

# Программирование обработки на оборудовании с ЧПУ

*В двух томах*

Под редакцией Г.Б. Евгенева и А.Х. Хараджиева

Том 1



Москва

ИЗДАТЕЛЬСТВО  
МГТУ им. Н. Э. Баумана

2018

УДК 681.5  
ББК 34.5-5  
П78

Авторы:

*Г.Б. Евгениев, А.Х. Хараджиев, А.В. Грошев, С.А. Мальков,  
В.А. Бурков, Н.В. Сергеев, П.С. Шильников*

*Рекомендовано Редакционно-издательским советом  
МГТУ им. Н.Э. Баумана в качестве учебника*

Рецензенты:

Кафедра «Робототехники и мехатроники ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН»  
(заведующий кафедрой д-р техн. наук, профессор *Ю.В. Подураев*);  
канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана  
*В.Б. Пясецкий*

**Программирование обработки на оборудовании с ЧПУ** : учебник : в 2 т. /  
П78 [Г. Б. Евгениев и др.] ; под ред. Г. Б. Евгениева и А. Х. Хараджиева. — Москва :  
Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018.

ISBN 978-5-7038-4906-4

Т. 1. — 325, [3] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-4907-1

Изложены теоретические основы и практические методы программирования обработки на станках и роботах с ЧПУ в соответствии с профессиональной деятельностью бакалавров и инженеров по направлению «Автоматизация технологических процессов и производств». Описаны языки представления знаний и модель жизненного цикла изделий машиностроения. Дано описание основных характеристик оборудования с ЧПУ, оснастки, систем ЧПУ и автоматизированного программирования. Приведены физические принципы и методы программирования резки и наплавки, являющейся основой аддитивных технологий.

Содержание учебника соответствует курсу лекций, читаемых в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

УДК 681.5  
ББК 34.5-5

## ОГЛАВЛЕНИЕ

---

---

Предисловие .....	5
Список сокращений .....	7
Введение .....	9
<b>1. ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ .....</b>	<b>14</b>
1.1. Язык функционального моделирования систем IDEF0 .....	14
1.2. Язык моделирования процессов IDEF3 .....	22
1.3. Унифицированный язык моделирования UML .....	25
1.4. Язык XML .....	34
1.5. Функциональная модель жизненного цикла изделия .....	38
Вопросы для самопроверки .....	44
<b>2. МОДЕЛИ ИЗДЕЛИЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ .....</b>	<b>46</b>
2.1. Геометрические и топологические модели изделий .....	46
2.2. Стандарт представления геометрических моделей изделий IGES .....	56
2.3. Стандарт представления объектных моделей изделий STEP .....	62
2.4. Компьютерные модели технологических процессов .....	83
2.5. Автоматизация проектирования технологических процессов для оборудования с ЧПУ .....	96
Вопросы для самопроверки .....	100
<b>3. ОБОРУДОВАНИЕ С ЧПУ И ОСНАСТКА .....</b>	<b>101</b>
3.1. Ретроспектива развития оборудования с ЧПУ .....	101
3.2. Цели использования оборудования с ЧПУ .....	105
3.3. Машинные технологические процессы и их фазовые пространства .....	109
3.4. Классификация оборудования с ЧПУ .....	115
3.5. Концептуальные и кинематические модели станков с ЧПУ .....	126
3.6. Средства технологического оснащения .....	131
Вопросы для самопроверки .....	152
<b>4. СИСТЕМЫ ЧПУ .....</b>	<b>153</b>
4.1. Мехатроника .....	153
4.2. Управляющие программы .....	160
4.3. Функциональная структура системы ЧПУ .....	176
4.4. Интерполяторы .....	179
4.5. Пульты управления .....	182

4.6. Архитектура систем ЧПУ .....	187
4.7. Приводы оборудования с ЧПУ .....	188
Вопросы для самопроверки .....	196
<b>5. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ С ЧПУ .....</b>	<b>198</b>
5.1. Функциональная схема автоматизированного программи- рования для оборудования с ЧПУ .....	198
5.2. Подготовка геометрической модели .....	200
5.3. Среда двумерных геометрических построений .....	210
5.4. Создание технологии на базе конструкторско-технологических элементов .....	212
5.5. Концептуальная модель процессора системы программи- рования обработки на оборудовании с ЧПУ .....	222
5.6. Язык CLDATA .....	230
5.7. Постпроцессоры системы автоматизированного программи- рования для оборудования с ЧПУ .....	236
Вопросы для самопроверки .....	285
<b>6. ПРОГРАММИРОВАНИЕ РЕЗКИ И НАПЛАВКИ .....</b>	<b>286</b>
6.1. Электрофизические методы обработки .....	286
6.2. Программирование резки по двум координатам .....	295
6.3. Программирование электроэрозионной обработки .....	301
6.4. Резка ножом .....	318
6.5. Программирование наплавки .....	320
Вопросы для самопроверки .....	326
<b>Литература .....</b>	<b>327</b>

## ПРЕДИСЛОВИЕ

---

Повышение производительности труда за счет модернизации экономики обеспечивает повышение уровня жизни и надежную безопасность России в мире. Удвоение производительности труда — одна из стратегических целей российской экономики. Одним из важнейших средств достижения этой цели является автоматизация технологических процессов и производств на основе оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ).

Автоматизация технологических процессов представляет собой совокупность методов и средств, позволяющих осуществлять управление технологическим процессом без непосредственного участия в нем человека либо при принятии им наиболее ответственных решений.

Автоматизация технологических процессов в рамках одного производственного процесса позволяет создать основу для внедрения систем управления производством и систем управления предприятием.

Изобретение числового программного управления технологическим оборудованием относится к наиболее значительным достижениям человечества в XX в. Впервые стало возможным превращать информационные модели изделий, созданные с помощью систем автоматизированного конструирования, посредством соединенных с ними систем автоматизированного программирования обработки и станков с ЧПУ в материальные объекты. Информационные технологии стали важным компонентом автоматизации материальных технологий.

На основе информационных технологий, реализуемых на станках и роботах с ЧПУ, были разработаны новые передовые технологии, в частности технологии удаления или вычитания (*Subtraction Technology*) и технологии послойного выращивания физических объектов по 3D-моделям — технология добавления или сложения (*Addition Technology*), описание которых приведено в этом учебнике.

Предлагаемое учебное пособие сформировано в соответствии с двухуровневой подготовкой кадров по направлению 220700 «Автоматизация технологических процессов и производств» и Государственными образовательными стандартами. Усвоение приведенного материала не требует дополнительных знаний в области информатики. Содержание учебника соответствует курсу лекций, читаемых в МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре «Компьютерные системы автоматизации производства».

Т. 1 содержит материалы, относящиеся к метаонтологии и предметной онтологии. Изложение материала ведется в соответствии с онтологической методологией.

Описаны языки представления знаний и модель жизненного цикла изделий машиностроения. Представлены цифровые модели изделий и технологических процессов. Дано описание основных характеристик оборудования с ЧПУ, оснастки, систем ЧПУ и автоматизированного программирования. Приведены физические принципы и методы программирования резки и наплавки, являющиеся основой аддитивных технологий.

В т. 2 приведены физические принципы и методы программирования токарной, фрезерной, сверлильно-точильной и токарно-фрезерной обработки. Дано описание теории и практики программирования многокоординатной обработки и промышленных роботов, а также контрольно-измерительных машин.

В учебнике отражены достижения отечественной теории и практики по данной дисциплине. Рассмотрен практический опыт отечественной системы программирования технологических процессов обработки изделий на оборудовании с ЧПУ SprutCAM — одной из лучших в мире. Эта система широко применяется в российской промышленности и за рубежом. По состоянию на 2015 г. продано иностранным компаниям более 7000 лицензий, включая такие фирмы, как Apple Inc., AEROSPACE, NASA, HITACHI, GE, hp, intel, PHILIPS, SAMSUNG, BMW, TOYOTA и др.

Учебное пособие подготовлено коллективом авторов под общей редакцией доктора технических наук профессора Г.Б. Евгенева и А.Х. Хараджиева. Материалы глав и разделов учебного пособия разделены между авторами следующим образом: Г.Б. Евгнев — т. 1: гл. 1–4, разд. 2.2, 2.4, 5.1, 5.5, 5.6, 6.1 и т. 2: гл. 11, 12, разд. 7.1, 8.1, 10.1; А.В. Грошев — т. 1: гл. 9, разд. 2.1, 5.2, 6.4 и т. 2: разд. 8.2, 8.3, 10.2–10.4, 10.12; Н.В. Сергеев — т. 1: разд. 5.3 и т. 2: разд. 7.2; В.А. Бурков — т. 1: разд. 5.4 и т. 2: гл. 9, разд. 8.2, 8.3, 10.5–10.9, 10.11; С.А. Мальков — т. 1: разд. 5.7, 6.2, 6.3, 6.5 и т. 2: разд. 7.3, 8.2, 8.3, 10.10; Н.А. Романов — т. 2: приложения; П.С. Шильников — т. 1: разд. 2.3.

Коллектив авторов выражает благодарность разработчикам метаянструментальной среды СПРУТ и прикладных систем SprutCAM, СПРУТ-ТП и СПРУТ-ОКП, техническая документация которых использована при написании учебного пособия. Особо следует отметить А.Х. Хараджиева, Н.В. Сергеева (ЗАО «СПРУТ-Технология»), Б.В. Кузьмина, Г.В. Серегина, А.А. Кокорева, А.Г. Стисеса, С.С. Крюкова и Н.С. Гришина (ООО «Центр СПРУТ-Т»).

Авторы будут благодарны за замечания и пожелания читателей по содержанию учебника.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

---

АСУ	— автоматизированная система управления
АСУП	— автоматизированная система управления предприятием
АСТПП	— автоматизированная система технологической подготовки производства
АТСС	— автоматизированная транспортно-складская система
БД	— база данных
ГАЛ	— гибкая автоматизированная линия
ГАУ	— гибкий автоматизированный участок
ГАЦ	— гибкий автоматизированный цех
ГПМ	— гибкий производственный модуль
ГПС	— гибкая производственная система
ГПЯ	— гибкая производственная ячейка
ЕСКД	— единая система конструкторской документации
ЕСТД	— единая система технологической документации
ЖЦИ	— жизненный цикл изделия
КИД	— компьютеризация инженерной деятельности
КИМ	— контрольно-измерительная машина
ЛСК	— локальная система координат
НИОКР	— научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы
ООП	— объектно-ориентированный подход
ПМК	— программно-методический комплекс
ПР	— промышленный робот
РТК	— роботизированный технический комплекс
САП	— система автоматизации программирования
САПР	— система автоматизированного проектирования
СВТ	— средства вычислительной техники
СРП	— сборно-разборное приспособление
СУБД	— система управления базами данных
ТЗ	— техническое задание
ТП	— технологический процесс
ТПП	— технологическая подготовка производства
УБП	— универсально-безналадочное приспособление
УНП	— универсально-наладочное приспособление
УП	— управляющая программа
УСП	— универсально-сборное приспособление
ЧПУ	— числовое программное управление

## *Список сокращений*

---

ШД	— шаговый двигатель
ЭВМ	— электронная вычислительная машина
B-Rep	— Boundary Representation
CAD	— Computer Aided Design
CAE	— Computer Aided Engineering
CALS	— Computer Aided Life-cycle System
CAM	— Computer Aided Manufacturing
CAPP	— Computer Aided Process Planning
CASE	— Computer Aided Software Engineering
CIM	— Computer Integrated Manufacturing
CLDATA	— Cutter Location DATA
CRM	— Customer Relationship Management
ER	— Entity-Relationship
ERP	— Enterprise Resource Planning system
ICAM	— Integrated Computer-Aided Manufacturing
IGES	— Initial Graphics Exchange Specification
IDEF	— Integrated DEFinition
IDEF0	— Function Modeling
IDEF1X	— IDEF1 Extended Data Modeling
IDEF3	— Integrated DEFinition for Process Description Capture Method
ISO	— International Standard Organization
HTML	— Hypertext Markup Language
MES	— Manufacturing Enterprise Solutions
NURBS	— Non-uniform rational b-spline
PDES	— Product Data Exchange Specification
PDM	— Product Data Management
PFDD	— Process Flow Description Diagrams
RAD	— Rapid Application Development
RBS	— Resource Breakdown Structure
SADT	— Structured Analysis and Design Technique
SGML	— Structured Generalized Language
SRM	— Supplier Relationship Management
STEP	— Standard for Exchange of Product model data
STL	— Standard Template Library
UML	— Unified Modeling Language
UOB	— Unit of Behavior
WBS	— Work Breakdown Structure
XML	— Extensible Markup Language



## ВВЕДЕНИЕ

---

Совокупность требований, обязательных при реализации основных образовательных программ по направлению подготовки 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств» квалификации «бакалавр», определяет Федеральный государственный стандарт (ГОС) высшего профессионального образования, утвержденный приказом Министерства образования и науки РФ № 2520 от 25 октября 2011 г. Стандарт устанавливает следующие виды профессиональной деятельности бакалавра: проектно-конструкторская, производственно-технологическая, организационно-управленческая, научно-исследовательская, научно-педагогическая, сервисно-эксплуатационная и специальные.

Приведенные в учебнике материалы относятся к направлению производственно-технологической деятельности, материалы по смежным направлениям деятельности изложены в той мере, в которой они обеспечивают эту деятельность или являются ее результатом.

Материалы, связанные с проектно-конструкторской деятельностью бакалавра, изложены в гл. 1 и 2, средства для проведения производственно-технологической деятельности — в гл. 3–5.

Технологические процессы, реализуемые на оборудовании с ЧПУ, с описанием физических принципов их реализации и методов программирования, описаны в т. 1 (гл. 6) и в т. 2 (гл. 7–12).

ГОС определяет требования к результатам освоения основных образовательных программ и профессиональных компетенций бакалавриата. Учебник отражает соответствие содержания профессиональных компетенций выпускников требованиям ГОС (табл. В1).

*Таблица В1*

**Соответствие требованиям ГОС**

Код ПК	Содержание профессиональной компетенции	Том (глава)
ПК-1	Сбор (синтез) и анализ исходных информационных данных для проектирования технологических процессов изготовления продукции, средств и систем автоматизации, контроля, технологического оснащения, диагностики, испытаний, управления процессами, жизненным циклом продукции и ее качеством	1 (1–5)

Код ПК	Содержание профессиональной компетенции	Том (глава)
ПК-2	Использование основных закономерностей, действующих в процессе изготовления продукции, использование их для производства изделий требуемого качества, заданного количества при наименьших затратах общественного труда	1 (6) 2 (7–12)
ПК-3	Выбор основных и вспомогательных материалов для изготовления изделий, способов реализации основных технологических процессов, аналитических и численных методов при разработке их математических моделей	
ПК-4	Применение прикладных программных средств при решении практических задач профессиональной деятельности, методов стандартных испытаний по определению физико-механических свойств и технологических показателей материалов и готовых изделий, стандартных методов их проектирования, прогрессивных методов эксплуатации изделий	1 (1, 2, 4, 5)
ПК-7	Участие в разработке обобщенных вариантов решения проблем, связанных с автоматизацией производств, выбором на основе анализа вариантов оптимального, прогнозированием последствий решения	1 (1–5)
ПК-8	Участие в разработке проектов изделий с учетом технологических, конструкторских, эксплуатационных, эстетических, экономических и управленческих параметров	
ПК-9	Участие в разработке проектов модернизации действующих производств, создании новых	2 (7–12)
ПК-10	Применение современных информационных технологий при проектировании изделий, производств	1 (1–5)
ПК-11	Выбор средств автоматизации технологических процессов и производств	
ПК-12	Разработка (на основе действующих стандартов) технической документации (в электронном виде) для регламентного эксплуатационного обслуживания средств и систем производств	1 (2)
ПК-13	Разработка проектной и рабочей технической документации в области автоматизации технологических процессов и производств, управление жизненным циклом продукции и ее качеством, оформление законченных проектно-конструкторских работ	1 (1–5)
ПК-14	Участие в мероприятиях по контролю соответствия разрабатываемых проектов и технической документации действующим стандартам, техническим условиям и другим нормативным документам	

Код ПК	Содержание профессиональной компетенции	Том (глава)
ПК-15	Проведение предварительного технико-экономического обоснования проектных расчетов	1 (3)
ПК-17	Участие в разработке математических и физических моделей процессов и производственных объектов	1 (1–5)
ПК-19	Участие в разработке проектов по автоматизации производственных и технологических процессов, технических средств и систем автоматизации, контроля, диагностики, испытаний, управления процессами, жизненным циклом продукции и ее качеством	1 (1–5), 2 (12)
ПК-20	Практическое освоение и совершенствование систем автоматизации производственных и технологических процессов, контроля, диагностики, испытаний, управления процессами, жизненным циклом продукции и ее качеством	
ПК-21	Выполнение работ по автоматизации технологических процессов и производств, их обеспечению средствами автоматизации и управления, использование современных методов и средств автоматизации, контроля, диагностики, испытаний и управления процессами, жизненным циклом продукции и ее качеством	
ПК-22	Определение номенклатуры параметров продукции и технологических процессов ее изготовления, подлежащих контролю и измерению, установление оптимальных норм точности продукции, измерений и достоверности контроля, выбор технических средств автоматизации, контроля, диагностики, испытаний и управления процессами, жизненным циклом продукции и ее качеством	2 (12)
ПК-24	Проведение оценки уровня брака продукции, анализ причин его появления, разработка предложений по его предупреждению и устранению, совершенствованию продукции	
ПК-26	Освоение средств программного обеспечения автоматизации и управления, их сертификации	1 (1–5) 2 (12)
ПК-28	Разработка планов, программ, методик, связанных с автоматизацией технологических процессов и производств, управления процессами, жизненным циклом продукции и ее качеством, инструкций по эксплуатации оборудования, средств и систем автоматизации и управления, программного обеспечения, других текстовых документов, входящих в конструкторскую и технологическую документацию	

Код ПК	Содержание профессиональной компетенции	Том (глава)
ПК-31	Разработка мероприятий по проектированию процессов разработки, изготовления, контроля и внедрения продукции, средств и систем автоматизации, контроля, диагностики, управления производством, жизненным циклом продукции и ее качеством, их эффективной эксплуатацией	1 (6) 2 (7–12)
ПК-32	Выбор технологий, инструментальных средств и средств вычислительной техники при организации процессов проектирования, изготовления, контроля и испытания продукции, средства и системы автоматизации, контроля, диагностики, испытаний, управления производством, жизненным циклом продукции и ее качеством	1 (1–5) 2 (12)
ПК-33	Выполнение работ по организации управления информационными потоками на всех этапах жизненного цикла продукции, ее интегрированной логистической поддержки	1 (1)
ПК-34	Проведение мероприятий по повышению качества продукции, производственных и технологических процессов, техническому и информационному обеспечению их разработки, испытаний и эксплуатации, планированию работ по стандартизации и сертификации, систематизации и обновлению применяемой регламентирующей документации	2 (12)
ПК-34	Участие в разработке и практическом освоении средств, систем автоматизации и управления производством продукции, ее жизненным циклом и качеством, подготовке планов освоения новой техники, составлении заявок на проведение сертификации	1 (1–5) 2 (12)
ПК-36	Организация работ по обслуживанию и реинжинирингу бизнес-процессов предприятия в соответствии с требованиями высокоэффективных технологий, анализу и оценке производственных и непроизводственных затрат на обеспечение требуемого качества продукции, автоматизации производства, результатов деятельности производственных подразделений, разработке оперативных планов их функционирования	
ПК-38	Изучение и анализ необходимой информации, технических данных, показателей и результатов работы, их обобщение и систематизация, проведение необходимых расчетов с использованием современных технических средств и программного обеспечения	
ПК-39	Применение научно-технической информации, отечественного и зарубежного опыта в области автоматизации технологических процессов и производств, автоматизированного управления жизненным циклом продукции, компьютерных систем управления ее качеством	

Код ПК	Содержание профессиональной компетенции	Том (глава)
ПК-40	Участие в работах по моделированию продукции, технологических процессов, производств, средств и систем автоматизации, контроля, диагностики, испытаний и управления процессами, жизненным циклом продукции и ее качеством с использованием современных средств автоматизированного проектирования	1 (1–5) 2 (12)
ПК-41	Участие в разработке алгоритмического и программного обеспечения средств и систем автоматизации и управления процессами	
ПК-45	Участие в постановке и модернизации отдельных лабораторных работ и практикумов по дисциплинам профилей направления	
ПК-46	Проведение отдельных видов аудиторных учебных занятий, включая лабораторные и практические, а также готовность обеспечивать научно-исследовательскую работу обучающихся	
ПК-48	Выполнение работ по наладке, настройке, регулировке, опытной проверке, регламентному техническому, эксплуатационному обслуживанию оборудования, средств и систем автоматизации, контроля, диагностики, испытаний и управления, средств программного обеспечения, сертификационным испытаниям изделий	
ПК-51	Участие в организации приемки и освоения вводимых в эксплуатацию оборудования, технических средств и систем автоматизации, контроля, диагностики, испытаний и управления	2 (12)

# 1. ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

---

## 1.1. Язык функционального моделирования систем IDEF0

В машиностроении для строгого описания технологических систем применяются специальные языки, являющиеся стандартными в международном масштабе. При изложении материала в данном учебнике использованы стандартные языки функционального моделирования IDEF0 и моделирования процессов IDEF3, а также унифицированный язык моделирования UML.

Для представления функциональных моделей систем разработана методология IDEF0, представляющая собой совокупность методов, правил и процедур, предназначенных для построения функциональной структуры сложных иерархических систем. Эта методология применима как для определения требований и функций на начальных этапах проектирования автоматизированных систем, так и при разработке рабочих проектов систем, специфицированных с помощью IDEF0. Методология IDEF0 позволяет повысить производительность и уменьшить вероятность появления ошибок при анализе систем.

Основной принцип моделирования IDEF0 заключается в представлении системы в виде набора взаимодействующих и взаимосвязанных блоков, отображающих процессы, операции и действия, происходящие в системе.

**Процесс** — совокупность последовательно или(и) параллельно выполняемых операций, преобразующая материальный или(и) информационный потоки в соответствующие потоки с другими свойствами.

**Операция** — совокупность последовательно или(и) параллельно выполняемых действий, преобразующих объекты, входящие в состав материального или(и) информационного потока, в соответствующие объекты с другими свойствами.

**Действие** — преобразование какого-либо свойства материального или информационного объекта в другое свойство.

В основе методологии IDEF0 лежат следующие концепции:

- графическое представление модели в виде иерархии блок-схем, обеспечивающее компактность информации;
- максимальная коммуникативность, т. е. доступность для понимания широким кругом специалистов;
- строгость и точность, обеспечивающие качество модели;
- пошаговые процедуры, обеспечивающие эффективные процессы разработки модели, ее просмотра и объединения;

## 2. МОДЕЛИ ИЗДЕЛИЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

### 2.1. Геометрические и топологические модели изделий

Согласно наиболее обобщенной модели системы — модели «черного ящика», система автоматизированного проектирования и конструирования изделий представляет собой средство преобразования входной информации в выходную (рис. 2.1). Выходами функционального блока проектирования и конструирования изделий являются конструкторские документы, а также геометрические и объектные модели изделий.

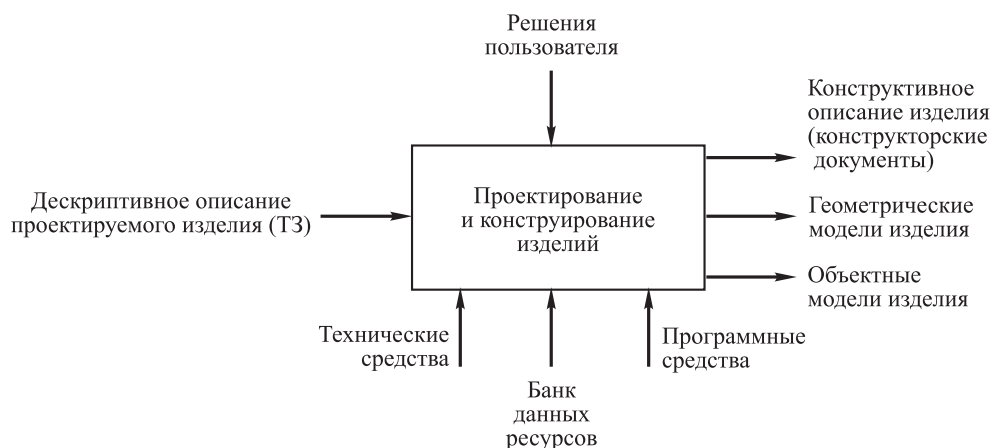


Рис. 2.1. Функциональная модель системы автоматизированного проектирования и конструирования изделий

Машиностроительное изделие описывается и как геометрический объект, и как реальное физическое тело. *Геометрическая модель* необходима для задания идеальной формы, которой должно соответствовать изделие, а модель физического тела обуславливает характеристику материала, из которого изготавливается изделие, и допустимые отклонения реальных изделий от их идеальной формы. Допустимые отклонения приводятся на чертежах в виде технических требований (допуски и посадки, отклонения формы и расположения, параметры шероховатости поверхностей и т. д.). Они необходимы для принятия решений при проектировании ТП.

## 3. ОБОРУДОВАНИЕ С ЧПУ И ОСНАСТКА

---

### 3.1. Ретроспектива развития оборудования с ЧПУ

Первые станки с ЧПУ появились во второй половине 1940-х гг. Их создание было обусловлено неэффективностью использования копировальных станков для обработки пространственно-сложных деталей. Основоположником систем с ЧПУ считается Д. Т. Парсонс (Массачусетский технологический институт, США). В конце 1940-х гг. он разработал оборудование для кодирования управляющей программы на металлических перфокартах. Программа позволяла управлять приводами подачи фрезерного станка.

Координаты точек задавались именно в цифровом виде, и это уже была именно NC (*Numerical control*) — система ЧПУ. В 1948 г. система была принята в эксплуатацию в военной авиапромышленности США. На рис. 3.1 представлен один из первых станков с ЧПУ.

Вначале эти станки создавались на базе модернизации станков с ручным управлением. На рис. 3.1 представлен общий вид вертикально-фрезерного станка, рядом с которым видна система управления.

В 60-е годы XX в. активно развивалось отечественное станкостроение. Были созданы станки с ЧПУ, которые позволяли обрабатывать сложнейшие детали авиационной и космической техники. На рис. 3.2, а представлена пятикоординатная обработка крышки лунохода на станке СФП5 по программе, подготовленной с помощью первой отечественной системы пятикоординатного программирования САП5.

Вид лунохода с открытой крышкой, в которую вставлены солнечные батареи, приведен на рис. 3.2, б.

Создание станков с ЧПУ можно считать самым крупным и перспективным достижением XX в. в области машиностроения.

Основным фактором, обусловившим необходимость дальнейшего развития станков с ЧПУ, является потребность автоматизации обработки в средне- и мелкосерийном производствах.

Один из главных критериев, определяющих область применения отдельных видов автоматизированного оборудования, — число различных деталей,

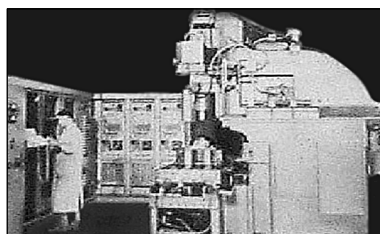


Рис. 3.1. Один из первых станков с ЧПУ



## 4. СИСТЕМЫ ЧПУ

---

### 4.1. Мехатроника

Мехатроника — новое, стремительно развивающееся направление современной науки и техники. Цель мехатроники состоит в создании интеллектуальных машин и движущихся систем, обладающих качественно новыми функциями и свойствами. Именно принципиальная новизна мехатронных систем вызывает быстро растущий интерес к мехатронике во всем мире и обуславливает высокую активность специалистов в научно-исследовательской, образовательной и производственной сферах.

В действующем ГОС РФ по направлению «Мехатроника и робототехника» приведено следующее определение мехатроники: «Мехатроника — область науки и техники, основанная на синергетическом объединении узлов точной механики с электронными, электротехническими и компьютерными компонентами, обеспечивающая проектирование и производство качественно новых модулей, систем и машин с интеллектуальным управлением их функциональными движениями».

В данном определении подчеркнута триединая сущность мехатронных систем, в основу построения которых заложена идея взаимосвязи механических, электронных и компьютерных элементов. Поэтому наиболее распространенным графическим символом мехатроники (рис. 4.1) стали три пересекающихся круга, помещенные во внешнюю оболочку.

**Цель мехатроники** как области науки и техники заключается в создании качественно новых модулей движения и на их основе — движущихся интеллектуальных машин и систем.

**Предметом мехатроники** являются процессы проектирования и производства модулей, машин и систем для реализации заданных функциональных движений.

**Функциональное движение** мехатронной системы предусматривает ее целенаправленное механическое перемещение, которое координируется с параллельно управляемыми технологическими и информационными процессами. Таким образом, понятие «движение» трактуется в данном определении мехатроники расширительно. Древнегреческие философы понимали под движением тела всякое его изменение вообще: от изменения размеров, цвета и температуры до возникновения и уничтожения. Однако основой функциональных движений в мехатронике служит механическое перемещение системы в пространстве и во времени. Требования к показателям каче-

## 5. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ С ЧПУ

---

### 5.1. Функциональная схема автоматизированного программирования для оборудования с ЧПУ

Автоматизация программирования для станков с ЧПУ была одним из первых направлений компьютеризации инженерной деятельности. Начало этому направлению было положено в 1950-х гг. одновременно с автоматизацией конструирования — созданием первых CAD- (*Computer Aided Design*) систем. На первых этапах развитие САП, получивших за рубежом название систем CAM- (*Computer Aided Manufacturing*) и CAD-систем, шло независимо. Входные данные для САП записывались на специальном языке, наносились на носитель информации и вводились в компьютер. Чтение исходной программы осуществлял специальный блок — САП-препроцессор, который обеспечивал преобразование исходных данных во внутренний формат системы.

Исходную программу составлял технолог-программист, описывая геометрию обрабатываемой детали и траекторию инструмента с необходимыми технологическими командами. Описание геометрии и траектории проводилось на специальных языках. При этом происходило дублирование работы, поскольку геометрия детали была уже описана конструктором в CAD-системе. С учетом этого были созданы интегрированные CAD-CAM системы, в которых описание геометрии детали передавалось автоматически с использованием одного из стандартных методов, описанных в гл. 2.

С появлением персональных компьютеров САП перешли на графический интерфейс, и языки технологического программирования потеряли актуальность.

Целевая функция САП, по сути, заключается в формировании операционного ТП обработки детали на оборудовании с ЧПУ и преобразовании его в цифровую форму, необходимую для управления станком. Если в операционной карте для станка с ручным управлением достаточно качественных формулировок, например, «Сверлить отверстие D 20 мм на глубину L 30», которые может выполнить квалифицированный станочник, глядя на чертеж, то для станка с ЧПУ эта формулировка должна быть декомпозирована до уровня подробной цифровой модели, которую представляет собой УП.

На рис. 5.1 представлена общая функциональная модель САП.

## 6. ПРОГРАММИРОВАНИЕ РЕЗКИ И НАПЛАВКИ

### 6.1. Электрофизические методы обработки

#### Электроэрозионная обработка

Процесс формообразования при размерной электроэрозионной обработке основан на явлении электрической эрозии — разрушении части материала заготовки, подверженной воздействию электрического разряда. Для осуществления электроэрозионной обработки сначала использовали искровые разряды, создаваемые так называемым RC-генератором, что и определило название процесса — *электроискровая обработка*. С появлением генераторов, обеспечивающих обработку на более продолжительных разрядах, процесс стали называть *электроимпульсной обработкой*.

Для обеспечения процесса обработки заготовку и инструмент подключают к электрической цепи, образуя пару анод 1 — катод 2 (рис. 6.1, а) с межэлектродным зазором, заполненным жидким диэлектриком 3, в качестве которого используют масла, керосин, дистиллированную воду.

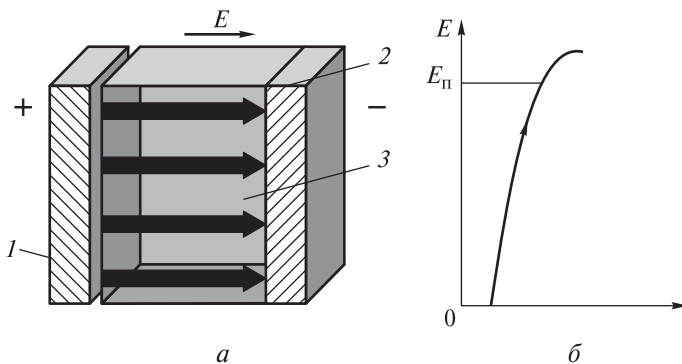


Рис. 6.1. Схема электроэрозионной обработки:

а — пара анод — катод; б — изменение напряженности электрического поля от времени

При обработке на электроды 1, 2 подается напряжение  $U$ , формирующее в межэлектродном зазоре напряженность электрического поля  $E$ . При превышении напряженности  $E$  уровня пробоя —  $EE_{п}$  (рис. 6.1, б) в меж-

## ЛИТЕРАТУРА

---

---

*Буч Г., Рамбо Дж., Джекобсон А.* Язык UML. Руководство пользователя / пер. с англ. А.А. Слинкина. 2-е изд., стер. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2004. 432 с.

*Высоцкий А.В., Карпович И.Б., Соболев М.П., Этингоф М.И.* Приборы автоматического управления обработкой на металлорежущих станках. М.: Машиностроение, 1995. 328 с.

*Гжиров Р.И., Серебrenицкий П.П.* Программирование обработки на станках с ЧПУ: справочник. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1990. 588 с.

*Евгеньев Г.Б.* Интеллектуальные системы проектирования: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 420 с.

*Евгеньев Г.Б.* Системология инженерных знаний: учеб. пособие для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 520 с.

*Клочков В.И.* Метрология и сертификация: учеб. пособие. М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2010. 224 с.

*Ли К.* Основы САПР (CAD/CAM/CAE). СПб.: Питер, 2004. 560 с.

Основы автоматизации технологических процессов и производств: учеб. пособие: в 2 т. / под ред. Г.Б. Евгеньева. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015.

*Подураев Ю.В.* Мехатроника: основы, методы, применение: учеб. пособие для студентов вузов. М.: Машиностроение, 2007. 256 с.

Проектирование автоматизированных станков и комплексов: учебник: в 2 т. / под ред. П.М. Чернянского. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012.

*Сосонкин В.Л., Мартинов Г.М.* Программирование систем числового программного управления: учеб. пособие. М.: Логос, Университетская книга, 2008. 344 с.

*Сосонкин В.Л., Мартинов Г.М.* Системы числового программного управления: учеб. пособие. М.: Логос, 2005. 296 с.

*Учебное издание*

**Евгеньев** Георгий Борисович,  
**Хараджиев** Александр Харлампиевич,  
**Грошев** Александр Владимирович,  
**Мальков** Сергей Андреевич,  
**Бурков** Виталий Александрович,  
**Сергеев** Николай Витальевич,  
**Шильников** Петр Станиславович

## **Программирование обработки на оборудовании с ЧПУ**

Редактор *Л.Т. Мартыненко*  
Художник *Я.М. Асинкритова*  
Корректор *Н.В. Савельева*  
Компьютерная графика *Т.Ю. Кутузовой*  
Компьютерная верстка *Т.В. Батраковой*

Оригинал-макет подготовлен  
в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В оформлении использованы шрифты  
Студии Артемия Лебедева.

Подписано в печать 20.04.2018. Формат 70×100/16.  
Усл. печ. л. 26,65. Тираж 200 экз. Заказ

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
press@bmstu.ru  
www.baumanpress.ru

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
baumanprint@gmail.com