производстве является источником брака, ошибок и аварий. Технологические процессы (ТП), в которых участвует человек, в технологической практике, а позднее в технической литературе [19-21], называется «негарантированной технологией».

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:

1. Автоматизация ТП, при которой участие человека в технологическом процессе сводится к минимуму;

2. 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). Это дает возможность производить на станках обработку всей номенклатуры деталей, которая может быть произведена на универсальных станках соответствующих типов.

Числовое программное управление позволяет:

1. Автоматизировать процесс обработки;
2. Сократить время подготовки станка к работе, включая наладку инструмента, подготовку заготовки для обработки и отладку программы на станке;
3. Организовать многостаночное обслуживание в серийном и мелкосерийном производстве;
4. Повысить производительность труда, культуру производства и качество обработанных деталей.

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 замкнутой⁴ системы управления (англ. *CLU – Control Loop Unit*). Модуль *MCU* считывает информацию в ПЗУ. После чего *DCU* преобразует их в сигналы управления станком. Управление внешними устройствами (ВУ) осуществляется с помощью интегрированного в ВУ контроллера и внешнего компьютера.

Блок управления (БУ) 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 УП.

Уменьшение размеров компьютеров позволила ввести МП в схему управления станком. Такой станок стал называться станком с компьютерным числовым управлением (англ. *CNC – Computer Numerical Control*). ЧПУ имеет основную память (ОП, англ. *Main Memory*) – это запоминающее устройство, напрямую связанное с процессором и предназначенное для хранения выполняемых программ и данных непосредственно участвующих в операциях. ОП 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 следующих технологических задач:

- минимизация трудоёмкости обработки детали;

⁴ Замкнутая система управления имеет в своей структуре обратную связь

- 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 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. Число управляемых координат 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 происходит управление всем цехом, включая загрузку данных на конкретный станок. Такая схема называется распределенным числовым управлением (англ. *DNC – Distributed Numerical Control*).

По командам УП с помощью ЧПУ реализуются направления и скорости перемещения исполнительных органов станка, циклы работы станка, смена инструмента и др. Компьютер ЧПУ позволяет оператору 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 и в указании скорости движения в различных единицах измерения (мм/мин, мм/об, дюйм/мин, питч/об и т.д.). Движения выполняемые с высокой точностью – рабочие движения. На холостых ходах перемещения инструмента происходят с высокой скоростью, но с меньшей точностью.

Любое движение регламентируется операторами *ISO* (англ. *ISO – International Organization for Standardization*), которые интернациональны для ЧПУ любого производителя. Построение операторов в определенную временную последовательность для движения 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].

В недавнем прошлом организация работы станка с ЧПУ помимо оператора, наладчика, электрика, электроника, системного программиста обеспечивалась также программистом – пользователем и технологом. Технолог разрабатывал технологическую схему обработки детали, программист реализовал её на языке ЧПУ высокого уровня (англ. *High – level language*)⁵. Технологическая

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

карта обработки детали и программа ЧПУ, реализующая данную т/карту, подписывались разработчиками и хранились в архивах в соответствии с нормативными документами (ГОСТ, ОСТ, заводская нормаль и т.д.) [22]. Такая организация работ со станком с ЧПУ является устаревшей. Современная практика состоит в развитии электронного документооборота и использовании САПР. В этом случае большая часть работ, связанных с обслуживанием станков с ЧПУ, передана системам ЧПУ, а человек является только пользователем.

Нехватка квалифицированных рабочих приводит к найму на работу на станках с ЧПУ людей, не имеющих навыков составления УП. Станки с системами ЧПУ позволяют использовать в производстве неквалифицированный персонал. Это возможно потому, что система ЧПУ берет на себя большую часть обязанностей оператора и программиста. Для этого в систему ЧПУ импортируют 3D-модель детали, выполненная в соответствии с конструкторской документацией (КД, англ. *Design Documentation*). Современные системы ЧПУ предлагают оператору последовательность технологических операций для обработки детали; предлагают необходимый инструмент и режимы обработки с учетом материала детали. Все предложения системы носят рекомендательный характер, окончательное решение принимает оператор.

2.2. Программный интерфейс в системах ЧПУ

Общение системы с оператором достигается с помощью специальной УП, которая совместно со стандартами электрических сигналов и с определенными электрическими схемами является элементом интерфейса⁶. При этом УП называется программным интерфейсом, а электрические схемы и стандарты на электрические сигналы являются аппаратным интерфейсом. Оператор в диалоговом режиме общается с программным интерфейсом.

Интерфейс тем дружелюбней, чем больше обязанностей оператора он выполняет.

Большое количество производителей предлагают на рынке системы ЧПУ различного назначения, функционала и стоимости. Унификация таких систем регламентируется международными стандартами, которые носят рекомендательный характер, поэтому часто не соблюдаются. На многих отечественных предприятиях эксплуатируются станки различных производителей (при организации современных производств такие ситуации не рекомендуются), которые часто обслуживает один человек. У этого специалиста возникают сложности с адаптацией при переходе от одной системы числового управления к другой. По этой причине организация современного производства должна соответствовать принципам: по возможности большая часть станочного оборудования должна быть одного производителя; все команды программного интерфейса должны иметь один и тот же смысл и иметь одно и то же обозначение; специалисты, об-

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

служивающие оборудование с ЧПУ, должны регулярно проходить курсы повышения квалификации.

2.3. Унификация условий эксплуатации систем ЧПУ

При покупке станка с ЧПУ покупатель должен ориентироваться не только на стоимость станка, но и на его технологические возможности, которые предоставляет система ЧПУ. Большинство производителей систем ЧПУ стремятся к унификации мнемонических обозначений на консоли ЧПУ, терминов, обозначений и назначений операторов *ISO* и т.д. Отличия и особенности работы оператора на системах ЧПУ многих известных производителей незначительные и не требуют переобучения персонала.

Современные системы ЧПУ преимущественно графическо-диалоговые. Это означает, что на мониторе системы ЧПУ оператору предлагается выбрать рекомендованную УП операцию. Например, предлагается включить охлаждение. При согласии оператор ставит галочку в меню против пункта «Охлаждение вкл/выкл». В ранних системах ЧПУ оператор должен помнить о ситуациях, когда необходимо включать систему водяного охлаждения и помнить необходимые для этого операторы УП.

Возможности современных ЧПУ определяются не системными особенностями и вычислительными мощностями используемых процессоров и других компонент компьютера, а определяются структурой разработанной УП, позволяющей оптимально использовать имеющиеся вычислительные возможности компьютера. Поэтому 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. Задача *ICNC* состоит в скоординированном управлении группой станочного оборудования.

Стоимость промышленных компьютеров приближается к стоимости самых новых систем ЧПУ. Вычислительные возможности процессора, объём памяти, аппаратный интерфейс и другие компоненты промышленного компьютера по своим характеристикам многократно превосходят необходимые требования для систем ЧПУ.

Для организации эффективного управления производством, использующего станки с ЧПУ, необходимо единое информационное пространство. Современное оборудование должно быть интегрировано в сети с удаленным доступом. Это позволяет в режиме реального времени осуществлять дистанционный контроль за процессом обработки, передавать УП на удаленные станки, сохранять и анализировать контрольно-измерительные данные по обрабатываемым деталям.

Станки с ЧПУ, объединенные в единое информационное пространство, называют гибкой производственной системой (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

Первые системы ЧПУ являлись программируемыми контроллерами. По мере усложнения их структуры систем ЧПУ приобретали признаки специализированных компьютеров. Наиболее значимые признаки ЧПУ, как компьютера, следующие:

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

Кроме того, классификация существующих систем ЧПУ осуществляется с помощью количества управляемых системой координат станочного оборудования.

На современном этапе системы ЧПУ интегрируются в вертикальную иерархическую структуру, которая управляется из единого центра. Такие центры управления применительно к машиностроительным производствам называются промышленными компьютерами.

Автоматизация промышленных производственных процессов становится объективно необходимым условием активного развития предприятия в части совершенствования его специализации, расширения номенклатуры изделий и других экономических показателей. По этой причине системами ЧПУ оснащаются самые различные станки – от простейших до самых сложных.

3.1. Классификация по типу и количеству управляемых координат

Перемещения исполнительных органов станков могут быть различных типов: непрерывные и дискретные. Перемещения происходят по прямым отрезкам или по фрагментам окружности необходимого радиуса. При этом скорость или частота перемещений могут происходить с переменной во времени скоростью или с переменными во времени частотами.

Перемещение исполнительных органов станка с ЧПУ в пространстве задается в прямоугольной декартовой системе координат. Наиболее часто для станков с ЧПУ используется правая (стандартная) декартова система координат, при которой координаты осей X , Y , Z задают линейные перемещения исполнительных органов станка. Инструмент или заготовка могут совершать дополнительно круговые перемещения, которые обозначаются буквами A (вокруг оси X), B (вокруг оси Y), C (вокруг оси Z).

Разработчики станочного оборудования указывают в технической документации на станок направление осей вдоль рабочих органов, предел перемещений по ним, а также начало системы координат (ноль станка).

По количеству управляемых перемещений различают системы двух-, трёх-, четырёх-координатные и т.д. (например, перемещения в направлении осей ко-

ординат X , Y и Z , повороты и т.д.). Простейшие система ЧПУ управляют двумя координатами. У токарного станка с ЧПУ есть 2-е управляемых координаты: поперечная - координата X и продольная - координата Z . Такая система ЧПУ называется 2-координатная⁷.

Координату, работающую лишь при отсутствии перемещений по остальным координатам, называют половиной координаты. Систему ЧПУ 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 управление координатами имеет место на фрезерных станках устаревших моделей).

Конструкции современных станков могут иметь до 7 и более исполнительных органов. Это означает, что такой станок имеет до 7 и более управляемых системой ЧПУ координат. Возможности системы ЧПУ определяют количество координат, которые могут управляться системой одновременно. Существуют системы ЧПУ, которые могут управлять одновременно всеми координатами станка. Часто в технической документации на станок указывается, что станок система ЧПУ работает, например, в режиме 3+2. Это означает, что станок имеет 3+2=5 управляемых координат. При этом система ЧПУ этого станка способна одновременно управлять любыми тремя координатами из пяти координат этого станка. Если в технической документации указывается режим работы ЧПУ 5+1, то это означает, что у станка управляются одновременно любые пять координат из шести управляемых координат этого станка. Следует отметить, система ЧПУ может управлять одновременной и меньшим количеством координат, чем количество одновременно управляемых координат, указанное в технической документации станка.

Четырех и пяти координатные станки могут принадлежать, как к токарной, так и к фрезерным группам. Обычно у токарных станков 4-ая координата – это моторизованный инструмент. Моторизованных инструментов может быть два, в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. При одновременном использовании на токарном станке координат X , Y , C , а также двух моторизованных инструментов, необходима 5-ти координатная система ЧПУ.

На фрезерном станке с ЧПУ есть управляемые координаты X , Y , Z , к которым добавляют поворотный стол, управляемый ЧПУ. В этом случае фрезерный станок при одновременном управлении всеми координатами должен иметь четырех координатную систему ЧПУ. В случае, когда фрезерный станок оснащается глобусным столом, управляемым ЧПУ, станок должен иметь пяти координатную систему ЧПУ. На рис. 3.1 показан пятикоординатный фрезерный станок, у которого шпиндель имел возможность перемещаться вдоль своей оси вращения и возможность совершать угловые перемещения относительно фиксированной оси.

⁷ Современные системы ЧПУ для токарных станков оснащаются координатой «С», которая с помощью ЧПУ управляет углом поворота шпинделя и удерживает его.



Рис. 3.1. 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

Шести координатные системы ЧПУ могут использоваться, например, в токарных станках с двумя шпинделями. На рис. 3.2 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.

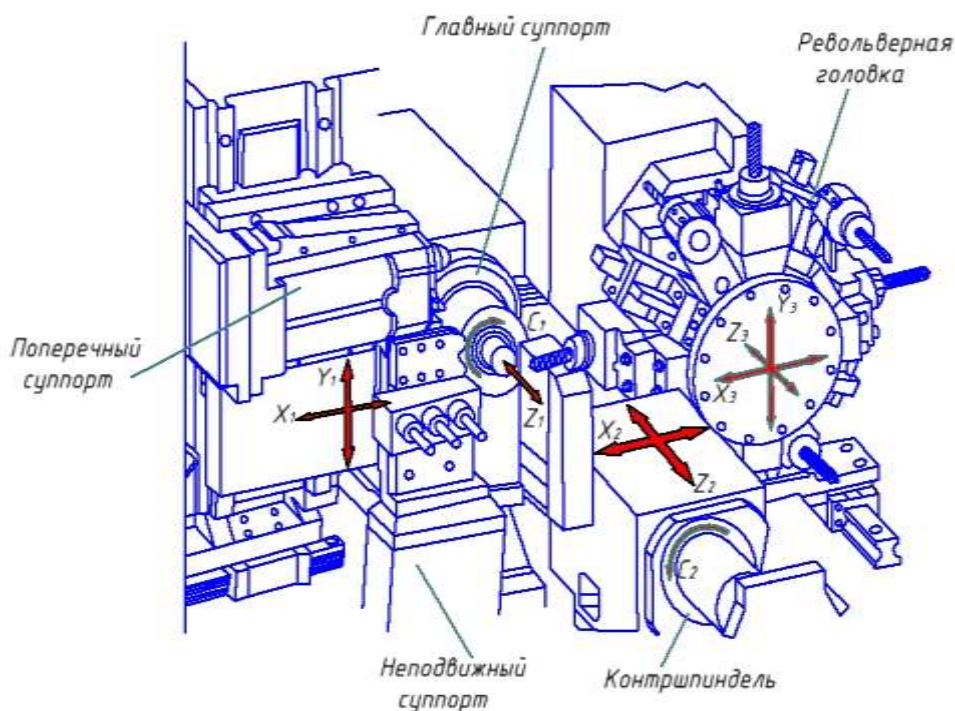


Рис. 3.2. Возможная схема движений исполнительных органов станка при использовании шестикоординатной системы ЧПУ

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. 3.3 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].



Рис. 3.3. Фрезерно-сверлильный станок *XMini* с параллельной кинематикой (производитель *Exechon, 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. 3.4). 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.

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



Рис. 3.4. Вертикальный координатно-шлифовальный станок особой точности мод. Аэрошлиф 400(производитель ЗАО «Стан-Самара» г. Самара)

В 2018 г. безусловным лидеров мирового станкостроения, производящих токарно-фрезерные центры, являлась 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*. Обрабатывающий 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.

Существует большое количество признаков классификации станков, различия между которыми включают среди прочих: количество и тип координат. Для обеспечения общности методов подготовки программ для ЧПУ существуют рекомендации международной организации по стандартизации *ISO*, а также рекомендации отечественных и 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 неза-

висимо от того, как он расположен – вертикально или горизонтально. По этой причине для двух координатной обработки системы ЧПУ используют в УП обозначения координат через X и Y 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. 3.5. Для вторичных угловых перемещений вокруг специальных осей используются буквы D и E .

Начало стандартной системы координат станка обычно совмещается с базовой точкой поверхности (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.

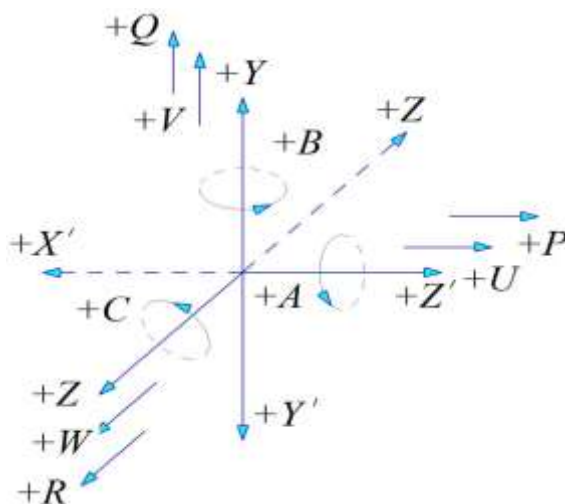


Рис. 3.5. Правая прямоугольная система координат станка

Например, системой координат токарного станка служит двух координатная система X , Z . Начало этой системы принимается в базовой точке шпиндельного узла (обычно торец заготовки). Положительные направления осей системы координат токарного станка определяются расположением основного рабочего диапазона перемещений инструмента (рис. 3.6 а, б).

Для станков сверлильной, сверлильно-расточной и фрезерной групп применяется трех координатная 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. 3.6 в, г).

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

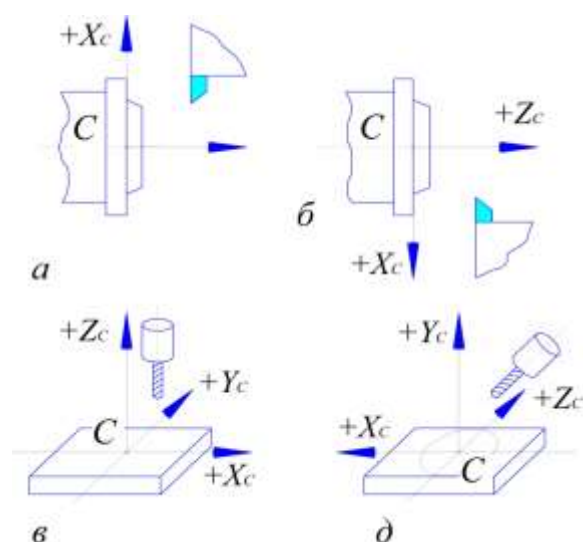


Рис. 3.6. Направления стандартной системы координат станка

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.

Разработчики систем ЧПУ для придания своей продукции технологической гибкости придают системам числового программного управления новые возможности.

Большое значение при обработке деталей имеет точности обработки, величина которого определяется отклонением (Δ) действительного размера от номинального. Величина Δ зависит от многих технологических факторов. При обработке большой партии деталей, температура в наибольшей степени влияет на точность их изготовления. При длительной эксплуатации станка нагреваются различные его узлы, приводящие к деформациям всей конструкции. В результате этого процесса снижается точность обработки деталей. Для решения этой проблемы в конструкцию станка вводятся системы охлаждения ШВП, шпинделя, а также системы температурной стабилизации СОЖ. Все эти системы охлаждения управляются системой ЧПУ.

Американская компания *Hardinge* [27] для минимизации отклонений размеров после обработки на станке с ЧПУ предлагает пакет опций *Thermal Package*. Установка 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*). Из графика на рис. 3.1 видно: в диапазон 0,005 мм попадают детали уже с «холодного старта»⁸, а начиная с 3-й детали диапазон сужается до 0,003 мм.

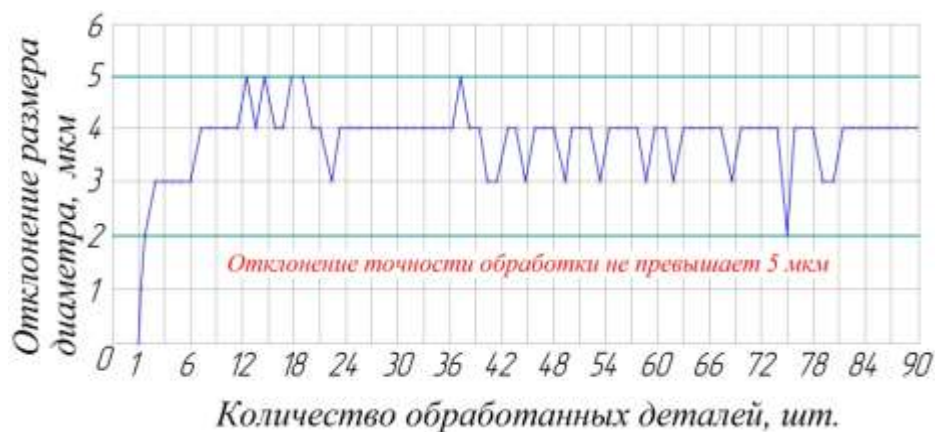


Рис. 3.7. Допуск на изготовление детали, определяемый количеством обработанных деталей

⁸ После простоя станка во время его включения система ЧПУ сканирует все датчики системы, которые, не достигнув определенной температуры, могут какое-то время блокировать работу станка; проблема «холодного старта» может быть устранена использованием программных корректоров

4. НАПИСАНИЕ И ГЕНЕРАЦИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ ДЛЯ СИСТЕМ ЧПУ

УП определяет производительность обработки детали, а также качественные параметры сформированного технологическим воздействием поверхностного слоя. УП управляет программным интерфейсом, который по команде управляющей программы включает или отключает движение исполнительных органов станка, определяет характер их движения⁹ и скорость перемещений. Рабочим ходом исполнительного органа станка называют движения, когда происходит непосредственно обработка детали. Рабочий ход характеризуется гарантированной точностью перемещения инструмента. Холостой ход исполнительного органа характеризуется высокой скоростью и низкой точностью перемещения. Используют холостой ход для перемещений инструмента, когда не происходит обработка поверхности детали.

Кроме того, УП управляет включением охлаждения зоны резания, направлением вращения шпинделя станка, типом использования подачи (минутная или подача на оборот), управляет поддержанием скорости резания и многими другими функциями станка.

Сложность программы и время её разработки (программисты говорят – «написание») определяется наличием необходимого станочного оборудования и особенностями конструкции детали.

Существует условное деление режимов написания УП, которое определяется в первую очередь квалификацией программиста, величиной серией деталей, подлежащих изготовлению, самой деталью:

1. Написание программы с пульта (консоли) ЧПУ. Такой режим в англоязычной технической литературе называется *Shop-floor*, используется для мелких серий несложных деталей. Количество управляемых координат в этом случае не более 2;
2. Программу пишет предварительно программист (без привлечения CAD-систем). Этот режим написания УП называется *Manual Programming Techniques* (ручной режим) и используется, когда количество управляемых координат не более трех. В этом режиме может быть разработана УП для изготовления пресс-формы доньшка ПЭТ-бутылки. Отличительная черта разработки УП в режиме *Manual Programming Techniques* – необходимость в большом количестве времени для написания и отладки программы. Программа, написанная в ручном режиме, обычно наиболее эффективно организована с точки зрения использования оперативной памяти ЧПУ и быстродействия обработки детали.
3. Генерацию УП для обработки сложных деталей, например, поверхность пера лопатки ГТД, осуществляют с помощью специального программного обеспечения (*Computer-aided design*). Такой способ генерации УП достаточно дорог, требует привлечения сторонних специалистов. Сгенерированная программа не всегда оптимальна с точки зрения использования оперативной памяти си-

⁹ Движения могут быть непрерывными, сканирующими, линейными и по дуге.

стемного блока ЧПУ и времени обработки детали. Использование САМ систем практически исключает процесс отладки УП. Без САМ систем невозможна разработка УП для станков с одновременно управляемыми координатами количеством не менее трех.

4.1. САМ-системы

Инструментом написания УП для изготовления сложных деталей с помощью станков ЧПУ являются САМ-системы¹⁰, которые предназначены для проектирования технологии обработки деталей и генерации управляющих программ для таких станков. Системами ЧПУ могут оснащаться фрезерные, сверлильных, эрозионных, пробивных, токарных, шлифовальных и др. станки.

В САМ-системах используется твердотельная трехмерная модель детали, созданная в одной из САД-систем (англ. САД – *Computer Aided Design*). САД и САМ-системы являются структурными элементами единой системы технологической подготовки производства (ЕТПП)¹¹.

САМ-системы различных производителей имеют различные технологические возможности. САМ-системы отличаются между собой различным уровнем возможностей:

1. 2.5-координатная обработка. В этом случае система рассчитывает траектории для простого двух координатного обработки деталей (точение, фрезерование). К таким системам относятся *BobCAM SolidCAM GEMMA, ТЕХТРАН* и др.
2. Трех координатная обработка с позиционированием 4-ой оси. Генерируется УП программа для объемной обработки. Такими системами являются *SprutCAM, T-FLEX, ESPRIT* и др.
3. Много координатная обработка – это генерация УП с учетом выбранной (рекомендованной) стратегии обработки¹², которая основана на особенностях обрабатываемой поверхности и на основе используемых кинематики станка и системы ЧПУ. В качестве примера можно указать следующие системы *EdgeCAM, FeatureCAM, SurfCAM Velocity*, которые могут применяться для обработки крыльчаток, лопаток и других подобных деталей.

Условно САД-системы можно поделить на три группы: Компас

1. «Легкие» используются для 2D графики, дешевы среди других САД-системы и не требовательны к компонентам вычислительного комплекса. К таким САД-системам можно отнести *QCAD, LibreCAD, Компас*
2. «Средние» имеют ограниченные возможности при создании 3D моделей по сравнению с «тяжелыми» САД-системами. Такими системами считаются *AutoCAD, Solidworks, ADEM*

¹⁰ САД – *Computer Aided Design* англ.

¹¹ ГОСТ 14.004-83 Технологическая подготовка производства. Термины и определения основных понятий.

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

3. «Тяжелые» применяются для построения сложных трехмерных моделей детали. Эти *CAD*-системы наиболее универсальны, дороги, позволяют оформлять чертежи в соответствии с выбранным стандартом, а также архивировать их. Такими системами являются *OpenSCAD*, *CATIA*, *NX*.

Многие системы *CAD* и *CAM* совмещают в себе решение задач относящихся к различным аспектам проектирования *CAD/CAM*. Такие системы называют

Работа с *CAM*-системами осуществляется следующим образом. На персональном компьютере (*PCNC*) с установленной *CAD*-системой строится контур обрабатываемой детали, если речь идет о токарном станке с ЧПУ, или загружается через носитель информации 3D модель обрабатываемой поверхности детали. Используемая *CAM*-система разрабатывает несколько технологий стратегий обработки детали. Выбор наиболее приемлемой стратегии обработки детали осуществляет оператор станка совместно с технологом. После этого программист (оператор станка) указывает *CAM*-системе модель станка (его кинематику и количество исполнительных органов с линейными и круговыми координатами), после чего с помощью *CAM*-системы генерируется УП для используемой на станке модели ЧПУ. В этом случае УП адаптирована к вложенным циклам, макросам и плагинам конкретной стойки ЧПУ. Процесс адаптации УП осуществляет постпроцессор (специальная программа (англ. *Post Processor*)). Встроенные постпроцессоры входят в виде модулей в *CAM*-систему. Постпроцессор преобразует рассчитанные в *CAM*-системе (формат *APT/CL*) данные о положении режущего инструмента в коды конкретного станка (*G/M*-коды) с учетом особенностей его кинематики.

Современные *CAM*-системы оснащены набором обобщенных постпроцессоров, поэтому проблем с адаптацией УП, сгенерированных для стоек ЧПУ, например, *Sinumerik*, *Haidenhain*, *FANUC* и других распространенных систем ЧПУ не возникает. Для отечественных систем ЧПУ 2C42-65, 2C42, 2R22, 2Y22, которые можно встретить на российских предприятиях (для обработки простых деталей), пишется индивидуальный постпроцессор для конкретного станка. Для ряда отечественных станков (не для всех) отечественные *CAM*-системы (*GEMMA*, *ТЕХТРАН*) предлагают постпроцессоры для стоек ЧПУ 2C42-65, 2C42, 2R22, 2Y22.

Адаптация УП для СЧПУ различных производителей осуществляется с помощью форматов файлов, которые загружаются в систему станка с программным управлением. В этих файлах содержится информация о послойном отображении 3D модели детали и порядок её механической обработки. Форматы файлов УП, сгенерированных *CAD*-системой, позволяют импортировать или экспортировать определённую информацию из одной программной среды в другую.

Каждая из используемых программных сред, используемых для организации работы станков с ЧПУ (*CAM*-системы, *CAD*-системы и программное обеспечение визуализации), работает с файлами определённого формата. Для понимания файла одной программной среды другой программной средой

существуют специальные программы, называемые конвертором. Обычно любые *CAD/CAM*-системы имеют встроенные конверторы.

Современные системы ЧПУ оснащены средствами визуализации процесса движения инструмента по выбранной траектории. Наблюдение за движением инструмента может осуществляться в *2D* проекции или в *3D* [28]. Процесс виртуальной визуализации механической обработки детали называют верификацией¹³.

¹³ Верификация – способ подтверждения каких-либо теоретических положений, алгоритмов, программ и процедур путём их сопоставления с опытными (эталонными или эмпирическими) данными, программами и алгоритмами

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), «*Fagor*» (Испания), «*FANUK*» (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» – разработчик НИИКон, производитель НПО «Полус» (Новосибирск), «Микрос-12» – производитель ЗАО «Микрос» (г. Ногинск, Московская обл.) и т.д.

Следует отметить, что отечественные управляющие системы отличаются от своих зарубежных конкурентов и технологическими возможностями, и дружелюбностью интерфейса. К достоинствам отечественных систем ЧПУ можно отнести их стоимость. Поскольку «железо» (микросхемы, крейты и т. д.) отечественных и зарубежных системы ЧПУ собирается в континентальном Китае, то в ближайшее время произойдет выравнивание отечественных и зарубежных цен ЧПУ.

Следует отметить: новейшие системы ЧПУ зарубежных производителей. 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 (ПК) 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.

Несколько станков с ЧПУ могут объединиться в гибкую автоматизированную производственную систему (ГПС), которая может быть дополнена гибким автоматизированным участком (ГАУ) и войти в состав автоматической линии (производства масштаба участка либо цеха). Обмен информационными потоками между ГПС, ГАУ и ЧПУ станков может осуществляться через локальную или глобальную информационную сеть.

При написании оператором УП в режиме *Shop-floor* (программирование с пульта) возникает необходимость определения координат точек сопряжения фрагментов контура детали. Точки сопряжения контура детали могут быть точками касания и перегиба, точками пересечения и др. Для определения необходимых координат разработчики ЧПУ устанавливают в систему языки, оперирующие графическими объектами.

Разработчики СЧПУ «Балт-систем» оснащают свои системы языком *GTL*, который позволяет строить по чертежу детали её контур и определять координаты необходимых точек [29, 30].

Разработчики СЧПУ «*Heidenhain*» предлагают для построения контура использовать графический редактор, с помощью которого строится подобный требуемому контур. Затем оператор сообщает контуру с помощью системы ЧПУ размеры детали на чертеже.

5.1. Системная структура ЧПУ

СЧПУ (железная часть) представляет собой специализированный компьютер, который имеет алгоритмический язык высокого уровня и машинно-ориентированный (Ассемблер) язык.

Язык высокого уровня ориентирован на пользователя ЧПУ и предназначен для написания пользовательских программ, которые пишет программист или оператор ЧПУ, для управления исполнительными органами станка при обработке деталей различной сложности. Язык высокого уровня является алгорит-

мическим языком, который определяет степень дружелюбности системы к пользователю, то есть программный интерфейс.

Язык низкого уровня ориентирован на аппаратную структуру самого специализированного компьютера. В качестве языка низкого уровня обычно используют *ASSEMBLER*. Работа с этим языком требует определенной подготовки и навыков.

Современные станки с числовым программным управлением представляют собой сложные механотронные системы. Для обслуживания подобной техники необходимы высококвалифицированные специалисты во время наладки и запуска оборудования, и на этапе его эксплуатации. Специалисты такого уровня обычно находятся в удаленных сервисных центрах. Поэтому потребность в диагностическом программном обеспечении, с помощью которого возможно заниматься дистанционным анализом входных и выходных сигналов электроавтоматики, располагая результатами измерений, велика. Система диагностики СЧПУ должна уметь анализировать информационные сигналы, архивировать результаты измерений, вырабатывать рекомендуемые для исполнения действия.

На практике это означает следующее. 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 минимизации возможного ущерба станку при поиске неисправности электроавтоматики, СЧПУ производства «Балт-Системс» [29, 30] оснащены программным комплексом *SIPROM*. Этот программный комплекс есть интерфейс, реализующий логический протокол (связь) между базовым (железным) протоколом и логическим протоколом. Комплекс *SIPROM*, используя метод эмуляции¹⁴, проверяет все основные соединения между элементами электроавтоматики станка. Управляет диагностическим комплексом оператор (системный программист) с пульта ЧПУ. Диагностика электроавтоматики с помощью *SIPROM* происходит при отключенной силовой сети станка. Использование диагностической системы существенно повышает достоверность поиска неисправностей и снижает время их поиска.

Для диагностики автоматизации и телеметрии станка с ЧПУ, а также для диагностики возможных поломок электроавтоматики (обрывы, окисление, выход из строя датчиков и т.д.) на станках с СЧПУ производства *Siemens* используется программа *Step 7 90* [31]. *Step 7 90* работает по жесткому алгоритму и позволяет определять произошедшие поломки.

Аналогичные средства диагностирования состояния всего комплекса ЧПУ используются на СЧПУ производителей «*DELEM*» (Голландия), «*Heidenhein*» (*DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH*, Германия), «*Fagor*» (Испания), «*FANUC*» (Япония), «*Mitsubishi*» (Япония).

¹⁴ Эмуляция (англ. *emulation*) – воспроизведение программными или аппаратными средствами либо их комбинацией работы других программ или устройств.

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 (футорки), полить их маслом с помощью масленки.

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 УП 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 УП 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, «защитому» (предварительно 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 сообщает 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 [32, 33]. При работе на отечественных станках ЧПУ наладчик должен иметь следующие навыки:

- вывести систему в «ноль» при включении станка;
- заменить изношенный или поломавшийся режущий инструмент;
- новый установленный резец должен быть выставлен в револьверной головке таким образом, чтобы вершина резца была максимально близка к оси вращения детали обычно в горизонтальной плоскости;
- вершина резца должна быть «привязана» к координатам для чего вводятся необходимые коррективы в СЧПУ. «Привязка» выполняется вручную с помощью рейсмуса. Современные СЧПУ оснащаются устройствами, которые выполняют привязку к координатам инструмента с помощью электронного блока, в основу работы которого может быть положен оптический, индукционный, пневматический принципы [34, 35];
- в процессе обработки детали корректировать УП, останавливать её выполнение, менять параметры обработки (подачи, частоту обработки и др.).

Успешная работа СЧПУ обеспечивается также привлечением к обслуживанию станка программиста-пользователя и системного программиста.

Программист-пользователь пишет сам или генерирует УП с помощью САМ-системы. В этом случае качественные параметры обработанной поверхности, а также точность изготовления детали регламентируется расчетно-технологической картой (РТК), которая нормирует режимы технологического воздействия (скорость резания, подачи, глубина и другие параметры). При использовании САМ-систем РТК генерирует сама система (в режиме «Мастер»).

Далее программист-пользователь совместно с технологом могут скорректировать предложенный САМ-системой вариант РТК. Во многих САМ-системах существует возможность редактировать таблицу РКТ.

Программист, обслуживающий УП (пользовательскую программу), разрабатывает движений исполнительных органов станка, необходимых для обработки детали в соответствии с требованиями чертежа. Программа, которую пишет программист-пользователь учитывает имеющийся в наличии инструмент, оснастку, квалификацию и пристрастия¹⁵ оператора, материал заготовки и многие другие обстоятельства, связанные с обслуживающим персоналом и технологическими возможностями используемого станочного оборудования.

Обслуживание станков с ЧПУ невозможно осуществлять без системных программистов, которые настраивают систему ЧПУ на определенную конфи-

¹⁵ В отношении пристрастий оператора можно вспомнить поговорку программистов о том, что легче написать новую программу, чем разобраться в программе, написанной кем-то другим.

гурацию 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. Полностью исключить работу системного программиста в этом случае нельзя. Системный программист обслуживает конкретную СЧПУ.

Ориентируясь на отечественные станки и системы ЧПУ, можно утверждать, что обязанностей системных программистов заключаются в характеристике следующих параметров:

1. Определение скоростей движения исполнительных органов станка на холостых ходах;
2. Определение времени эксплуатации инструмента;
3. Определение зон допустимых движений исполнительных органов станка;
4. Способов документации (ТД) и передачи информации;
5. Организации рабочего пространства экрана монитора системы и др.

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 приглашать 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, среди которых следующие:

1. Колебания напряжения в силовой электросети;
2. Использование устаревших моделей коммутационных устройств;
3. Поджог контактов силовой электросети и др.

В настоящее время на территории РФ работает немало станков полностью импортного производства. Обслуживание этого оборудования отличается от обслуживания станочного оборудования отечественных производителей. Схемы и датчики электроавтоматики импортного оборудования отличаются высокой надежностью и в случае выхода из строя они не ремонтируются, а заменя-

ются 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. 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. Следует отметить, что в станках импортного производства давно не используются привода с электродвигателями постоянного тока, как морально устаревшие [36, 37]. Взамен им пришли высокомоментные электродвигатели с цифровым частотным управлением.

Поломки механики станка с ЧПУ требуют привлечения к обслуживанию станка механиков. 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. 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.

7. СПОСОБЫ НАПИСАНИЯ ИЛИ ГЕНЕРАЦИИ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ

Использование в производстве станков с ЧПУ решает экономические и технологические задачи. Одна из экономических задач - снижение машинного времени, необходимого для изготовления одной детали. Это время включает в себя подготовку станка к работе, а также время изготовления детали. Наиболее затратный период в подготовке станка к работе – это время написания УП, которое зависит от сложности детали.

Для несложных деталей экономически целесообразно написать УП с пульта ЧПУ. Когда не хватает квалификации оператора или наладчика для написания УП с пульта, управляющую программу предварительно пишет опытный программист-пользователь СЧПУ. Для сложных деталей генерация УП осуществляется с помощью CAD/CAM – системы. В этом случае требуются квалифицированные специалисты: пользователи CAD/CAM – систем и технологи.

Все три случая, рассмотренные выше, написания или генерации УП занимают определенное время и требуют определённых финансовых затрат, которые определяют экономическую эффективность обработки детали на станке с ЧПУ. По этой причине важно выбрать такой метод разработки УП, который оптимально соотносится со сложностью детали.

Следует отметить, что общепринятого критерия сложности изготовления детали на станке с ЧПУ нет. Выбор режима написания УП всегда решается индивидуально и зависит от опыта и квалификации оператора, программиста и технолога.

7.1. Базовые понятия пользовательских программ систем ЧПУ

Наиболее распространенный язык программирования ЧПУ для металлорежущего оборудования описан документом *ISO 6983* Международного комитета по стандартам и называется «G-код» [22, 38]. В отдельных случаях, например, системы управления гравировальными станками, язык управления принципиально отличается от стандарта. Для простых задач, например, раскрой 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 кадров¹⁶:

- 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

¹⁶ Кадр – последовательность слов, определяющих операции, которые необходимо выполнить

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*.

1). Оператор *G*, определяемый в соответствии с [22, 38, 39] 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:

- 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.

2). 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.

7.2. Назначение системы ЧПУ типа 4С и его возможности

В технической литературе принято называть перемещение исполнительного органа станка – интерполяцией. Кроме того, любая СЧПУ имеет достаточно универсальный характер. Это означает, что система ЧПУ не привязана к конкретной кинематике станка и может управлять различным количеством и различными видами интерполяций. Например, СЧПУ может управлять исполнительными органами станка, которые способны совершать только перемещения по окружностям или их дугам. Возможны ситуации, когда, например, из пяти исполнительных органов, два способны совершать круговые перемещения, а оставшиеся могут совершать только линейные перемещения. По этим причинам в общем случае говорят, что СЧПУ имеет, допустим, пять управляемых осей. Любая из этих осей при необходимости может управлять либо линейными перемещениями (линейная ось), либо круговыми (ось вращения).

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 промежуточ-

ных опорных точек выполняет центральное процессорное устройство (интерполятор 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 СЧПУ 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.

7.3. 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 [37-39], 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.

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.

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 (задние углы $\alpha_{1,2} \leq 1 - 1,5^\circ$) – 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. Решение рассматриваемой технологической задачи возможно было в приемлемые сроки и затраты только в результате использования опыта технолога.

Приведем второй 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 [38, 39]. Все последующие координаты, вводимые оператором в систему, в результате характеристики инструмента СЧПУ 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 СЧПУ станка обычно системный программист «зашивает» в память систему информацию 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 НЦ-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 опе-

раторов программы, что позволяет легко её отладить и перенастроить на другие геометрические параметры.

Рассмотрим деталь, изображенную на рис. 7.1.

Это – обойма, используемая в дозировочном насосе, изготавливаемом на Самарском насосном заводе. Обойма выполнена из стали 40Х, поверхность детали должна иметь $R_z = 12,5$ мкм. Это говорит о том, что в качестве режущего инструмента предпочтительно использовать следующие материалы: ВК8 или Т15К10 (предпочтительней). Поскольку деталь имеет довольно сложный наружный 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 будут устанавливать в патроне станка. При составлении технологии обработки детали следует ориентироваться 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.

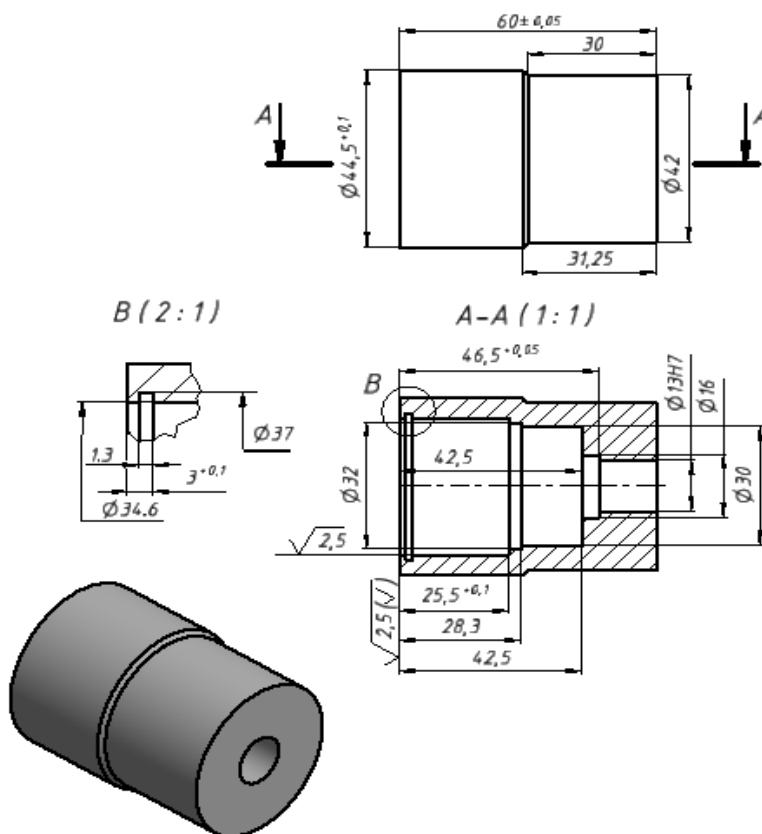


Рис. 7.1. Эскиз обоймы

Не указанные размеры на эскизе рис. 7.1 выполняют с учетом технических условий¹⁷ (ТУ) выполнения детали.

¹⁷ 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.

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 были 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 характеризацию этого резца. Коснувшись поверхности вращающегося проточенного цилиндра, мы знаем размер координаты X . Чтобы такая характеризация была по возможности более 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 характеризация проводится во время его выставления. Когда вершина проточенного конуса совпадает с вершиной инструмента (сверло или центровка), проводится характеризация инструмента.

Под характеризацией 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 revolverной головке, где установлен характеризуемый инструмент (хотя это не обязательно).

Применительно к универсальным станкам процесс характеризации 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.

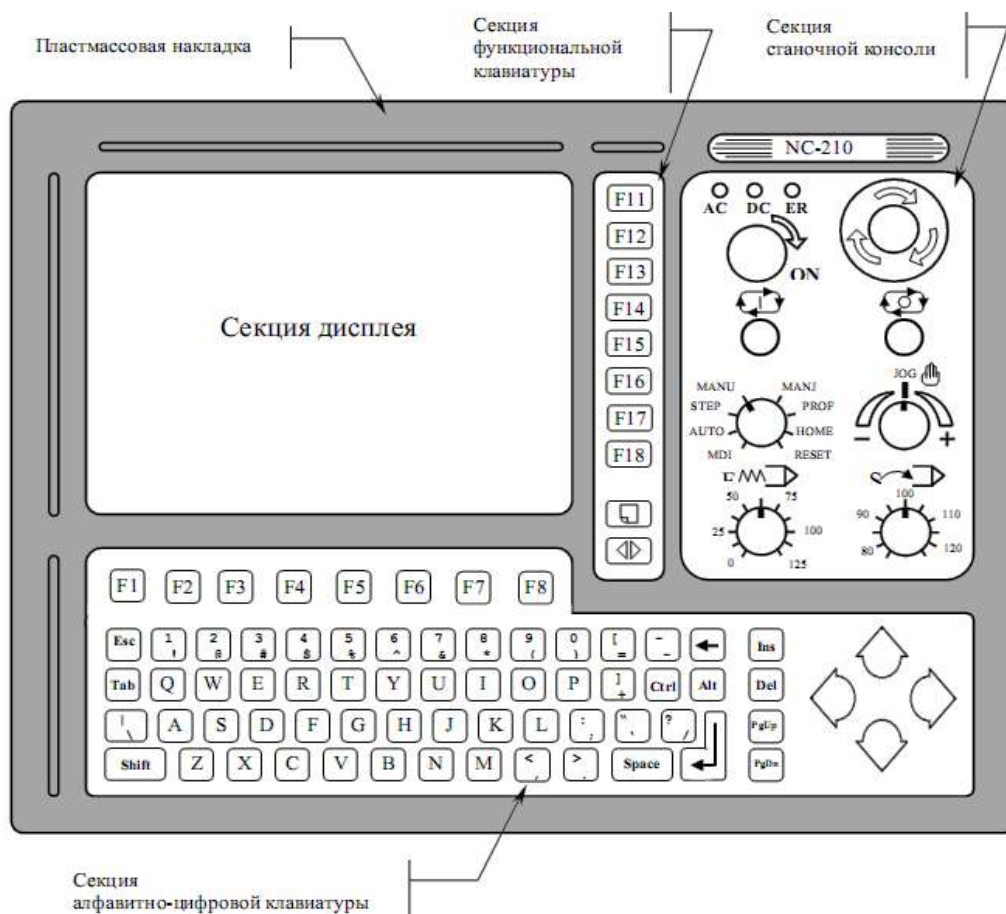


Рис. 7.2. Панель пульта управления

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 врезания, 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 УП.

Программирование СЧПУ 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 в дальнейшем в теле программы будут использованы другие начальные точки, то, чтобы не путаться, в начале программы следует объявить 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*.

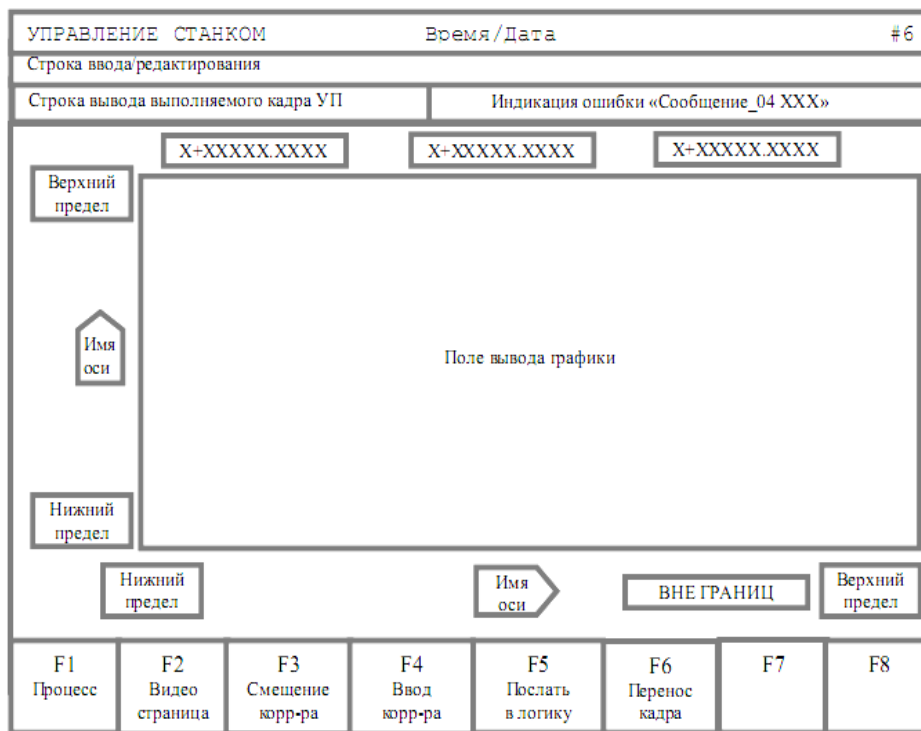


Рис. 7.3. Видеостраницы графического редактора *UCG* на мониторе системы ЧПУ

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.

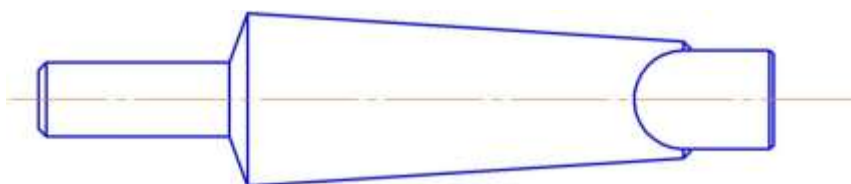


Рис.7.4. Конструкция упора

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 торец 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.

T3
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
T3
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 ЧПУ 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 в позиции револьверной головки № 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 окружную 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).

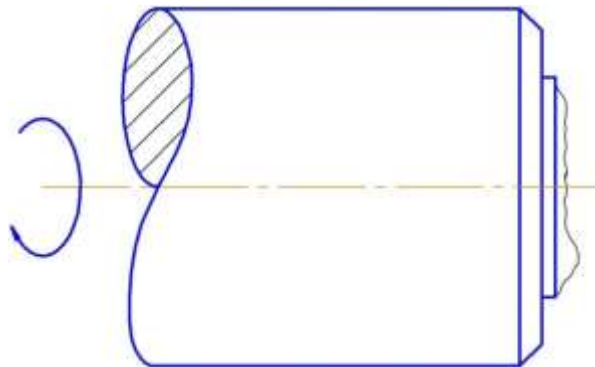


Рис. 7.5. Операция подрезки торца

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.

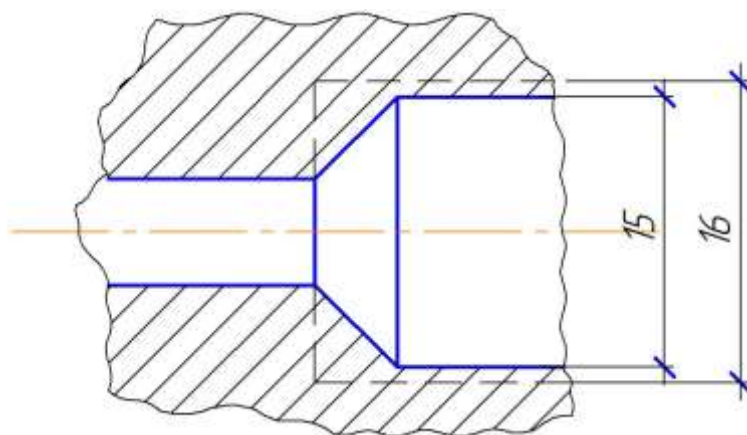


Рис. 7.6. Расточка отверстия $\varnothing 16$ мм

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
```


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

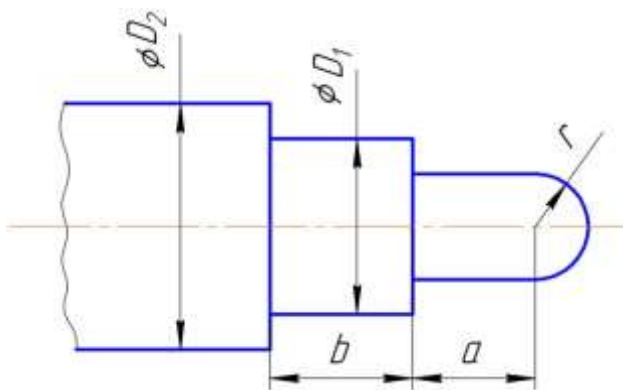


Рис. 7.8. Деталь, подлежащая обработке на станке с ЧПУ

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

Таблица 7.1. Возможные размеры детали

№ n/n	<i>r</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>D₁</i>	<i>D₂</i>
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 приложении 1 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® [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 (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.spectechnologia.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 (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. **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.
30. Устройство числового программного управления NC-200, NC-210, NC-220, NC-230. Руководство оператора. – СПб: Балт-Систем, 2018. – 144 с.
31. SIMENS. SIMATIC. Программирование с помощью Step 7 V5.3. Руководство (часть пакета документации 6ES7810-4CA07-8BW1, редакция 01/2004). – 2004. – 124 с.

32. **Сагателян, Г.Р.** Основные принципы разработки управляющих программ для оборудования с ЧПУ: лекция / Г. Р. Сагателян. – М.: МГТУ им. Баумана, 2004. – 12 с.
33. СТЕЛЛА. SIMATIC программное обеспечение Siemens [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.ste.ru/siemens/software.html> (дата обращения: 28.04.2021).
34. Simatic WinCC [Электронный ресурс]. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Simatic_WinCC (дата обращения: 28.04.2021).
35. **Марголит, Р.Б.** Наладка станков с программным управлением: учебное пособие / Р.Б. Марголит. – М.: Машиностроение. 1983. – 253 с.
36. **Сергиевский, Л.В.** Пособие наладчика станков с ЧПУ / Л.В. Сергиевский, В.В. Русланов. – М.: Машиностроение, 1991. – 176 с. – ISBN: 5-217-01019-3.
37. **Корниевич, М.А.** Обработка деталей на станках с ЧПУ: учебное пособие / М.А. Корниевич, Е.Э. Фельдштейн. – Минск: Новое знание, 2005. – 288 с.
38. **Балла, О.М.** Обработка деталей на станках с ЧПУ. Оборудование. Оснастка. Технология: учебное пособие / О.М. Балла. – СПб.: Лань, 2019. – 368 с.
39. **Сотников, В.И.** Программирование и работа на станках, оснащённых системой ЧПУ 2P22: учебное пособие для вузов / В.И. Сотников – Орёл: ОрёлГТУ, 2009. – 83 с.

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: Издательство 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. –
12. 4-е изд. – М.: Изд. центр Academia, 2010. – 192 с. – ISBN: 978-5-7695-7351-4.
13. Устройство ЧПУ НЦ-31м. Паспорт. – Севастополь: ДП «Маяк-Сервис». – 10 с.
14. 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.
15. 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 (дата обращения: 28.10.2019).
16. **Кошкин, В.Л.** Аппаратные системы числового программного управления / В.Л. Кошкин. – М.: Машиностроение, 1989. – 248 с.
17. **Пятунин, А.И.** САПР управляющих программ: Курс лекций / А.И. Пятунин. – Электросталь: Электростальский политехнический институт, филиал МИСиС, 2006. – 130 с.

18. **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.
19. **Сосонкин, В.Л.** Мультиагентная модель открытой системы ЧПУ типа PCNC / В.Л. Сосонкин, Г.М. Мартинов // Автоматизация в промышленности. – 2007. – № 5. – С. 3-6.
20. **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.
21. **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.
22. **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.
23. **Fitzpatrick, M.** Machining and CNC technology / M. Fitzpatrick. – 4th ed. – New York: McGraw-Hill Higher Education; 2019. – 864 p.
24. **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).
25. **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 (дата обращения: 28.10.2019).
26. **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.
27. **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.
28. **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.
29. Программирование обработки деталей на станках с ЧПУ: учеб. пособие / С.И. Кормилицин, В.М. Орбинский, В.А. Солодков, А.Г. Схиртладзе, Ю.М. Быков. – Волгоград: ВолгГТУ, 1999. – 92 с. – ISBN: 5-230-03704-0.
30. **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 (дата обращения 10.10 2019).

31. **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 (дата обращения 10.10.2019).
32. Гибридное моделирование компании Delcamplc – успешная комбинация поверхностного, твердотельного и фасетного 3D-моделирования // Сапр и графика. – 2008. – № 9. – С. 60-61.
33. 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-B/Руководство%20по%20техобслуживанию.pdf> (дата обращения: 28.10.2019).
34. Серия FANUC 0i-MB. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]. – URL: <https://gendocs.ru/v20424/?cc=1&view=pdf> (дата обращения 12.11.2020).
35. **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.
36. **Геринг, А.** Секреты систем ЧПУ серии Fanuc 6T/M-A,B,E / А. Геринг. – Тольятти: Тольятти ГТУ, 2007. – 115 с.
37. 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).
38. Опыт модернизации оборудования с ЧПУ на ОАО «Долгопрудненское научно-производственное предприятие / В. Григоренко, В. Андреев // CADmaster. – 2007. – № 4(39). – С. 38-44.
39. **Константинов, М.Т.** Расчёт программ фрезерования на станках с ЧПУ / М.Т. Константинов. – М.: Машиностроение, 1985. – 160 с.
40. **Павлов, С.** Механика самодельного станка с ЧПУ [Электронный ресурс] / С. Павлов. – URL: http://www.rcdesign.ru/articles/tools/cnc_mechanics (дата обращения 10.10.2019).
41. **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).
42. **Вильямс, Дж.** Программируемые роботы. Создаём робот для своей домашней мастерской / Дж. Вильямс; пер. с англ. А.Ю. Карцева. – М.: ИТ Пресс, 2006. – 240 с.
43. **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.
44. **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.

45. **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.
46. **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.
47. **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.
48. **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.
49. **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).
50. **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.
51. **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.

Приложение 1

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 ТОРЕЦ1 )
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 ТОРЕЦ1 )
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
%

Учебное издание

Абульханов Станислав Рафаелевич

СИСТЕМЫ ЧПУ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

Учебное пособие

Текст печатается в авторской редакции
Техническое редактирование И.П. Ведмидской
Компьютерная верстка И.П. Ведмидской

Подписано в печать 01.06.2021. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 4,5.
Тираж 25 экз. Заказ .

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.

