

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Л.М. Акулович

## **КОМПЬЮТЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ И САПР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Рекомендовано Учебно-методическим объединением  
высших учебных заведений Республики Беларусь по образованию  
в области сельского хозяйства в качестве пособия для студентов  
высших учебных заведений группы специальностей  
74 06 Агроинженерия

**Минск  
БГАТУ  
2009**

УДК 658.512(075.8)  
ББК 30.2-5-05я7  
А 44

Рецензенты:  
кафедры «Технологии и оборудование машиностроительного  
производства» и «Информационные технологии» ПГУ;  
канд. техн. наук, проф. БНТУ *Г.Я.Беляев*

**Акулович, Л.М.**

А44 Компьютерное проектирование и САПР технологических  
процессов : пособие / Л.М. Акулович. – Минск : БГАТУ, 2009. –  
200 с. – ISBN 978-985-519-101-9.

В издании приведена классификация применяемых в машиностроении систем компьютерного проектирования, изложены методические основы автоматизации проектирования технологических процессов механической обработки деталей сельскохозяйственных машин на основе использования металлообрабатывающих станков с числовым программным управлением и гибких производственных систем. Приведены типовая структура систем автоматизации проектирования технологических процессов и фрагменты автоматизации проектирования технологических операций и переходов на отдельных этапах.

Предназначено для студентов специальности «Ремонтно-обслуживающее производство». Может быть рекомендовано учащимся колледжей, магистрантам, аспирантам, специалистам предприятий сельскохозяйственного машиностроения, разрабатывающим технологические процессы механической обработки.

**УДК 658.512(075.8)  
ББК 30.2-5-05я7**

ISBN 978-985-519-101-9

© БГАТУ, 2009

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5	4.1. Некоторые положения дискретной математики .....	61
1. КОМПЬЮТЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ В СОВРЕМЕННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ .....	8	4.2. Цель формализации и постановка задач .....	71
1.1. Системы компьютерного проектирования в машиностроении ..	8	4.3. Математическое моделирование в САПР технологических процессов .....	79
1.2. Роль технологической подготовки производства в машиностроении .....	11	4.4. Этапы решения задач методом математического моделирования ..	88
1.3. Основные термины и определения .....	13	4.5. Виды алгоритмов .....	90
1.4. Классификация САПР .....	16	4.6. Принятие решений при технологическом проектировании .....	92
1.5. Интегрированные САПР .....	18	5. СТРУКТУРА САПР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ .....	97
1.6. Стандарты ЕСТПП .....	23	5.1. Методы автоматизированного проектирования технологических процессов .....	97
2. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА .....	24	5.2. Уровни автоматизации проектирования ТП .....	103
2.1. Современные требования к технологической подготовке производства .....	24	5.3. Состав и структура САПР ТП .....	109
2.2. Задачи и функции САПР технологической подготовки производства .....	26	6. ВИДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ САПР ТП .....	111
2.3. Исходная информация для разработки технологических процессов .....	30	6.1. Техническое обеспечение .....	111
2.4. Системный подход к проектированию технологических процессов .....	32	6.2. Математическое обеспечение .....	114
3. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ КОМПЬЮТЕРНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ .....	38	6.3. Лингвистическое обеспечение .....	116
3.1. Анализ исходных данных для разработки технологического процесса .....	39	6.4. Информационное обеспечение .....	121
3.2. Проектирование принципиальной схемы обработки детали ..	41	6.5. Программное обеспечение .....	129
3.3. Выбор исходной заготовки и метода ее изготовления .....	43	6.6. Методическое обеспечение .....	135
3.4. Выбор технологических баз .....	43	6.7. Организационное обеспечение .....	136
3.5. Составление технологического маршрута обработки .....	45	7. САПР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ В УСЛОВИЯХ ЕДИНИЧНОГО И МЕЛКОСЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВ .....	137
3.6. Разработка технологических операций .....	49	7.1. Анализ размерных связей деталей с использованием теории графов .....	137
3.7. Нормирование технологических операций .....	55	7.2. Выбор технологических баз .....	142
3.8. Разработка специальных средств поддержки технологического процесса .....	56	7.3. Синтез технологического маршрута .....	144
3.9. Разработка требований охраны труда .....	57	7.4. Расчет оптимальных режимов резания методом линейного программирования .....	149
3.10. Расчет экономической эффективности технологического процесса .....	58	8. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ ДЛЯ СТАНКОВ С ЧПУ .....	162
3.11. Оформление технологических процессов и управляющих программ для станков с ЧПУ .....	58	8.1. Методы разработки управляющих программ .....	162
4. ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ .....	61	8.2. Классификация САПР УП .....	166
		8.3. Структура и состав САПР УП .....	168
		8.4. Характеристики САПР УП .....	171
		8.5. Задание геометрической информации в САПР УП .....	174
		8.6. Задание элементов контура .....	179
		8.7. Функции САПР УП в составе гибких производственных систем ..	195
		ЛИТЕРАТУРА .....	199

## ВВЕДЕНИЕ

Основными технологическими процессами в машиностроении являются механическая обработка и сборка. На их долю приходится более половины общей трудоемкости изготовления машины. В ходе технологической подготовки производства (ТПП) на каждую деталь разрабатывается технологический процесс ее обработки, на каждую сборочную единицу – технологический процесс ее сборки. Кроме этого, в ходе ТПП разрабатывают технологические процессы изготовления заготовок, термической обработки деталей, покраски изделий и т. п.

Задачами автоматизации ТПП являются:

- снижение трудоемкости технологической подготовки производства;
- сокращение сроков освоения выпуска новых изделий;
- повышение качества разрабатываемых технологических процессов и продукции в целом.

Во многих современных системах автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП) предусмотрен принцип накопления технологических знаний. В САПР ТП используются знания опытных технологов, а разработанные ими технологические процессы служат в качестве аналогов при проектировании новых технологических процессов. Это позволяет минимизировать затраты и сократить сроки разработки оптимальных технологических процессов и тем самым повысить общий уровень технологической подготовки производства. Кроме этого, использование САПР ТП практически исключают ошибки субъективного характера.

Важную роль в подготовке для агропромышленного комплекса инженеров технологических специальностей, наряду с изучением основных курсов базовых дисциплин, таких как «Технология сельскохозяйственного машиностроения», «Начертательная геометрия и графика», «Материаловедение и технология конструкционных материалов», «Метрология и стандартизация», «Технология ремонтно-обслуживающего производства» и др., имеет умение использовать на практике полученные знания с наибольшей эффективностью. Дисциплина «Компьютерное проектирование и САПР ТП» является связующим звеном между известными подходами математического описания методов обработки и построения их алгоритмов, с одной стороны, и прикладными задачами технологического проектирования, с другой стороны. Она призвана обучить студентов приемам и навыкам использования полученных ими знаний при изучении ука-

занных дисциплин для более качественного решения традиционных технологических задач методами автоматизированного проектирования. Использование САПР ТП повышает производительность труда технолога-машиностроителя в десятки раз и гарантирует качество разрабатываемой технологической документации за счет более полного использования накопленных знаний в данной предметной области.

Дисциплина «Компьютерное проектирование и САПР ТП» основывается на знаниях инженерной и компьютерной графики, материаловедения и технологии конструкционных материалов, метрологии и стандартизации, технологии сельскохозяйственного машиностроения, теории графов, линейного программирования. Знания и навыки, приобретенные студентами при изучении указанной дисциплины, могут быть использованы при решении различных практических задач в области технологии сельскохозяйственного машиностроения.

Для решения задач автоматизации проектирования технологических процессов в машиностроении широко используют методы дискретной математики и, в частности, теории графов. Это обусловлено тем, что многие объекты машиностроительного производства обладают ярко выраженной дискретностью. Типичными примерами дискретного объекта являются штамповочное, сборочное или механообрабатывающее производства, где технологический процесс представляет собой множество технологических операций обработки на ряде станков. Предприятие, представляющее собой совокупность цехов и служб, сами цехи, участки также являются дискретными объектами.

При решении технологических задач методом математического моделирования наиболее часто применяются алгоритмы поиска оптимальных путей в графах. Такие алгоритмы можно использовать в случаях, когда существует конечное число вариантов решения прикладной задачи. От выбора конкретного варианта зависит значение некоторого критерия оптимальности, например себестоимости, времени обработки, энергопотребления и т. п. В частности, такой подход может быть использован для выбора оптимальной структуры перехода, операции, а также для оптимизации технологического маршрута в целом, когда обработка детали допускает различные его варианты.

С 60-х годов XX века активно разрабатывалась теория автоматизированного проектирования различных технологических объектов

(маршрутных и операционных технологических процессов, режимов резания, режущих инструментов, технологической оснастки, управляющих программ для станков с ЧПУ и др.). Учитывая ограниченные возможности первых ЭВМ, основное внимание уделялось формализации методов проектирования и расчета технологических задач, выбору необходимой информации и ее представлению в виде технологических карт. Из отечественных ученых большой вклад в развитие автоматизации ТПП внесли Г.К. Горанский, В.Д. Цветков, С.П. Митрофанов, Б.Н. Челищев, Н.М. Капустин и другие ученые.

С появлением персональных ЭВМ и программно-технических средств обработки графической информации круг решаемых технологических задач значительно расширился. Кроме этого стало возможным объединять различные этапы конструкторской и технологической подготовки производства, в виде интегрированных систем автоматизации проектирования (САПР), которые еще называют CAD-CAM система.

Организационно-технические системы, ориентированные на комплексную автоматизацию проектных работ в сфере технологической подготовки производства в настоящее время называют САПР ТП. Однако эти системы на различных предприятиях могут существенно отличаться друг от друга и в первую очередь по уровню автоматизации.

## 1. КОМПЬЮТЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ В СОВРЕМЕННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

### 1.1. Системы компьютерного проектирования в машиностроении

Одной из важнейших задач инженерно-технических работников машиностроительных предприятий является освоение выпуска новых конкурентоспособных изделий. В современных экономических условиях предприятие, не использующее методы компьютерного проектирования для освоения выпуска новых изделий, не может быть конкурентоспособным.

В основе деятельности инженера-проектировщика лежит процесс проектирования, под которым в общем случае понимают выбор некоторого способа действий. Применительно к задаче автоматизации инженерной деятельности процесс проектирования – это процесс составления описания, необходимого для создания в заданных условиях еще не существующего объекта или алгоритма его функционирования с возможной оптимизацией заданных характеристик объекта. При компьютерном проектировании объекта используют системы автоматизированного проектирования (САПР).

Система автоматизированного проектирования – это комплекс средств автоматизации проектирования, взаимосвязанных с необходимыми подразделениями проектной организации или коллективом специалистов (пользователей системы), выполняющих автоматизированное проектирование.

**Целью** создания и внедрения на машиностроительных предприятиях САПР является освоение выпуска новых изделий, повышение технического уровня и качества продукции, улучшение всех технико-экономических показателей работы предприятий.

Различают автоматизированное и автоматическое проектирование. **Автоматизированным** называют проектирование, при котором все преобразования описаний объекта и алгоритма его функционирования, а также представление описаний на различных языках осуществляются взаимодействием человека и ЭВМ. **Автоматическим** является проектирование, при котором все преобразования описаний объекта и алгоритма его функционирования, а также представление описания на различных языках осуществляются без участия человека.

Для освоения выпуска новых изделий, в первую очередь, необходимо проектирование (конструирование) этих изделий и разработка технологических процессов их изготовления. В соответствии с этим в машиностроении системы автоматизированного проектирования принято делить на два основных вида:

- САПР изделий (САПР И);
- САПР технологических процессов изготовления изделий (САПР ТП).

В публикациях часто используется сложившаяся за рубежом терминология в области автоматизированного проектирования. Поэтому рассмотрим основные наиболее встречающиеся в машиностроении термины и их сущность.

**САПР изделий.** За рубежом такие системы называют CAD (Computer Aided Design, что означает: *Computer* – ‘компьютер’, *Aided* – ‘с помощью’, *Design* – ‘проект, проектировать’). То есть термин «CAD» переводится ‘проектирование с помощью компьютера’. Эти системы выполняют объемное и плоское геометрическое моделирование, инженерные расчеты и анализ, оценку проектных решений, изготовление чертежей.

В этом виде САПР научно-исследовательский этап иногда выделяют в самостоятельную **автоматизированную систему научных исследований (АСНИ)**. За рубежом такие САПР называют CAE (Computer Aided Engineering, что означает: *Computer* – ‘компьютер’, *Aided* – ‘с помощью’, *Engineerin*’ – автоматизированная система инжиниринга. Эти системы поддерживают процесс принятия человеком новых нестандартных решений, иногда и на уровне изобретений.

**САПР технологических процессов изготовления изделий.** К этому виду САПР относят САПР ТП или АСТПП (**автоматизированные системы технологической подготовки производства**). За рубежом такие системы называют CAPP (Computer Automated Process Planning, что означает: *Computer* – ‘компьютер’, *Automated* – ‘автоматический’, *Process* – ‘процесс’, *Planning* – ‘планировать’, планирование, составление плана). С помощью этих систем разрабатывают технологические процессы и оформляют их в виде маршрутных, операционных, маршрутно-операционных карт, проектируют технологическую оснастку, разрабатывают управляющие программы (УП) для станков с числовым программным управлением (ЧПУ).

Конкретное описание технологии в виде управляющих программ обработки на оборудовании с ЧПУ вводится в **автоматизированную систему управления производственным процессом (АСУПП)**. За рубежом такие системы принято называть САМ

(Computer Aided Manufacturing, что означает: *Computer* – ‘компьютер’, *Aided* – ‘с помощью’, *Manufacturing* – ‘производство, изготовление’). Техническими средствами, реализующими данную систему, могут быть системы ЧПУ станков, компьютеры, управляющие автоматизированными технологическими модулями и робототехническими комплексами.

Различают также **автоматизированную систему управления производством (АСУП)** и **автоматизированную систему управления качеством (АСУК)**. За рубежом такие системы называют соответственно PPS (Produktionsplaungs system – система производственного планирования и управления) и CAQ (Computer Aided Quality Control, что означает: *Computer* – ‘компьютер’, *Aided* – ‘с помощью’, *Quality* – ‘качество’, *Control* – ‘управление’).

Конструирование является частью процесса проектирования и сводится к определению свойств изделия. Работы по автоматизации процессов конструирования и технологической подготовки производства характеризуются на начальных этапах разработкой отдельных пакетов прикладных программ (ППП), а на заключительных – созданием систем автоматизированного проектирования.

Самостоятельное использование систем CAD, САМ дает экономический эффект. Но он может быть существенно увеличен их интеграцией в системы типа CAPP. Такая **интегрированная система CAD/CAM** на информационном уровне поддерживается единой базой данных. В ней хранится информация о структуре и геометрии изделия (как результат проектирования в системе CAD), о технологии изготовления (как результат работы системы CAPP) и управляющие программы для оборудования с ЧПУ (как исходная информация для обработки в системе САМ на оборудовании с ЧПУ).

Этапы проектирования и изготовления изделий могут выполняться последовательно, либо перекрываться во времени, т. е. выполняться полностью, параллельно или частично. В настоящее время основной тенденцией достижения высокой конкурентоспособности предприятий является переход от отдельных замкнутых САПР и их частичного объединения к **полной интеграции** технической и организационной сфер производства. Такая интеграция сопряжена с внедрением модели компьютерно-интегрированного производства (КИП). За рубежом такие системы называют CIM (Computer Integrated Manufacturing), что означает: *Computer* – ‘компьютер’, *Integrated* – ‘интеграция’, *Manufacturing* – ‘производство’.

В структуре компьютерно-интегрированного производства выделяются, как правило, три основных иерархических уровня компьютерного проектирования.

1. **Верхний уровень (уровень планирования)**, включающий в себя подсистемы, выполняющие задачи планирования производства (АСУП).

2. **Средний уровень (уровень проектирования)**, включающий в себя подсистемы (САПР и АСТПП) проектирования изделий, технологических процессов, разработки управляющих программ для станков с ЧПУ.

3. **Нижний уровень (уровень управления)** включает в себя подсистемы управления производственным оборудованием (АСУПП).

Построение автоматизированных систем компьютерно-интегрированного производства предусматривает решение следующих задач в части:

- **информационного обеспечения** (отход от принципа централизации и переход к координированной децентрализации на каждом из рассмотренных уровней как путем сбора и накопления информации внутри отдельных подсистем, так и в центральной базе данных);
- **обработки информации** (стыковка и адаптация программного обеспечения различных подсистем);
- **физической связи подсистем** (создание интерфейсов, т. е. стыковка аппаратных средств ЭВМ, включая использование вычислительных систем).

Организация компьютерно-интегрированных производств значительно сокращает общее время производственного цикла за счет:

- сокращения времени межоперационного пролеживания заготовок;
- перехода от последовательной обработки к параллельной;
- сокращения простоев оборудования по организационным причинам;
- исключения или существенного ограничения повторяемости ручных операций по подготовке и передаче данных.

## 1.2. Роль технологической подготовки производства в машиностроении

Технологическая подготовка производства – это совокупность взаимосвязанных действий, обеспечивающих технологическую готовность предприятий к выпуску изделий заданного качества при установленных сроках, объемах и затратах.

Технологическая подготовка производства включает работы по разработке технологических процессов, проектированию и изготовлению средств технологического оснащения.

В промышленности с технологической подготовкой производства непосредственно связаны освоение выпуска новых изделий, повышение технического уровня и качества продукции, улучшение всех технико-экономических показателей работы предприятий. Первостепенное значение при этом приобретает максимальное уменьшение длительности циклов подготовки производства. Использование вычислительной техники при ТПП обусловлено необходимостью сокращения сроков, отводимых на технологическую подготовку производства, снижения трудоемкости и многовариантности технологического проектирования, быстрого поиска оптимального проектного решения. Однако это требует коренных изменений методов проектирования. Наибольший эффект от использования ЭВМ в технологии достигается при комплексном решении технологических задач. Поэтому проблема автоматизации технологической подготовки производства решается путем создания автоматизированной системы технологической подготовки производства, которая становится подсистемой автоматизированной системы управления (АСУ) предприятием.

ТПП является основной частью технической подготовки производства, в общем цикле технической подготовки она составляет (по трудоемкости) для серийного производства 40–50 %, а для крупносерийного и массового – 60–70 %.

Чтобы обеспечить запуск производства изделий, на каждую деталь необходимо разрабатывать несколько единиц технической документации и изготавливать в среднем примерно 5 единиц различных видов оснастки и инструмента. Высокая трудоемкость выполнения всех этапов ТПП (таблица 1.1) требует привлечения для этих работ большого числа инженерно-технических работников и, прежде всего, высококвалифицированных технологов.

По мере совершенствования конструкций машин и ужесточения технических требований, предъявляемых к ним, усложняются технологические задачи, а следовательно повышаются требования к квалификации инженеров-технологов. В то же время сроки, отводимые для технологической подготовки производства, зачастую бывают весьма ограничены, что обусловлено рыночной конкуренцией. Вследствие этого возрастает степень влияния технологиче-

ской подготовки производства на эффективность деятельности машиностроительного предприятия и его конкурентоспособность.

В этих условиях нет альтернативы использованию систем автоматизированного проектирования технологических процессов изготовления изделий.

Таблица 1.1 – Ориентировочная усредненная трудоемкость выполнения технологических этапов

Технологическая задача	Время, ч	
	минимальное	Максимальное
Разработка технологии: маршрутной операционной	1	22
	3	70
Нормирование технологических процессов (маршрутного описания)	0,5	10
Разработка и вычерчивание операционных эскизов к технологическому процессу	1	33
Конструирование приспособлений	3	140
Конструирование специального инструмента	1	40

САПР ТП создаются в проектных, конструкторских, технологических организациях и на предприятиях с целью:

- повышения качества проектируемой и выпускаемой продукции;
- повышения технико-экономического уровня объектов проектирования;
- уменьшения сроков и трудоемкости проектирования.

### 1.3. Основные термины и определения

Основные термины и определения в области автоматизированного проектирования установлены ГОСТ 22487–77.

Рассмотрим некоторые из них.

**Проектирование** – процесс создания такого описания объекта, которое необходимо и достаточно для его реализации в заданных условиях.

Проектирование, которое происходит как процесс взаимодействия человека и ЭВМ, называется **автоматизированным**.

В процессе проектирования получают **решения**.

**Под решением** понимают результат, который может носить форму промежуточного или окончательного описания объекта проектирования.

Представление проектного решения по заданной форме является **проектным документом**.

Совокупность проектных документов, соответствующая заданному перечню, называется **проектом**.

Процесс проектирования состоит из проектных процедур и операций. **Проектная процедура** – формализованная совокупность действий, выполнение которых оканчивается проектным решением. Проектными процедурами являются, например, оптимизация, корректировка, моделирование. Фактически проектная процедура – это нахождение части общего решения.

**Унифицированная проектная процедура** – проектная процедура, алгоритм которой остается неизменным для различных объектов проектирования или различных стадий проектирования одного и того же объекта.

**Обработка** данных состоит в перемещении данных с одного места на другое и в выполнении операций над ними.

**Проектная операция** – действие или формализованная совокупность действий, составляющих часть проектной процедуры, алгоритм которых остается неизменным для ряда проектных процедур. Проектными операциями являются, например, составление таблиц с данными, ввод и вывод данных и т. д. Фактически **операция** состоит в нахождении промежуточного (неокончательного) решения.

Как операции, так и процедуры представляют собой формализованные совокупности действий. Формализация заключается в том, что используются либо арифметические, либо логические операции, либо их сочетание.

**Программа** – это алгоритм вычисления, записанный в таком коде, который ЭВМ способна обработать. Программа состоит из команд (командных слов). Каждой команде соответствует одна операция. Кроме того, в команде содержится информация о месте расположения **операнда** – объекта, подвергаемого преобразованию, а также другая информация, необходимая для вычислений.

Совместное хранение в оперативной памяти данных и программ обеспечивает возможность автоматического выбора дальнейшего хода вычислений в зависимости от промежуточных результатов.

**Внешняя память** – периферийные устройства современных КТС предназначены для хранения больших объемов информации, для связи ЭВМ с человеком или с другими ЭВМ.

Основная **функция САПР** состоит в выполнении автоматизированного проектирования на всех или отдельных стадиях проектирования объектов и их составных частей.

Таким образом, **смысл процесса проектирования в любой САПР** независимо от объекта проектирования один и тот же: получить в соответствии с замыслом такую информационную систему – модель, которая позволяет создать систему – оригинал, полностью соответствующую замыслу.

В процессе проектирования с помощью САПР в качестве промежуточных и окончательных решений используют математические модели следующих видов:

- модели формы и геометрических параметров – это плоские и объемные изображения объектов проектирования, выполненные в соответствии с правилами ЕСКД, ЕСТД, ЕСТПП (чертежи, схемы, карты эскизов и т. д.);
- модели структуры – это кинематические, гидравлические, электронные и др. схемы. Для технологического процесса – это его структура, представленная в виде маршрутной, маршрутно-операционной и операционной карт. Для процесса проектирования – это его структура, представленная в виде графа;
- модели временных и пространственно-временных отношений – это циклограммы, сетевые графики и т. д.;
- модели функционирования – это, например, динамические и кинематические схемы, выполненные в режиме анимации;
- модели состояний и значений свойств объекта – это формальное (упрощенное) описание объекта (процесса) в виде отдельных формул, систем уравнений и т. д. Они предназначены для расчетов параметров объекта проектирования. Для технологического проектирования – это математические модели для расчета припусков и межоперационных размеров, режимов резания и т. п.;
- имитационные (статистические) модели позволяют, учитывая большую совокупность случайных факторов проигрывать (имитировать) на ЭВМ многочисленные и разнообразные реальные ситуации, в которых может оказаться будущий объект проектирования.

## 1.4. Классификация САПР

Современная САПР при ее полном развитии должна предусматривать автоматизированное решение всех задач, встречающихся в технологическом проектировании. С этой целью в настоящее время разработаны и создаются новые системы автоматизации технологической подготовки производства, обеспечивающие автоматизированное выполнение работ по ТПП на машиностроительных предприятиях.

В состав АСТПП входит целый ряд специальных подсистем проектирования технологий, к которым, как правило, относятся:

- технологии получения отливок различного вида;
- технологии сварки и резки металлов, включающие разработку управляющих программ для сварочных автоматов и для раскройных комплексов резки металлов на оборудовании с ЧПУ;
- технологии кузнечно-штамповочного производства;
- технологии механической обработки, включающие разработку управляющих программ для станков с ЧПУ;
- технологии сборки, включающей проектирование операционных технологических процессов сборки, разработку управляющих программ для промышленных роботов;
- технологии химико-термических и термических методов обработки.

Помимо специальных подсистем проектирования в состав АСТПП входят инвариантные подсистемы конструирования специальной оснастки, формирования и кодирования исходных данных, технико-экономических расчетов и банк данных технологического назначения. Подсистема конструирования специальной технологической оснастки позволяет решать задачи проектирования специального оборудования, технологической оснастки, режущего и мерительного инструмента. Для осуществления функций связи между системами САПР И и САПР ТП должна быть разработана специальная подсистема. Эту функцию выполняет подсистема формирования и кодирования исходных данных, которая выбирает, перерабатывает и систематизирует данные, выдаваемые САПР И, и подготавливает данные для работы системы технологического проектирования.

Для хранения, поиска и первичной переработки данных, необходимых при автоматизированном проектировании, служит банк данных технологического назначения.

С целью систематизации, а также сопоставления САПР различных направлений и предметных областей, разработана единая классификация систем. Согласно ГОСТ 23501.108-85 установлены следующие восемь признаков классификации САПР.

1. Тип объекта проектирования.
2. Разновидность объекта.
3. Сложность объекта проектирования.
4. Уровень автоматизации проектирования.
5. Комплексность автоматизации проектирования.
6. Характер выпускаемых проектных документов.
7. Число выпускаемых проектных документов.
8. Число уровней в структуре технического обеспечения.

Каждый из указанных признаков классифицируется на ряд следующих группировок.

1. По типу объекта проектирования предусматривается разделение САПР на 8 классификационных группировок. Например, САПР изделий машиностроения и приборостроения; САПР ТП машиностроения и приборостроения; САПР объектов строительства; САПР организационных систем.

2. По признаку разновидности объекта стандарт не устанавливает специальных обозначений, а требует их указания и кодирования в соответствии с действующими в каждой отрасли системами обозначения документов.

3. По признаку «Сложность объекта проектирования» стандарт предусматривает следующие группировки САПР:

- простых объектов с числом составных систем до  $10^2$ ;
- объектов средней сложности с числом частей от  $10^2$  до  $10^3$ ;
- сложных объектов с числом частей от  $10^3$  до  $10^4$ ;
- очень сложных объектов с числом частей от  $10^4$  до  $10^6$ .

4. По признаку «Уровень автоматизации» стандарт предусматривает следующие группировки САПР:

- низко автоматизированного проектирования (автоматизируется до 25 % проектных процедур, выполняемых при проектировании объектов данного типа);
- средне автоматизированного проектирования (автоматизируется от 25 до 50 %);
- высоко автоматизированное проектирование (автоматизируется свыше 50 %).

5. По признаку «Комплексность автоматизации проектирования»:

- одноэтапные;

- многоэтапные;
- комплексные.

6. По признаку «Характер выпускаемых проектных документов»:

- САПР текстовых документов на бумаге;
- САПР текстовых и графических документов на бумаге;
- САПР документов на машинных носителях;
- САПР документов на фотоносителях;
- САПР на двух носителях;
- САПР на всех носителях.

7. По признаку «Число выпускаемых проектных документов» определены три классификационные группировки:

- малой производительности (до  $10^5$  документов в год в пересчете на формат А4);
- средней производительности (от  $10^5$  до  $10^6$ );
- высокой производительности (свыше  $10^6$ ).

8. По числу уровней в структуре технического обеспечения:

- одноуровневые (универсальная ЭВМ + прибор периферийного устройства);
- двухуровневые (ЭВМ + автоматизированное рабочее место (АРМ));
- трехуровневые (ЭВМ + АРМ + программно управляемое оборудование, в том числе чертежные автоматы, комплексы для контроля управляющих программ для станков с ЧПУ и т. п.).

## 1.5. Интегрированные САПР

Перспективным направлением развития современного машиностроения является создание гибких производственных систем (ГПС). В основу функционирования таких систем положены принципы централизованной переработки с помощью ЭВМ конструкторской и технологической информации, а также обеспечения управления станками с ЧПУ, промышленными роботами, системами транспортирования заготовок и инструмента.

В условиях производства все виды систем автоматизации должны взаимодействовать друг с другом (рисунок 1.1).

Взаимодействие различных систем осуществляется путем обмена информацией. Обмен может осуществляться как в виде обычных документов, так и в машинных кодах с помощью машинных носителей информации.

От автоматизированной системы управления производством (АСУП) все системы получают информацию планового характера, а также информацию о фактическом наличии ресурсов.

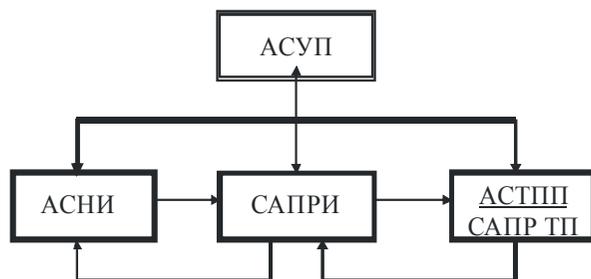


Рисунок 1.1 – Схема взаимодействия систем автоматизации производства

В свою очередь, все системы направляют в АСУП данные о выполнении плановых заданий, о потребности в различных ресурсах, в том числе материалах, комплектующих изделиях, инструментах и др.

Информация о технических требованиях на проектируемые изделия, об отдельных технических и конструкторских решениях, выработанных в результате исследования математической модели объекта, передается из автоматизированной системы научных исследований (АСНИ) в автоматизированную систему проектирования изделий.

В ходе проектирования могут появляться решения, которые целесообразно снова проверить на исходной модели и подтвердить дополнительными расчетами. В этом случае решения, полученные в САПР И, передаются обратно в АСНИ в виде задания.

Автоматизированная система технологической подготовки производства (АСТПП) включает в себя САПР ТП и является одновременно подсистемой комплексной системы автоматизированного проектирования изделия и технология его изготовления. Из САПР И передается в САПР ТП законченный проект изделия, занесенный в базу данных (БД).

САПР ТП, проектируя технологический процесс, использует БД и в то же время влияет на принятые решения САПР И для обеспечения их максимальной технологичности.

Централизация переработки всех видов информации приводит к необходимости интеграции (объединения) систем проектирования, использующих и передающих эту информацию, т. е. к созданию интегрированных САПР.

Общая схема интегрированной системы подготовки производства приведена на рисунке 1.2. Исходные данные для решения задач конструирования, разработки технологической документации и управляющих программ в таких системах вводятся один раз на первом этапе, а дополнительные данные задаются проектировщиком при работе в режиме диалога. Преимущество такого подхода состоит в том, что трудоемкое описание детали производится один раз, а используется многократно. Это позволяет сократить трудоемкость подготовки исходных данных и уменьшить вероятность появления ошибок субъективного характера. Использование интегрированных систем САД/САМ особенно эффективно при подготовке производства и программировании обработки геометрически сложных деталей. Созданию таких систем должны предшествовать работы по унификации конструктивных решений и упорядочению процессов конструирования и технологической подготовки. Целесообразно применение специализированных (объектно-ориентированных) интегрированных подсистем для конструирования, разработки технологии и УП изготовления деталей однородных технологических групп.

В основу систем автоматизированного проектирования и изготовления деталей на станках с ЧПУ положены алгоритмы, моделирующие мышление высококвалифицированных конструкторов и технологов-программистов.

Основой интеграции систем является объединение иерархически сгруппированных, самостоятельных, связанных и взаимодополняющих друг друга систем проектирования. Использование таких систем открывает возможности создания «безлюдной» технологии. Главной особенностью таких технологий является переработка и передача информации с помощью вычислительных систем от проектирования (конструктора или технолога) непосредственно к исполнительному элементу производственной системы – станку или роботу без бумажной документации и рабочего станочника.

Интегрированные системы проектирования охватывают:

- а) информационную интеграцию (единая классификация, единая система документации);
- б) организационную интеграцию (единая система сбора, поиска и передачи информации);
- в) математическую интеграцию (унифицированные математические методы анализа решаемых задач);
- г) программную интеграцию (унификация программного обеспечения);



Рисунок 1.2 – Схема структуры интегрированной системы подготовки производства

д) техническую интеграцию (унификация используемой вычислительной техники, периферийного оборудования и средств связи).

Особое значение при интегрировании систем имеет общность языка проектирования для всех подсистем.

**Требования к интегрированным САПР.** Интегрированной считается система обработки информации, в которой между конструкторской, технологической подготовкой производства и самим производством существует единая взаимосвязь в области интеграции автоматизированных систем проектирования и управления.

Для объединения подсистем в комплексы автоматизированного проектирования используют методы их аппаратного, программного, информационного и лингвистического согласования. При выполнении такого согласования используют интерфейс. Одним из основных элементов интерфейса является совокупность правил обмена информацией, которые необходимо соблюдать для взаимодействия двух и более объектов, процессов.

Необходимость соблюдения определенных правил согласования возникает и при последовательной работе прикладных программ. Состав и формы представления результатов работы каждой предыдущей программы должны соответствовать требованиям к составу и формату представления исходных данных для последующей программы. Если такого соответствия нет, то необходимо его обеспечить с помощью специальной программы, которая называется интерфейсом.

Если между какими-либо подсистемами САПР отсутствует программная связь, то функцию интерфейса между этими подсистемами выполняет человек.

Например, это имеет место при кодировании чертежей деталей с целью последующего автоматизированного проектирования процессов их изготовления. В этом случае говорят, что интерфейсную связь конструкторского и технологического этапов выполняет человек.

В настоящее время за рубежом и в нашей стране наиболее часто используются следующие виды интегрированных систем в области САПР:

CAD – CAM (CAD – CAPP) – интегрированные системы автоматизированного конструирования изделий, разработки технологических процессов их изготовления и описания технологий в виде управляющих программ обработки на оборудовании с ЧПУ;

CAE – CAD – CAM – интегрированные системы автоматизации научных исследований (инжиниринга), конструирования изделий, разработки технологических процессов и управляющих программ для станков с ЧПУ.

## 1.6. Стандарты ЕСТПП

Основные формы организации технологических процессов регламентируются стандартами Единой системы технологической подготовки производства (ЕСТПП).

Стандарты ЕСТПП подразделяются на группы. В эти группы входят различные ГОСТы, которые определяют единые принципы и направления совершенствования технологической подготовки производства на предприятиях. Одновременно с созданием ЕСТПП существует ряд систем стандартов, непосредственно взаимодействующих с ней. К важнейшим системам стандартов, используемым в ЕСТПП, относятся:

- единая система конструкторской документации (ЕСКД);
- единая система технологической документации (ЕСТД);
- система управления качеством изделий (в том числе на стадии технологической подготовки производства).

Стандарты ЕСТПП предусматривают приведение всей информации, используемой при технологическом проектировании, к единому виду формального представления. Это создает объективные предпосылки использования ЭВМ для ее переработки. Поэтому существует группа стандартов, которая предусматривает правила применения технических средств механизации и автоматизации инженерно-технических работ, а также регламентирует основные вопросы автоматизации технологической подготовки производства. Основопологающим стандартом этой группы является ГОСТ 14.401–73 «ЕСТПП. Правила организации работ по механизации и автоматизации решения инженерно-технических задач и задач управления технологической подготовкой производства».

## 2. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

### 2.1. Современные требования к технологической подготовке производства

Одной из особенностей современного машиностроительного производства является постоянный рост объемов и сложности проектных работ в сфере технологической подготовки производства. Это связано со следующими причинами:

- увеличивается номенклатура и сложность выпускаемых машин и приборов, которые характеризуются использованием новых конструктивных материалов, более высокими требованиями к качеству;
- повышаются требования к качеству технологических решений, обеспечивающих конкурентоспособность изделий за счет снижения себестоимости продукции и повышения ее качества;
- расширяются возможности оборудования с ЧПУ, требующего дополнительной разработки управляющих программ и детального проектирования операционной технологии;
- значительно сокращаются сроки подготовки производства для выпуска новых изделий.

В этих условиях наиболее значимым направлением совершенствования ТПП является ее автоматизация на базе использования ЭВМ.

Применение ЭВМ в технологическом проектировании накладывает свой отпечаток на постановку технологических задач, а также требует решения ряда дополнительных задач.

Тип производства предъявляет основные требования к ТПП и технологическому оборудованию. Так, например, к оборудованию в массовом производстве главным требованием является высокая производительность, а в серийном и единичном производствах – гибкость (универсальность и мобильность), вызванная необходимостью частой сменяемости выпускаемых изделий. Это объясняется тем, что понятия автоматизации и гибкости считались альтернативными. Однако за последние годы заметно «размывается» резкая граница между указанными требованиями к технологическому оборудованию в массовом и серийном производствах. Это обусловлено, с одной стороны, спросом рынка, требующего частой сменяемости объекта производства, с другой стороны, – развитием средств управления технологическим оборудованием на базе использования

достижений микроэлектроники и средств числового программного управления.

В настоящее время в условиях производства любого типа (массового, серийного, единичного) к технологическому оборудованию в качестве главных предъявляются требования высокой производительности и гибкости. **Производительность и гибкость** являются главной задачей автоматизации.

Обязательным и первостепенным условием выполнения указанных требований является автоматизация рабочего цикла оборудования, т. е. автоматизация задания и выполнения управляющей программы каждой единицей технологического оборудования.

Под управляющей программой металлорежущим станком понимается последовательность команд, обеспечивающих функционирование рабочих органов станка по выполнению операции обработки заготовки детали.

УП содержит технологическую и геометрическую информацию.

**Технологическая информация** – это данные о технологии обработки, содержащие сведения о смене заготовок и инструмента, последовательности ввода их в работу, выборе и изменении режимов обработки, включении в работу в определенной последовательности различных исполнительных органов станка, автоматическом измерении размеров обрабатываемой заготовки детали или инструмента и т. п.

**Геометрическая информация** – это данные, содержащие сведения о размерах отдельных элементов детали и инструмента, их положении относительно выбранного начала координат, величинах их перемещений.

К числу основных задач, которые необходимо решать при проектировании технологического процесса, относятся:

- формализация сведений о детали, которые при традиционном ручном проектировании задаются в виде чертежа со множеством специальных обозначений и перечня технических требований, изложенных в виде описания (текста). Эту информацию при автоматизированном проектировании необходимо представить в буквенно-цифровых кодах. К такому виду необходимо привести всю информацию о детали, включая описание ее конфигурации, размерных связей, технических требований;
- создание информационных массивов, содержащих сведения о наличном парке металлорежущего оборудования и его технических характеристиках, режущем, вспомогательном и мерительном ин-

струментах, станочных приспособлениях, заготовительном производстве, ГОСТах, руководящих и нормативных материалах. Для организации проектирования необходимо создать информационно-справочную службу, которая могла бы обеспечить процесс проектирования необходимой справочной документацией. При этом нужно не только обеспечить формализованное описание и ввод этой информации в ЭВМ, но и разработать методы поиска необходимой информации в памяти машин, а также ее вывод в нужном виде;

- разработка множества типовых решений, на которые базируется процесс автоматизированного проектирования, и алгоритмов их выбора. Их также нужно описать формальным образом, организовать ввод, размещение в памяти ЭВМ и предусмотреть возможность оперативной работы с ними;
- организация вывода результатов работы ЭВМ в виде распечаток (или в другом виде) технологических карт или другой документации. Поэтому нужны программы для вывода результатов проектирования в виде, удобном для технологов и рабочих-станочников.

Таким образом, для организации автоматизированного проектирования технологических процессов с помощью ЭВМ необходимо:

- а) разработать совокупность типовых решений и алгоритмов их выбора применительно к условиям производства, где система будет эксплуатироваться;
- б) разработать систему формализованного описания исходной технологической документации;
- в) организовать информационно-поисковую службу в ЭВМ;
- г) разработать систему печати результатов проектирования.

## 2.2. Задачи и функции САПР технологической подготовки производства

Технологическая подготовка производства, являясь основной составляющей технической подготовки, представляет собой взаимосвязанный комплекс организационно-технических мероприятий и инженерно-технических работ, направленных на подготовку изготовления новых изделий. При этом главной задачей ТПП является обеспечение выпуска нового изделия в короткие сроки и с наименьшими затратами.

Содержание, объем и организация технологической подготовки производства во многом зависят от типа и масштаба производства. В единичном и мелкосерийном производствах технологическая подготовка составляет 25 %, в серийном – до 50 %, в крупносерийном и массовом – до 70 % от всего объема работ по технической подготовке производства новых изделий.

Уровень технологической подготовки производства существенно влияет на организационную структуру предприятия и технико-экономические показатели его производственной деятельности, а также определяет качество выпускаемой продукции. Высокий уровень технологической подготовки производства сокращает трудоемкость изготовления деталей и сборки изделия, сокращает длительность производственного цикла, снижает себестоимость изготовления продукции, уменьшает расход металла на изготовление деталей, повышает качество машин, снижает производственный брак и т. д.

В комплексе работ по ТПП можно выделить следующие основные задачи:

- 1) организация и управление ТПП;
- 2) конструкторско-технологический анализ изделия;
- 3) обеспечение технологичности конструкции изделия;
- 4) организационно-технический анализ производства;
- 5) проектирование технологических процессов;
- 6) разработка технологических нормативов;
- 7) проектирование средств технологического оснащения;
- 8) изготовление технологической оснастки;
- 9) отладка технологического оборудования.

С функциональной точки зрения значение этапа «проектирования технологических процессов» наиболее велико. Разработанные технологические процессы определяют методы обеспечения точности при сборке и при изготовлении деталей, форму организации производства и, следовательно, трудоемкость процессов. Виды заготовок и припуски на обработку характеризуют коэффициент использования материала при механической обработке. Разработка унифицированных операций и технологических процессов в значительной степени определяет объем работ практически по всем задачам ТПП. От принятого уровня оснащенности, видов применяемой технологической оснастки и специального инструмента зависит объем работ в конструкторских подразделениях отдела главного технолога и в инструментальном цехе. Обоснованное нормирование

всех элементов технологических процессов направлено на определение себестоимости изделия. Таким образом, этап проектирования технологических процессов является центральным, основным звеном всей системы. Автоматизация подготовки производства в значительной степени зависит от того, как решаются вопросы по автоматическому проектированию процессов механической обработки и сборки.

Современная САПР ТП при ее полном развитии должна включать автоматизированное решение всех задач, встречающихся при технологическом проектировании. Причем для решения каждой задачи предполагается создание отдельной подсистемы автоматизированного проектирования. Примерный состав подсистем, соответствующий современному уровню развития технологии машиностроения, показан на рисунке 2.1.

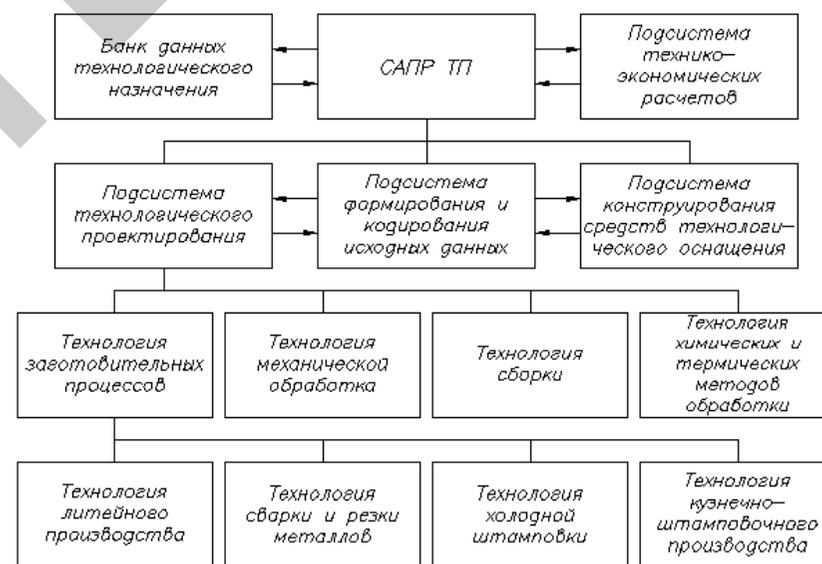


Рисунок 2.1 – Функциональная структура комплексной САПР ТП машиностроительного предприятия

Подсистемы автоматизации технологического проектирования охватывают разработку технологических процессов следующих видов производств:

- 1) литейного производства (литье в земляные формы, литье под давлением, кокильное литье, центробежное литье, прецизионное литье);
- 2) сварки и резки металлов (дуговая и контактная электросварка, газовая сварка и резка с разработкой управляющих программ для сварочных автоматов и резательных машин);
- 3) кузнечно-штамповочного производства (свободная ковка, штамповка на молотах и прессах, ковка на горизонтально-ковочных машинах, прессование на гидравлических прессах, поперечная прокатка, разработка управляющих программ для пресов с ЧПУ);
- 4) механической обработки ( типовые, групповые и единичные технологические процессы, автоматные операции, техническое нормирование, разработка управляющих программ для станков с ЧПУ);
- 5) сборки (операционные технологические процессы сборки, разработка управляющих программ для промышленных роботов);
- 6) химико-термических, термомеханических, электроэрозионных, нанесения металлопокрытий, окраски и др.

Подсистемы конструирования средств технологического оснащения должны решать задачи проектирования специального оборудования, специальной оснастки, специальных режущих и мерительных инструментов. Для осуществления функций связи между отдельными подсистемами САПР ТП должна быть разработана специальная подсистема стыковки. Эту функцию, как показано на рисунке 2.1, выполняет подсистема формирования и кодирования исходных данных, которая осуществляет выборку, переработку и систематизацию данных, выдаваемых предыдущими подсистемами, а также подготовку данных для работы последующих подсистем технологического проектирования.

Для хранения, поиска и первичной переработки данных, необходимых при проектировании, в САПР ТП служит банк данных технологического назначения.

Несмотря на многообразие задач, возникающих при создании комплексных САПР ТП машиностроительного предприятия, имеется возможность их построения на единой методологической основе с максимальным использованием стандартных методов, программ и технических средств. В настоящее время используются как отдельные подсистемы технологического проектирования, так и комплексные САПР ТП, которые наряду с получением комплектов тех-

нологической документации по каждому виду технологических работ обеспечивают передачу по каналам связи промежуточной информации от одной подсистемы к другой (см. рисунок 2.1).

### 2.3. Исходная информация для разработки технологических процессов

Исходными данными для ТПП являются:

- комплект чертежей на новое изделие;
- программа выпуска изделия;
- срок запуска изделий в производство;
- организационно-технические условия, учитывающие возможности приобретения комплектующих изделий, а также использования оборудования и оснастки на других предприятиях по кооперации.

Технологическая подготовка производства включает:

- обеспечение технологичности конструкций изделий;
- проектирование технологических процессов;
- конструирование и изготовление средств технологического оснащения.

Наиболее ответственной частью технологической подготовки производства являются проектирование технологических процессов и конструирование технологической оснастки с оформлением комплекта необходимой технологической документации. Эти элементы ТПП охватывают основной круг вопросов технологической подготовки производства и решающим образом влияют на сроки подготовки и освоения новых изделий, повышение их качества.

На основных стадиях ТПП выполняются следующие виды работ:

- проектирование технологических процессов изготовления деталей;
- проектирование технологических процессов сборки узлов и изделия в целом;
- оформление ведомостей заказов заготовок, нормализованного режущего и мерительного инструмента, оснастки и оборудования, операций, выполняемых по кооперации;
- разработка технических заданий на проектирование специальных инструментов, приспособлений и оборудования;
- изготовление спроектированной технологической оснастки;
- проектирование планировки размещения оборудования, расчет рабочих мест и формирование производственных участков;
- отладка и корректировка технологических процессов, управляю-

щих программ и оснастки, изготовление пробной партии изделий.

В процессе автоматизированного проектирования технологических процессов происходит переработка больших объемов информации. Эффективность процесса проектирования во многом зависит от рационального представления исходной информации и в первую очередь с точки зрения ее полноты и избыточности.

Исходная информация для автоматизированного проектирования технологических процессов делится на базовую, руководящую, справочную.

**Базовая информация** для проектирования технологических процессов включает:

- данные, содержащиеся в конструкторской документации на изделие;
- программу выпуска, определяющую тип производства;
- сведения о наличных средствах технологического оснащения, производственных площадях и т. п. (при проектировании технологических процессов для действующих заводов и цехов).

**Руководящая информация** включает данные, содержащиеся в следующих видах источников:

- стандартах ЕСТПП, соответствующих отраслевым стандартам и стандартам предприятия на технологические процессы, методы управления ими, средства технологического оснащения (оборудование, приспособления и др.);
- документации на действующие единичные, типовые, групповые и перспективные технологические процессы;
- руководящих материалах по выбору технологических нормативов (режимов обработки, припусков, норм расхода материалов и др.);
- документации по технике безопасности и промышленной санитарии и производственных инструкциях.

**Справочная информация** включает данные, содержащиеся в следующих документах:

- описании прогрессивных методов изготовления и ремонта изделий;
- каталогах, паспортах, номенклатурных справочниках, альбомах прогрессивных средств технологического оснащения;
- справочниках технологических нормативов (режимов обработки, припусков, норм расхода материалов и др.);
- прогнозах научно-технического прогресса и планах повышения технического уровня производства;
- методических материалах по расчетам точности и управлению технологическими процессами;
- методических материалах результатов научных исследований;

- материалах и трудовых нормативах (в том числе общемашиностроительных и отраслевых нормативах времени для нормирования технологической трудоемкости, тарифно-квалификационных справочниках и т. п.).

#### 2.4. Системный подход при проектировании технологических процессов

Процесс проектирования различных технологических объектов может быть представлен в виде нескольких уровней или этапов. На каждом уровне проектирования исходными данными являются техническое задание (ТЗ) и набор параметров, характеризующих рассматриваемый уровень. В результате проектирования разрабатывается техническая документация, описывающая отдельные стороны объекта и ТЗ для выполнения проектирования на последующих уровнях.

Для каждого уровня процесса автоматизированного проектирования имеется свой определенный состав и последовательность решаемых задач, основными из которых являются задачи анализа и синтеза.

Анализ технических объектов предполагает изучение их свойств. При анализе не создаются новые объекты, а исследуются заданные.

Синтез технических объектов направлен на создание новых вариантов. Поскольку анализ используется для оценки этих вариантов, то синтез и анализ выступают в процессе проектирования в диалектическом единстве.

Понятие «синтез» технического объекта в широком смысле слова близко по содержанию к понятию «проектирование». Разница заключается в том, что проектирование означает весь процесс разработки объекта, а синтез характеризует часть этого процесса, когда создается какой-то вариант, не обязательно окончательный. То есть, синтез как задача может выполняться при проектировании много раз в сочетании с решением задач анализа.

Накопленный в технологии машиностроения значительный теоретический и практический материал касается в основном задач анализа технологических процессов, с помощью которого устанавливается влияние различных технологических факторов на производительность, геометрическую точность и качество поверхности при обработке деталей. В то же время методы синтеза технологических процессов на основе информации об обрабатываемой детали и

производственных условиях изучались недостаточно и их использование в инженерной практике при разработке технологических процессов ограничено. Это во многом объясняется тем, что для перехода от традиционно решаемых задач и эмпирических описаний объекта проектирования к синтезу технологических процессов требуется разработка совершенно новых подходов, основанных на системно-структурном анализе.

В отличие от традиционных методов системный подход основан на том, что сложные объекты и составляющие их элементы, а также свойства этих элементов рассматриваются как система, во всей их сложности и развитии.

Система может рассматриваться как совокупность взаимосвязанных элементов, обладающих определенной структурой и допускающих выделение иерархии элементов. При этом элементы системы могут обладать по отношению к ней свойствами подсистем. Иначе говоря, каждая система состоит из подсистем и в то же время сама является подсистемой некоторой системы более высокого иерархического уровня.

Системный подход включает комплекс методов, которые позволяют анализировать сложные объекты как целое, рассматривать многие альтернативы (варианты), каждая из которых описывается большим числом переменных, обеспечивать полноту каждой альтернативы.

Как методология решения проблем системный анализ дает возможность наметить необходимую последовательность взаимосвязанных операций, состоящую из формирования проблемы, разработки (конструирования) плана решения проблемы и реализации этого решения. Решение включает оценку и отбор альтернатив по заранее выбранным критериям. Системный анализ можно представить в виде каркаса, объединяющего все необходимые методы, знания и действия для решения проблемы.

Технологическую подготовку производства с одной стороны (стороны структуры) можно представить как совокупность взаимосвязанных этапов, операций и переходов, а с другой (со стороны функции) – как часть производственного процесса, связанную с количественным и качественным преобразованием объектов производства из состояния заготовок  $C_3$  в состояние готовых изделий  $C_{II}$ . В этом определении выделяются две системные характеристики: целостность процесса и его функция. Процессы, обладающие указанными свойствами, могут рассматриваться как системные. Это

дает возможность при разработке методов анализа и синтеза технологических процессов опираться на аппарат кибернетики и теории систем.

Реализация технологических процессов приводит к изменению качественных и количественных характеристик объектов производства. В результате функция технологического процесса может быть описана как  $C_3 \rightarrow C_{II}$ . В соответствии с разделением технологического процесса на операции общая функция расчленяется на ряд операционных функций  $\phi_j$ . Функция каждой  $\phi_j$  – операции характеризует промежуточное изменение качественного состояния заготовки  $C_{j-1} \rightarrow C_j$ .

Состояние заготовки  $C_j$  характеризуется формой, межоперационными размерами, их точностью, шероховатостью и физико-механическими свойствами поверхностей, полученных в результате выполнения  $j$ -й операции.

Для дискретных объектов, какими в технологии машиностроения являются маршрутный технологический процесс и структура операции, задача синтеза состоит в определении структуры технологического процесса и операций.

Для непрерывных объектов, каким является процесс резания, решение задачи синтеза должно приводить к определению структуры и численных значений внутренних параметров проектируемого объекта, например режимов резания.

Если среди вариантов структуры необходимо найти не любой приемлемый вариант, а наилучший в некотором смысле, то такую задачу синтеза называют *структурной оптимизацией*.

Расчет внутренних параметров, оптимальных с позиций некоторого критерия при заданной структуре объекта, называется *параметрической оптимизацией*.

Обоснование цели и оценка эффективности выполнения технологической операции или ее отдельных элементов, например режимов резания, является важным вопросом при разработке оптимальных технологических процессов. Под целью при проектировании и выполнении технологической операции обычно понимается обеспечение заданных характеристик качества изделий наиболее производительным путем при минимальных затратах. В этом случае оптимальность операции можно определить как меру ее соответствия поставленной цели: чем эффективнее операция, тем она производительнее и экономичнее. В задачах, которые встречаются при оптимизации технологических процессов, используются различные

виды критериев оптимальности, но наиболее часто применяют критерии «максимальная производительность» и «минимальная себестоимость».

Для системного анализа технологических процессов в машиностроении необходимо установить:

- номенклатуру систем;
- состав параметров и переменных системы каждого типа;
- типаж межсистемных связей и их свойств.

Технологические процессы представляют собой класс технических систем, отличительной особенностью которых является существенная зависимость от времени.

Предложена следующая иерархическая классификация элементов технологических процессов (рисунок 2.2):

– *шаг*, простейший элемент этапа проектирования, например, в управляющей программе для станка с ЧПУ кодируется одним кадром и определяет движение по заданной траектории (прямая, окружность и т. п.) при неизменных режимах обработки;

– *ход*, простейший элемент ТП и составной элемент УП, кодируемый одним словом и выполняемый при неизменных режимах обработки вдоль обрабатываемой поверхности;

– *проход*, элемент ТП, состоящий из одного или нескольких ходов и представляющий собой однократное движение инструмента относительно обрабатываемого объекта, в результате которого с поверхности или сочетания поверхностей снимается один слой материала;

– *переход*, элемент ТП, состоящий из одного или нескольких проходов и представляющий собой законченный процесс получения каждой новой поверхности или сочетания поверхностей изделия при обработке одним инструментом;

– *позиция*, часть ТП, характеризующая обработку одного или нескольких конструктивных элементов обрабатываемого объекта и выполняемая при определенном расположении его в приспособлении, и приспособления относительно оборудования в начале и конце обработки;

– *установ*, часть ТП обработки изделия на одном рабочем месте при неизменном расположении его в приспособлении;

– *операция*, законченная часть ТП изготовления изделия, выполняемая на одном рабочем месте;

– *маршрут* обработки, совокупность этапов, состоящих из однородных по характеру и точности операций обработки, выполняемых

непосредственно друг за другом в технологической последовательности;

– *план* обработки, совокупность этапов обработки, представляющая законченный технологический процесс изготовления изделия.

В приведенной классификации элементов технологических процессов одновременно описано служебное назначение этих элементов.

Построенная иерархия определяет базовую номенклатуру систем, используемых при проектировании технологических процессов.

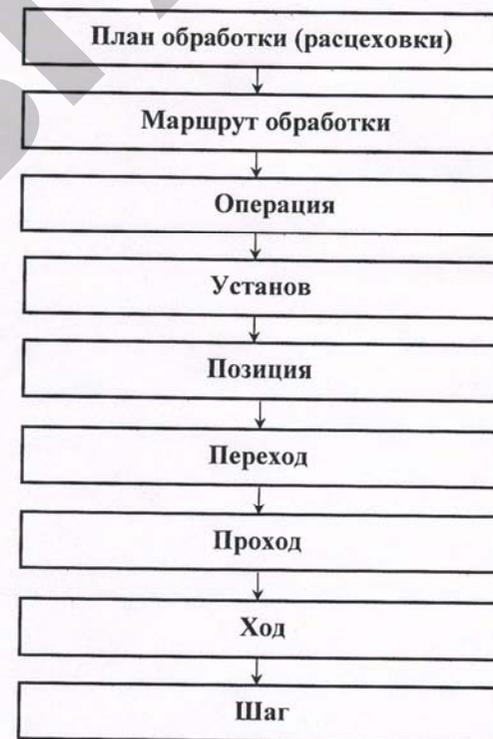


Рисунок 2.2 – Системная иерархия элементов технологических процессов

Полный набор этапов, из которых складывается первоначальный план обработки зависит от конкретных условий, однако, при этом можно выделить следующую базовую совокупность:

- термическая 1 (улучшение, старение), предназначена для улучшения обрабатываемости материала и снятия внутренних напряжений заготовки;
- обработка баз, предназначена для формирования технологических баз с использованием предварительных черновых баз;
- черновая, предназначена для съема лишних припусков и позволяет получить 14 квалитет точности размеров детали;
- полустовая, предназначена для размерной обработки с точностью 11...12 квалитетов;
- термическая 2 (закалка или улучшение);
- чистовая, предназначена для размерной обработки с точностью 9...11 квалитетов;
- термическая 3, предназначена для азотирования или старения;
- отделочная, предназначена для размерной обработки с точностью 6...8 квалитетов;
- нанесение покрытий, предназначена для нанесения упрочняющих и защитных покрытий;
- доводочная, предназначена для получения поверхностей с шероховатостью  $R_a < 0,63$  мкм.

### 3. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ КОМПЬЮТЕРНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Проектирование технологического процесса сопряжено с неоднозначностью информации и многовариантностью технологических решений. Автоматизация решения такой многокритериальной инженерной задачи требует определенных численных исследований, обеспечивающих принятие решения на основе опыта и интуиции инженера-технолога. Для этого необходим обоснованный алгоритм формирования полной информации с использованием определенного минимального количества знаний на всех этапах проектирования.

Для решения задач технологического проектирования необходима исходная информация – конструкторская документация на изделие, включающая рабочий чертеж детали, технические требования, параметры качества обработанных поверхностей и детали в целом.

К параметрам качества относят макрогеометрию, микрогеометрию и состояние поверхностного слоя. Особое значение имеет точность изготовления детали, которая характеризует близость размеров к номинальному (предписанному) значению. Количественной мерой точности служит погрешность. Повышение точности заготовки уменьшает величины припусков на обработку и приводит к экономии материала.

Погрешности обработки подразделяются на:

- погрешности размеров;
- погрешности расположения поверхностей;
- отклонение формы;
- волнистость поверхности;
- шероховатость поверхности.

К параметрам качества могут быть отнесены также декоративные свойства поверхностей деталей, особые свойства, связанные с требованиями в эксплуатации (например, требования гарантированной величины дисбаланса, условий утилизации, требования к состоянию необрабатываемых поверхностей и др.).

Рассмотрим подробнее последовательность этапов проектирования технологических процессов.

### 3.1. Анализ исходных данных для разработки технологического процесса (Этап 1)

Основные документы, необходимые для решения задачи на этом этапе:

- 1) сведения о программе выпуска изделия;
- 2) конструкторская документация на изделие;
- 3) архив производственно-технической документации.

На рисунке 3.1 представлена схема, поясняющая последовательность выполнения анализа исходных данных (АИД) при разработке ТП.

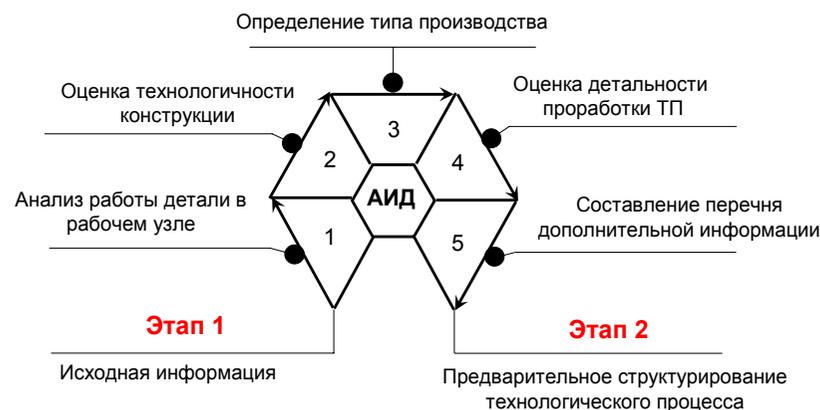


Рисунок 3.1 – Схема последовательности анализа исходных данных при разработке ТП

**Шаг 1.1.** Анализ условий работы детали в сборочном узле, выявление конструкторских баз, оценка требований к рабочим поверхностям.

**Шаг 1.2.** Технологическая отработка чертежа детали (оценка технологичности конструкции):

1.2.1. Сравнение с аналогичными деталями, принятыми в качестве базовых по трудоемкости, материалоемкости, унификации конструктивных элементов, требованиям к точности изготовления.

1.2.2. Выявление возможных затруднений при обеспечении параметров шероховатости поверхности, размеров, форм и расположения поверхностей.

1.2.3. Увязка с возможностями методов окончательной обработки, возможностями оборудования и метрологических средств.

1.2.4. Анализ конфигурации и размерных соотношений детали.

1.2.5. Установление обоснованности требований точности.

1.2.6. Выявление тех или иных возможных изменений, не влияющих на параметры качества детали, но облегчающих изготовление и открывающих возможности применения высокопроизводительных технологических методов и режимов обработки.

1.2.7. Проверка соблюдения требований к созданию конструкции детали, повышающих ее технологичность: размеры элементарных поверхностей деталей (ширина канавок и пазов, резьбы, фасок и т. п.) должны быть унифицированы, за исключением особых случаев, например при слишком близком расположении осей отверстий детали, невозможности сквозного прохода инструмента.

1.2.8. Анализ специальных технических требований (балансировка, подгонка по массе, термическая обработка, нанесение покрытий и т. п.), а также условий их выполнения в технологическом процессе и методов контроля.

1.2.9. Утверждение изменений в рабочие чертежи и технические требования на изготовление.

**Шаг 1.3.** Определение типа производства (массовое, серийное, единичное) и его организационной формы: для поточного производства – расчет такта выпуска, для непоточного производства – определение ритмичности выпуска изделий и объема партии запуска в производство.

**Шаг 1.4.** Определение степени детальности проработки ТП:

- уровень синтеза допустимых вариантов принципиальной схемы ТП;
- уровень маршрутной технологии;
- уровень операционной технологии;
- уровень синтеза состава переходов (может, в принципе, не выделяться в отдельный уровень, а проводиться в составе операционного уровня);
- уровень синтеза траектории инструмента и команд управления станками.

**Шаг 1.5.** Составление перечня дополнительной информации, необходимой для более подробной разработки технологического процесса.

*Примечание.* Все расчеты на этом этапе в связи с неглубокой детальностью проработки ТП производятся по приближенным зависимостям из-за недостаточности информации для точных расчетов.

### 3.2. Проектирование принципиальной схемы обработки детали (Этап 2)

Основные документы, необходимые для решения задачи на этом этапе:

- 1) конструкторская документация на изделие;
- 2) технологический классификатор изделий;
- 3) документация на типовые, групповые и единичные технологические процессы для данной группы изделий.

Постановка задачи – спроектировать и (или) выбрать один или ограниченное число наиболее рациональных вариантов принципиальной схемы обработки детали, удовлетворяющих требованиям рабочего чертежа и заданным техническим ограничениям.

На данном этапе:

- производится поиск действующего на предприятии типового, группового или аналогичного единичного ТП;
- в случае принятия решения о необходимости разработки нового ТП формулируются основные принципы его построения.

**Исходными данными** при выполнении этого этапа проектирования служат информация о форме, размерах и точности обрабатываемой детали, программа выпуска.

**Техническими ограничениями**, определяющими возможные варианты принципиальной схемы технологического процесса, являются набор применяемых на заводе прогрессивных методов обработки поверхностей различных видов и их характеристика.

На рисунке 3.2 представлена схема, поясняющая последовательность действий при выполнении этапа 2.



Рисунок 3.2 – Схема последовательности действий при предварительном структурировании технологического процесса

**Шаг 2.1.** Формирование технологического кода изделия по технологическому классификатору.

**Шаг 2.2.** Отнесение изготавливаемого изделия к соответствующей классификационной группе на основе технологического кода.

**Шаг 2.3.** Отнесение изготавливаемого изделия по его технологическому коду к действующему типовому, групповому или единичному процессу.

**Шаг 2.4.** При отсутствии соответствующей классификационной группы – разработка технологического процесса как единичного:

2.4.1. Выбор возможных способов получения заготовки без детальной разработки технологии.

2.4.2. Выбор принципиальных методов обработки поверхностей детали (точение, фрезерование, нанесение покрытий и т. д.) исходя из экономической целесообразности и необходимости получения заданных параметров детали. При этом происходит синтез переходов обработки (но не операций). Здесь не следует привязываться к определенным моделям оборудования и детально анализировать процесс обработки.

2.4.3. Дифференцирование технологических переходов по видам обработки (черновая, получистовая, чистовая, термическая, гальваническая и т. д.) технологического процесса.

Цель настоящего этапа – произвести первое структурирование ТП по уровням точности обработки, выделить этапы однородных видов обработки и определить соответствующие им грузопотоки деталей.

*Примечание.* На данном этапе выполняется подробный анализ базового (если он имеется) ТП с точки зрения его прогрессивности, повышения производительности труда и качества изделия, сокращения трудовых и материальных затрат на его реализацию, уменьшения вредных воздействий на окружающую среду.

### 3.3. Выбор исходной заготовки и метода ее изготовления (Этап 3)

Основные документы, необходимые для решения задач на этом этапе:

- документация на типовой или групповой технологический процесс;
- классификатор заготовок;
- методика расчета и технико-экономической оценки выбора заготовок;
- стандарты и технические условия на заготовки и основной материал.

На рисунке 3.3 представлена схема последовательности действий при выборе исходной заготовки.

**Шаг 3.1.** Определение (или уточнение) вида исходной заготовки.

**Шаг 3.2.** Выбор метода изготовления исходной заготовки.

**Шаг 3.3.** Техничко-экономическое обоснование выбора заготовки.

*Примечание.* Выбор заготовки на данном этапе основывается:

- на эвристических критериях выбора вида заготовки;
- на экономических расчетах себестоимости получения заготовки. Однако при этом необходимо помнить, что часто малая себестоимость заготовки влечет за собой большую себестоимость механической обработки;
- на использовании методов группового получения заготовок.

### 3.4. Выбор технологических баз (Этап 4)

Основные документы, необходимые для решения задач этого этапа:

- классификатор способов базирования;
- методика выбора технологических баз.

Последовательность действий при выборе технологических баз представлена на рисунке 3.4.

**Шаг 4.1.** Выбор поверхностей базирования.

**Шаг 4.2.** Выбор черновых баз для обработки поверхностей, используемых далее в качестве основной технологической базы.

**Шаг 4.3.** Определение количества баз.

**Шаг 4.4.** Выбор систем координат.

**Шаг 4.5.** Построение схем базирования (определение числа связей заготовки и выбранной системы координат).

**Шаг 4.6.** Оценка возможности выполнения принципа совмещения баз.

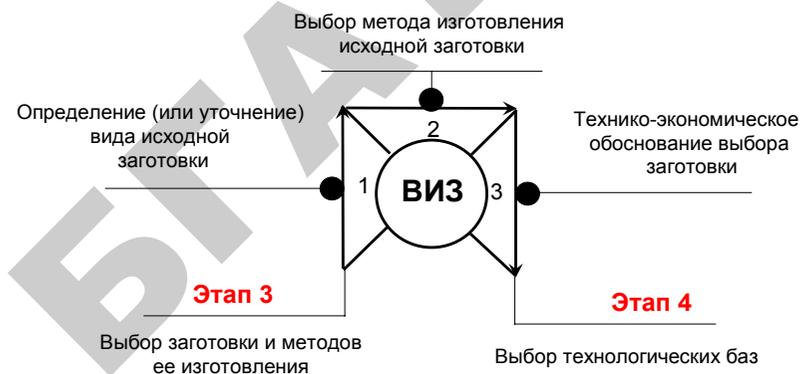


Рисунок 3.3 – Схема последовательности действий при выборе исходной заготовки

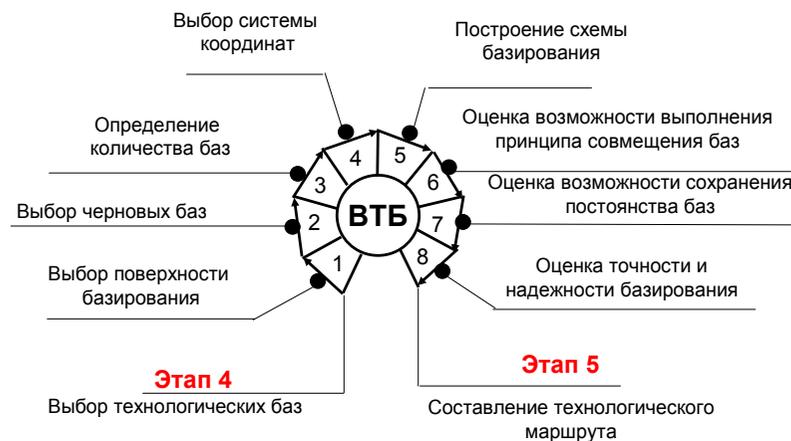


Рисунок 3.4 – Схема последовательности действий при выборе технологических баз

В сложных деталях часто встречаются поверхности одинакового ранга. Это приводит к невозможности установления последователь-

ности операций обработки из-за равнозначности поверхностей. В таком случае установление наиболее рациональной последовательности укрупненных операций производят на основе анализа размерных цепей, руководствуясь принципом совмещения конструкторских и технологических баз. Принцип совмещения баз требует, чтобы в роли технологической базы (установочной, исходной, измерительной) по отношению к каждой поверхности детали использовался тот же элемент детали, который в рабочем чертеже служит по отношению к ней конструкторской базой. Согласно этому принципу последовательность обработки поверхностей должна быть увязана с их взаимной координацией, заданной размерными цепями и техническими требованиями. Соблюдение принципа совмещения баз при установлении последовательности операций дает возможность исключить ошибки, связанные с несовместимостью баз, а это, в свою очередь, создает предпосылки для обработки деталей с наименьшими затратами.

**Шаг 4.7.** Оценка возможности сохранения постоянства баз.

**Шаг 4.8.** Оценка точности и надежности базирования.

### 3.5. Составление технологического маршрута обработки (Этап 5)

Основные документы, необходимые для решения задач на этом этапе:

- 1) документация типового, группового или единичного технологического процесса;
- 2) чертеж детали, созданный в системе конструкторско-технологической параметризации.

#### Постановка задачи.

**Задача** – спроектировать и (или) выбрать наиболее рациональный вариант технологического маршрута, включающего определение состава и последовательности операций, выбор технологических баз, оборудования и зажимных приспособлений для каждой операции. Формирование структуры технологического процесса начинается с чистовых операций, а заканчивается черновыми и заготовительными. Основанием для формирования структуры является рабочий чертеж детали с окончательными размерами.

**Исходными данными** для проектирования на данном этапе служат полученные на предыдущих этапах несколько наиболее рациональ-

ных вариантов принципиальных схем ТП, сведения о форме, размерах и точности детали и заготовки, программе выпуска.

В качестве **технических ограничений** выступают наборы применяемых на заводе основных материалов, оснастки, оборудования и его технические характеристики.

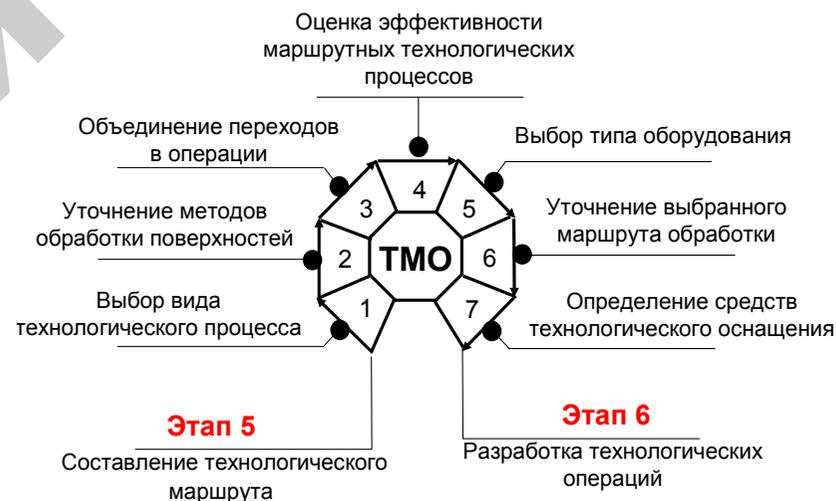
На рисунке 3.5 представлена схема последовательности действий при составлении технологического маршрута обработки.

**Шаг 5.1.** Выбор вида проектируемого процесса (единичный, типовой, групповой) и степени его детализации.

**Шаг 5.2.** Уточнение методов обработки поверхностей.

**Шаг 5.3.** Объединение переходов в операции.

**Шаг 5.4.** Оценка эффективности маршрутных технологических процессов. Составление вариантов маршрута обработки и их эффективности по себестоимости, трудоемкости, энергопотреблению, материалоемкости обрабатываемой детали и технологического оборудования.



Ри  
сунк 3.5 – Схема последовательности действий при составлении технологического маршрута обработки

**Шаг 5.5.** Выбор типов оборудования.

**Шаг 5.6.** Определение (уточнение) последовательности технологических операций (по типовому или групповому технологическому процессу).

При формировании алгоритмов последовательности операций необходимо учитывать следующее:

- **ранг поверхности.** Вначале должны обрабатываться основные поверхности, затем поверхности первого, второго и т. д. рангов (данная рекомендация относится только к чистовым и получистовым операциям);
- **принцип совмещения конструкторских баз с технологическими;**
- **удобство установки детали.** В ряде случаев размерные цепи рабочего чертежа не обеспечивают создания достаточно удобных в конструктивном и эксплуатационном отношении установочно-зажимных элементов приспособлений. Тогда приходится отступать от принципа совмещения баз и идти на уменьшение допуска на некоторые размеры в расчете на то, что простота приспособления и удобство работы компенсируют затраты на обеспечение более жестких допусков на эти размеры.

В тех случаях, когда обрабатываемые поверхности не связаны жесткими допусками и техническими требованиями или их величина настолько велика, что не оказывает влияния на последовательность обработки, последняя должна учитывать имеющуюся в производстве расстановку оборудования и прогрессивные технологические традиции проектирования технологии на конкретном предприятии. Учет расстановки оборудования в цехах обеспечивает максимально возможную поточность технологического процесса, при которой сводятся к минимуму встречные потоки деталей. Например, при отсутствии в цехе станков для точной обработки зубчатых, шлицевых или резьбовых поверхностей их обработку необходимо вынести в конец этапа, чтобы, выполнив эти операции на другом участке, деталь не возвращали обратно, а направляли в склад или на сборку;

Использование в алгоритмах **опыта проектирования технологии на конкретном предприятии** дает возможность учесть влияние организационных и других факторов на последовательность операций, которое на сегодняшний день не поддается расчету. Например, на ряде станкостроительных заводов обработка наружных резьбовых поверхностей выносится в конец этапа, а при отсутствии термообработки — в конец технологического процесса. Это делается для того, чтобы при установке детали на других операциях и транспортировке не повредить резьбу. На других предприятиях этот фактор не принимают во внимание, но учитывается ряд других особенностей.

*Примечание.* На данном этапе принимается окончательное решение о способе получения заготовки, а при установлении общей последовательности обработки рекомендуется учитывать следующие положения:

1. Каждая последующая операция должна уменьшать погрешности предыдущей обработки и улучшать качество поверхности.
2. В первую очередь следует обрабатывать поверхности, которые будут служить технологическими базами для последующих операций.
3. Затем необходимо обрабатывать поверхности, с которых снимается наибольший слой металла, что позволит своевременно обнаружить возможные внутренние дефекты заготовки.
4. Операции, при которых возможно появление брака из-за внутренних дефектов в заготовке, нужно производить на ранних стадиях ее обработки.
5. Обработка остальных поверхностей ведется в последовательности, обратной степени их точности, т. е. чем точнее должна быть поверхность, тем позже она должна обрабатываться. Обработку менее точных поверхностей можно выполнять в виде перехода при обработке высокоточных поверхностей. При этом операция изначально komponуется с целью получения высокоточной поверхности, а затем в нее по возможности добавляют переходы для обработки менее точных поверхностей (если это не повлияет на качество основной поверхности).
6. Заканчивается процесс изготовления детали обработкой той поверхности, которая должна быть наиболее точной и имеет наибольшее значение для эксплуатации детали. Если она была обработана ранее, до выполнения других смежных операций, может возникнуть необходимость в ее повторной обработке.
7. Отверстия нужно сверлить в конце технологического процесса, за исключением тех случаев, когда они служат базами.
8. Не рекомендуется совмещение черновой и чистовой обработок немерным инструментом на одном и том же станке (за исключением станков с ЧПУ, для которых это предпочтительно), но чтобы избежать трудоемких переустановок крупногабаритных и тяжелых заготовок черновую и чистовую обработку таких заготовок иногда выполняют за одну операцию. Такое построение маршрутной технологии характерно для мелкосерийного производства. Во всех случаях выполнения черновой и чистовой обработки за одну операцию рекомендуется сначала провести черновую обработку всех поверхностей, а затем выполнить чистовую обработку тех поверхностей, для которых она необходима.
9. Если деталь подвергается термической обработке по ходу технологического процесса, механическая обработка расчленяется на две части: до термической обработки и после нее.
10. Технический контроль намечают после тех этапов обработки, где вероятно повышенная доля брака перед сложными и дорогостоящими операциями, после законченного цикла обработок, а также в конце обработки детали.
11. В массовом производстве необходимое качество обработки обеспечивается статистическим анализом и выполнением условий регулирования технологического процесса.

### **Шаг 5.7.** Определение средств технологического оснащения.

Приведенные рекомендации по последовательности разработки технологического маршрута не являются обязательными и требуют творческого подхода в каждом конкретном случае. Работа по составлению маршрутов обработки существенно облегчается при использовании типовых технологических процессов на данную группу деталей.

### 3.6. Разработка технологических операций (Этап 6)

Основные документы, необходимые для решения задач этапа:

- документация на типовые, групповые или единичные технологические операции;
- классификатор технологических операций;
- стандарты по выбору средств технологического оснащения (СТО);
- каталоги (альбомы и картотеки) на СТО;
- материалы по выбору технологических нормативов (режимов обработки, припусков и пр.).

#### Постановка задачи.

**Задача** заключается в том, чтобы из заданных техническими ограничениями наборов отдельных элементов технологической системы спроектировать и рассчитать наиболее рациональные параметры операций, при которых требуемые размеры детали и их точность обеспечивались бы с минимальной себестоимостью.

**Исходными данными** для проектирования технологической операции служат набор переходов, выполняемых в операции, требуемая форма, межоперационные размеры и их точность. Эти сведения получены на основе информации, разработанной на предыдущих этапах проектирования, а также в результате проектирования предыдущей операции.

**Техническими ограничениями**, определяющими допустимые варианты систем обработки детали, структуру и характеристики операции, являются:

- 1) набор типоразмеров оборудования, применяемого в цехах завода для выполнения указанной операции;
- 2) набор универсальных, групповых и специализированных установочно-зажимных приспособлений, используемых на каждом типе станков;
- 3) технологические нормативы на припуски и напуски, время выполнения отдельных элементов операции, поправочные коэффици-

циенты для расчета режимов резания и другие технико-экономические данные.

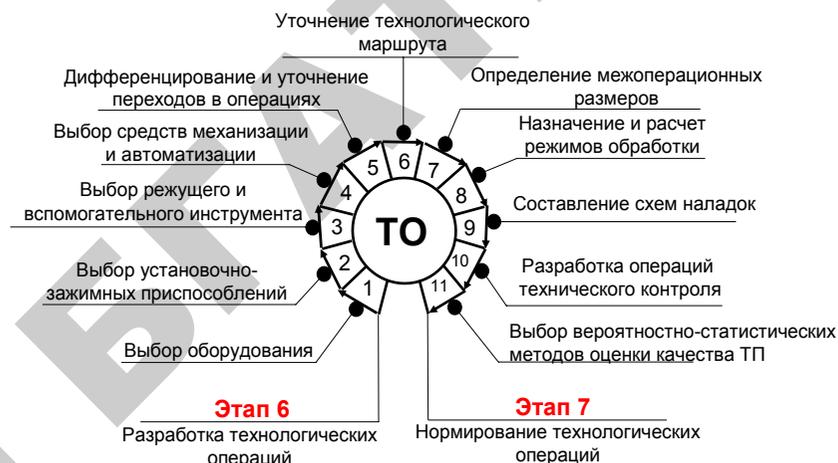


Рисунок 3.6 – Схема последовательности действий при разработке технологических операций

На рисунке 3.6 представлена схема последовательности действий при разработке технологических операций.

#### Шаг 6.1. Выбор (или уточнение) моделей оборудования.

Выбор модели станка определяется, прежде всего, возможностью изготовления на нем деталей с достижением требуемых размеров, формы и качества поверхности. Если эти требования можно обеспечить обработкой на различных станках, определенную модель станка выбирают следующим образом:

- 1) по соответствию его основных размеров габаритам изготавливаемых деталей, устанавливаемых по принятой схеме обработки;
- 2) по соответствию производительности заданному типу производства;
- 3) по возможности работы с оптимальными режимами резания;
- 4) по соответствию станка требуемой мощности;
- 5) по возможности механизации и автоматизации выполняемой обработки;
- 6) по обеспечению наименьшей себестоимости обработки;
- 7) по необходимости использования имеющихся станков;
- 8) по возможности приобретения станка;
- 9) в условиях массового производства нужно стремиться к тому,

чтобы одна операция выполнялась не более, чем на двух станках. Если это условие не выполняется, следует выбрать более производительную модель станка (многошпиндельный, многопозиционный или агрегатный).

**Шаг 6.2.** Назначение (или уточнение) типоразмера установочно-зажимного приспособления.

6.2.1. Выбор (или уточнение) схемы базирования и установки детали.

6.2.2. Поиск информации о существующих приспособлениях происходит в следующей последовательности:

- поиск технической документации на разработку существующих приспособлений;
- поиск информации об имеющихся на складе приспособлениях или приспособлениях, задействованных в производстве;
- формирование заказа на производство и (или) поставку со склада (закупку у производителя) приспособления существующего типоразмера.

6.2.3. При отсутствии готовых приспособлений и (или) технической документации на них выполняют:

- поиск информации об аналогичных приспособлениях;
- при отсутствии приспособлений-аналогов – разработку принципиальных схем оригинальных приспособлений;
- разработку технического задания на создание оригинального приспособления или заказ универсального приспособления, удовлетворяющего требованиям.

**Шаг 6.3.** Выбор режущего и вспомогательного инструмента.

**Шаг 6.4.** Выбор средств механизации и автоматизации технологического процесса и внутрицеховых средств для транспортирования:

6.4.1. Выбор:

- устройств механизированной или автоматизированной загрузки заготовок на станки и разгрузки их;
- межоперационных транспортных средств;
- бункерных и магазинных устройств и накопителей;
- средств автоматического контроля и др.

6.4.2. Определение целесообразности использования средств механизации и автоматизации на основе расчета технико-экономических показателей.

6.4.3. Заказ новых средств технологического обеспечения, в том числе средств контроля и испытаний, учитывая метрологические и требования стандартов при проведении испытаний.

**Шаг 6.5.** Дифференцирование и уточнение переходов в операции.

6.5.1. Проектирование технологических переходов.

Структура перехода для одной и той же поверхности может быть различной. Например, точение торца может производиться с помощью продольной, поперечной подачи или комбинированным способом на предварительно настроенном станке или методом пробных проходов. В зависимости от выбранного способа выполнения перехода будут различными тип режущего инструмента, характер основных и вспомогательных приемов и их последовательность, т. е. структура перехода. В связи с этим при обработке каждой поверхности возникает задача проектирования и выбора наиболее рационального варианта структуры и параметров перехода.

Исходные данные:

- схема установки детали, сведения о жесткости основных узлов технологической системы, ряды частот вращения шпинделя и величин подачи станка, мощность главного привода, допустимое усилие подачи, размеры посадочных мест для режущих инструментов;
- таблица промежуточных состояний детали, описывающая форму, размеры, точность и механические свойства обрабатываемых поверхностей к моменту выполнения перехода;
- требуемая форма, размеры, точность и шероховатость поверхности после выполнения перехода.

Техническими ограничениями, определяющими возможные варианты структуры и содержание перехода, являются применяемые на заводе способы выполнения перехода каждого вида, ограничительные перечни режущего, вспомогательного и мерительного инструментов. Общая задача проектирования перехода разбивается на три части. В первой исходя из технических ограничений определяются допустимые способы обработки поверхности и типоразмеры режущего, вспомогательного, мерительного инструмента, а во второй — соответствующий им граф допустимых вариантов структуры перехода. В третьей части на основе анализа графа производится выбор наиболее рационального варианта элементов технологической системы, структуры и параметров перехода. В соответствии с этим для различных переходов установлена следующая типовая последовательность:

- выбор допустимых способов выполнения перехода;

- определение типоразмеров режущего инструмента;
- выбор вспомогательного инструмента;
- выбор измерительного инструмента;
- определение допустимых вариантов структуры перехода;
- расчет режимов резания и определение основного времени для каждого варианта перехода;
- определение времени выполнения вспомогательных приемов для каждого варианта структуры перехода;
- выбор наиболее рациональной структуры перехода и элементов технологической системы;
- формирование описаний перехода для записи в технологическую карту.

6.5.2. Формирование допустимых вариантов структуры операции: окончательный выбор состава переходов, определение последовательности установок и переходов в операции, детальное уточнение последовательности переходов в операции.

**Шаг 6.6.** Уточнение технологического маршрута.

**Шаг 6.7.** Определение формы и межоперационных размеров заготовки, поступающей на операцию.

6.7.1. Назначение припусков расчетно-аналитическим или опытно-статистическим методами.

6.7.2. Расчет межоперационных размеров и допусков на них.

6.7.3. Проверка возможности получения детали из ранее спроектированной заготовки. При неудовлетворительном результате – корректировка размеров заготовки.

6.7.4. Назначение напусков на заготовку (в случае, если заготовка проектируется технологом механического цеха из-за невозможности использовать стандартизированную заготовку).

**Шаг 6.8.** Назначение и расчет режимов обработки.

Алгоритм определения режимов резания (методом расчета по эмпирическим формулам или путем выбора по нормативам) включает:

- определение нормативной подачи и значений подач, допустимых ограничивающими условиями;
- корректировка значения подачи в соответствии с паспортом конкретной модели станка;
- определение нормативного периода стойкости инструмента;
- вычисление нормативной скорости резания, определяемой выбранным периодом стойкости, а также значений скоростей по ограничивающим условиям (мощности и крутящему моменту);

- корректировка расчетных значений величины скорости, определение частоты вращения шпинделя станка;
- определение основного технологического времени.

*Примечание.*

1. При составлении ТП необходимо также провести анализ вариантов химико-термических, упрочняющих операций и операций нанесения покрытий и др.

2. Непосредственно режимы резания уже рассчитывались при проектировании переходов, однако на уровне операций имеются сведения, относящиеся к операции в целом, что часто приводит к необходимости их пересчета. Например, проектирование многоинструментальной обработки и связанных с ней режимов обработки возможно лишь на уровне проектирования операции.

**Шаг 6.9.** Составление схем наладок инструментов.

**Шаг 6.10.** Разработка операций технического контроля.

Включает следующие работы:

- определение состава контролируемых параметров качества детали и номера этапа ТП, после или перед которым необходим контроль параметров деталей;
- определение средств контроля;
- определение доли деталей, подвергаемых окончательному, а в случае необходимости – промежуточному контролю.

*Примечание.* Контрольная операция предусматривает выделение отдельного рабочего места контролера, однако это не исключает контроль на рабочем месте самим рабочим).

**Шаг 6.11.** Выбор вероятностно-статистических методов оценки качества и стабильности ТП.

*Примечание.* Все действия, выполняемые на данном этапе, лишь детализируют этап разработки маршрута ТП, так как они с некоторой степенью детальности уже были выполнены на этапе разработки маршрутной технологии.

### 3.7. Нормирование технологических операций (Этап 7)

Основные документы, необходимые для решения задач на этом этапе:

- нормативы норм времени и расхода материала;
- методика нормирования технологических операций;
- классификаторы разрядов работ и профессий;
- дифференцированные нормативы времени (для установления расчетных и других уточненных норм).

На рисунке 3.7 представлена схема действий при нормировании технологических операций.

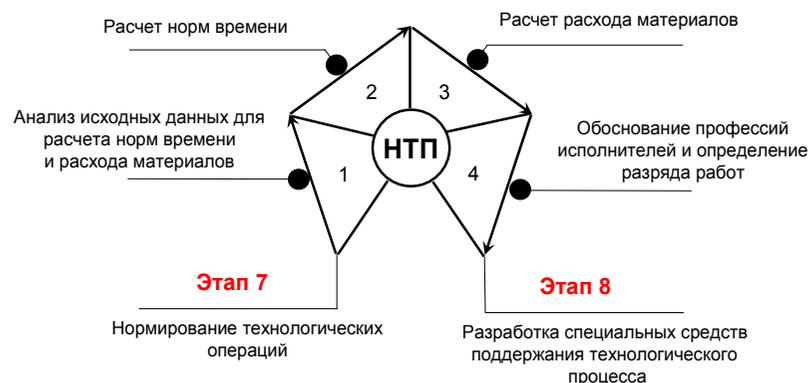


Рисунок 3.7 – Схема последовательности действий при нормировании технологических операций

**Шаг 7.1.** Анализ исходных данных для расчетов норм времени и расхода материалов.

**Шаг 7.2.** Расчет и нормирование затрат труда на выполнение процесса: расчет норм времени и сопоставление их с тактом работы (в поточном производстве).

**Шаг 7.3.** Расчет норм расхода вспомогательных материалов (здесь масса материала, из которого изготавливается сама деталь, не анализируется) и потребности в энергоресурсах (электроэнергии, воде, сжатом воздухе и др.).

**Шаг 7.4.** Определение разряда работ и обоснование профессий исполнителей для выполнения операций в зависимости от их сложности.

*Примечание.* На данном этапе обычно производится лишь количественная оценка затрат времени (или материальных ресурсов) на производство одной детали, т. е. производится первая часть экономических расчетов, которые уже не относятся к кругу основных задач технолога. Однако цель данного этапа не должна трактоваться узко, поскольку данный этап является последним из этапов построения технологии, на которых технолог является наиболее квалифицированным специалистом для принятия решений, имеет всю информацию в законченном виде и знает ее истоки. Последующие технико-экономические расчеты лучше выполнит экономист, чем технолог. Поэтому основная цель настоящего этапа – использовать полученную информацию о трудовых и материальных затратах для совершенствования технологического процесса, а именно для разработки высокопроизводительных экономически оправданных операций.

### 3.8. Разработка специальных средств поддержки технологического процесса (Этап 8)

На рисунке 3.8 представлена схема последовательности действий при разработке специальных средств поддержания технологического процесса.

**Шаг 8.1.** Разработка мероприятий по улучшению качества рабочих поверхностей, долговечности и декоративных свойств детали технологическими методами.

8.1.1. Выбор методов улучшения.

8.1.2. Разработка технологических операций упрочнения поверхностей и других мероприятий.

8.1.3. Проектирование для вышеуказанных мероприятий:

- технологического оборудования и оснастки;
- режимов обработки;
- оборудования и режимов для испытаний или контроля.

8.1.4. Расчет технико-экономической эффективности внедрения мероприятий.

**Шаг 8.2.** Детальная разработка новых технологий.

*Примечание.* Здесь необходимо детально и в полном объеме провести все работы, включенные в предыдущие этапы.

**Шаг 8.3.** Разработка специального оборудования:

- нестандартных средств автоматизации и механизации ТП;
- нестандартного режущего, вспомогательного и мерительного инструментов;
- нестандартных приспособлений.

*Примечание.* Разработку конструкции оснастки необходимо сопровождать расчетами усилия зажима, прочности, жесткости, точности базирования и закрепления. Следует разработать также инструкцию по наладке данной оснастки на станке и правилам ее эксплуатации с учетом охраны труда и промышленной санитарии.

### 3.9. Разработка требований охраны труда (Этап 9)

Основные документы, необходимые для решения задач этого этапа:

- стандарты ССБТ (система стандартов безопасности труда);
- инструкции по технике безопасности и производственной санитарии.

**Шаг 9.1.** Разработка требований, выбор методов и средств защиты окружающей среды.

*Примечание.* Невыполнение требований данного этапа может привести к заприятию производства органами госнадзора.

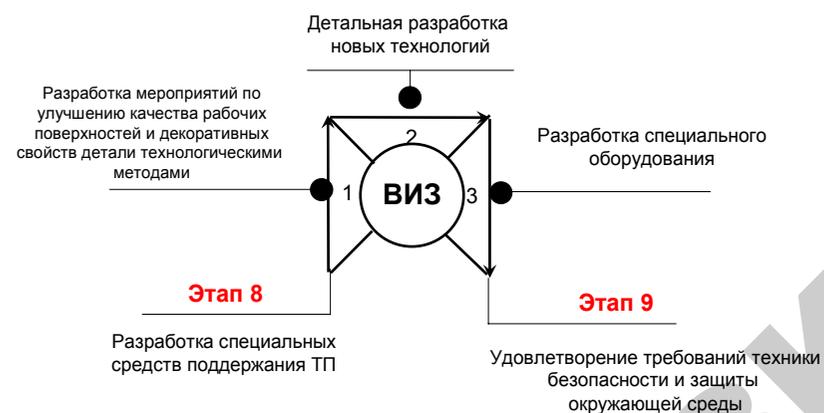


Рисунок 3.8 – Схема последовательности действий при разработке специальных средств поддержания технологического процесса

### 3.10. Расчет экономической эффективности технологического процесса (Этап 10)

Основные документы, необходимые для решения задач этого этапа: методика расчета экономической эффективности процессов.

**Шаг 10.1.** Выбор технологического процесса из представленных вариантов.

На данном этапе производится оценка себестоимости и оптимальности вариантов ТП. Но часто в реальных условиях производства может оказаться, что выбранный по указанным критериям оптимальности вариант ТП является неприемлемым. Одна из причин этого – необходимость учета особенностей сложившейся организации производства. Пример ситуации: спроектированный процесс требует использования специального оборудования, не имеющегося на предприятии, покупка его также невозможна, но деталь может быть получена на другом оборудовании с более высокой себестоимостью обработки (не превышающей предельной величины, при которой отсутствует прибыль от производства). В результате будет использован худший вариант ТП. Такой вариант технологического процесса обычно называют **производственно-оптимальным**. Следовательно, в методике выбора оптимального ТП должна быть заложена возможность учета организационных особенностей реального производства. Цель – предоставить «организаторам производства» возможность выбора наилучшего варианта процесса производства детали из ограниченного набора наиболее технологически выгодных вариантов.

*Примечание.* Этот этап обычно приводит к принятию решения о выборе конкретного варианта техпроцесса, поэтому в той или иной степени детализации данный этап может быть задействован на любом этапе проектирования ТП, если необходимо произвести отбор вариантов ТП. Однако количественные соотношения при проведении анализа ТП на различных этапах проектирования могут отличаться по уровню детализации.

### 3.11. Оформление технологических процессов и управляющих программ для станков с ЧПУ (Этап 11)

Основные документы и системы, необходимые для решения задач на этом этапе:

- руководства по разработке управляющих программ для каждого из станков с ЧПУ;
- стандарты ЕСТД;

- САПР управляющих программ для станков с ЧПУ.

На рисунке 3.9 представлена схема действий при оформлении технологической документации.

**Шаг 11.1.** Нормоконтроль технологической документации.

**Шаг 11.2.** Согласование документации технологических процессов со

всеми заинтересованными службами и ее утверждение.

**Шаг 11.3.** Синтез управляющих программ для станков с ЧПУ.

**Шаг 11.4.** Формирование пакета технической документации:

- вычерчивание чертежей детали и заготовки;
- вычерчивание карт наладок;
- печать технологических и операционных карт;
- вычерчивание карт операционных эскизов;
- вычерчивание рабочих чертежей нестандартных приспособлений, режущего и вспомогательного инструментов;
- вывод УП на программноситель;
- печать ведомостей технологического процесса, норм расхода материала, оборудования, оснастки и т. п.

ется условной, так как при проектировании любого ТП в условиях производства обычно необходимо несколько раз повторять отдельные этапы. Это вызвано необходимостью получения в процессе проектирования недостающей информации, в некоторой степени противоречащей первоначальным предположениям технолога. Алгоритмы автоматизированного проектирования ТП используют интерактивно-алгоритмический метод, при котором в автоматическом режиме выполняются один или несколько шагов или этапов, затем на определенном шаге или этапе принимается решение пользователем в интерактивном режиме. Далее чередование режимов повторяется до получения проектного решения.

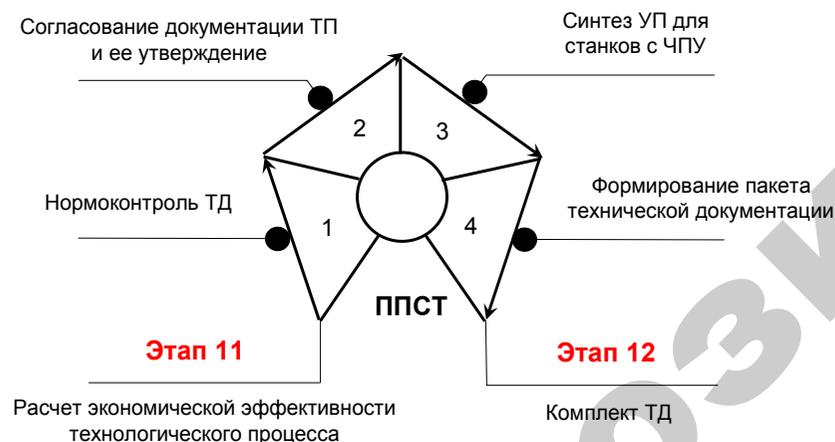


Рисунок 3.9 – Схема последовательности действий при оформлении технологических процессов и выдача комплекта документов и (или) управляющих программ для станков с ЧПУ

Приведенная последовательность этапов служит основой построения алгоритмов автоматизированного проектирования и явля-

## 4. ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

### 4.1. Некоторые положения дискретной математики

**Понятия теории множеств.** Понятие множества является фундаментальным неопределяемым понятием, как и понятие точки или линии. Интуитивно под *множеством* понимают совокупность определенных, вполне различаемых объектов, рассматриваемых по некоторому признаку как единое целое. Отдельные объекты, из которых состоит множество, называются *элементами множества*.

Множество, не содержащее ни одного элемента, называется *пустым*.

Если любой элемент  $x$ , принадлежащий множеству  $X$ , принадлежит и множеству  $Y$ , то множество  $X$  называется *подмножеством* множества  $Y$ .

Множества, элементами которых являются числа, называются *числовыми*.

Пусть  $s$  – числовое множество. *Верхней границей* множества  $s$  называется число  $c$ , которое не меньше любого его элемента. Точной верхней границей или *супремумом* множества  $s$  называют такую его верхнюю границу, которая не больше любой другой. *Нижней границей* множества  $s$  называется число  $c$ , которое не больше любого его элемента. Точной нижней границей или *инфинумом* множества  $s$  называют такую его нижнюю границу, которая не меньше любой другой.

**Понятия теории графов.** Теория графов представляет собой раздел математики, имеющий широкое практическое применение при решении многих проблем в различных областях науки и техники.

Любой граф состоит из двух групп элементов: точек и линий, соединяющих эти точки. Придерживаясь стандартной терминологии, точки будем называть *вершинами* или *узлами* графа, а линии – *ребрами*, если они не имеют направления, и *дугами*, если на них задано направление.

*Графом  $G$*  называется совокупность множества  $V$ , элементы которого называются вершинами, и множества  $A$  упорядоченных пар вершин, элементы которого называются ребрами. Предполагается, что как множество  $V$ , так и множество  $A$  содержат конечное число элементов.

Граф обозначается как  $G = (V, A)$ ,

где  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  и  $A = \{a_{ij} / i, j \in V\}$ , т. е.  $i, j$  являются элементами множества  $V$ .

При графическом представлении графа вершины обозначаются кружками, ребра – отрезками прямых, дуги – отрезками прямых с направляющими стрелками. Как правило, вершины обозначаются цифрами или буквами (например,  $1, i, j$ ), ребра – либо парой вида  $(i, j)$ , либо  $a_{ij}$ , указывающей начальную и конечную вершину ребра.

Ребро с совпадающими начальной и конечной вершинами называется *петлей*.

Граф, в котором направления дуг не задаются, называется *неориентированным*. Граф, в котором направления дуг задаются, называется *ориентированным*. Граф, в котором имеются дуги и ребра, называется *смешанным*.

*Подграфом  $G_A$*  графа  $G = (V, A)$   $(x, y)$  называется граф, в который входит лишь часть вершин графа  $G$  вместе с соединяющими их дугами. Если любые две вершины графа соединены ребром или дугой, то граф называется *полным*.

На рисунке 4.1 приведен пример неориентированного графа с множеством вершин  $V = \{1, 2, 3, 4, 5\}$  и множеством ребер  $A = \{a_{12}, a_{13}, a_{14}, a_{32}, a_{52}, a_{45}, a_{55}, a_{34}\}$ .

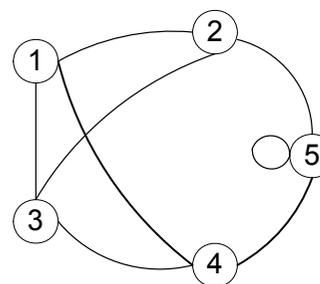


Рисунок 4.1 – Пример графа

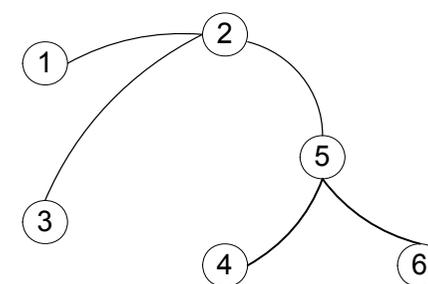


Рисунок 4.2 – Пример дерева

*Путем, маршрутом* или *цепью* из узла  $i$  в узел  $j$  на графе называется последовательность вершин и ребер, в которой конечный узел каждой дуги является начальным узлом следующей (исключая начальную и конечную вершину последовательности). При этом одно и то же ребро может встречаться в маршруте несколько раз. Если в маршруте графа нет ребер, предшествующих некоторой вершине, то она называется *начальной вершиной* маршрута. Если нет ребер, следующих за некоторой вершиной, то такая вершина называется *конеч-*

ной (висящей) вершиной маршрута. Любая вершина графа, принадлежащая двум соседним ребрам, называется *внутренней* или *промежуточной вершиной*.

Пример пути из вершины 1 в вершину 4 (см. рисунок 4.1):  $1, a_{14}, 4; 1, a_{12}, a_{25}, a_{54}, 4$ . Начальная вершина маршрута – 1, конечная вершина – 4.

*Циклом* называется конечный путь, начальный и конечный узлы которого совпадают.

*Деревом* называется граф, не имеющий циклов. Пример дерева представлен на рисунке 4.2. *Корнем* ориентированного дерева называется вершина, из которой ориентированные дуги могут только исходить.

Примеры представления структуры технологического процесса в виде графа и в виде дерева приведены на рисунках 4.3 и 4.4.

Рассмотрим анализ различных вариантов маршрутов обработки элементарных поверхностей на примере формирования *технологического маршрута обработки наружной поверхности вращения*. Применительно к таким поверхностям удобно использовать понятие «*стадия обработки*», под которым понимается укрупненная группа операций, включающая однородную по характеру, точности и качеству обработку элементарных поверхностей. Это понятие может быть отнесено и к детали в целом.

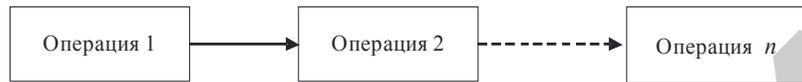


Рисунок 4.3 – Представление структуры технологического процесса в виде графа

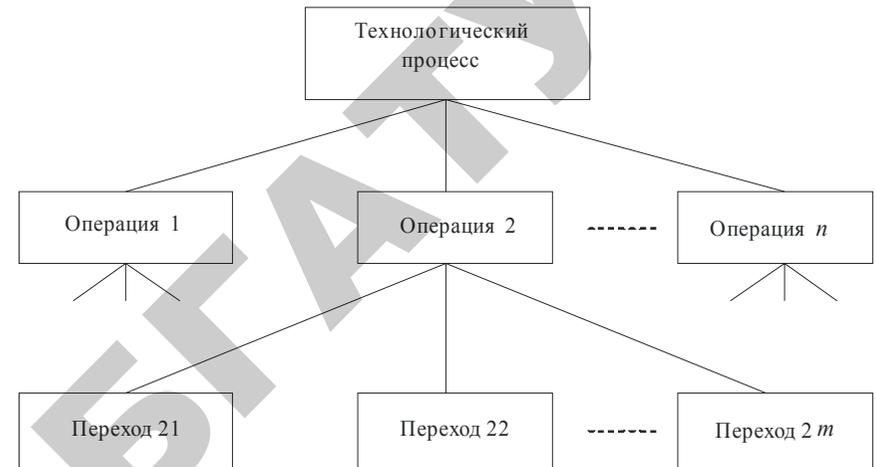


Рисунок 4.4 – Представление структуры технологического процесса в виде дерева

Для наружной поверхности вращения можно выделить 6 стадий обработки:

- I – черновая операция,
- II – получистовая,
- III – чистовая
- IV – тонкая,
- V – отделочная,
- VI – доводочная операция.

Для элементарных поверхностей обычно стадия обработки совпадает с операцией или переходом. Причем число операций, обеспечивающих близкие по значению требования качества изготовления детали, в пределах одной стадии может быть различным (таблица 4.1).

Анализ приведенных данных показывает, что для достижения определенной точности и шероховатости элементарной поверхности могут быть использованы различные технологические маршруты. Для их описания воспользуемся методами теории графов. В этом случае технологический маршрут обработки элементарной наружной поверхности вращения может быть представлен в виде графа (рисунок 4.5), в вершинах которого отражены характеристики точности и шероховатости, а ребра сопоставлены с кодами операций (таблица 4.1). Подобные графы разрабатываются на основе об-

ших правил построения маршрутов обработки типовых элементарных поверхностей, известных из технологии машиностроения.

Таблица 4.1 – Массив операций обработки элементарных наружных поверхностей вращения

Стадия обработки	Виды операций	Код операции	Квалитет точности	Параметры шероховатости, мкм	
				Rz	Ra
I	Токарная черновая	1	14	160	12,5
II	Токарная получистовая	2	12	80	6,3
III	Токарная чистовая	3	10		2,5
	Шлифовальная черновая	4	10		2,5
IV	Токарная тонкая	5	7		0,8
	Шлифовальная чистовая	6	7		0,8
V	Шлифовальная тонкая	7	6		0,25
VI	Накатная	8	6		0,16
	Суперфинишная	9	5		0,08
	Полировальная	10	6		0,04

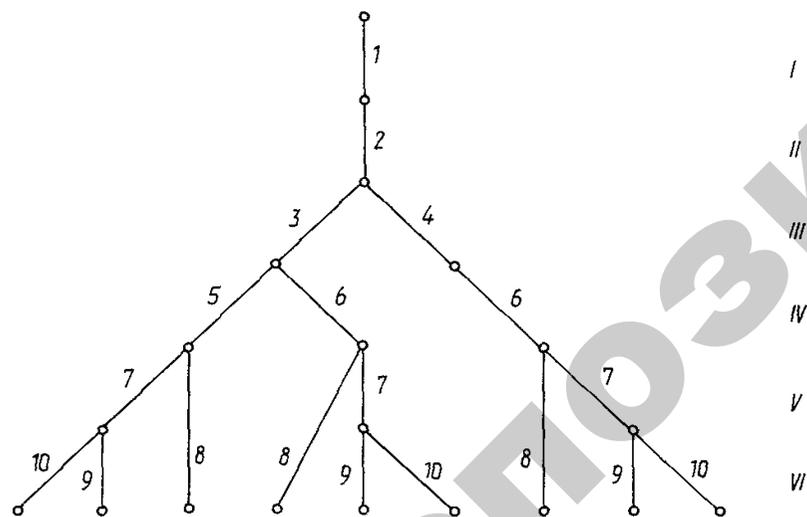


Рисунок 4.5 – Граф технологического маршрута обработки элементарной наружной поверхности вращения

Так, например, при использовании операции накатывания (код 8) отпадает необходимость в выполнении операции тонкого шлифования (код 7), что позволяет перейти в этом случае сразу от IV к стадии VI.

Общее количество возможных вариантов обработки рассматриваемого типа поверхности, как видно из рисунка 4.5, не превышает девяти, и поэтому выбор оптимального варианта может быть получен их перебором.

**Основные положения теории линейного программирования.**

Общей задачей линейного программирования называется задача поиска экстремума (максимума или минимума) линейной функции  $n$  переменных  $x_1, x_2, \dots, x_n$ :

$$z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \rightarrow \min(\max),$$

удовлетворяющих  $m$  линейным ограничениям

$$a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n \leq b_i, i = \overline{1, m_1};$$

$$a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n = b_i, i = \overline{m_1 + 1, m_2};$$

$$a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n \geq b_i, i = \overline{m_2 + 1, m}$$

и, возможно, условию неотрицательности для некоторых переменных.

Пусть задана, например, система  $m$  линейных алгебраических уравнений с  $n$  неизвестными  $x_1, x_2, \dots, x_n$ :

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n = b_1, \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n = b_2, \\ \dots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n = b_m. \end{cases} \quad (4.1)$$

и линейная функция

$$Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$$

относительно этих неизвестных.

Требуется найти такое неотрицательное решение:

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_n \geq 0$$

заданной системы (4.1), при котором функция  $Z$  принимает минимальное значение.

Система (4.1) – это система ограничений данной задачи. Система, в которой все ограничения представляют собой уравнения, называется системой канонического вида.

В математической постановке основной задачи линейного программирования выделяются три составные части: целевая функция, система ограничений и условия неотрицательности переменных.

Во многих задачах технологического проектирования ограничения, которые наложены на переменные  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , задаются в виде системы неравенств:

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1, \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq b_2, \\ \dots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq b_m. \end{cases} \quad (4.2)$$

Любую задачу линейного программирования с ограничениями вида (4.2) можно привести к ограничениям вида (4.1).

Для этого добавим к левой части неравенства системы (4.1) некоторую неотрицательную величину  $x_{n+1}$ , к левой части второго неравенства – неотрицательную переменную  $x_{n+2}$  и т. д., к левой части  $m$ -го неравенства – неотрицательную переменную  $x_{n+m}$ . В итоге приходим к системе, учитывающей ограничения (4.1) и эквивалентной системе (4.2).

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n = b_1, \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n = b_2, \\ \dots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n = b_m. \end{cases} \quad (4.3)$$

Каждое решение системы неравенства (4.3) удовлетворяет системе уравнений (4.2) и наоборот.

Если ограничения заданы в виде неравенства:

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \geq b_1, \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \geq b_2, \\ \dots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \geq b_m, \end{cases} \quad (4.4)$$

то можно отнять от левых частей первого, второго, ...,  $m$ -го неравенств соответственно неотрицательные переменные  $x_{n+1}, x_{n+2}, \dots, x_{n+m}$ .

В результате получим систему ограничений вида:

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n - x_{n+1} = b_1, \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n - x_{n+2} = b_2, \\ \dots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n - x_{n+m} = b_m. \end{cases} \quad (4.5)$$

Между задачами минимизации и максимизации существует связь. Очевидно, неотрицательное решение, минимизирующее линейную функцию  $Z$ , одновременно максимизирует линейную функцию  $f$ , равную  $-Z$ , ибо  $\min Z = -\max(-Z)$ .

Оптимальное решение (если оно вообще существует) не обязательно единственно, возможны случаи, когда существует множество оптимальных решений.

Рассмотрим **геометрическую интерпретацию** линейных неравенств системы:

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n + b_1 \geq 0, \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n + b_2 \geq 0, \\ \dots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n + b_m \geq 0. \end{cases} \quad (4.6)$$

Каждое из неравенств системы (4.6) определяет некоторое полупространство, а пересечение (общая часть)  $m$  полупространств определяет некоторую область  $M$  в  $n$ -мерном пространстве.

Область  $M$  является выпуклой, так как выпукло любое из образующих ее полупространств. Эта область, являющаяся пересечением конечного числа полупространств, может быть ограниченной и

неограниченной. Ограниченную область называют выпуклым многогранником, а неограниченную – многогранной областью.

Пример системы неравенств с двумя неизвестными:

$$\begin{cases} a_1x_1 + b_1x_2 + c_1 \geq 0, \\ a_2x_1 + b_2x_2 + c_2 \geq 0, \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ a_mx_1 + b_mx_2 + c_m \geq 0. \end{cases} \quad (4.7)$$

Первое неравенство определяет некоторую полуплоскость  $P_1$ , второе – полуплоскость  $P_2$ , т. е. – полуплоскость  $P_m$ .

Истолковывая  $x_1$  и  $x_2$  как координаты точки на плоскости, поставим вопрос: какую область на плоскости определяет, например, первое неравенство системы (4.7)? В этом случае рассматривается прямая линия, задаваемая уравнением

$$a_1x_1 + b_1x_2 + c_1 = 0. \quad (4.8)$$

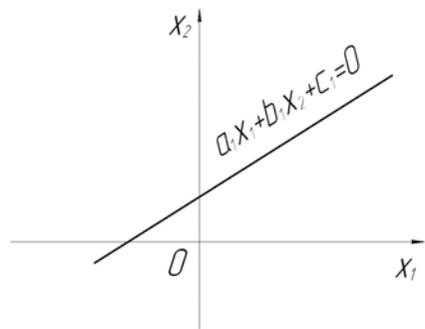


Рисунок 4.6 – Уравнение прямой линии

В прямоугольной системе координат строим прямую линию (рисунок 4.6). Эта прямая разбивает всю плоскость на две полуплоскости, в одной из которых выполняется неравенство  $a_1x_1 + b_1x_2 + c_1 \geq 0$ , а в другой – неравенство  $a_1x_1 + b_1x_2 + c_1 \leq 0$ . Сама прямая считается принадлежащей каждой из двух указанных полуплоскостей. Область решений каждого неравенства определим подстановкой начала координат. Если какая-либо пара чисел  $(x_1, x_2)$  удовлетворяет всем неравенствам системы (4.7), то соответствующая

точка  $A(x_1, x_2)$  принадлежит пересечению (общей части) полуплоскостей  $P_1, P_2, \dots, P_m$ . Пересечение конечного числа полуплоскостей есть многоугольная область  $M$ , которая в прямоугольной системе координат может располагаться по-разному (рисунок 4.7).

Возможен случай, когда нет ни одной точки, принадлежащей одновременно всем рассматриваемым полуплоскостям, т. е. область «пуста». Это означает, что система (4.7) несовместима (рисунок 4.8).

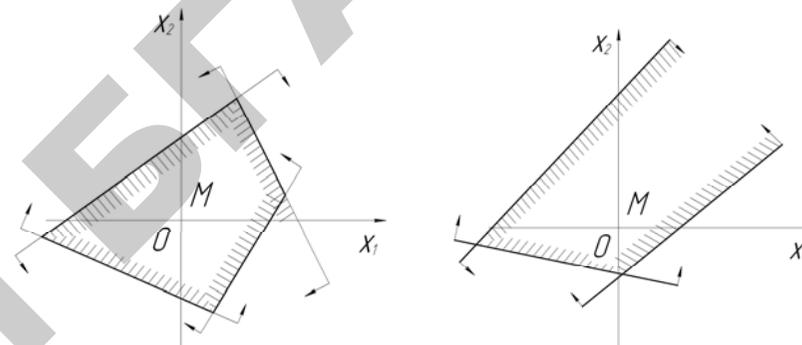


Рисунок 4.7 – Области систем неравенств

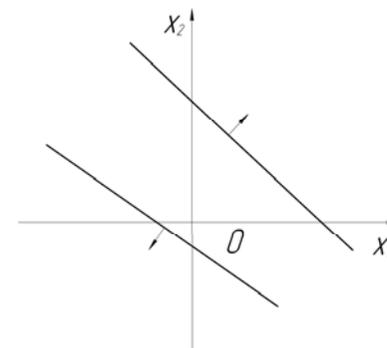


Рисунок 4.8 – Пример несовместимости уравнений

Рассмотрим пример нахождения области решений системы неравенств:

$$\begin{cases} 3x_1 + 2x_2 \geq 9, \\ 2x_1 - 3x_2 \leq 8, \\ -x_1 + x_2 \leq 2, \\ x_2 \leq 5. \end{cases} \quad (4.9)$$

Заменив знаки неравенств на знаки равенств, получим систему уравнений четырех прямых:

$$\begin{cases} 3x_1 + 2x_2 = 9, & \text{(I)} \\ 2x_1 - 3x_2 = 8, & \text{(II)} \\ -x_1 + x_2 = 2, & \text{(III)} \\ x_2 = 5. & \text{(IV)} \end{cases}$$

Строим прямые линии I – IV в прямоугольной системе координат. Областью решений системы неравенств (4.9) является многоугольник ABCDE (рисунок 4.9).

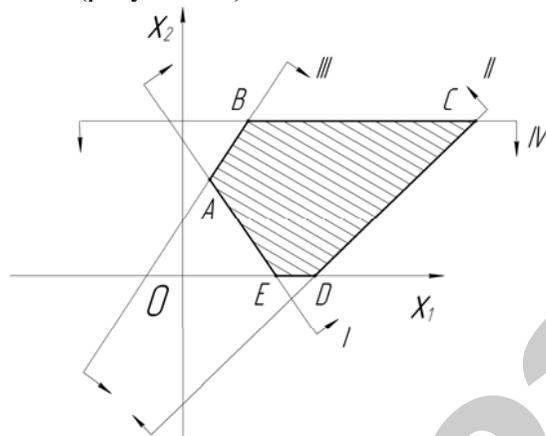


Рисунок 4.9 – Область решения системы неравенств

## 4.2. Цель формализации и постановка задач

Процесс «ручного» проектирования технологических процессов представляет собой ряд действий, с помощью которых инженер-технолог производит выбор элементов из рассматриваемых массивов различных технологических предметов, устанавливая между

ними соответствия, формулируя переходы и технологические операции. Выбор оптимального процесса производится технологом путем сравнения нескольких вариантов процессов при введении оценок на элементы, составляющие его.

Для современной науки «технология машиностроения» и ее использования на практике характерно:

- отсутствие строгих аналитических зависимостей;
- сложная логика суждений, сложная взаимосвязь и взаимное влияние отдельных задач;
- наличие огромных информационных потоков и большого числа составных элементов технологии (станки, приспособления, инструмент, режимы обработки и др.).

Трудности автоматизации проектирования технологических процессов связаны главным образом с тем, что задачи ТПП не имеют определенных формальных методов решения.

Вместе с тем, решение любой задачи на ЭВМ требует наличия аналитических или других видов зависимостей, отражающих количественную, а не качественную сторону процесса проектирования. Поэтому для решения задач автоматизации технологического проектирования с помощью ЭВМ необходимо провести формализацию технологии (или ее части).

**Формализацией** называется процесс замены (преобразования) содержательных предложений формулами.

Формализация обеспечивает возможность создания универсальных алгоритмов и программ относительно формы и размеров детали, характера производства, характеристик оборудования и оснастки, тем самым позволяет более эффективно применять ЭВМ в проектировании различных технологических процессов для деталей различных классов и любой сложности: корпусов, валов, рычагов и т. п.

Формализация задач превращает процесс технологического проектирования из процесса рассуждений и построения аналогии в процесс реализации строгого расчета. При этом форма образования технологического процесса и его составных элементов может быть выражена с помощью аппарата математической логики; содержание технологических процессов, характеризуемое рядом свойств объектов технологии, описывается средствами теории графов и теории множеств; качественные отношения могут быть представлены количественными зависимостями с помощью логических функций.

Следует также отметить, что одной из трудностей процесса формализации является то, что существующие в технологии машино-

строения эмпирические зависимости количественных отношений выражаются громоздкими таблицами, имеющие большое число значений, либо эмпирическими формулами, не охватывающими различные условия производства. В связи с этим важными являются работы, выполняемые в области теоретических и экспериментальных исследований, по установлению более точных количественных зависимостей, связывающих производительность, точность обработки и качество поверхности с методами и режимами резания для различных условий обработки.

Проводя статистические исследования и используя аппарат математического анализа, таблицы и эмпирические формулы во многих случаях можно заменить математическими выражениями (моделями). При этом повышается эффективность и точность расчета многих параметров и уменьшается нагрузка памяти ЭВМ.

Формализация процессов технологического проектирования неразрывно связана с описанием количественных связей информационной структуры детали с технологическими особенностями ее обработки. Между конструкцией, геометрической структурой и другими характеристиками деталей, с одной стороны, и структурой технологического процесса, с другой стороны, существуют объективные связи. Так, геометрическая структура детали предопределяет методы достижения требуемой точности, выбор технологических и измерительных баз, последовательность обработки поверхностей деталей и их измерений, межоперационные размеры, припуски, допуски и т. д. Поэтому для описания геометрии любой машиностроительной конструкции необходимо описать ее структуру, форму, размеры и взаимное расположение отдельных элементов.

Применение ЭВМ в технологическом проектировании отражается на постановке технологических задач, а также требует решения дополнительных задач.

Рассмотрим основные задачи, которые необходимо решать при автоматизированном проектировании технологических процессов с помощью ЭВМ.

1. Основу задания на проектирование технологического процесса составляют сведения о детали, которые при традиционном ручном проектировании задаются в виде чертежа с множеством специальных обозначений и перечня технических требований в виде описания (текста). Эту информацию при автоматизированном проектировании необходимо ввести в ЭВМ. Возможности современных ЭВМ позволяют вводить лишь буквенно-цифровые массивы. По-

этому к такому виду необходимо привести всю информацию о детали: описание ее конфигурации, размерных связей, технических требований. Графическую информацию можно ввести в компьютер, используя специальное периферийное оборудование: сканер, дигитайзер.

2. Неотъемлемой частью информации являются также сведения о наличном парке металлорежущего оборудования, заготовительном производстве, технические характеристики станков, режущего, вспомогательного и мерительного инструмента, станочных приспособлений, ГОСТы, нормативы, необходимые руководящие и нормативные материалы. При автоматизированном проектировании необходимо организовать информационно-справочную службу, которая могла бы обеспечить процесс проектирования необходимой справочной документацией. При этом нужно не только организовать формализованное описание и ввод этой информации в ЭВМ, но и разработать методы поиска необходимой информации в памяти машин, а также ее вывод в нужном виде.

3. Процесс автоматизированного проектирования базируется на множествах типовых решений и алгоритмах их выбора. Их также нужно описать формальным образом, организовать ввод, размещение в памяти ЭВМ и предусмотреть возможность оперативной работы с ними.

4. Результатом работы ЭВМ должна явиться распечатка технологических карт или другой документации. Поэтому нужны программы вывода результатов проектирования в удобном виде для технологов и рабочих-станочников.

Таким образом, в соответствии с поставленными задачами для организации автоматизированного проектирования технологических процессов с помощью ЭВМ необходимо:

- разработать систему формализованного описания исходной технологической документации;
- организовать информационно-поисковую систему;
- разработать совокупность типовых решений и алгоритмов их выбора применительно к условиям производства, где система будет эксплуатироваться;
- разработать систему печати результатов проектирования.

Для решения задач автоматизации проектирования технологических процессов необходимо построение различных видов математических моделей рассматриваемых объектов (этапов), среди которых наиболее сложным является сам процесс проектирования.

В процессе автоматизации проектирования технологических процессов происходит переработка больших объемов информации. Эффективность процесса проектирования во многом зависит от рационального представления исходной информации и, в первую очередь, с точки зрения ее полноты и избыточности.

Исходная информация для проектирования технологических процессов делится на базовую, руководящую и справочную (см. главу 2).

Анализ существующих методов моделирования показывает, что наиболее информативными являются обобщенные модели систем в виде «черного ящика», которые представляют собой средство преобразования входных данных и знаний о предметной области в выходную информацию (рисунок 4.10).

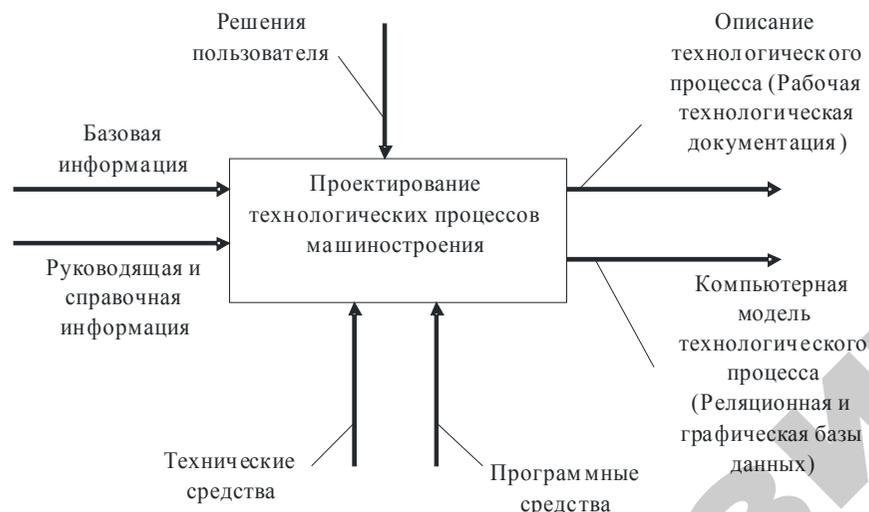


Рисунок 4.10 – Функциональная модель САПР технологических процессов

Входными данными в рассматриваемых системах являются конструктивное описание изделия на машинных носителях и (или) в форме конструкторской документации и различные виды руководящей и справочной информации. Выходная информация во внутренней форме представляет собой машинную модель технологического процесса, а во внешней – технологическую документацию, оформленную в соответствии со стандартами. Отсюда следует, что первыми шагами системного анализа в этой ситуации является системологическое исследование двух компонентов:

- проектируемых технологических процессов;
- процессов их проектирования.

Проведение расчетов или выполнение проектных задач на ЭВМ начинается с математической формулировки задачи и заканчивается решением задачи на ЭВМ и анализом результата.

В процессе формализации описания технологической информации можно выделить два подхода:

- а) кодирование на базе известных классификаторов;
- б) использование специального проблемно-ориентированного языка.

Рассмотрим пример кодирования на базе конструкторско-технологической классификации.

В единую систему конструкторско-технологической классификации входят: «Классификатор промышленной и сельскохозяйственной продукции» и «Технологический классификатор деталей машиностроения и приборостроения».

Процесс кодирования заключается в присвоении детали цифрового кода классификационной характеристики ее конструктивных признаков по «Классификатору промышленной и сельскохозяйственной продукции». Затем этот код дополняется кодами основных технологических признаков.

Для группирования необходимы следующие признаки: габариты детали, ее материал, вид заготовки.

Размерная характеристика также представляет собой обобщенный признак, кодирование которого зависит от конструкторского кода детали.

Примеры кодирования деталей в соответствии с указанными признаками и по технологическому процессу приведены в таблицах 4.2–4.4.

Таблица 4.2 – Коды размерной характеристики

Код	Наименьший наружный диаметр или ширина, мм	Код	Длина, мм	Код	Толщина или диаметр, мм
0	до 5	0	до 20	0	до 0,2
1	5...10	1	20...32	1	0,2...0,5
2	10...16	2	32...45	2	0,5...0,8

Для разработки маршрутного технологического процесса иногда используется дополнительный технологический код, в котором указывается:

- xx – вид исходной заготовки;
- xx – качество точности;
- x – шероховатость;
- x – характеристика элементов зубчатого зацепления;
- x – характеристика термической обработки;
- x – весовая характеристика.

Таблица 4.3 – Кодирование группы материала

Код	Наименование материала	
01	Стали углеродистые с содержанием углерода, %	до 0,25
02		0,25...0,6
03		свыше 0,6

Таблица 4.4 – Кодирование вида детали по технологическому процессу

Код	Вид детали по технологическому процессу
1	Литье
2	Ковка, горячая штамповка
3	Холодная штамповка
4	Обработка резанием

Таким образом на базе классификации формируется конструкторско-технологический шифр детали. Этот шифр может служить ключом для поиска детали аналога и типового технологического процесса на нее. Однако для разработки операционного ТП необходимы подробные сведения о размерах всех элементов детали, о точности размеров, точности расположения элементарных поверхностей, шероховатости. Эти сведения описываются в таблицах кодированных сведений (ТКС).

**Формы представления технологической документации.** Результатом проектирования технологических процессов является соответствующая документация, состав и форма представления которой определяются стандартами (таблица 4.5).

Таблица 4.5 – Виды основных технологических документов

Вид документа	Обозначение документа	Назначение документа
<i>Документы общего назначения</i>		
Титульный лист	ТЛ	Оформление первого листа комплекта технологических документов
Карта эскизов	КЭ	Пояснение выполнения технологического процесса, операции или перехода
<i>Документы специального назначения</i>		
Маршрутная карта	МК	Описание технологического процесса маршрутного или маршрутно-операционного, либо указание полного состава технологических операций с данными об оборудовании, технологической оснастке, материальных норма- тивах и трудовых затратах
Карта техно- логического процесса	КТП	Описание операционного технологиче- ского процесса в технологической по- следовательности по всем операциям одного вида формообразования, обра- ботки, сборки или ремонта с указанием переходов, технологических режимов и данных о средствах технологического оснащения, материальных и трудовых затратах.
Карта типо- вого (группо- вого) техно- логического процесса	КТТП	Описание типового (группового) техно- логического процесса в технологической последовательности по всем операциям одного вида формообразования, обработ- ки, сборки или ремонта с указанием пере- ходов, технологических режимов и дан- ных о средствах технологического осна- щения, материальных и трудовых затратах
Операцион- ная карта	ОК	Описание технологической операции с указанием последовательного выполне- ния переходов, данных о средствах тех- нологического оснащения, режимах и трудовых затратах

Окончание таблицы 4.5

Вид документа	Обозначение документа	Назначение документа
Карта типовой (групповой) операции	КТО	Описание типовой (групповой) технологической операции с указанием последовательности выполнения переходов и общих данных о средствах технологического оснащения и режимах
Карта наладки	КН	Указание дополнительной информации к технологическим процессам (операциям) по наладке средств технологического оснащения

### 4.3. Математическое моделирование в САПР технологических процессов

Математика представляет собой средство или инструмент для решения различных задач, возникающих в других отраслях науки и в практической деятельности человека. Этим инструментом, как и любым другим, надо уметь пользоваться, т. е. уметь использовать ее широкие возможности для решения других задач. Методы математической формализации и решения задач, возникающих в различных областях деятельности человека, объединяют под общим названием *математическое моделирование*. Общепринятого определения этого термина не существует. На эмоциональном уровне можно сказать, что математическое моделирование – это искусство применять математику. В философском контексте математическое моделирование является одним из наиболее общих методов научного познания закономерностей создания и функционирования реальных объектов различной природы.

При решении задач методом математического моделирования объект, подлежащий изучению (реальная технологическая система, процесс, производственная ситуация, проектная задача и т. п.), заменяется математической моделью. Математическая модель представляет собой совокупность математических соотношений, отображающих взаимосвязь между существенными с точки зрения решаемой задачи параметрами (признаками) объекта-оригинала. Математические соотношения могут представлять собой функциональные зависимости или логические соотношения. Окончательный вид формул и математических зависимостей между признаками

объекта обычно называют *математической моделью*. Под признаками моделируемого объекта понимаются параметры его структуры, различные его свойства, особенности и закономерности его функционирования и т. п. Математическая модель описывает зависимость между исходными и искомыми величинами или данными.

Практически любой реальный объект обладает достаточно большим числом характеризующих его признаков. Разработка математических моделей, описывающих всевозможные взаимосвязи между всеми параметрами моделируемого объекта, в подавляющем большинстве случаев, с одной стороны, просто невозможна из-за их сложности. С другой стороны, как правило, математическое описание всех взаимосвязей просто не требуется, так как в зависимости от предпринимаемого исследования те или иные параметры и их взаимосвязи являются несущественными и могут не учитываться.

Если математическая модель построена корректно, то существенные признаки ее и объекта-оригинала идентичны со степенью достоверности, достаточной с точки зрения решаемой задачи. В соответствии с этим знания, полученные при исследовании модели, переносятся на оригинал.

В настоящее время основные этапы перехода от объекта-оригинала к его математической модели выполняются на основе опыта, интуиции и анализа аналогичных исследований. При этом проблема считается разрешимой, если удастся ее свести к математическим задачам, для которых известны методы решения. В противном случае прикладная проблема сводится к математической проблеме, для разрешения которой должны быть разработаны новые математические подходы.

Таким образом, первым этапом решения задачи автоматизации проектирования технологических процессов является *математическая формулировка задачи*, включающая математическое описание условий задачи, а также определение аналитических выражений, которые подлежат решению на ЭВМ. Для перехода от словесного описания задачи к математической формулировке используют математические методы.

Математические модели, используемые в САПР ТП, имеют общую структуру. Все переменные в математических моделях делятся на три группы: управляемые, неуправляемые и производные.

Под *управляемыми* переменными понимаются такие, выбор конкретных значений которых определяет выбор того или иного проектного решения.

**Неуправляемые** переменные характеризуют ситуацию, в которой должно быть принято решение. Они описывают внешние факторы, не зависящие от оптимизируемых проектных решений, но влияющие на последствия принятия решения.

**Производные** переменные, зависящие от управляемых и неуправляемых переменных, являются результатами принятия решения. К таким переменным относятся в проектных задачах технико-экономические характеристики проектируемого объекта.

Основой процесса выбора проектных решений на различных этапах является достижение некоторых целей. Их подразделяют на качественные и количественные.

Под **качественными** подразумеваются цели, которым соответствуют только два исхода – цель достигнута или цель не достигнута. Соотношения, описывающие условие выполнимости качественных целей, называют ограничениями модели (техническими ограничениями), а решения, удовлетворяющие этим условиям – допустимыми. Поэтому этот тип критериев называют иногда критериями допустимости.

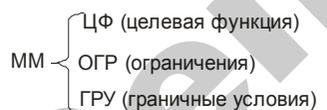
Под **количественными** целями подразумевают такие цели, которые заключаются в стремлении увеличить (или уменьшить) некоторые характеристики проектируемого объекта, зависящие от принимаемых решений. Критерии, служащие для выражения количественных целей, называют критериями эффективности или частными критериями эффективности.

При выполнении проектных задач возникает необходимость, принимая решение, учитывать возможность достижения нескольких количественных целей. В этих случаях приходится учитывать несколько частных критериев эффективности. Наиболее простым способом в данном случае является построение обобщенного критерия, который представляет собой определенную совокупность частных критериев.

В условиях реальных производств наиболее подходящим вариантом является использование обобщенных критериев.

Зависимость между обобщенным критерием или частным критерием эффективности и параметрами оптимизации называется *целевой функцией*.

Поэтому математическая модель:



Таким образом, процесс моделирования включает следующие этапы:

- постановка задачи;
- построение модели;
- разработка методов получения проектных решений на модели;
- экспертная проверка и корректировка модели и методов.

Для различных математических задач, используемых в САПР ТП, разработаны **численные методы их решения**. Выбор численного метода определяется:

- требованиями, предъявляемыми постановкой задачи. Сюда относятся требуемая точность, быстрота решения, затраты на подготовку программы;
- возможностью ЭВМ реализовать выбранный метод.

Численные методы позволяют свести решение самых разнообразных и сложных операций (интегрирование, дифференцирование, логарифмические и другие функции) к последовательному выполнению четырех арифметических действий.

На этапе выбора численного метода решения задачи выбираются методы оптимизации, исходя из вида долевой функции, количества и характера переменных и др.

Разработка **алгоритма** предусматривает определение последовательности решения задачи на основе ранее выполненной математической формулировки задачи и выбора численного метода ее решения.

Выполнение проектных процедур при автоматизированном проектировании основано на оперировании с математическими моделями технологических процессов, которые представляют собой систему математических объектов (чисел, переменных, множеств, графов, матриц и т. д.) и отношений между ними, отражающих некоторые свойства технологического процесса.

В САПР технологических процессов находят применение **структурно-логические** и **функциональные** математические модели.

Структурно-логические математические модели подразделяются на табличные, сетевые и перестановочные.

*Табличная модель* описывает одну конкретную структуру технологического процесса. В табличной модели каждому набору условий соответствует единственный вариант проектируемого технологического процесса. Поэтому табличные модели используют для поиска типовых проектных решений.

Рассмотрим обработку группы деталей  $d_1, d_2, d_3$  на прутковом токарном автомате. Последовательность обработки их поверхностей устанавливается с помощью табличных моделей. Каждая деталь (рисунок 4.11) имеет поверхности с определенными свойствами  $F_1, F_2, F_3$ :

$$F(d_1) = \{F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6, F_7, F_8\} = F'_1;$$

$$F(d_2) = \{F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_8\} = F'_2;$$

$$F(d_3) = \{F_1, F_2, F_5, F_8\} = F'_3.$$

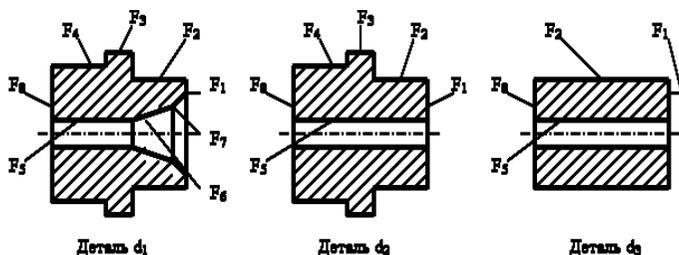


Рисунок 4.11 – Эскизы заготовок при их токарной обработке

На рисунке 4.12. представлены табличные модели в виде графов взаимосвязей переходов при обработке деталей  $d_1, d_2, d_3$  на данной операции.

Для представления данных на языке, удобном для программирования, информация об обработке деталей на указанной операции может быть описана в виде таблиц 4.6 и 4.7, которые затем можно превратить в массивы.

В таблицах логическая единица обозначает наличие связи, а ноль – отсутствие таковой.

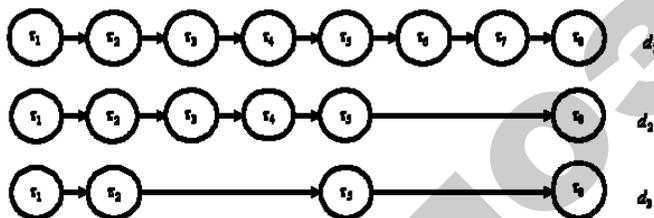


Рисунок 4.12 – Графы взаимосвязей переходов при обработке деталей  $d_1, d_2, d_3$ :

$\tau_1 \dots \tau_8$  – операторы (технологические переходы):  $\tau_1$  – подрезка торца;

$\tau_2, \tau_3, \tau_4$  – точение наружной цилиндрической поверхности;

$\tau_5$  – сверление;  $\tau_6$  – зенкерование;  $\tau_7$  – зенкование;  $\tau_8$  – отрезка

Сетевые модели описывают множество структур технологического процесса, отличающихся количеством и (или) составом элементов структуры при неизменном отношении порядка. Структура элементов сетевой модели описывается ориентированным графом, не имеющим ориентированных циклов. В модели может содержаться несколько вариантов проектируемого технологического процесса, однако во всех вариантах порядок элементов одинаков.

Рассмотрим сетевую модель технологического проектирования маршрута обработки детали «Зубчатое колесо», эскиз которой представлен на рисунке 4.13.

На рисунке 4.14 показан граф взаимосвязи операторов (технологических операций) по возможной последовательности их выполнения.

Этот граф можно представить в виде матрицы этого графа (здесь не приводится), которая может быть описана в виде массива информации. А массивы являются неизменными атрибутами любого языка программирования.

Таблица 4.6 – Связи между свойствами поверхностей деталей и операторами (технологическими переходами)

$\tau_i$	$F_j$							
	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$	$F_6$	$F_7$	$F_8$
$\tau_1$	1	0	0	0	0	0	0	0
$\tau_2$	0	1	0	0	0	0	0	0
$\tau_3$	0	0	1	0	0	0	0	0
$\tau_4$	0	0	0	1	0	0	0	0
$\tau_5$	0	0	0	0	1	0	0	0
$\tau_6$	0	0	0	0	0	1	0	0
$\tau_7$	0	0	0	0	0	0	1	0
$\tau_8$	0	0	0	0	0	0	0	1

Таблица 4.7 – Связи между совокупностями свойств деталей и операторами (технологическими переходами)

$\tau_i$	$F_j$		
	$F_1$	$F_2$	$F_3$
$\tau_1$	1	1	1
$\tau_2$	1	1	1
$\tau_3$	1	1	0
$\tau_4$	1	1	0
$\tau_5$	1	1	1
$\tau_6$	1	0	0
$\tau_7$	1	0	0
$\tau_8$	1	1	1

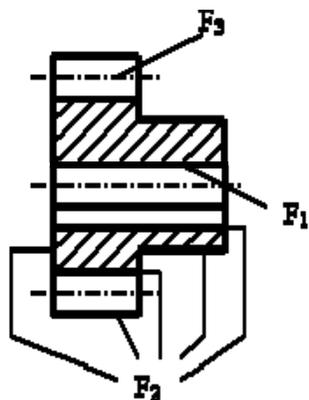


Рисунок 4.13 – Эскиз детали «Зубчатое колесо»

Сетевая модель включает в себя таблицу связей свойств поверхностей детали и операторов технологического процесса (технологических операций) (таблица 4.8).

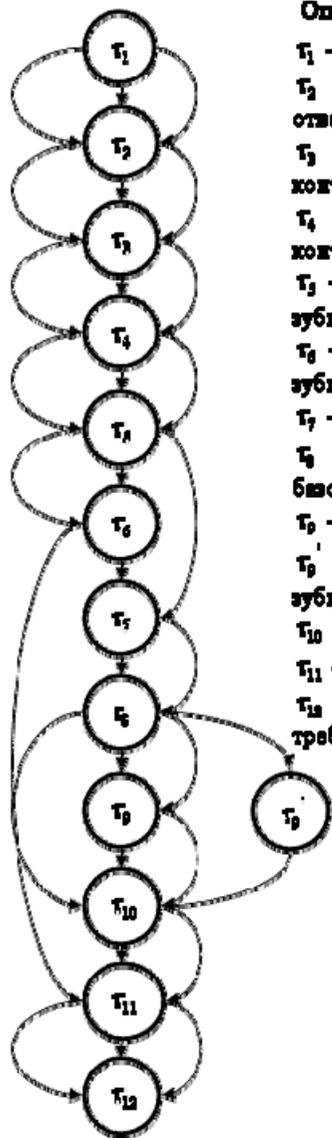
Перестановочные модели описывают множество структур технологического процесса, отличающихся количеством и (или) составом элементов структуры при изменении отношения порядка. От-

ношения порядка в этих моделях задаются с помощью графа, содержащего ориентированные циклы.

На рисунке 4.15 показан граф, отображающий расщеповку при изготовлении изделия.

Таблица 4.8 – Связи между свойствами поверхностей детали и операторами технологического процесса

$\tau_i$	$F_j$		
	$F_1$	$F_2$	$F_3$
$\tau_1$	1	1	0
$\tau_2$	1	0	0
$\tau_3$	0	1	0
$\tau_4$	0	1	0
$\tau_5$	0	0	1
$\tau_6$	0	0	1
$\tau_7$	1	1	1
$\tau_8$	1	0	0
$\tau_9$	0	0	1
$\tau_{10}$	0	0	1
$\tau_{11}$	1	1	1
$\tau_{12}$	1	1	1



**Операторы  $T_i$  (технологические операции):**  
 $T_1$  - заготовительная;  
 $T_2$  - протяжная (протягивание базового отверстия);  
 $T_3$  - черновая токарная (черновое точение контура зубчатого колеса);  
 $T_4$  - чистовая токарная (чистовое точение контура зубчатого колеса);  
 $T_5$  - зубофрезерная черновая (черновая нарезка зубьев);  
 $T_6$  - зубофрезерная чистовая (чистовая нарезка зубьев);  
 $T_7$  - термическая (объемная закалка);  
 $T_8$  - внутренняя шлифовальная (шлифование базового отверстия);  
 $T_9$  - зубошлифовальная (шлифование зубьев);  
 $T_{10}$  - зубошлицовальная (шлицевание зубьев);  
 $T_{11}$  - притирочная (притирка зубьев);  
 $T_{12}$  - мозочная (мойка детали);  
 $T_{13}$  - контрольная (контроль технических требований детали)

Рисунок 4.14 – Граф взаимосвязи операторов (технологических операций) по возможной последовательности их выполнения

Сетевые и перестановочные модели используют для получения типовых, групповых и индивидуальных технологических процессов. Наличие в них вариантов позволяет производить оптимизацию технологических процессов.

Примером *функциональных моделей* могут быть математические модели, используемые при расчете и оптимизации режимов резания.

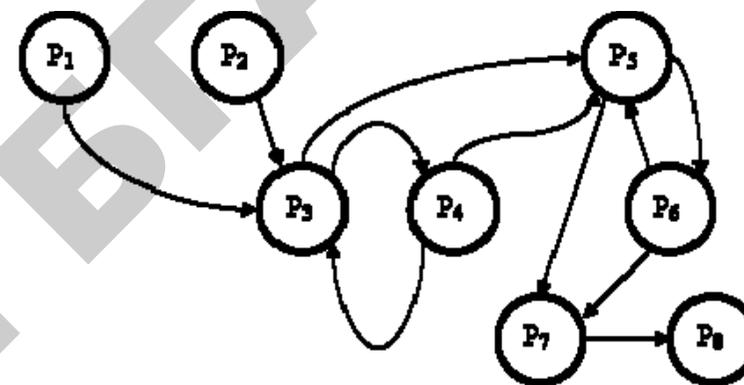


Рисунок 4.15 – Граф, отображающий расщепку при изготовлении изделия:  
 $P_1, P_2, \dots, P_8$  обозначены цехи:  $P_1$  – литейный;  $P_2$  – кузнечный;  $P_3$  – механический;  $P_4$  – термический;  $P_5$  – механосборочный;  $P_6$  – узловой сборки;  $P_7$  – испытательный;  $P_8$  – упаковочный

#### 4.4. Этапы решения задач методом математического моделирования

Исследование реальных объектов методом математического моделирования в общем случае представляет собой последовательное выполнение следующих этапов.

1. Формулировка цели исследования, которая должна быть достигнута при моделировании. Важность этого этапа состоит в том, что цель исследования в значительной степени обуславливает сложность математической модели и саму возможность решения задачи.

2. Анализ моделируемого объекта. На этом этапе устанавливается, какие из признаков объекта оригинала являются существенными с точки зрения решаемой задачи. Определяются исходные данные, характеризующие эти признаки, возможна разработка конструктив-

ной или функциональной схемы объекта и т. п.

3. Разработка физической модели и обоснование ее соответствия по существенным признакам моделируемому объекту. На этом этапе формулируются ограничения и предположения, которые упрощают описание объекта- оригинала, не нанося при этом существенного ущерба достоверности получаемых результатов исследования. Этот этап особенно важен, поскольку большинство реальных технических объектов являются крайне сложными, поэтому без упрощения их математическое моделирование зачастую просто невозможно.

4. Разработка математической модели.

5. Разработка алгоритма или алгоритмов компьютерной модели. Здесь следует отметить, что на основании одной и той же модели могут быть построены различные алгоритмы. Это зависит от того, какие из параметров в рамках предпринимаемого исследования будут известными, а какие искомыми. Например, параметры, которые считаются известными при решении задач анализа, будут неизвестными (искомыми) при решении задач синтеза и наоборот.

6. Разработка компьютерной программы или пакета программ. Обычно для этих целей используют языки программирования высокого уровня, такие как Си++, Delphi и др.

7. Отладка и тестирование программ. Этот этап часто является самым трудоемким. Здесь выявляются ошибки не только в программе, но и в алгоритме, и в самой математической модели. Нередко на этапе отладки программ выявляется некорректность или невозможность допущений и ограничений, принятых на этапе разработки физической модели. Это может привести к необходимости отказа от разработанной математической модели и разработки новой.

8. Численные исследования, анализ и интерпретация результатов численных исследований в терминологии объекта-оригинала.

9. Определение погрешности получаемых результатов. В зависимости от происхождения все погрешности можно разбить на четыре группы:

- погрешности формализации возникают при переходе от объекта-оригинала к его физической модели и обусловлены степенью его соответствия этой модели. Количественную оценку этих погрешностей можно получить при экспериментальных исследованиях на самих объектах-оригиналах или на их макетах;

- погрешности исходных данных связаны с физическими измерениями объекта оригинала. При измерениях в технических системах погрешность измерения в статических условиях обычно составляет 1–5 %, погрешность измерения динамических величин 5–20 %;

- погрешности вычислительного алгоритма связаны с приближенным решением математических соотношений численными методами. Погрешность вычислительного алгоритма должна быть в 2..5 раз меньше погрешности исходных данных. Следует иметь в виду, что неудачно разработанный алгоритм может привести к тому, что результаты численного решения не будут соответствовать исследуемой математической модели;

- погрешности машинного округления связаны с тем, что в ЭВМ все вычисления выполняются с определенным числом значащих цифр. Эта погрешность зависит от типа компьютера и программы. Погрешность машинного округления должна быть в 5..10 раз меньше погрешности вычислительного алгоритма.

Приведенная схема решения задач методом математического моделирования является в определенной степени условной. Так, не всегда есть необходимость в допущениях и ограничениях, устанавливаемых на третьем этапе, иногда возможно использование известных алгоритмов и готовых компьютерных программ и т. п.

Таким образом, для получения достоверных результатов при математическом моделировании необходимо глубокое понимание всех существенных особенностей исследуемого объекта, его модели, вычислительных алгоритмов, программ, возможностей вычислительной техники.

#### 4.5. Виды алгоритмов

При переводе решения любой задачи на ЭВМ требуется разработка алгоритма.

*Алгоритм* – это правило действий, указывающее как и в какой последовательности это правило необходимо применять к исходным данным задачи, чтобы получить ее решение.

Алгоритм характеризуется следующими понятиями – детерминированностью, дискретностью, массовостью и степенью формализации.

*Детерминированность*, или определенность, устанавливает однозначность результата процесса при заданных исходных данных и означает, что не может быть различных толкований.

*Дискретность* означает расчлененность алгоритма на отдельные элементарные действия.

*Массовость* предполагает решение любой задачи однотипных классов при различных значениях исходных данных.

Под *степенью формализации*, следует понимать уровень приближения разработки алгоритма к языку программирования. Можно считать, что алгоритм достаточно формализован тогда, когда он может быть запрограммирован для ЭВМ с использованием существующего математического обеспечения.

Наиболее распространены следующие формы представления (описания) алгоритма.

1. *Словесное описание*. Представляет собой общее описание процедур на естественном языке. Степень детализации вычислительного процесса является весьма низкой, формализация процесса практически отсутствует. Положительным моментом является емкое и компактное описание задачи целиком.

2. *Операторное описание*. Заключается в подробном описании процесса, расчлененного на отдельные формулы или даже отдельные арифметические операции со словесным или символьным указанием последовательности действий. Такое представление алгоритма сопровождается почти полной формализацией. Поэтому программирование его значительно упрощается. Такую форму представления алгоритма целесообразно применять для несложных и малых по объему расчетных задач.

3. *Описание в виде таблицы принятия решений*. Таблицы принятия решений следует рассматривать как специальную форму алгоритмов, которые особенно хорошо подходят для постановок технологических задач.

Преимущества формы представления алгоритма в виде таблиц принятия решений следующие:

- возможность любого развития по строкам и столбцам;
- хорошие возможности для применения типовых решений (маршрутов обработки, станков, инструментов и др.);
- хорошая приспособляемость к специфическим условиям предприятия посредством замены, развития или изменения;
- легкое представление таблиц принятия решений как подпрограмм общей системы алгоритмов.

4. *Описание в виде математических зависимостей*. Это достаточно краткая и рациональная форма представления алгоритмов.

Функциональные зависимости, записанные в виде формул, обеспечивают минимизацию объема памяти ЭВМ.

#### 4.6. Принятие решений при технологическом проектировании

Решение задачи технологического проектирования с помощью ЭВМ представляет собой моделирование деятельности технолога, проектирующего технологический процесс. Поэтому важно знать, каким образом технолог находит то или иное решение и какие методологические принципы заложены в его деятельности.

Множество частных технологических задач, которые решает технолог в процессе проектирования, можно свести в две группы.

*Первую группу* составляют задачи, которые легко поддаются формализации. К таким задачам следует отнести расчет режимов резания, расчет припусков на механическую обработку, расчет норм времени и т. д. Решение этих задач сводится к выполнению расчетов по формулам. Для них легко составить формальный алгоритм, позволяющий для решения использовать ЭВМ. Однако таких задач при технологическом проектировании немного.

*Вторую группу* составляют задачи, которые условно называют неформализуемыми. К таким задачам относятся: выбор метода обработки, выбор оборудования, инструмента, назначение схемы базирования, выбор вида заготовки, определение последовательности операций и т. д. Эти задачи объединяет то, что для них в технологии машиностроения нет формальных методов решения, т. е. не установлены функциональные соотношения, позволяющие формально получать решения с учетом исходных данных.

Например, рассмотрим задачу о выборе метода обработки отверстия заданных размеров и точности. Для ее решения технологу не нужно изобретать новые методы обработки отверстий, а следует использовать уже известное, апробированное решение. В технологии машиностроения применяется ряд проверенных на практике методов обработки отверстий: для черновых – сверление, рассверливание, зенкерование, растачивание; для чистовых – растачивание чистовое, развертывание, протягивание, хонингование. Следовательно, имеется конечный набор известных методов обработки (типовых решений), задача технолога состоит в обоснованном выборе одного из них.

Каждый из методов обработки (типовое решение) имеет область рационального применения. Например, при отсутствии отверстия в

заготовке первым черновым проходом назначают сверление. Если окончательные размеры отверстия велики, сначала сверлится отверстие меньшего диаметра, а затем оно рассверливается. В крупносерийном и массовом производстве применяют более точные методы получения заготовок, поэтому в заготовке отверстие, как правило, имеется. Тогда в качестве типового прохода используют зенкерование. Зенкеры изготавливают диаметром до 150 мм, а при больших размерах отверстия необходимо производить растачивание.

Чистовая обработка отверстий по седьмому качеству ведется развертыванием. Но стандартные развертки имеют диаметр до 80 мм, поэтому для получения больших отверстий применяют чистовое растачивание. В массовом производстве часто используют протягивание.

Таким образом, **основной принцип деятельности технолога** при решении рассматриваемой задачи состоит в обоснованном выборе (принятии) типового решения с учетом комплекса условий.

Чтобы получить полное описание геометрии любой машиностроительной конструкции, необходимо описать ее структуру, форму, размеры и взаимное расположение отдельных ее элементов. Для этого достаточно представить весь набор типовых решений, а также условий, при которых может быть принято каждое из них – в формализованном виде. Тогда процесс выбора сводится к проверке соответствия исходных данных и условий применимости типового решения. В случае выполнения всех условий принимается соответствующее типовое решение.

Рассмотрим задачу выбора шлифовального круга на операцию круглого наружного шлифования методом врезания. Для решения этой задачи необходимо:

- сформировать множество типовых решений;
- сформировать комплекс условий применимости;
- сформировать массив параметров применимости;
- разработать алгоритм логической проверки соответствия исходных данных и условий применимости.

Например, на некотором предприятии имеются шлифовальные станки трех моделей – они и составляют *множество типовых решений (МТР)*:

$$МТР = \{ЗУ12В, ЗУ131М, ЗМ163В\}.$$

Сформируем комплекс условий применимости выявленных типовых решений. *Комплекс условий применимости* – это множество параметров, проверка которых с достаточной достоверностью по-

зволяет выбрать то или иное решение. Условиями применимости в данном случае являются:

- возможность размещения обрабатываемой заготовки в рабочей зоне станка;
- возможность обработки заготовки на данном типе оборудования.

Первая группа условий регламентирует габаритные размеры детали – диаметр вала  $D$  и его длина  $L$  (рисунок 4.16) должны находиться в пределах, допустимых рабочей зоной станка.

Вторую группу условий составляют следующие требования: длина шлифуемой шейки  $l$  не должна превышать высоту  $H$  шлифовального круга  $1$ ; высота бурта  $h$  у шлифуемой шейки детали  $3$  не должна быть больше, чем разность радиусов шлифовального круга  $1$  и закрепляющей его планшайбы  $2$ .

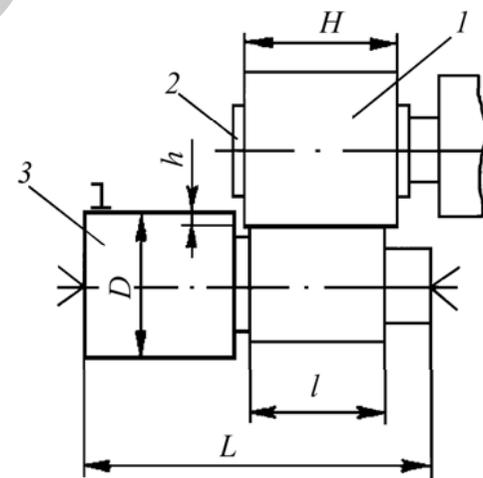


Рисунок 4.16 – Схема установки детали на шлифовальном станке

Условия применимости типового решения являются ограничениями на параметры, характеризующие исходные данные рассматриваемой задачи. Это позволяет описать комплекс условий применимости (*КУП*) математическими средствами:

$$KUP = \left\{ \begin{array}{l} D_{\min} \leq D \leq D_{\max} \\ L_{\min} \leq L \leq L_{\max} \\ l_{\min} \leq l \leq l_{\max} \\ h_{\min} \leq h \leq h_{\max} \end{array} \right\}$$

Совокупность параметров, регламентированных комплексом условий применяемости, называют *комплексом параметров применяемости*. В данном случае  $KPP = \{D, L, l, h\}$ .

В соответствии с  $KPP$  формируются исходные данные задачи и характеристики типовых решений.

Для решения задачи нужно выявить допустимые для каждого типового решения диапазоны параметров применяемости. Характеристики шлифовальных станков и обрабатываемых деталей приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Условия применяемости шлифовальных станков

Модель станка	Параметры станков, мм			
	$D$	$L$	$l$	$h$
ЗУ12В	$\leq 200$	$\leq 500$	$\leq 40$	$\leq 50$
ЗУ131М	$\leq 280$	$\leq 700$	$\leq 50$	$\leq 75$
ЗМ163В	$\leq 280$	$\leq 1400$	$\leq 200$	$\leq 75$

Затем формируется массив условий применяемости (МУП):

$$МУП = \begin{matrix} ЗУ12В \\ ЗУ131М \\ ЗМ163М \end{matrix} \begin{pmatrix} D & L & l & h \\ 200 & 500 & 40 & 50 \\ 280 & 700 & 50 & 75 \\ 280 & 1400 & 200 & 75 \end{pmatrix}$$

В соответствии с комплексом условий применяемости для заданного набора исходных данных (параметров деталей)  $U_d = \{D_d, L_d, l_d, h_d\}$  из трех имеющихся принимается то решение, которое удовлетворяет неравенствам  $KUP$ .

Процедуру проверки этих условий можно описать при помощи *формального алгоритма* (рисунок 4.17).

На основе этого алгоритма может быть составлена программа, позволяющая для любого набора  $U_d$  выбрать модель шлифовального станка.

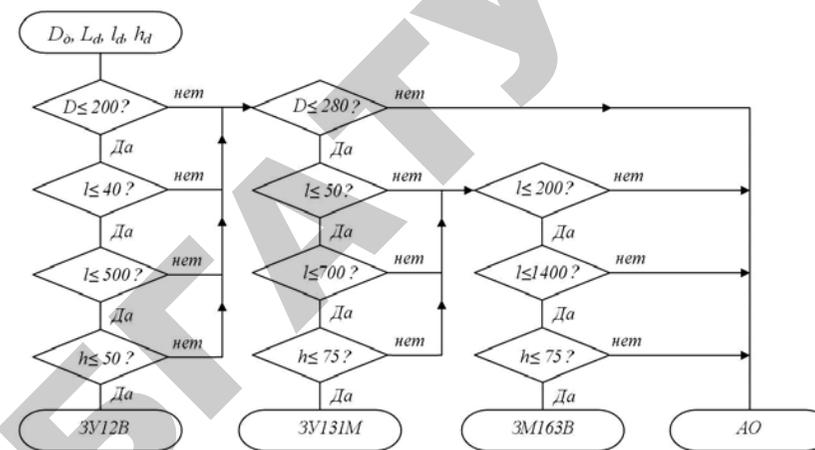


Рисунок 4.17 – Схема алгоритма выбора шлифовального станка

Важнейшим этапом в разработке алгоритма решения задачи логического типа является формирование комплекса условий применяемости. В рассмотренном примере выделены лишь условия, определяющие принципиальную возможность обработки. В производственных условиях этот комплекс может быть расширен.

Таким образом, при решении частных технологических задач с применением ЭВМ необходимо в каждом случае сформировать множество типовых решений, комплекс условий применяемости каждого типового решения, массив условий применяемости, а также разработать правила проверки этих условий – алгоритм решения. На основании полученных решений, которые являются составными элементами технологического процесса, формируется полный технологический процесс.

## 5. СТРУКТУРА САПР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

### 5.1. Методы автоматизированного проектирования технологических процессов

Структура технологического процесса – это множество его элементов и множество связей между ними.

Если обозначить  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  – множество элементов технологического процесса,  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$  – множество связей между элементами, то структуру технологического процесса можно представить  $S_{m.n} = \{V, S\}$ .

Проектирование технологического процесса – это, с одной стороны, просто перечень отдельных его этапов (выбор заготовки, определение маршрута обработки детали и т. д.), а с другой стороны – совокупность взаимосвязанных и взаимообусловленных этапов.

Проектирование технологического процесса – сложная задача, общепринятый подход к решению которой – разбиение ее на простые задачи и их решение во взаимосвязи друг с другом. Простые задачи при проектировании технологического процесса: выбор типа заготовки, расчет режимов резания и т. д.

Технологический процесс, как объект проектирования, можно представить в виде иерархической структуры, состоящей из нескольких взаимосвязанных уровней (рисунок 5.1).

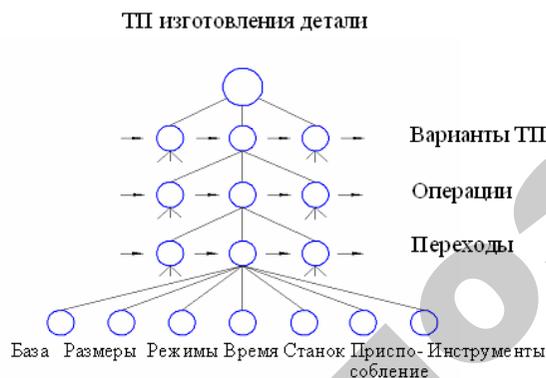


Рисунок 5.1 – Технологический процесс как объект проектирования

В результате такой декомпозиции процесс проектирования технологического процесса сводится к решению задач различной степени детализации на взаимосвязанных уровнях: от формирования

состава и структуры маршрута обработки до разработки управляющих программ и расчета режимов резания для обработки отдельных поверхностей.

Процессу проектирования на различных уровнях характерен определенный состав и последовательность решаемых задач, основными из которых являются задачи анализа и синтеза.

Анализ технических объектов предполагает изучение их свойств. При анализе не создаются новые объекты, а исследуются заданные.

Синтез технических объектов направлен на создание новых вариантов. Поскольку анализ используется для оценки этих вариантов, то синтез и анализ выступают в процессе проектирования в диалектическом единстве.

Понятие «синтез» технического объекта в широком смысле слова близко по содержанию к понятию «проектирование». Разница заключается в том, что проектирование означает весь процесс разработки объекта, а синтез характеризует часть этого процесса, когда создается какой-то вариант, не обязательно окончательный, т. е. синтез как задача может выполняться при проектировании много раз, чередуясь с решением задач анализа.

Теоретические и практические наработки в области технологии машиностроения касаются в основном задач *анализа технологических процессов*, с помощью которого устанавливается влияние различных технологических факторов на производительность, геометрическую точность и качество поверхности при обработке деталей. В то же время методы *синтеза технологических процессов* на основе информации об обрабатываемой детали и о производственных условиях мало изучены, их использование в инженерной практике при разработке технологических процессов было ограничено.

Процесс формирования технологического процесса в общем случае – это совокупность процедур структурного и параметрического синтеза с последующим анализом проектных решений.

Структурный синтез реализуется на уровнях формирования операций и переходов, а параметрический – на уровне выбора базы, определения межоперационных размеров, расчета режимов резания и т. д. (см. рисунок 5.1).

В зависимости от степени полноты реализации синтеза (главным образом структурного) и анализа при автоматизированном проектировании технологических процессов можно выделить *три основных метода*:

- прямого проектирования (документированного);

- анализа (адресации, аналога);
- синтеза.

В реальной САПР технологических процессов может быть реализован один метод или любая комбинация данных методов.

**Метод прямого проектирования** (метод случайных аналогий).

Данный метод предполагает, что подготовка проектных документов (технологических карт) возлагается на самого пользователя, выбирающего из базы данных в диалоговом режиме типовые решения различного уровня. Этот метод основан на использовании готовых решений на всех уровнях проектирования за счет их заимствования из существующих единичных технологических процессов.

Для реализации этого метода необходимо иметь развитую информационно-поисковую систему (ИПС). Заранее создается и заполняется технологическая база данных, включающая в себя информацию об имеющихся на предприятии заготовках, станках, приспособлениях, инструментах и т. д. База данных имеет структурированный характер, т. е. четко разделена на разделы, подразделы, страницы, отдельные поля (фразы). В базе данных этой системы должны находиться поисковые образцы деталей и их технологические процессы. С помощью ИПС технологического назначения находят детали-аналоги. Далее на основе номеров чертежей находят в базе данных технологические процессы на выбранные детали-аналоги. Технологический процесс на деталь-аналог используется как исходный вариант для проектирования. Откорректировав технологический процесс детали-аналога применительно к параметрам детали, можно получить необходимый рабочий технологический процесс. Корректировке подлежат структура технологического процесса, параметры режущего и мерительного инструментов, режимы резания и т. п. Качество разработанного технологического процесса зависит от результатов поиска детали-аналога, т. е. от эффективности работы ИПС технологического назначения.

Пользователю представляются меню на разных уровнях проектирования для выбора заготовок, операций, станков, приспособлений, переходов, инструментов и т. д. Выбранная пользователем из базы данных информация автоматически заносится в графы и строки шаблона технологической карты. После этого в режиме редактирования информация при необходимости может редактироваться, а затем распечатываться в форме, предусмотренной соответствующим ГОСТом.

Указанный метод проектирования целесообразно использовать в случаях, если для обработки заготовок отсутствуют унифицированные технологические процессы (УТП).

**Метод анализа.** Этот метод базируется на использовании унифицированных технологических процессов. Данный метод исходит из того, что структура индивидуального технологического процесса не создается заново, а базируется на использовании типовых и групповых технологических процессов. Она определяется соответственно составом и структурой одного из унифицированных технологических процессов, т. е. соответствующего типового или группового технологического процесса. Это осуществляется путем анализа необходимости наличия каждой операции и перехода с последующим уточнением всех решений на уровнях декомпозиции «сверху–вниз».

Метод анализа в общем случае реализует следующую схему проектирования: ввод описания чертежа детали → определение конструктивно-технологического кода детали → поиск по коду в базе данных приемлемого унифицированного (типового или группового) технологического процесса → анализ его структуры → доработка в соответствии с описанием чертежа детали → оформление индивидуального технологического процесса.

На первом этапе производится адресация (привязка) детали к УТП. Алгоритм адресации основан на сравнении двух объектов (адресуемого и эталона) по общим свойствам, составу и структуре. В качестве эталона используется комплексная деталь, на которую уже имеется УТП. На основании такого сравнения делается вывод о сходстве объектов и возможности использования УТП.

После того как УТП выбран, производится его анализ и доработка применительно к детали, для обработки которой он был выбран.

При доработке исключаются отдельные (ненужные для детали) операции и производится анализ на возможность использования оставшихся унифицированных операций (УО). При необходимости УО дорабатываются.

Доработка заключается в следующем:

- а) проверяется возможность использования приспособления при заданной схеме базирования;
- б) производится удаление отдельных переходов в заданной структуре УО;
- в) выполняется расчет режимов резания;
- г) уточняются типоразмеры режущего и мерительного инструментов.

Недостатком этого метода является необходимость постоянного наращивания в базе данных типовой технологии. Использование данного метода на конкретном предприятии предполагает большую подготовительную работу. Из множества деталей заводской номенклатуры формируются группы, имеющие общие конструктивно-технологические признаки, способы обработки.

Далее возможны два подхода.

1. В каждой группе выбирается деталь-представитель – и для нее разрабатывается типовой технологический процесс. Все типовые технологические процессы для всех групп деталей заносятся в ЭВМ. При разработке индивидуального технологического процесса из типового технологического процесса, как правило, исключаются лишние операции и переходы. Иногда недостающие операции и переходы могут добавляться в режиме ручного редактирования технологического процесса. Далее уточняется оборудование, технологическая оснастка, выбираются или рассчитываются режимы резания, рассчитываются нормы времени.

2. Для каждой группы формируется обобщенная модель всех деталей – комплексная деталь. Она включает все многообразие поверхностей рассматриваемой группы. Для комплексной детали разрабатывается унифицированный (групповой) технологический процесс. Он заведомо является избыточным, т. е. содержит операции и переходы по обработке всех деталей группы. Разработка индивидуального технологического процесса заключается в анализе необходимости включения в него операций и переходов из соответствующего группового технологического процесса: из группового технологического процесса исключаются лишние операции и переходы. Затем выполняется, как и в первом случае, параметрическая настройка: уточнение оборудования, технологической оснастки, выбор или расчет режимов резания и т. д.

Когда типовой (групповой) технологический процесс создан, то можно приступить к автоматическому проектированию индивидуальных технологических процессов. Для этого необходимо создать описание конструкции детали, для которой необходимо спроектировать индивидуальный технологический процесс обработки.

Описание чертежа детали заключается в заполнении общих сведений о ней (данные из штампа и технические требования чертежа) и параметров элементов конструкции (поверхностей), имеющих на чертеже детали. Описание можно выполнить на входном языке САПР ТП или заимствовать электронную версию чертежа детали.

Для ускорения процесса проектирования можно также воспользоваться копией описания подобной детали, уже имеющейся в базе данных САПР ТП, или скопировать технологический процесс ее обработки.

После создания описания детали ей назначается общий технологический процесс соответствующей группы деталей.

Метод анализа является основным методом проектирования технологических процессов при эксплуатации гибких производственных систем. Его применение дает наибольший эффект при использовании на производстве групповых и типовых технологических процессов. Это объясняется тем, что этот метод не нарушает существующей специализации и традиций производственных подразделений, упрощает процесс проектирования, не требует трудно формализуемых процедур синтеза новых технологических процессов.

**Метод синтеза** основан на синтезе маршрутов и операций, т. е. на принципе их генерации для проектирования единичных технологических процессов.

Существует несколько разновидностей этого метода:

- метод, основанный на анализе размерных связей детали;
- метод ступенчатого синтеза.

Технологический маршрут на основе анализа размерных связей проектируют путем определения размерных связей между элементарными поверхностями детали, выбора технологических баз и синтеза схем базирования.

Метод ступенчатого синтеза предполагает разделение технологического маршрута на такое количество этапов, при котором на каждом из них структура и параметры процесса выражаются через исходные данные в виде многих переменных.

В основе метода синтеза лежат локальные типовые решения. Алгоритмы построения САПР на основе метода синтеза существенно отличаются друг от друга по следующим причинам:

1. Процедуры разработки (синтеза) технологических процессов относятся к разряду трудно формализуемых.

2. Ряд САПР ТП, построенных по методу синтеза, ориентированы на проектирование технологических процессов изготовления деталей определенного класса (например, «тел вращения»).

3. С целью исключения циклов при разработке технологии и обеспечения линейной стратегии проектирования некоторые разработчики САПР ТП отошли от классической схемы проектирования технологических процессов «маршрут – операция – переход» и т. д.

Метод синтеза в САПР технологических процессов реализует следующую упрощенную схему последовательности:

- 1) ввод описания чертежа детали;
- 2) синтез маршрутов (планов) обработки для всех поверхностей детали;
- 3) синтез принципиальной схемы технологического процесса;
- 4) синтез маршрута обработки детали;
- 5) синтез состава и структуры операций технологического процесса;
- 6) доработка технологического процесса (расчет режимов резания, нормирование);
- 7) оформление документации.

Оптимальная структура технологического процесса определяется дифференцированным поиском на каждом этапе, как простая функция небольшого числа переменных. Проектирование в данном случае является многошаговым и развивается от этапа к этапу.

Разработка операционной технологии при синтезе технологических процессов основана на анализе структуры связей в заготовке детали и синтезе структуры операции.

Преимущество метода синтеза – его универсальность, которая позволяет разрабатывать технологические процессы для различных классов деталей. Однако сложность синтеза маршрута и операций вызывает большие трудности при разработке соответствующих алгоритмов и программ.

## 5.2. Уровни автоматизации проектирования ТП

Как отмечалось в главе 1, в зависимости от степени автоматизации проектных процедур, выполняемых при проектировании, стандарт предусматривает следующие уровни автоматизации проектирования ТП:

- 1) Низко автоматизированное – до 25%;
- 2) Средне автоматизированное – от 25 до 50 %;
- 3) Высоко автоматизированное – свыше 50 %.

**Первый уровень автоматизации** – автоматизация низкого уровня, при которой автоматизировано только оформление технологической документации (маршрутные, операционные карты и другие документы). Бланки технологических карт выводятся на экран монитора, и технолог в режиме диалога заполняет этот документ, используя заранее подготовленные формы, формулировки

операций и переходов и сведения о технологическом оснащении, представляемые в электронном виде.

**Второй уровень автоматизации** – автоматизация среднего уровня достигается, когда дополнительно создаются и используются базы данных, проектные и расчетные модули. Чем больше заполнена база данных, тем эффективнее начинает работать САПР ТП. Работа проектных модулей базируется на использовании информационно-поисковой системы (ИПС). При этом условия поиска формирует технолог, используя режим диалога на этапе ввода исходной информации и оценки промежуточных и окончательных решений.

Расчетные модули, например модули расчета припусков, расчета режимов резания и норм времени, начинают работать, когда сформированы базы данных с нормативно-справочной информацией (рисунок 5.2).

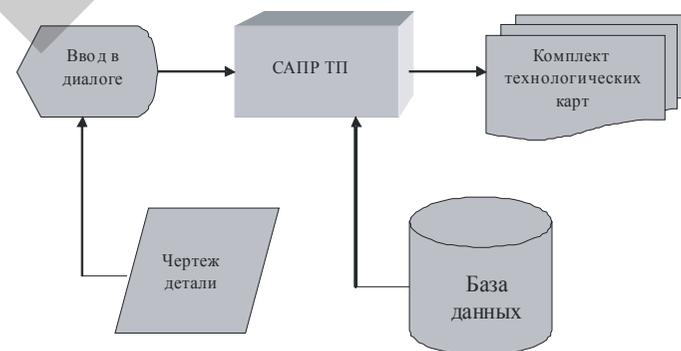


Рисунок 5.2 – Схема автоматизации проектирования ТП при ручном вводе информации о детали

**Третий уровень автоматизации** – автоматизация высокого уровня, который достигается при заполнении базы данных. В этом случае становится возможным автоматизированное принятие сложных логических решений, связанных, например, с выбором структуры процесса и операций, назначением технологических баз и др. Процесс принятия таких решений полностью автоматизировать не удастся, поэтому режим диалога частично остается и на третьем уровне автоматизации.

Процесс проектирования в САПР ТП представляет собой сложный процесс переработки конструкторской информации, заданной в чертеже детали, в технологическую информацию, которая затем фиксируется в технологической документации.

Наибольший эффект от применения систем третьего уровня достигается при совместном использовании подсистем автоматизации конструирования изделий (САПР И) и технологического проектирования (САПР ТП). Для этого используются специальные программные комплексы конвертора, которые преобразуют графические модели детали, представленные в виде файлов формата передачи данных IGES или STEP (стандарт ИСО 10303) в массив данных о конструкторско-технологической информации о детали, необходимой для решения всего комплекса задач в рамках САПР ТП (рисунок 5.3).

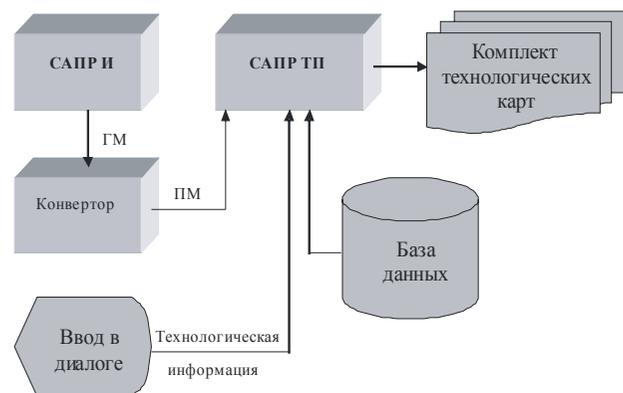


Рисунок 5.3 – Схема автоматизации проектирования ТП при использовании графических моделей деталей

Системное единство САПР обеспечивается наличием комплекса взаимосвязанных моделей, определяющих объект проектирования в целом, а также комплексом системных интерфейсов, обеспечивающих указанную взаимосвязь.

Внутри проектирующих подсистем системное единство обеспечивается наличием единой информационной модели той части объекта, проектное решение по которой должно быть получено в данной подсистеме.

Формирование и использование моделей объекта проектирования в прикладных задачах осуществляется комплексом средств автоматизированного проектирования, структурными частями которого являются программно-методические и программно-технические комплексы, а также компоненты организационного обеспечения.

Комплексы средств могут объединять свои вычислительные и информационные ресурсы, образуя локальные вычислительные сети подсистем или систем в целом.

Структурными частями комплексов средств являются компоненты следующих видов обеспечения: программного, информационного, методического, математического, лингвистического и технического.

Компоненты видов обеспечения выполняют в комплексах средств заданную функцию и представляют наименьший (неделимый) самостоятельно разрабатываемый (или заимствованный) элемент САПР (например: программа, инструкция и т. п.).

Эффективное функционирование комплексов средств и взаимодействие структурных частей САПР ТП всех уровней должно достигаться за счет ориентации на стандартные интерфейсы и протоколы связи, обеспечивающие программную совместимость, типизацию и возможность развития.

Принцип *совместимости* должен обеспечивать совместное функционирование составных частей САПР ТП и сохранять открытую систему в целом.

Принцип *типизации* заключается в ориентации на преимущественное создание и использование типовых и унифицированных элементов САПР ТП. Типизации подлежат элементы, имеющие перспективу многократного применения. Типовые и унифицированные элементы периодически проходят экспертизу на соответствие современным требованиям САПР ТП и модифицируются по мере необходимости.

Создание САПР ТП с учетом принципа типизации должно предусматривать:

- разработку базового варианта комплекса средств и (или) его компонентов;
- создание модификаций комплексов средств и (или) его компонентов на основе базового варианта.

Принцип *развития* должен обеспечивать пополнение, совершенствование и обновление составных частей САПР, а также взаимодействие и расширение взаимосвязи с автоматизированными системами различного уровня и функционального назначения.

Методической основой реализации указанных принципов в САПР ТП является технологическая унификация.

Технологическая унификация является одним из основных направлений совершенствования ТПП, позволяющих сократить сроки технологической подготовки производства.

В технологической унификации различают два метода:

- типизация технологических операций и процессов;
- групповая обработка изделий.

Под **типизацией** понимается создание процессов обработки групп конструктивно и технологически подобных деталей. Для их изготовления выбирают оптимальные маршруты, оборудование, средства технологического оснащения и формы организации производства. Методика типизации технологических процессов создана А. П. Соколовским. Эта методика базируется на классификации процессов, в основе которой лежит классификация деталей. В качестве классификационных признаков здесь принимаются конфигурация детали, ее размеры, материал, точность и качество обрабатываемых поверхностей. Основой классификационного деления является класс. *Класс* представляет собой совокупность деталей определенной конфигурации, связанных общностью технологических задач.

Для обработки однотипных деталей разрабатывают типовые технологические процессы. **Типовым технологическим процессом** называется процесс, характеризуемый единообразием содержания и последовательности выполнения большинства технологических операций и переходов для групп изделий с общими конструктивными признаками.

При методе **групповой обработки** для групп однородных по тем или иным конструктивно-технологическим признакам деталей устанавливаются однотипные способы обработки с использованием однородных и быстропереналаживаемых средств производства.

Характерной особенностью данного метода является наличие групповых операций, которые проектируются таким образом, что на станке с одной наладкой можно производить обработку заготовок всех различных деталей, входящих в данную группу. Метод групповой обработки был предложен С. П. Митрофановым.

Принципиальное различие этих двух методов заключается в том, что типовые процессы характеризуются общностью последовательности и содержания операций при обработке типовой группы деталей, а групповая обработка – общностью оборудования и технологической оснастки при выполнении отдельных операций или при полном изготовлении группы разнородных деталей.

Оба эти метода основаны на унификации конструктивных и технологических элементов.

Технологическая унификация выполняется на разных уровнях проектирования процессов:

- на уровне перехода;
- на уровне операции;
- на уровне процесса.

На уровне **технологического перехода** разрабатываются унифицированные технологические переходы. Объектом унификации в этом случае являются:

- конфигурация конкретной геометрической поверхности;
- формулировка перехода;
- вид применяемого инструмента.

Для типового сочетания элементарных поверхностей унифицируется схема обработки, которая образуется как совокупность унифицированных переходов. Например, обработка сквозного отверстия под крепежный винт (рисунок 5.4) состоит из двух унифицированных переходов: «Сверлить отверстие *А*», «Зенкеровать отверстие *Б*, выдерживая размер *h*».

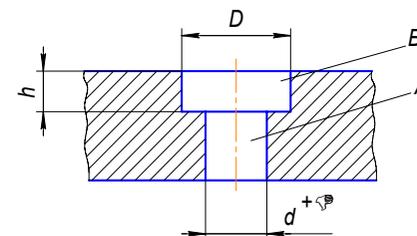


Рисунок 5.4 – Вариант типового сочетания элементарных поверхностей

Параллельно с унификацией переходов разрабатывают классификаторы переходов, режущих инструментов, элементарных поверхностей и составляют словарь текстов с формулировками переходов. Унифицированный переход содержит помимо указанной выше информации правила выбора переходов, соответствующие коды инструмента, коды поверхностей и текстов.

Унификация на уровне технологической операции приводит к созданию типовых и групповых технологических операций. Объектом унификации являются вид и характер обработки, заранее установленной совокупности поверхностей, технологическое оборудование, схемы базирования, вид приспособлений.

Унификация на уровне технологического процесса приводит к созданию типовых и групповых технологических процессов.

### 5.3. Состав и структура САПР ТП

Материальной основой любой САПР является программно-технический комплекс (ПТК), состоящий из комплекса технических средств (КТС) и программно-методического комплекса (ПМК). Под ПМК понимают программные средства САПР, базы данных и документацию по эксплуатации системы.

Основными структурными и функциональными составляющими САПР ТП являются подсистемы.

Подсистема – это самостоятельный программный комплекс, решающий некоторую определенную задачу и функционирующий самостоятельно.

Различают два вида подсистем (рисунок 5.5):

- общего назначения (обслуживающие);
- специального назначения (проектирующие).

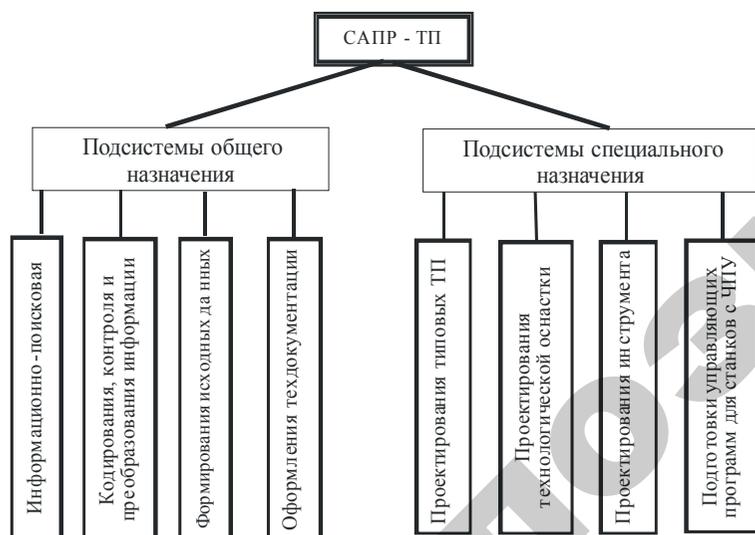


Рисунок 5.5 – Структура САПР ТП

**Подсистемы специального назначения** осуществляют функции технологического проектирования. К ним относят подсистемы, выполняющие процедуры и операции проектирования отдельных частей объекта (приспособления, инструмента, технологического процесса), а также подсистемы осуществляющие выполнение определенной стадии проектирования объекта (например, подсистемы выполнения эскизного проекта, комплекса расчетных работ и т. п.). Проектирующие подсистемы чаще всего являются объектно-ориентированными, т. е. содержание и порядок выполнения проектных процедур характерны только для данного вида проектируемых объектов.

Состав подсистем специального назначения определяется спецификой предприятия и, как правило, включает:

- подсистему проектирования типовых технологических процессов;
- подсистему проектирования технологической оснастки;
- подсистему проектирования инструмента;
- подсистему подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ.

**Под обслуживающими** понимают подсистемы, обеспечивающие функционирование проектирующих подсистем (например, подсистема формирования текстовых документов, информационно-поисковая система и т. д.). Обслуживающие подсистемы в большинстве случаев являются инвариантными ко многим видам объектов проектирования, т. к. предназначены для выполнения унифицированных процедур и операций (например, хранение и поиск информации, обработка графической информации, формирование проектной документации).

Подсистемы общего назначения осуществляют специфические функции машинного решения задач.

К ним относятся:

- информационно-поисковая система (ИПС). ИПС предназначена для хранения и поиска условно-постоянной информации САПР;
- подсистема кодирования, контроля и преобразования информации;
- подсистема формирования исходных данных;
- подсистема оформления и тиражирования технической документации.

Таким образом, подсистемы общего назначения обеспечивают совместное функционирование подсистем специального назначения.

## 6. ВИДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ САПР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Основой САПР ТП является совокупность различных видов обеспечения автоматизированного проектирования, необходимых для решения проектных задач.

Комплекс средств автоматизации проектирования современных САПР включает семь видов обеспечения:

- техническое;
- математическое;
- лингвистическое;
- информационное;
- программное;
- методическое;
- организационное.

Рассмотрим указанные виды обеспечения САПР ТП в порядке их перечисления.

### 6.1. Техническое обеспечение

Системы автоматизированного проектирования технологических процессов реализуются в виде программно-аппаратного комплекса, т. е. совокупности программных и аппаратных средств. Аппаратные средства образуют комплекс технических средств (КТС) САПР ТП.

*Техническое обеспечение* – это совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих технических средств, предназначенных для выполнения автоматизированного проектирования.

К компонентам технического обеспечения относят устройства вычислительной и организационной техники, средства передачи данных, измерительные и другие устройства и их сочетания, обеспечивающие функционирование ПМК и САПР ТП. Компоненты технического обеспечения должны предоставлять возможность:

- кодирования и ввода информации с ее визуальным контролем и редактированием;
- передачи информации по различным каналам связи;
- хранения, контроля и восстановления информации.

Общий принцип действия и функциональные возможности КТС определяются его структурой, которую принято называть конфигурацией, и функциональными свойствами элементов.

Основу КТС составляет ЭВМ, которая выполняет арифметические и логические операции, а также другие функции обработки данных (извлечение из памяти, помещение в память и т. п.)

В качестве ЭВМ применяется персональный компьютер. Пример обозначения параметров компьютера: Intel Pentium 4 – 1700 MHz/128 Mb DDR/40 Gb HDD/32 Mb Video/52x CD-ROM/FDD 1,44 Mb/Монитор 17"/Клавиатура.

Здесь: Intel Pentium 4 – тип процессора; 1700 MHz – его тактовая частота в мегаГерцах; 128 Mb – объем оперативной памяти в мегаБайтах; DDR – тип оперативной памяти; 40 Gb – объем винчестера в гигаБайтах; 32 Mb – объем видеопамати (видеокарты); 52x CD-ROM – наличие и характеристика привода для компакт-дисков; FDD 1,44 Mb – наличие привода для дискет и объем дискеты; Монитор 17" – наличие монитора с размером экрана 17 дюймов по диагонали; Клавиатура/Мышь – наличие клавиатуры и мыши.

На практике в настоящее время широко применяются локальные вычислительные сети (ЛВС). Это принадлежащая одной организации коммуникационная система, связывающая различные аппаратные средства: компьютеры, принтеры, плоттеры. Слово «локальная» указывает на близость расположения компьютеров. Диапазон действия ЛВС колеблется от нескольких метров до 8 – 10 км.

ЛВС предоставляет пользователям следующие возможности:

- обмен информацией (файлами текстовых документов, чертежей и программ, а также сообщениями по электронной почте);
- разделение ресурсов компьютеров, т. е. совместное использование баз данных и программ, хранящихся на любом из компьютеров сети (либо на удаленном мощном компьютере – сервере с жестким диском большой емкости);
- вывод информации, например на лазерный принтер или плоттер, подключенный только к одному из компьютеров сети.

ЛВС состоит из следующих основных элементов:

- файлового сервера;
- рабочих станций;
- сетевой операционной системы;
- несущей среды (кабелей), сетевых карт и других аппаратных средств.

**Сервер** – это мощная ПЭВМ, на жестком диске которой хранятся прикладные программы, базы данных и т. д., необходимые для работы пользователей сети. Сервер, предназначенный только для обслуживания сетевых запросов, называется выделенным. При ге-

нерации (установке) сети можно сформировать и совмещенный сервер, на котором можно работать как на рабочей станции.

**Рабочие станции** – подключенные к сети ПЭВМ, на которых работают отдельные пользователи.

Каждая рабочая станция и сервер в ЛВС должны иметь специальное программное обеспечение: сетевую оболочку или операционную систему.

Кабель в ЛВС определяет физическую среду передачи информации. Существует три типа кабелей.

1. Витая пара (физически этот кабель состоит из четырех витых пар в оплетке, одна пара используется для передачи информации в одном направлении, вторая – в другом направлении, две оставшиеся пары предназначены для передачи служебных сообщений по сети, на практике иногда они не используются).

2. Коаксиальный (типа телевизионного).

3. Волоконно-оптический (физически это кварцевая нить в полимерной оплетке, оплетка предназначена для придания гибкости кабелю; передача информации по кабелю производится световыми излучениями с разной длиной волны, за счет чего образуется ряд информационных каналов).

Скорость передачи информации – важнейший показатель эффективности сети, она измеряется в Мбит/с или Гбит/с. Скорость передачи информации по витой паре составляет от 10 до 100 Мбит/с, по коаксиальному кабелю – от 0,5 до 10 Мбит/с, по волоконно-оптическому – около 2 Гбит/с.

Сетевые карты физически могут быть встроены в материнскую плату или устанавливаться в разъемы системного блока компьютера. Их тип определяется выбранной топологией сети.

В ЛВС компьютеры располагаются сравнительно недалеко друг от друга. Для связи на большом расстоянии можно использовать аппаратуру обычных телефонных линий, которая поддерживает относительно низкую скорость передачи информации. Дополнительным устройством при этом является модем. Когда с компьютера информация передается по телефонной линии, передаваемые сигналы подвергаются модуляции, а когда принимается – демодуляции. Отсюда название – модем. Назначение модема – замена двоичного сигнала компьютера (сочетания 0 и 1) аналоговым сигналом с частотой, соответствующей рабочему диапазону телефонной линии.

Конструктивно модем представляет собой печатную плату, вставляемую в компьютер или присоединяемую к нему, связанную с кабелем, подключаемым к телефонной розетке.

С переводом телефонных сетей на цифровые сигналы, совместимые с сигналами компьютеров, необходимость в модемах отпадает.

## 6.2. Математическое обеспечение

*Математическое обеспечение* (МО) – это совокупность математических методов, математических моделей и алгоритмов проектирования, необходимых для выполнения автоматизированного проектирования ТП. В МО входят математические модели конкретных объектов (технологических процессов, инструментов, приспособлений и др.), методы их проектирования, а также методы и алгоритмы выполнения различных инвариантных проектных операций и процедур, связанных с оптимизацией, поиском информации, автоматизированной графикой и др.

Взаимосвязи между компонентами математического обеспечения должны реализовать формализацию процесса проектирования и его целостность.

Основу математического обеспечения САПР ТП составляет математический аппарат для моделирования, синтеза, структурной и параметрической оптимизации.

Математическое обеспечение состоит из двух частей: специального МО и общего (инвариантного) МО.

*Специальное МО* отражает специфику объекта проектирования, физические и информационные особенности его функционирования. Это часть математического обеспечения охватывает математические модели, методы и алгоритмы их получения, алгоритмы одновариантного анализа, а также большую часть используемых алгоритмов синтеза.

*Общее (инвариантное) МО* включает методы и алгоритмы, не связанные с особенностями математических моделей объектов проектирования и используемые при решении многих различных задач проектирования.

Первым этапом выполнения проектных задач на ЭВМ является математическая формулировка задачи, которая включает математическое описание условий решаемой задачи и определение аналитических выражений, которые подлежат решению на ЭВМ. Оконча-

тельный вид математических зависимостей называют математической моделью.

Фактически математическая модель описывает зависимость между исходными данными и искомыми величинами.

Математическая модель – это совокупность математических объектов (чисел, переменных величин, векторов, множеств и т. п.) и отношений между ними, которая адекватно отражает некоторые свойства проектируемого объекта. Основой оценки оптимальности математической модели является степень достижения поставленной цели при минимальных затратах.

Математические модели, используемые в САПР ТП, имеют общую структуру, которая определяется составом переменных.

Все переменные в математических моделях САПР ТП делятся (см. главу 4) на три группы: управляемые, неуправляемые и производные.

При создании математического обеспечения САПР учитывают следующие требования: универсальность, алгоритмическая надежность, точность, затраты машинного времени, объем используемой памяти.

Универсальность МО определяет его применимость к широкому классу проектируемых объектов. Особенно это важно при создании комплексных САПР, включающих различные виды задач.

Алгоритмическая надежность – это свойство МО давать при его применении и заранее определенных ограничениях правильные результаты. Количественной оценкой алгоритмической надежности служит вероятность получения правильных результатов при соблюдении оговоренных ограничений на применение метода.

Точность определяет степень совпадения расчетных и истинных результатов. Алгоритмически надежные методы могут давать различную точность.

Затраты машинного времени во многом определяются сложностью проектируемых объектов и размерностью решаемых задач. Машинное время вычислительного процесса является главным ограничивающим фактором при попытках повысить сложность проектируемых на ЭВМ объектов.

Объем используемой памяти является вторым после затрат машинного времени показателем экономичности МО. Затраты памяти определяются длиной программы и объемом массивов данных.

На основе математической формулировки задачи и выбранного численного метода ее решения осуществляют разработку алгоритма последовательности решения задачи.

### 6.3. Лингвистическое обеспечение

*Лингвистическое обеспечение* – это совокупность языков проектирования, включающая также термины и определения, правила формализации естественного языка, методы сжатия и развертывания текстов, необходимых для автоматизированного проектирования и представления в заданной форме. В этот вид обеспечения входят общеизвестные *алгоритмические языки*, используемые для записи программ при создании САПР ТП, и *входные языки*, которые служат для описания объектов проектирования и заданий на выполнение проектных процедур.

К компонентам лингвистического обеспечения относят языки проектирования (ЯП), информационно-поисковые языки (ИПЯ) и вспомогательные языки, используемые в обслуживающих подсистемах и для связи с ними проектирующих подсистем.

Компоненты лингвистического обеспечения должны быть согласованными с компонентами обеспечения других видов, быть относительно инвариантными к конкретному содержанию баз данных, а также предоставлять в компактной форме средства для описания всех объектов и процессов с необходимой степенью детализации и без существенных ограничений на объект описания.

В состав лингвистического обеспечения САПР входят языки программирования и проектирования. Их классификация представлена на рисунке 6.1.

*Языки программирования* предназначены для написания программного обеспечения. Эти языки – средства разработки САПР ТП.

К языкам программирования предъявляют требования удобства использования, универсальности и эффективности использования объектных программ (программ, полученных после трансляции на машинный язык).

Удобство использования выражается в затратах времени программиста на освоение языка и, главным образом, на написание программ на этом языке.



Рисунок 6.1 – Классификация языков программирования САПР ТП

Универсальность определяется возможностями языка для описания разнообразных алгоритмов, характерных для программного обеспечения САПР.

Эффективность объектных программ определяется свойствами используемого транслятора, которые, в свою очередь, зависят от свойств языка. Эффективность оценивается затратами машинного времени и памяти на исполнения программ.

С позиций универсальности и эффективности объектных программ наилучшими свойствами обладают машинно-ориентированные языки. Близость к машинным языкам (языкам машинных команд) обуславливает простоту и эффективность трансляторов на машинный язык, называемых *ассемблерами*. Машинно-ориентированные языки называют языками ассемблера или Автокадами. Однако, языки ассемблера не удобны для человека, их использование снижает производительность труда программистов. Поэтому их применяют для разработки лишь тех модулей программного обеспечения САПР ТП, которые требуют для своего использования больших вычислительных ресурсов.

Среди алгоритмических языков высокого уровня, созданных на различных этапах развития вычислительной техники, наибольшее распространение в САПР ТП получили языки Си++, Delphi и др.

Языки проектирования (ЯП) предназначены для описания информации об объектах и задачах проектирования. Языки проектирования ориентированы на пользователей-проектировщиков и предназначены для эксплуатации САПР технологических процессов.

ЯП должны:

- представлять собой набор директив, используя которые пользователь осуществляет процесс формирования модели объекта проектирования и ее анализ;
- обеспечивать возможность эффективного контроля заданий пользователя;
- иметь средства выдачи пользователю справок, инструкций и сообщений об ошибках;
- предусматривать возможность использования механизма выбора альтернативных директив из определенного набора (функциональная клавиатура и др.).

Среди языков проектирования выделяют языки входные, выходные, сопровождения, управления, промежуточные и внутренние.

Место входного, выходного и внутреннего языков проектирования на различных этапах переработки информации в САПР ТП (один из вариантов) показано на рисунке 6.2.

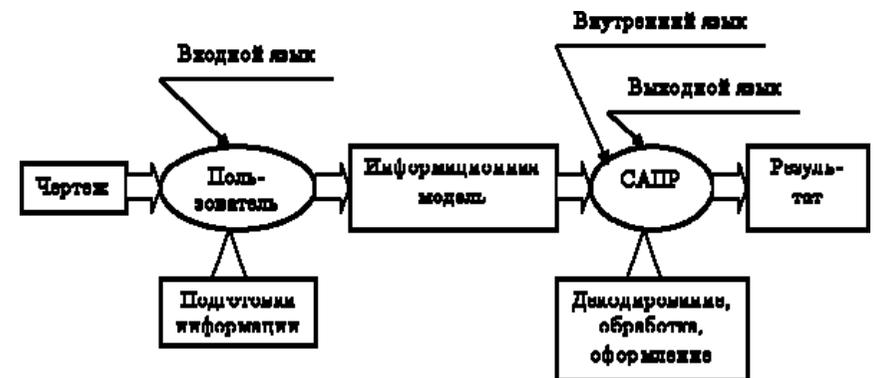


Рисунок 6.2 – Использование языков проектирования на различных этапах преобразования информации в САПР ТП

*Входные* языки служат для задания исходной информации (подготовка и ввод исходных данных об объектах) и включают в себя языки описания объектов (ЯОО) и языки описания заданий (ЯОЗ). Первые служат для описания свойств проектируемых объектов, а

вторые – для описания заданий на выполнение проектных операций и процедур.

ЯОО (языки описания объектов) делятся на языки схемные, графические и моделирования. Эти языки используются для описания исходной информации, представленной в виде соответственно некоторой схемы, конструкторского чертежа, алгоритма функционирования.

Схемные языки широко применяют при описании принципиальных электрических схем в подсистемах проектирования электронных устройств, функциональных схем в подсистемах функционально-логического проектирования.

Графические языки – основа лингвистического обеспечения в подсистемах геометрического моделирования и машинной графики.

Языки моделирования – развиты в подсистемах имитационного моделирования систем массового обслуживания.

Языки *сопровождения* применяются для корректировки и редактирования данных при выполнении проектных процедур.

*Выходные* языки обеспечивают оформление результатов проектирования в текстовом или графическом виде.

*Промежуточные и внутренние* языки предназначены для представления информации на определенных стадиях ее переработки в ЭВМ. Достоинство этих языков в том, что в отличие от выходных языков, которые характеризуются большим разнообразием, узкой проблемной ориентацией и изменчивостью при адаптации САПР к конкретным условиям, они являются унифицированными и более универсальными. *Внутренние* языки обычно скрыты от рядового пользователя и служат для представления информации, передаваемой между различными подсистемами САПР. Узкоспециализированные языки при всех их достоинствах имеют недостаток – необходимость существенной переработки программного обеспечения при изменении условий проектирования. Недостаток универсальных языков обусловлен их громоздкостью и, следовательно, неудобством использования программистами-пользователями.

Устранение указанных недостатков достигается путем использования универсальных промежуточных языков, отражающих возможности широкого класса проектируемых объектов, и узкоспециализированных входных языков, ориентированных на разработчиков некоторых подклассов проектируемых объектов.

Пользователь составляет описание на входном языке. Это описание с помощью специальной транслирующей программы, называе-

мой конвертором, переводится на промежуточный язык. Далее работает основной транслятор, переводящий описание задачи с промежуточного языка в рабочую программу.

Преимущества такого двухуровневого лингвистического обеспечения заключается в том, что программная система сравнительно легко настраивается на новые подклассы объектов. Для включения в систему нового входного языка достаточно разработать только конвертор с этого языка на промежуточный язык. Наиболее сложная часть системы – основной языковой процессор при этом остается без изменений.

*Языки процедурные и непроцедурные.* Языки проектирования, предназначенные для описания развивающихся во времени процессов, обычно оказываются близкими к языкам описания алгоритмов и называются процедурными языками. Языки проектирования, предназначенные для описания структур проектируемых объектов, называются непроцедурными языками.

Примером процедурных языков служит большинство языков описания заданий и языков моделирования систем. Пример непроцедурных языков – схемные языки.

Как правило, для пользования в САПР ТП непроцедурные языки более удобны. С помощью непроцедурных языков непосредственно описывается схема или чертеж, пользователю нужно лишь соблюдать правила языка, не заботясь о разработке моделирующего алгоритма. Формальный характер перевода исходного рисунка схемы в текст на непроцедурном языке облегчает разработку программного обеспечения интегрированных графических систем, в которых исходная информация об объекте формируется пользователем в виде рисунка на экране дисплея. Кодирование изображения в соответствии с правилами непроцедурного языка осуществляется автоматически.

*Диалоговые языки.* Важное значение для САПР ТП имеют диалоговые режимы пользователя с ЭВМ. Лингвистическое обеспечение диалоговых режимов представляется диалоговым языком. Фактически *диалоговый язык* объединяет в себе средства языков входного, выходного и сопровождения и служит для оперативного обмена информацией между человеком и ЭВМ. Различают пассивный и активный диалоговые режимы и соответственно пассивные диалоговые языки и активные диалоговые языки.

*В пассивном диалоговом режиме* инициатива диалога принадлежит ЭВМ. Прерывание вычислительного процесса в нужных местах

выполнения маршрута проектирования и обращения к пользователю осуществляется с помощью диалоговых программных средств, воплощенных в мониторной системе САПР или мониторе ППП. Обращения ЭВМ к пользователю могут быть следующих типов: запрос, информационное сообщение, подсказка.

*Запросы* предусматриваются в тех случаях, когда от человека требуется либо задание исходных данных, либо выбор между ограниченным множеством возможных предложений проектирования. При запросе исходных данных ЭВМ высвечивает на экране дисплея *шаблон*, состоящий из вопроса и пустых позиций, в которые нужно поместить ответ. Пользователь должен с помощью клавиатуры дисплея поместить в отведенные позиции запрошенные числа или фразы.

При запросе варианта дальнейшего проектирования на экране высвечивается меню – вопросы и несколько наименованных вариантов ответа. Пользователю достаточно указать имя выбранного из меню ответа.

*Информационные сообщения* используются для передачи пользователю промежуточных и окончательных результатов решения, а также сведений о состоянии его задания. На эти сообщения не требуется реакция пользователя.

*Подсказки* применяются в тех случаях, когда действия пользователя ошибочны, например нарушаются формальные правила языка.

*В активном диалоговом режиме* инициатива начала диалога может быть двухсторонней – возможности прерываний вычислительного процесса имеются и у ЭВМ, и у пользователя. Активные диалоговые языки могут быть близкими к естественному языку человека, но с ограниченным набором возможных слов и фраз. Для организации активного диалогового режима требуется более сложное программное обеспечение, чем для пассивного.

#### 6.4. Информационное обеспечение

*Информационное обеспечение* – это совокупность сведений, необходимых для выполнения автоматизированного проектирования и представления его результатов в заданной форме. Основную часть информационного обеспечения составляет *база данных* – информационные массивы, используемые более, чем в одной программе проектирования. В процессе функционирования САПР база данных пополняется, корректируется и, кроме того, производится ее защита от неправильных изменений. Все эти функции выполняет *система*

*управления базой данных* (СУБД). База данных совместно с СУБД образует *банк данных*.

Под информацией подразумеваются некоторые сведения или совокупность каких-либо данных, являющихся объектом хранения, передачи и преобразования. Применительно к САПР ТП под данными понимается информация, представленная в форматизированном виде, т. е. в виде последовательности символов, букв, цифр, графиков, таблиц.

Требования к компонентам информационного обеспечения:

- основной формой реализации компонентов информационного обеспечения являются базы данных (БД) в распределенной или централизованной форме, организация данных в которых обеспечивает их оптимальное использование в конкретных применениях;
- совокупность БД САПР должна удовлетворять принципу информационного единства, т. е. использовать термины, символы, классификаторы, условные обозначения, способы представления данных, принятые в САПР объектов конкретных видов;
- информационную совместимость проектирующих и обслуживающих подсистем САПР;
- независимость данных на логическом и физическом уровнях, в том числе инвариантность к программному обеспечению;
- возможность одновременного использования данных из различных БД и различными пользователями;
- возможность интеграции неоднородных БД для совместного их использования различными подсистемами САПР;
- возможность наращивания БД;
- контролируруемую избыточность данных.

В соответствии с ГОСТ 23501.101–87 создание, поддержка и использование БД, а также взаимосвязь между информацией в БД и обрабатывающими ее программными модулями осуществляется системой управления базами данных (СУБД).

Информацию, используемую в САПР, условно можно разделить на исходную и производную.

*Исходная информация*, существующая в начале машинного проектирования, делится на переменную и условно-постоянную.

К переменной относится геометрическая и технологическая информация о конкретной детали. Эта информация вводится в оперативное запоминающее устройство каждый раз при проектировании нового технологического процесса на конкретную деталь.

Условно-постоянная информация состоит из справочной и методической информации. Она включает сведения об имеющихся на заводе нормативных узлах и деталях, оборудовании, оснастке, режущем и измерительном инструменте и т. д. Эта информация является достаточно стабильной и постоянно хранится во внешней памяти ЭВМ. Вся условно-постоянная информация, необходимая для функционирования САПР, представляется в виде *базы данных*.

*Производная информация* формируется на различных этапах процесса проектирования. Применительно к САПР ТП она содержит сведения о маршруте обработки заготовки, технологических операциях, режимах резания, графических изображений операционных эскизов и инструментальных наладок.

В базе данных можно выделить части, играющие различную роль в процессе проектирования (рисунок 6.3).

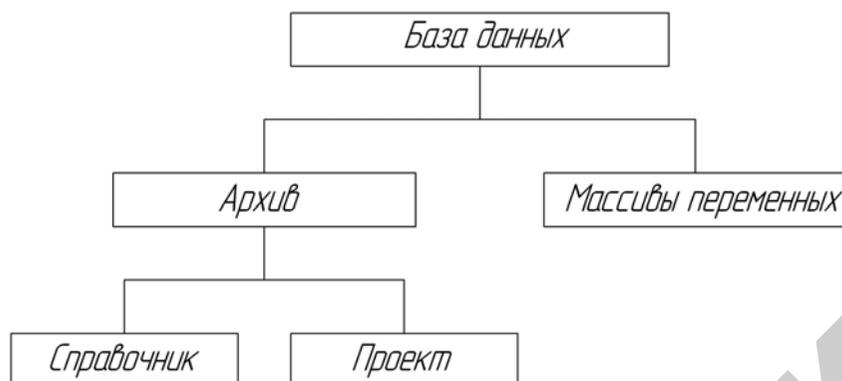


Рисунок 6.3 – Структура базы данных САПР ТП

Справочник содержит условно-постоянную информацию (справочные данные о ГОСТах, нормах, унифицированных элементах, ранее выполненных типовых проектах и т. п.). Эта часть подвергается изменениям сравнительно редко, характеризуется однократной записью данных и многократным их считыванием и поэтому называется постоянной.

Проект содержит сведения о решениях, получаемых в процессе проектирования. Это результаты решения проектных задач, полученные к текущему моменту (различного типа схемы, спецификации, таблицы, тексты и др.). Проект пополняется или изменяется по

мере завершения очередных операций на этапах проектирования. Эта часть называется полупеременной.

Массивы данных, входящие в справочник и проект, объединяют под общим названием «архив».

Третья часть БД содержит массивы переменных, значения которых необходимы для решения одной конкретной задачи проектирования. Эта часть БД называется переменной.

В общем виде БД представляет совокупность информационных массивов. При этом каждый массив содержит информацию по одному классу объектов. Сведения по описанию объекта, подлежащие включению в БД, называют информационным содержанием. Совокупность данных информационного содержания объекта (или нескольких объектов), представленных определенным образом, называют подмассивом. Совокупность подмассивов для всей группы объектов составляет информационный массив. Подмассив может включать как числовую, так и текстовую информацию.

По характеру представления данных, а следовательно, и организации списка различают подмассивы списковой и табличной структуры. Примером списковой структуры служат паспортные данные оборудования, примером табличной структуры – таблицы, например, зависимости шероховатости обработки от величины подачи инструмента.

Для использования БД необходимо специальное программное обеспечение, которое обеспечивает выборку данных, запись новых данных, удаление старых ненужных записей, перезапись файлов с одних машинных носителей на другие.

БД и СУБД вместе организуют банк данных, который чаще называют автоматизированным банком данных (АБД).

АБД создают как обслуживающую подсистему и используют для автоматизированного обеспечения необходимыми данными подсистем САПР ТП.

Обслуживание АБД осуществляется специалистом или группой специалистов, обеспечивающих целостность, правильность данных, эффективность использования и функциональные возможности СУБД САПР ТП.

АБД должен обладать гибкостью, надежностью, наглядностью и экономичностью.

Гибкость АБД характеризует возможность адаптации средств СУБД и изменения структуры баз данных без больших стоимостных и временных затрат.

Надежность АБД должна обеспечить выполнение следующих требований:

- возможность восстановления информации и программных средств АБД в случае их разрушения;
- обеспечение стандартных или описанных пользователем ответов на ошибочный запрос.

Наглядность АБД реализуется выполнением двух требований:

- предоставление пользователю АБД данных в привычной и удобной для восприятия форме;
- наличие средств, обеспечивающих учет его функционирования.

Экономичность АБД связана с удовлетворением следующих требований:

- дублирование данных исключается;
- автоматизация сбора статистических данных о содержании и использовании информационного банка с целью организации более эффективного использования памяти;
- наличие средств тиражирования баз данных.

*Виды представления базы данных.* При построении базы данных САПР ТП используют логическое и реляционное ее представление.

*Логическое представление БД* отражает состав сведений без указаний о размещении информации в конкретных запоминающих устройствах. Это представление используется в прикладных программах, в которых используется уже заданная БД. С позиции логического представления БД в сведениях можно выделить простейшие части, которые называются элементами данных. При описании свойств объекта обычно фигурируют некоторые группы взаимосвязанных элементов, называемыми «записи». Однотипные записи, содержащие близкую информацию, можно объединить под общим заголовком. Например, в записи «Наименование \_\_\_\_\_ инструмента» можно объединить сведения: номер инструмента, его наименование, принадлежность к той или иной нормали или ГОСТу.

Записи одного типа могут иметь связь с записями других типов. Изображая каждую группу однотипных записей в очередной вершине, а связи между записями в виде ветвей, можно предоставить структуру БД в виде графа. При этом различают сетевые и древовидные структуры. Последний вид структуры проще для реализации в БД (рисунок 6.4).

Из каждого узла может исходить несколько дуг, но входить только одна. Для иерархических структур характерны отношения

1:М (один ко многим), т. е. одному экземпляру записи одного типа соответствует несколько экземпляров записи другого типа:

Простейшим случаем отношения является 1:1 (один к одному), т. е. одному экземпляру записи одного типа точно соответствует один экземпляр записи другого типа. Файлы такой структуры называются плоскими или прямоугольными.

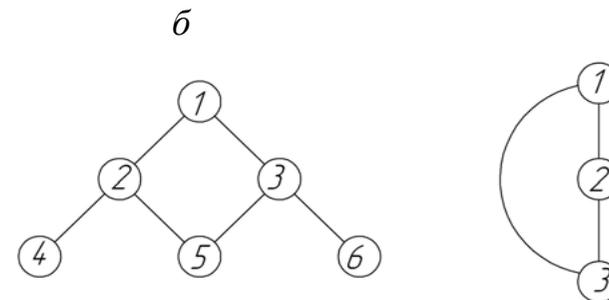
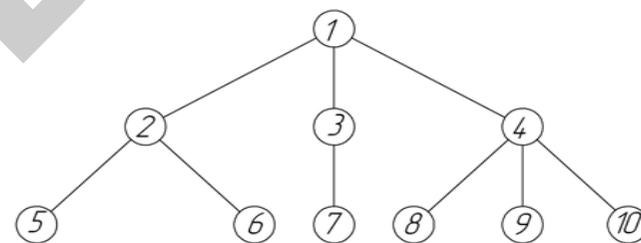


Рисунок 6.4 – структуры БД в виде графов:  
а – древовидный граф; б – замкнутый (сетевой) граф

*Реляционная модель* представляется в виде списков или таблиц. Табличный вид – реляционная структура является наиболее приемлемой структурой представления информации в БД.

В структуре отношения (связь между элементами данных) выражают двухмерными таблицами. Каждая строка такой таблицы соответствует записи соответствующего отношения. Каждый столбец таблицы содержит домен, т. е. набор значений элементов данных, участвующих в отношениях (рисунок 6.5).

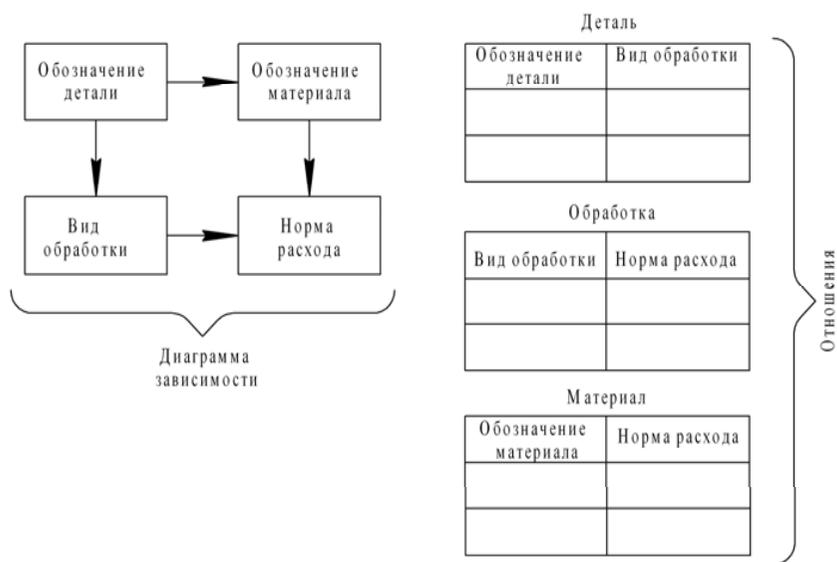


Рисунок 6.5 – Структуры БД в виде таблиц

Простейшими являются плоские таблицы, состоящие из двух столбцов (включающие 2 домена). Для описания таких отношений и операций над ними используют специальные языки, основанные на алгебре отношений. Основными операциями являются объединение столбцов (соединение) и извлечение подмножества столбцов (проецирование).

Реляционные модели обладают следующими преимуществами:

- более унифицированная структура;
- большая степень независимости данных и результатов;
- относительная простота запроса для поиска и модификации данных;
- возможность одновременного манипулирования набором записей, а не одной записью.

Поиск и выборка информации в БД производится с помощью запросов. Для описания структуры запросов используются ключи записи. Ключом записи является элемент данных, принятых за идентификатор данной записи. Поиск записей в БД может вестись по двум и более ключам. Если запись нельзя идентифицировать с помощью только одного элемента данных, то могут использоваться сцепленные ключи, состоящие из нескольких элементов. Например, при выборе резца для выполнения токарных работ может быть использован сцепленный ключ: № инструмента, + № типоразмера, + № режущей пластины. Как видно из приведенного примера, ни один из элементов отдельно не идентифицирует запись.

Физическое представление БД отражает способ расположения информации на машинных носителях. Это расположение создает разработчик СУБД. Пользователь, обращаясь к БД, формирует запрос, основанный на логическом представлении данных. СУБД должна по заданным значениям ключей найти и выдать пользователю запрошенную информацию.

В СУБД могут быть реализованы следующие способы поиска.

1. *Просмотр всей БД.* Это наиболее простой способ. Способ основан на сравнении значения ключа со всеми записями. При совпадении значений запись выдается пользователю. Способ крайне не экономичен, поэтому для повышения эффективности поиска, каждому ключу присваивается код, а все записи упорядочиваются по возрастанию кода ключа.

2. *Блочный поиск.* При этом способе экземпляры записи упорядочиваются по ключу, и весь диапазон значения ключа разделен на подразделы. Тогда вместо полного просмотра всей БД можно ограничиться просмотром значений ключа для начальных записей в подразделе. Это позволяет выделить нужный подраздел с последующим его просмотром.

3. *Способ половинного деления.* В этом случае весь диапазон значений ключа делится на два, затем определяется та половина диапазона, в которой находится заданное значение. Эта половина делится пополам и т. д., пока в результате деления не получится часть БД, состоящая из единственной записи.

4. *Поиск в специальном (вспомогательном) файле, называемым индексом.* Он представляет собой таблицу соответствия значений ключа и адреса в записи. Индекс более короткий по объему файла, и поэтому использование таких файлов ускоряет процесс поиска.

## 6.5. Программное обеспечение

Программой называют законченную совокупность команд, необходимых для выполнения определенной задачи, а программирование – процесс составления такой программы.

*Программное обеспечение* (ПО) – это совокупность машинных программ, необходимых для выполнения автоматизированного проектирования и представленных в заданной форме.

Требования к компонентам программного обеспечения:

- компоненты программного обеспечения, объединенные в ПМК, должны иметь иерархическую организацию, в которой на верхнем уровне размещается монитор управления компонентами нижних уровней (программными модулями);
- монитор должен обеспечивать управление функционированием набора программных модулей ПМК, включая контроль последовательности и правильности исполнения, общение пользователя с ПМК и программных модулей с соответствующими базами данных (БД), сбор статистической информации;
- программный модуль должен регламентировать функционально законченное преобразование информации, быть написанным на одном из стандартных языков программирования, удовлетворять соглашениям о представлении данных, принятым в данной САПР.

ПО САПР разрабатывается после создания математического, лингвистического и информационного обеспечения. При этом необходимо последовательно решить следующие задачи:

- выбор или разработка входного языка всех подсистем САПР;
- проектирование схем алгоритмов с уточнением методов и моделей, входящих в математическое обеспечение;
- построение иерархической структуры ПО САПР с разделением ПО на модули;
- выбор типа пакета прикладных программ (ППП) и языков программирования для всех уровней;
- разделение функций управления между операционной системой и управляющими программами пакетов;
- уточнение содержимого базы данных, составление списка массивов переменной части базы данных, выбор структуры этих массивов;
- составление технических заданий на разработку модулей;
- программирование модулей, разработка тестовых задач макетов нижестоящих модулей и проведение тестирования модулей.

ПО включает комплексы программ специального и общего назначения.

*Специальное программное обеспечение* представляется в виде текстов прикладных программ, ориентированных на решение специальных задач (расчет точности и прочности, проектирование маршрутных и операционных технологических процессов, техническое нормирование, проектирование стандартных деталей и оснастки и т. п.).

*Общее программное обеспечение* предназначено для управления вычислительным процессом в САПР ТП и подготовки программ из ППП к их исполнению на ЭВМ. Эти функции обычно выполняют программы, входящие в состав операционных систем ЭВМ.

Общее ПО можно подразделить на общесистемное программное обеспечение и языки (среды) программирования.

Общесистемное ПО служит для организации функционирования технических средств (планирование и организация процесса обработки информации, ввод-вывод данных, управление данными, распределение ресурсов ЭВМ, отладка программ и другие вспомогательные операции). Основу этого вида программного обеспечения называют операционной системой (ОС).

Операционная система – это комплекс программ, который загружается в оперативную память при включении компьютера. Она производит диалог с пользователем, осуществляет управление компьютером, его ресурсами (оперативной памятью, местом на дисках и т. п.), запускает прикладные программы на выполнение заданных команд. Выполняет также различные вспомогательные действия (копирование, проверка на вирусы и т. д.). Программа – это законченная совокупность команд, необходимых для выполнения определенной задачи.

Зачем нужна операционная система? Основная причина заключается в том, что элементарные операции для работы с устройствами компьютера и управления его ресурсами – это операции очень низкого уровня. Поэтому действия, которые необходимы пользователю и прикладным программам, состоят из сотен и тысяч таких элементарных операций.

Например, накопитель на магнитных дисках «понимает» только такие элементарные операции, как включить/выключить двигатель дисковод, установить читающие головки на определенный цилиндр и т. д. Даже для выполнения такого несложного действия, как копирование файла со съемного носителя на винчестер или наобо-

рот, необходимо выполнить большое количество элементарных операций. Операционная система скрывает от пользователя эти сложные и ненужные подробности и предоставляет ему удобный интерфейс для работы с компьютером.

Персональные компьютеры ранее работали под управлением операционной системы MS DOS фирмы Microsoft Corp. Для большего упрощения работы с компьютером раньше применялись операционные программы («оболочки»), такие как Norton Commander и DOS Navigator. В настоящее время используется Windows Commander, однако, можно обходиться и без него, т. к. такие операции, как создание каталогов (папок), копирование файлов и т. д., легко выполняется и средствами операционной системы типа Windows, под управлением которой работает большинство персональных компьютеров. Версии этой операционной системы: Windows 98, Windows 2000, Windows XP.

Операционная система типа Windows предоставляет следующие возможности для программистов:

- независимость программ от внешних устройств. DOS-программа может работать с аппаратными средствами компьютера (монитором, клавиатурой, принтером и т. д.) непосредственно, минуя DOS. Windows-программа может обращаться к внешним устройствам только через Windows. Это снимает с программиста проблему обеспечения совместимости с конкретными внешними устройствами, т. к. ее берет на себя Windows. Поэтому любая Windows-программа может работать с любым внешним устройством, если с ним может работать Windows. Программы (драйверы) для поддержки наиболее распространенных устройств входят в Windows, а для остальных устройств – поставляются вместе с этими устройствами;

- наличие средств для построения пользовательского интерфейса. В Windows входят все необходимые средства для построения пользовательского интерфейса: окон, меню, запросов, списков и т. д. При этом стиль пользовательского интерфейса практически стандартен и считается одним из лучших;

- доступность всей оперативной памяти. В отличие от MS DOS средства управления оперативной памятью Windows обеспечивают доступность всей оперативной памяти компьютера (а не только ее части), что облегчает создание больших программ;

- другие возможности (обмен данными между приложениями Windows, организация встроенных справочных программ и т. д.).

Для пользователей Windows предоставляет следующие возможности:

- единый пользовательский интерфейс. Windows предоставляет программисту все необходимые средства для создания пользовательского интерфейса (окон, меню и т. д.). Вследствие этого пользовательский интерфейс Windows-программ в значительной степени унифицирован, и пользователям не требуется изучать для каждой программы новые принципы организации взаимодействия с этой программой;

- многозадачность. Windows обеспечивает возможность одновременного выполнения нескольких программ, переключения с одной задачи на другую, управления приоритетами выполняемых программ;

- поддержка мультимедиа. При подключении соответствующих устройств Windows может воспринимать звуки от микрофона, компакт-диска, изображения от цифрового фотоаппарата, цифровой видеокамеры или с компакт-диска, выводить звуки на колонки или в наушники, выводить на экран монитора движущиеся изображения.

Кроме ОС существует множество прикладных программ: входят редакторы текстов, трансляторы с различных языков программирования, графические пакеты (ACAD), системные оболочки (Windows).

Для создания программ используются языки (среды) программирования.

Специальное ПО реализует алгоритмы для выполнения проектных операций и процедур. Программы специального ПО в САПР группируются в пакеты прикладных программ.

Обычно каждый пакет ориентирован на обслуживание задач отдельной подсистемы САПР и характеризуется определенной специализацией. Поэтому функции ППП конкретной подсистемы тесно связаны с перечнем задач, реализуемых на соответствующем уровне проектирования.

Обычно ППП состоит из отдельных частей (модулей), каждый из которых способен выполнять одну из рабочих (проектных) или обслуживающих (вспомогательных) функций. Модули могут соединяться друг с другом по заданию пользователя, образуя требуемые программы.

Процедуру сборки прикладной программы из имеющихся в ППП модулей производит специальная программа – монитор.

В специальное ПО наряду с ППП, разрабатываемым человеком при создании САПР, входят и рабочие программы, составляемые автоматически на ЭВМ для каждого нового объекта и маршрута его проектирования. Рабочие программы состояются из библиотечных и генерируемых модулей.

*Библиотечные модули* – это математические модели, типовые методы и алгоритмы, применяемые при решении задач проектирования многих объектов.

*Генерируемые модули* реализуют математическую модель объекта проектирования и являются результатом трансляции с входного языка. Получение рабочих программ возможно методом компиляции и методом интерпретации.

*Метод компиляции* означает, что для каждой арифметической операции вычислительного процесса в рабочей программе формируется своя отдельная команда, занимающая ячейку памяти. Полученная рабочая программа состоит из команд перерабатывающих информацию, без каких-либо служебных команд типа передач управления, организации циклов и т. д. Скомпилированные программы наиболее экономичны по затратам времени (не имеют никаких дополнительных служебных операций), но наименее экономичны по затратам машинной памяти (каждой операции соответствует своя отдельная команда, занимающая ячейку памяти).

*Метод интерпретации* подразумевает, что рабочая программа не издается в окончательном виде до начала этапа счета: она будет генерироваться по частям при переходе от исполнения предыдущей директивы входящего языка к последующей. При этом затраты машинного времени увеличиваются, но сокращаются затраты машинной памяти (не нужно хранить всю скопированную рабочую программу).

В практике чаще всего используют элементы обоих методов генерации рабочих программ. Чем выше частота использования программ, тем более обоснованным будет применение метода компиляции. Метод интерпретации преобладает при генерировании программ более высоких уровней, он является основным при реализации диалогового режима САПР ТП.

*Структурное программирование.* Основное требование к ПО – выбор такой структуры программ и способов их реализации, которые способствовали бы уменьшению затрат времени и средств на разработку и сопровождение программ.

Улучшению организации разработки по САПР способствует применение структурного программирования.

К основным принципам структурного программирования относятся: модульность структуры; иерархия модулей; нисходящее проектирование.

*Модульный принцип построения ППП.* ПО разбивается на модули. Под модулем понимается генерируемая или библиотечная программа (или ее часть), способная входить в ПО в сочетании с другими модулями в качестве самостоятельного элемента. Модулем может быть крупная программа, например программа проектирования операций механической обработки.

В САПР ТП модули могут быть расширены, заменены, изъяты.

Состав модулей определяется рядом факторов: методикой разработки САПР ТП; выбранным методом решения разработанных алгоритмов; видом используемого периферийного оборудования; возможностями операционной системы; базовым алгоритмическим языком.

Построение ППП по модульному принципу имеет ряд преимуществ:

- относительная самостоятельность модулей позволяет параллельно программировать и отлаживать несколько модулей;
- при более детальном расчленении можно сэкономить время трансляции (меньшие модули требуют меньше времени на трансляцию), легче обнаружить ошибки;
- в расчлененном виде сложные логические связи более наглядны;
- изменения и совершенствования отдельных модулей не влияют на работоспособность ППП.

*Иерархия модулей.* Разделение модулей на иерархические уровни в структурном программировании производится по принципу вложенности. При этом используется вертикальное управление, для которого характерно то, что обращение к любому модулю может происходить только из какого-либо модуля более высокого уровня. Следовательно, на верхнем уровне должен быть единственный модуль (ведущая программа), управление которым происходит из операционной системы. Взаимодействие программ одного уровня при вертикальном управлении происходит только через программу более высокого уровня.

*Нисходящее проектирование* заключается в том, что планирование, реализация и контроль программной системы ведутся сверху

вниз, т. е. сначала производится проектирование модулей высших, а затем низших уровней.

Структурное программирование, наряду с иерархическим подходом к программированию, допускает и операционный подход, при котором модули разрабатываются в порядке их выполнения в маршруте проектирования.

Эти два подхода можно проиллюстрировать на примере системы, состоящей из модулей А–Н (рисунок 6.6).

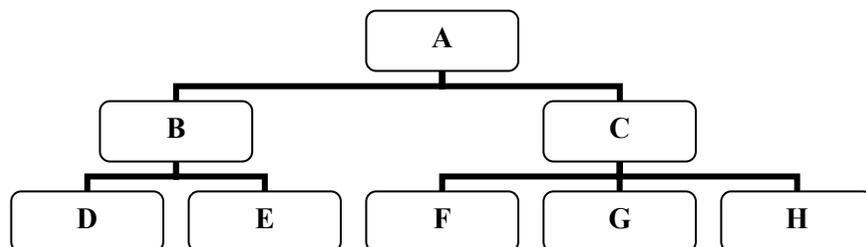


Рисунок 6.6 – Схема иерархии модулей ПО

Если при иерархическом подходе любой из модулей D–Н должен проектироваться после модулей А, В, С, то при операционном подходе допускается сначала разрабатывать модули А, В, D, E, а затем – модули С, F, G, H.

Важным направлением в программном обеспечении является стандартизация правил оформления модулей. Стандартизация позволяет обеспечить: единообразие оформления программной документации САПР; информационную программную совместимость модулей; унификацию и развитие программного обеспечения; обмен модулями между разработчиками.

### 6.6. Методическое обеспечение

*Методическое обеспечение* – это совокупность документов, устанавливающих состав, а также правила отбора и эксплуатации средств обеспечения автоматизированного проектирования, необходимых для решения проектных задач.

К компонентам методического обеспечения относятся:

- утвержденная документация инструктивно-методического харак-

тера, устанавливающая порядок работы по автоматизированному проектированию технологической документации;

- правила эксплуатации программно-методического комплекса;

- нормативы, стандарты и другие руководящие документы, регламентирующие процесс и объект проектирования.

Компоненты методического обеспечения должны размещаться на машинных носителях информации, позволяющих осуществлять как долговременное хранение документов, так и их оперативный вывод в форматах, установленных соответствующими стандартами.

### 6.7. Организационное обеспечение

*Организационное обеспечение* – это совокупность документов, устанавливающих состав проектной организации и ее подразделений, связи между ними, их функции, а также форму представления результата проектирования и порядок рассмотрения проектных документов.

Компоненты организационного обеспечения должны устанавливать:

- организационную структуру системы и подсистем, включая взаимосвязи ее элементов;
- задачи и функции службы САПР и связанных с нею подразделений проектной организации;
- права и ответственность должностных лиц по обеспечению создания и функционирования САПР;
- порядок подготовки и переподготовки пользователей САПР.

## 7. САПР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ В УСЛОВИЯХ ЕДИНИЧНОГО И МЕЛКОСЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Одним из основных способов автоматизации процессов механической обработки в условиях единичного и мелкосерийного производства является формализация этапов проектирования по методу анализа размерных связей деталей.

Технологический процесс, относящийся к изделиям одного наименования, типоразмера и исполнения независимо от типа производства, называется единичным. При разработке технологических процессов каждый раз решаются все задачи технологического проектирования: выбор вида заготовки, последовательности операций, назначение типов оборудования, проектирование технологической оснастки и т. д.

Технологическая подготовка на базе единичных технологических процессов предусматривает проектирование технологических процессов на всю номенклатуру деталей, подлежащих запуску в производство. Однако в зависимости от типа производства, сложности изделий и сроков на технологическое проектирование степень проработки задач проектирования различна. Например, для предприятий с единичным и мелкосерийным типом производства достаточно составить маршрутные ведомости, для предприятий с серийным типом производства необходимо разрабатывать маршрутные или операционные технологические процессы, а для массового производства требуются подробные технологические процессы.

При технологической подготовке производства на базе единичных технологических процессов объем работ, выполняемый на этапе технологического проектирования, велик. Поэтому такая форма подготовки производства оправдана, когда изделие подлежит выпуску в большом количестве и длительное время.

### 7.1. Анализ размерных связей деталей с использованием теории графов

Размерные связи машиностроительных деталей можно представить графом, вершины которого обозначают элементарные поверхности, а ребра – размерные связи между ними:

$$G = (A, E),$$

где  $A = \{a_i\}$  – множество поверхностей детали;

$E = \{E_{ij}\}$  – множество размеров, связывающих поверхности

$E_{ij} = \{a_i, a_j\}$ .

Размерная цепь – это расположенная по замкнутому контуру совокупность размеров, влияющих на точность одного из размеров контура. Ввиду того, что замыкающее звено непосредственно при механической обработке не выполняется и представляет собой результат формирования всех остальных звеньев цепи, то граф размерных связей детали в одном координатном направлении является деревом (рисунок 7.1, а).

Если на чертеже детали имеются размерные связи более чем в одном координатном направлении, то граф, которым они описываются, называется цепью или мультиграфом (рисунок 7.1, б). На этом рисунке ребра  $x_{1-2}$ ,  $x_{2-4}$ ,  $y_{1-2}$ ,  $z_{3-10}$  и другие обозначают размерные связи между элементами детали по координатам  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . На графе можно выделить несколько ветвей – маршрутов графа.

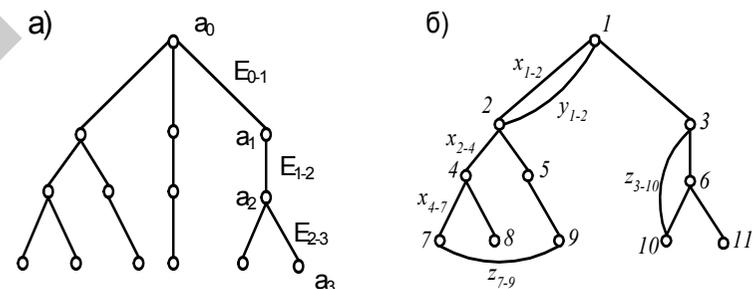


Рисунок 7.1 – Графы размерных связей типа «дерево» (а) и «мультиграф» (б)

На основе графа может быть сформирована формализованная модель геометрической структуры детали. Для этого необходимо, чтобы исходная геометрическая информация о детали была полностью описана в цифровой форме. Отсюда следует, что задача построения формализованной модели геометрической структуры детали сводится к распознаванию ее размерных связей в таблице кодированных сведений (ТКС) и построению матрицы смежности соответствующего графа.

При неавтоматизированном проектировании для распознавания размерных связей технолог визуально выявляет необходимые точностные параметры, связи между ними, размерные цепи, произво-

дит их пересчет исходя из конкретных условий и назначает технологический процесс изготовления детали.

В условиях автоматизированного проектирования процесс построения формализованной модели структуры детали производится путем анализа информации, содержащейся в таблице кодированных сведений, заполненной согласно принятой для данной САПР ТП системы кодирования (языка описания детали). Для решения рассматриваемой задачи ТКС должна содержать определенный набор реквизитов (сведений), которые необходимы для построения формализованной модели. К таким реквизитам, описывающим положение отдельной поверхности в общей конструкции детали, относятся:

- номер элемента *НЭ*;
- код элемента *КЭ*;
- номер базы *НБ*;
- линейный размер *X*;
- верхнее отклонение размера *X<sub>ВО</sub>*;
- нижнее отклонение размера *X<sub>НО</sub>*.

В результате выборки из ТКС формируется таблица, являющаяся исходной для алгоритма формирования графа размерных связей детали. Эта таблица представляет двухмерный массив  $M(m, n)$ , где  $m = 6$  – число реквизитов, описывающих положение  $i$ -й поверхности;  $n$  – количество поверхностей детали.

В качестве примера рассмотрим построение графа размерных связей для детали «вал» (рисунок 7.2). По вышеизложенным правилам для этой детали составлена таблица выборки сведений из ТКС (таблица 7.1).

Чтобы построить граф размерных связей детали в автоматизированном режиме, необходимо сформировать матрицу смежности. Для ее построения следует из множества поверхностей детали выделить базовую поверхность, которая принимается в качестве начальной вершины графа. Данная задача является достаточно важной, так как от нее зависит структура формализованной модели. При этом необходимо учитывать правила построения технологических процессов. Одно из таких правил определяет необходимость подготовки в первую очередь технологических установочных баз. Поэтому в качестве начальной вершины графа размерных связей используются поверхности, служащие технологическими установочными базами и обрабатываемые на первой операции. Это условие при автоматизированном проектировании должно быть обязательно проверено.

Алгоритм формирования графа размерных связей строится следующим образом. Для принятой базовой поверхности (начальной вершины графа) определяются висящие вершины первого дерева графа. С этой целью из сформированной таблицы 7.1 (по третьему столбцу) выбираются номера элементов *НЭ*, связанные с базовой поверхностью, и заносятся в матрицу смежности графа (таблица 7.2).

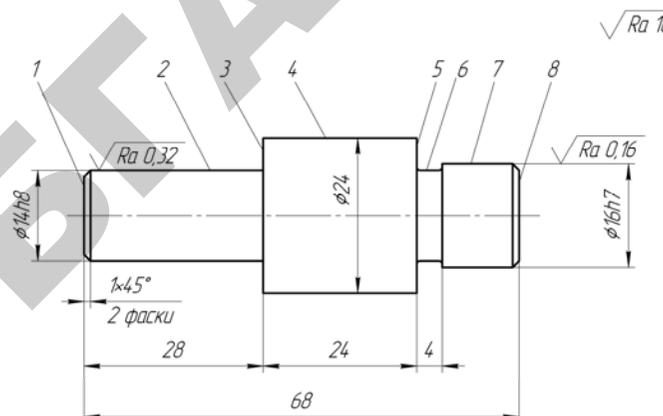


Рисунок 7.2 – Эскиз детали типа «вал»

В этой таблице по вертикали и горизонтали матрицы обозначены номера поверхностей. Если две какие-либо поверхности имеют размерную связь или связаны конструктивно, то в клетку, расположенную на пересечении соответствующей строки и столбца, ставится 1. При отсутствии размерной связи в клетку ставится нуль, который для упрощения таблицы может быть опущен.

В рассматриваемом примере в качестве базовой принята поверхность с номером 1. С этой поверхности начинается формирование матрицы смежности.

Таблица 7.1 – Таблица выборки сведений из ТКС

НЭ	КЭ	НБ	X	ВО	НО
1		1			
2		1			
3		1	-28		
4		3			
5		3	-24		
6		5			
7		5			
8		1	-68		

Граф размерных связей детали можно рассматривать, как состоящим из отдельных *деревьев* (кустов), каждый из которых имеет одну начальную (базовую) вершину и несколько (в крайнем случае, одну) висящих вершин. При формировании матрицы смежности происходит выделение деревьев графа.

После построения первого дерева графа производится формирование его последующих деревьев. Для этого необходимо проверить, не является ли поверхность, соответствующая выбранной висящей вершине, базовой для других поверхностей. Если поверхность является базовой, то повторяется последовательность выбора элементов с висящими вершинами по отношению к этой базовой поверхности.

Таблица 7.2 – Матрица смежности графа

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1	1					1
2								
3				1	1			
4								
5						1	1	
6								
7								
8								

После заполнения матрицы смежности графа и выделения его деревьев (рисунок 7.3) может быть сформирован окончательный граф размерных связей (рисунок 7.4).

В памяти ЭВМ граф размерных связей детали описывается массивом (назовем его, например, ГРАФ), который используется в дальнейшем при выборе технологических баз и проектировании технологических маршрутов.

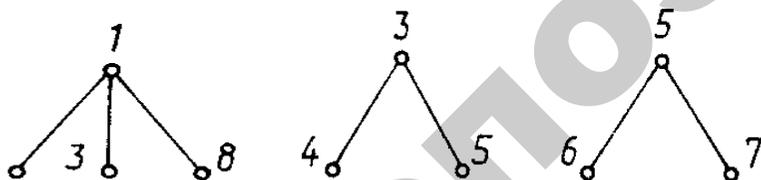


Рисунок 7.3 – Деревья графа размерных связей детали

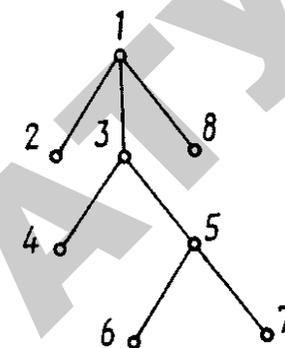


Рисунок 7.4 – Граф размерных связей детали типа «вал»

## 7.2. Выбор технологических баз

Одним из наиболее сложных этапов проектирования технологических процессов является назначение технологических баз. От правильности решения этой задачи зависит фактическая точность выполнения размеров, оптимальность маршрута обработки, сложность конструкций приспособлений, режущих и мерительных инструментов и, в конечном счете, производительность обработки детали.

В формализованной модели размерных связей детали одна из двух вершин, принадлежащих какому-либо ребру, всегда служит базой для другой. При этом под термином «база» подразумевается совокупность поверхностей, линий или точек детали, относительно которых по расчетам конструктора ориентируются другие поверхности данной детали. Как правило, невозможно обработать какую-то поверхность в соответствии с требованиями чертежа, предварительно не обработав ее базу до требуемой степени точности и шероховатости. Таким образом, формализованную модель структуры детали условно можно рассматривать как схему, определяющую последовательность обработки технологических баз.

Из технологии машиностроения известно, что конструкторские базы часто не могут быть использованы в качестве технологических, поэтому приходится определять *дополнительные базы* или вводить *искусственные опорные базы*. Например, центровые отверстия используются в качестве искусственных опорных баз для деталей класса «тела вращения» с  $L > 2D$ , где  $L$  – максимальная длина детали, а  $D$  – максимальный диаметр.

Выбор искусственных опорных баз и формирование соответствующего нового графа размерных связей производится с помощью специально разработанного алгоритма. При этом исходными данными являются ранее сформированный массив графа размерных связей ГРАФ, массив ТКС и ряд справочных массивов, содержащих сведения о припусках на обрабатываемые поверхности, базы и признаки вида поверхностей деталей. В результате проектирования по рассматриваемому алгоритму выполняется ряд проверок, устанавливающих необходимость искусственных опорных баз, например, в виде центровых отверстий с одной или двух сторон детали типа «вал».

После выполнения всех проверочных и вычислительных процедур формируется граф размерных связей вала с искусственными опорными базами. Такой граф может быть построен для ранее рассмотренной детали «вал» (рисунок 7.4). В этот граф размерных связей введены две искусственные опорные базы (80 и 10) в качестве третьего и четвертого элементов массива, получившего название «массив графа размерных связей с опорными базами» (массив МГОБ).

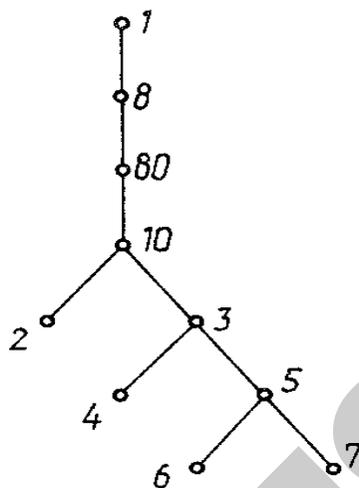


Рисунок 7.4 – Граф размерных связей с опорными базами детали типа «вал»

### 7.3. Синтез технологического маршрута

При проектировании единичных технологических процессов с помощью САПР ТП широко используются наработанные типовые решения различных подзадач для типовых элементов технологических процессов: типовые планы обработки, типовые схемы установки заготовок в приспособлениях и т. п. Такой подход позволяет наиболее рационально учитывать объективные факторы проектирования технологических процессов (размерные характеристики деталей) с типовыми решениями, характеризующими специфику конкретного предприятия.

Синтез технологического маршрута изготовления детали производится на основе построения *планов обработки элементарных и типовых поверхностей*. Планы обработки на отдельные поверхности, обеспечивающие получение требуемой точности и качества, разрабатывают расчетным методом, либо методом статистического анализа.

*Расчетный метод* основан на определении стоимости однократной обработки заготовки различными технологическими способами. В связи с отсутствием нормативов стоимости для способов обработки этот метод имеет ограниченное применение.

Метод *статистического анализа* основан на использовании статистических данных в производственных условиях конкретного предприятия или справочных данных. В настоящее время он нашел более широкое применение.

Алгоритм построения технологического маршрута по методу статистического анализа можно разделить на ряд этапов.

На *первом* этапе происходит формирование плана обработки.

Выбор плана обработки производится на основе анализа так называемых *таблиц соответствий*, представляющих собой одну из форм записи соответствия множества типовых решений множеству условий их существования. В качестве условий, определяющих выбор того или иного плана обработки  $W_i$ , принимают вид (код) обрабатываемой поверхности  $KЭ$ , вид термообработки  $ТО$ , шероховатость поверхности, качество точности обработки  $КТ$ , отклонения взаимного расположения  $\Delta$ , диаметр обработки  $D$ , расположение отверстий  $ОТ$ , вид отверстия  $ВО$  и др. В зависимости от этих условий из таблицы типовых планов обработки поверхностей рассмотренной детали «вал» (таблица 7.3) выбираются планы  $W_i$  на каждую

обрабатываемую поверхность и формируется таблица планов обработки поверхностей (таблица 7.4) – массив ПЛОБ.

Для *второго* этапа синтеза технологического маршрута обработки детали исходной информацией служат граф размерных связей с опорными базами (массив МГОБ) и таблица выбранных планов обработки (массив МПО  $W$ ). Ранее сформированный граф размерных связей детали «вал» с искусственными опорными базами будем называть *первичным графом*. Если вершины этого графа отождествить с планами обработки  $W_i$  соответствующих поверхностей, то получится так называемый *вторичный граф (ВТГ) размерных связей* (рисунок 7.5). Формирование в ЭВМ этого графа производится с помощью матрицы смежности (по аналогии с рассмотренным ранее). В вершинах вторичного графа будут сформированы планы обработки соответствующих поверхностей (массив ПЛОБ), состоящие из набора кодов методов обработки (КМО).

Таблица 7.3 – Планы обработки поверхностей различных видов

Планы обработки $W_i$	Коды методов обработки (КМО)	Методы обработки	Условия применения планов обработки
01	101	Точение черновое	Квалитет 9–10 $Ra = 3,2$ мкм Без термообработки
	102	Точение чистовое	
02	102	Точение чистовое	Канавки
03	101	Точение черновое	Квалитет 7–8 $Ra = 0,32–0,64$ мкм Без термообработки
	102	Точение чистовое	
	301	Шлифование	
04	101	Точение черновое	Квалитет 6–7 $Ra = 0,04–0,16$ мкм Без термообработки
	102	Точение чистовое	
	301	Шлифование	
	310	Полирование	
05	201	Сверление центрального отверстия	Центровые отверстия

Таблица 7.4 – Планы обработки поверхностей детали «вал»

Номер обрабатываемой поверхности (НЭ)	1	10	2	3	4	5	6	7	8	80
План обработки поверхности $W_i$	01	05	03	01	01	01	02	04	01	05

*Третьим* этапом синтеза технологического маршрута является объединение одноименных технологических методов обработки (имеющие общий код методов обработки КМО), принадлежащих разным вершинам вторичного графа. Для этого массив ВТГ (вторичного графа) с учетом массива ПЛОБ (планов обработки) поверхностей разбивается на операционные подграфы, вершины которых содержат одноименные методы обработки и соединены между собой ребрами, принадлежащими вторичному графу.

На заключительном этапе синтеза технологического маршрута предусматривается определение последовательности выполнения операций, т. е. задача сводится к упорядочиванию операционных подграфов. С этой целью выполняется проверка технологических операций на совместимость, т. е. возможность предшествования операций друг другу в типовых схемах построения маршрутной технологии.

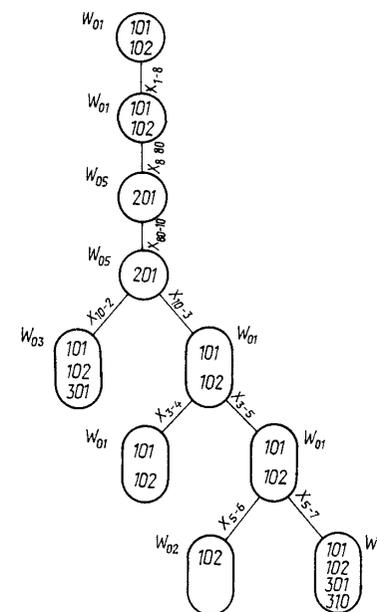


Рисунок 7.5 – Вторичный граф размерных связей детали типа «вал»

Для проверки операций на совместимость служит таблица, в которой операции записаны в порядке их возможного выполнения. Эта таблица строится разработчиками САПР ТП на основе положе-

ний, согласно которым вначале подготавливают технологические базы, затем выполняются черновые, чистовые и отделочные операции. В результате проектирования ЭВМ формирует технологический маршрут изготовления детали (таблица 7.5).

Таблица 7.5 – Технологический маршрут обработки детали «вал»

Номер операции	Код операции	Операция	Поверхности, обрабатываемые в операции (нумерация согласно ТКС)
1	201	Центровальная	80, 10
2	101	Токарная черновая	1, 8, 2, 3, 4, 5, 7
3	102	Токарная чистовая	1, 8, 2, 3, 4, 5, 6, 7
4	301	Круглошлифовальная	2, 7
5	310	Полировальная	7

Полученный в результате синтеза технологический маршрут может уточняться в дальнейшем на стадии проектирования операционной технологии.

*Метод представления знаний структурного синтеза.* При проектировании структуры технологических процессов традиционно используются типовые и групповые ТП.

*Типовые* процессы применяются для деталей, обладающих подобием в конструктивном и технологическом плане. С системной точки зрения к числу типовых относятся детали, имеющие одинаковую структуру, т. е. набор и связи КТЭ, при различных значениях свойств этих элементов (размеров, свойств материала и т. п.).

*Групповые* процессы используются для деталей, различных в конструктивном отношении, но подобных в технологическом плане. Такие детали обладают различной структурой КТЭ. На основе выбранного множества деталей, входящих в группу, обычно разрабатывают комплексную деталь, включающую все типы элементов, встречающихся у деталей группы. Для такой детали разрабатывается комплексный технологический процесс и формируется общая инструментальная наладка. Рабочий ТП для каждой детали из группы определяется составом ее КТЭ и представляет собой подмножество комплексного ТП.

На рисунке 7.6 представлены схемы моделей различных методов. Типовая модель имеет фиксированную структуру. Структура рабочего процесса в групповой модели формируется путем удаления лишних технологических действий (операций или переходов). Наи-

более общей является метамодель, представляющая собой И/ИЛИ-граф. В местах разветвлений на этом графе проставляются условия, определяющие выбор одного из возможных решений.

Если групповая модель строится на базе комплексной детали, то метамодель основывается на «*виртуальной*» детали. В отличие от комплексной, виртуальная деталь может не иметь физической реализации. Это происходит в тех случаях, когда в ее состав входят взаимоисключающие элементы, например дополнительные элементы, связанные со шпоночным или шлицевым соединением на одном и том же основном элементе — цилиндрической ступени вала.

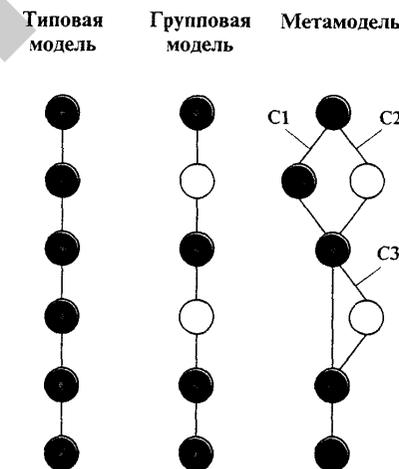


Рисунок 7.6 – Методы структурного синтеза технологических процессов

Метамодель является наиболее общей, интегрируя в себе типовую и групповую. В отличие от групповой модели, для формирования структуры ТП она использует операции не только удаления, но и замены.

Простейший способ ввода таких знаний заключается в рисовании на экране И/ИЛИ-графа с простановкой в соответствующих местах на его ребрах условий выбора решений. Такой граф в целом также имеет условия своего применения. На основе данной информации автоматически генерируются программные средства базы знаний, которые затем используются при проектировании ТП. Для общепринятого набора КТЭ с использованием общемашиностроительных нормативных материалов уже существует дос-

таточно обширная база знаний структурного синтеза операционных технологических процессов токарной, фрезерной и сверлильно-расточной обработки.

*Метод представления знаний параметрического синтеза.* Самым простым способом представления знаний параметрического синтеза является использование продукционных систем искусственного интеллекта. В таких системах знания представляются в виде правил-продукций, являющихся аналогами условного предложения естественного языка: ЕСЛИ <условие>, ТО <действие>.

Такие правила строятся на базе словаря содержащего термины технического языка и их условные обозначения (идентификаторы). В качестве действий используются расчеты по формулам, выбор информации из баз данных, генерацию графических изображений, выбор данных из многоходовых таблиц, которые могут содержать как константы, так и формулы и т. д.

Например, при расчете режимов резания для перехода «сверление» выполняют действия по двум правилам. При первом используют формулу для расчета подачи при сверлении отверстий, а при втором – коэффициенты, необходимые для расчета по этой формуле. Условием применения обоих правил является, например, значение «Сверлить» переменной «Вид перехода».

Проектирование нового ТП с ее помощью занимает считанные минуты. Технологи с помощью простейшего интерфейса необходимо описать деталь, а затем наблюдать за генерацией технологического процесса, отвечая на редкие запросы компьютера по выбору из допустимого набора тех решений, которые невозможно формализовать. В заключение производится автоматическая генерация технологической документации с использованием форм документов, принятых на предприятии.

Качество спроектированного ТП практически не зависит от квалификации технолога и определяется содержимым баз знаний.

#### **7.4. Расчет оптимальных режимов резания методом линейного программирования**

В основе оптимизации режимов резания методом линейного программирования лежит построение математической модели, которая включает совокупность технических ограничений, приведенных к линейному виду логарифмированием. Для решения этой задачи на ЭВМ могут быть использованы различные численные методы (метод пере-

бора, симплекс-метод и др.), а также графический метод, наглядно представляющий математическую модель процесса резания.

Качество математической модели процесса резания металлов и ее достоверность зависит от выбора технических ограничений, которые в наибольшей степени определяют описываемый процесс. Наиболее важными ограничениями являются следующие: режущие возможности инструмента; мощность электродвигателя привода главного движения; заданная производительность станка; наименьшая и наибольшая скорости резания и подача, допускаемые кинематикой станка; прочность и жесткость режущего инструмента; точность обработки; шероховатость обработанной поверхности.

Рассмотрим особенности построения технических ограничений для наиболее распространенных методов обработки — продольного наружного точения и фрезерования торцовыми и цилиндрическими фрезами.

*Ограничение 1. Режущие возможности инструмента.* Это ограничение устанавливает связь между скоростью резания, принятой стойкостью инструмента, его геометрией, глубиной резания, подачей и механическими свойствами обрабатываемого материала, с одной стороны, и скоростью резания, определяемой кинематикой станка, с другой.

Скорость резания для различных видов обработки определяется по формуле:

$$v = \frac{C_v D^{z_v} k_v}{T^m t^{x_v} S^{y_v} z^{u_v} B_{\phi}^{r_v}}, \quad (7.1)$$

где  $C_v$  – постоянный коэффициент, характеризующий нормативные условия обработки;

$D$  – диаметр обрабатываемой детали (или инструмента), мм;

$k_v$  – поправочный коэффициент, учитывающий качество обрабатываемого материала, состояние поверхности заготовки, характеристику режущего инструмента;

$T$  – принятая стойкость инструмента, мин;

$m$  – показатель относительной стойкости;

$t$  – глубина резания, мм;

$S$  – подача, мм/об, мм/мин;

$Z$  – число зубьев режущего инструмента;

$B_{\phi}$  – ширина фрезерования, мм;

$x_v, y_v, u_v, z_v, r_v$  – показатели степеней или переменных в формуле скорости резания.

Скорость резания также определяется кинематикой станка согласно зависимости:

$$v = \pi D n 10^{-3}. \quad (7.2)$$

Приравнивая правые части формул (7.1) и (7.2) и сделав преобразования, получают выражение первого технического ограничения в виде неравенства

$$n s^{y_v} \leq \frac{318 C_v k_v D^{z_v - 1}}{T^m t^{x_v} z^{u_v} B_\phi^{r_v}}. \quad (7.3)$$

Это техническое ограничение достаточно просто приводится к виду, описывающему конкретный вид обработки. Для продольного наружного точения можно получить при  $z_v = 0, u_v = 0, r_v = 0$  следующее неравенство:

$$n s^{y_v} \leq \frac{318 C_v k_v}{T^m D t^{x_v}}.$$

*Ограничение 2. Мощность электродвигателя главного движения станка.* Этим ограничением устанавливается взаимосвязь между эффективной мощностью, затрачиваемой на процесс резания, и мощностью электропривода главного движения станка. Эффективная мощность, затрачиваемая на процесс резания при различных видах обработки, определяется по формуле:

$$N_{\text{эф}} = \frac{C_z t^{x_z} D^{z_z} n^{n_z} s^{y_z} \pi^{n_z} B_\phi^{r_z} z^{u_z} k_z}{k_{Cz}}, \quad (7.4)$$

где  $C_z$  – постоянный коэффициент, характеризующий условия обработки;

$k_z$  – общий поправочный коэффициент на мощность, учитывающий изменение условий обработки против нормативных;

$k_{Cz}$  – поправочный коэффициент, учитывающий отдельный вид обработки;

$x_z, x_z, z_z, n_z, y_z, u_z, r_z$  – показатели степени при  $t, D, n, S, Z$  и  $B_\phi$ .

Учитывая необходимое условие протекания процесса резания, можно получить следующее неравенство:

$$N_{\text{эф}} \leq N_n \eta, \quad (7.5)$$

где  $N_n$  – мощность электродвигателя главного привода станка, кВт;

$\eta$  – КПД механизма передачи от электродвигателя к инструменту.

Приравнивая правые части выражений (7.4) и (7.5), получаем второе техническое ограничение в виде неравенства:

$$n^{n_z} s^{y_z} \leq \frac{N_n \eta k_{Cz}}{C_z t^{x_z} D^{z_z} \pi^{n_z} B_\phi^{r_z} k_z}. \quad (7.6)$$

*Ограничение 3. Заданная производительность станка.* Этим ограничением устанавливается связь расчетных скоростей резания и подачи с заданной производительностью станка. Исходя из соотношения продолжительности цикла работы станка  $T_{\text{ц}}$ , основного технологического  $t_0$  и вспомогательного непрерывного  $t_{\text{в.н}}$  времени, можно получить выражение для третьего технического ограничения:

$$n s \geq \frac{LR}{60 K_3 r_R - t_{\text{в.н}} R}, \quad (7.7)$$

где  $R$  – заданная производительность станка, шт/мин;

$K_3$  – коэффициент загрузки станка;

$r_R$  – число деталей, обрабатываемых одновременно на одной позиции;

$L$  – длина рабочего хода инструмента, мм.

*Ограничения 4 и 5. Наименьшая и наибольшая допустимые скорости резания.* Эти ограничения устанавливают взаимосвязь расчетной скорости резания с кинематикой станка по минимуму и максимуму. Они записываются в следующем виде:

$$n \geq n_{\text{ст. min}}; \quad (7.8)$$

$$n \leq n_{\text{ст. max}}. \quad (7.9)$$

*Ограничения 6 и 7. Наименьшая и наибольшая допустимые подачи.* Эти ограничения аналогично двум предыдущим устанавливают взаимосвязь расчетной подачи с подачей, допустимой кинематикой станка по минимуму:

$$s \geq s_{\text{ст. min}} \quad (7.10)$$

и максимуму

$$s \leq s_{\text{ст. max}}. \quad (7.11)$$

*Ограничение 8. Прочность режущего инструмента.* Это ограничение устанавливает взаимосвязь между значениями скорости резания и подачи: расчетными и допустимыми по прочности режущего инструмента. В основу построения этого ограничения закладывают условия нагружения режущего инструмента, например резца, как консольной балки с приложением на ее конце усилия, равного окружной составляющей силы резания  $P_z$ . В этом случае предел прочности материала державки резца при изгибе определяется зависимостью:

$$\sigma_{изг} \geq M_{изг} k_{з.п} / W,$$

где  $M_{изг} = P_z l_{в.р}$  – изгибающий момент в месте закрепления державки резца на расстоянии  $l_{в.р}$  вылета резца от точки приложения окружной силы;

$k_{з.п}$  – коэффициент запаса прочности;

$W$  – момент сопротивления сечения державки резца, мм<sup>3</sup>.

Выражая окружную силу резания в зависимости от элементов режимов резания, а также учитывая форму державки (для прямоугольного сечения шириной  $B$  и высотой  $H$  момент сопротивления  $W = \frac{BH^2}{E}$ ) и значение предела прочности для незакаленной углеродистой конструктивной стали  $\sigma = 2,0\text{--}2,4$  МПа, можно получить после некоторых преобразований следующее ограничение:

$$n^{n_z} s^{y_z} \leq \frac{4BH^2 (10^3)^{n_z}}{C_z t^{x_z} D^{n_z} \pi^{n_z} l_{в.р}^3 k_{з.п} k_z}. \quad (7.12)$$

*Ограничение 9. Жесткость режущего инструмента.* Это ограничение устанавливает взаимосвязь между расчетными значениями скорости резания и подачи и допустимыми по жесткости режущего инструмента. Известно, что максимальная нагрузка, допускаемая жесткостью резца  $P_{ж.доп}$ , определяется по формуле:

$$P_{ж.доп} = 3fEI / l_{в.р}^3,$$

где  $f$  – допустимая стрела прогиба резца, мм;

$E$  – модуль упругости материала резца (для конструктивной стали  $E = (2\text{--}2,5) \times 10^4$  кг/мм<sup>2</sup>);

$I$  – момент инерции державки резца, мм<sup>4</sup>.

Величина допустимого прогиба резца  $f$  зависит от требуемой точности обработки и может быть принята для черного и полукрестового точения равной 0,1 мм, а для чистового – 0,05 мм. Момент инерции державки резца зависит от ее формы. Для прямоугольного сечения с шириной  $B$  и высотой  $H$  момент инерции определяется по формуле  $I = BH^3 / 12$ . Из условия соотношений окружной составляющей  $P_z$  и максимальной нагрузки, допускаемой жесткостью резца, и после соответствующего представления  $P_z$  через элементы режима резания получают девятое ограничение в виде неравенства  $P_z \leq P_{ж.доп}$ , а после подстановки значений

$$n^{n_z} s^{y_z} \leq \frac{(10^3)^{n_z+1} BH^3}{2C_z t^{x_z} D^{n_z} \pi^{n_z} l_{в.р}^3 k_z}. \quad (7.13)$$

*Ограничение 10. Жесткость заготовки.* Это ограничение устанавливает взаимосвязь расчетных значений скорости резания и подачи с допустимыми их значениями. Из-за многообразия форм заготовок невозможно получить общие зависимости для описания рассматриваемого вида технического ограничения. Поэтому остановимся на его построении для операции точения цилиндрической гладкой заготовки при закреплении ее в центрах.

В основу этого ограничения положено условие, при котором величина прогиба  $y_c$  заготовки под действием радиальной составляющей силы резания  $P_y$  должна быть меньше или равна допустимому прогибу  $y_{доп}$ , т. е.  $y_c \leq y_{доп}$ .

Из рисунка 7.7 видно, что допустимый прогиб должен быть меньше величины половины допуска на размер:  $y_{доп} \leq 0,5\delta$ , где  $\delta$  – допуск на размер, мм. Величина прогиба заготовки:

$$y_c = P_y x_p^2 (L_3 - x_p)^2 / 3EI L_3,$$

где  $L_3$  – длина заготовки, мм;

$x_p$  – расстояние от правого торца до места приложения силы (до резца), мм;

$I = \pi D_{пр}^4 / 64$  – момент инерции сечения заготовки в месте искомого прогиба, мм<sup>4</sup>;

$D_{пр}$  – приведенный диаметр ступенчатого вала, мм.

После преобразования рассмотренных формул и подстановки в них значения  $P_y = \frac{C_y t^{x_y} s^{y_y} D^{n_y} n^{n_y} / \pi^{n_y} k_z}{(10^3)^{n_y}}$

получим техническое ограничение по жесткости заготовки:

$$n^{n_y} s^{y_y} \leq \frac{1,58 E \pi^{1-n_y} D_{\text{пр}}^4 (10^3)^{n_y} L_3}{64 C_y t^{x_y} k_y D^{n_y} x_p^2 (L_3 - x_p)^2} \quad (7.14)$$

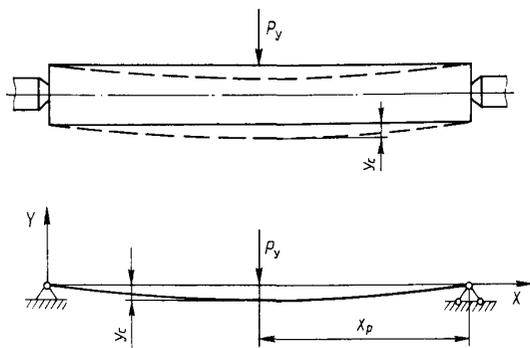


Рисунок 7.7 – Схема деформации заготовки при точении под действием радиальной составляющей силы резания

**Ограничение 11. Прочность механизма подач станка.** Это ограничение устанавливает взаимосвязь расчетных скоростей резания и подачи с допустимыми по прочности механизма подач станка. Имеет место обобщенная зависимость определения силы для различных видов обработки:

$$P_s = C_s t^{x_s} s^{y_s} n^{n_s} D^{n_s+z_s} \pi^{n_s} z^{u_s} B^{r_s} k_s (10^{-3})^{n_s}$$

При продольном наружном точении коэффициенты  $z_s, u_s, r_s$  равны нулю, а при фрезеровании коэффициент  $n_s = 0$ . В общем виде ограничение имеет вид  $P_s \leq P_{s \text{ доп}}$ . Значение  $P_{s \text{ доп}}$  находят в паспортных данных металлорежущего станка. Подставив в это неравенство выражение для  $P_s$ , получим техническое ограничение по прочности механизма подач станка:

$$n^{n_s} s^{y_s} \leq \frac{(10^3)^{n_s} P_{s \text{ доп}}}{C_s t^{x_s} D^{n_s+z_s} \pi^{n_s} z^{u_s} B^{r_s} k_s} \quad (7.15)$$

**Ограничение 12. Требуемая шероховатость поверхности.** Это ограничение устанавливает взаимосвязь расчетных скоростей резания и подачи с допустимой по требуемой высоте или форме шероховатостью.

Известно, что выбор скорости резания и особенно подачи при получистовой и чистовой обработке очень часто определяется требуемой шероховатостью поверхности. В основу этого ограничения могут быть положены многочисленные экспериментальные зависимости для различных характеристик шероховатости поверхности  $R$  ( $R_a, R_z, R_{\text{max}}$ ), шага микронеровности  $S_m$ , величины опорной поверхности  $t_p$ , которые представляются в виде следующих выражений мультипликативного типа:

$$R = k_1 n^{k_2} s^{k_3} t^{k_4} \varphi_1^{k_5} \varphi^{k_6} r^{k_7},$$

где  $\varphi, \varphi_1, r$  – параметры геометрии режущей части инструмента;  $k_1, k_2, k_3 \dots k_7$  – экспериментально установленные коэффициенты. После преобразования с учетом обеспечения требуемого значения шероховатости получают техническое ограничение также в виде неравенства:

$$n^{k_2} s^{k_3} \leq \frac{R}{k_1 t^{k_4} \varphi_1^{k_5} \varphi^{k_6} r^{k_7}} \quad (7.16)$$

Знак неравенства (7.16) определяется видом характеристики шероховатости. В тех случаях, когда требуется одновременно обеспечить несколько характеристик шероховатости, рассматриваемое техническое ограничение представляется в виде нескольких неравенств. Для обеспечения при наружном продольном точении заготовки из стали 45 шероховатости  $R_a$  и шага микронеровностей  $S_m$  могут быть использованы для построения технических ограничений следующие зависимости:

$$R_a = 0,16 \frac{s^{0,59} (\pi/2 + \gamma)^{0,66}}{r^{0,29} \nu^{0,19}};$$

$$S_m = 0,81 \frac{s^{1,34} (\pi/2 + \gamma)^{0,1}}{r^{-0,19}},$$

где  $\gamma$  – передний угол реза.

Выбранные и описанные выше технические ограничения, отражающие с определенной степенью точности физический процесс резания в совокупности с критерием оптимальности, образуют математическую модель процесса резания.

При определении режимов резания широкое применение для двух элементов  $n$  и  $s$  имеет метод линейного программирования, общая задача которого состоит в определении неотрицательных значений переменных, удовлетворяющих системе ограничений в виде линейных равенств и неравенств и обеспечивающих наибольшее или наименьшее значение некоторой линейной функции – критерия оптимальности.

Таким образом, первая задача, которая должна быть решена, — это приведение всех технических ограничений и оценочной функции к линейному виду. Для примера рассмотрим приведение к линейному виду первого технического ограничения (7.3) методом логарифмирования:

$$\ln n + y_v \ln s \leq \ln \left( \frac{318 C_v D^{z_v-1} k_v}{T^m t^{x_v} z^{u_v} B^{r_v}} \right) \quad (7.17)$$

Введя обозначения  $\ln n = x_1$ ,  $\ln(100s) = x_2$ ,

$$\ln \left( \frac{318 C_v D^{z_v-1} k_v}{T^m t^{x_v} z^{u_v} B^{r_v}} \right) = b_1$$

и подставив их в неравенство (7.17), получим

$$x_1 + y_v x_2 \leq b_1. \quad (7.18)$$

Аналогично могут быть получены в линейном виде зависимости для других технических ограничений.

Анализ различных критериев оптимальности показывает, что при оптимизации по двум элементам режимов резания  $n$  и  $s$  без изменения глубины резания, стойкости инструмента и других технических факторов эти оценочные функции при введении ряда упрощений выражаются через  $n$  и  $s$  достаточно просто. Так, для минимальной себестоимости операции можно записать  $C_{\bar{n}} = c_1 / ns$ ,

где  $c_1$  – постоянная величина, не зависящая от режимов резания  $n$  и  $s$ .

Из этого выражения видно, что значение оценочной функции является наименьшим, когда произведение  $ns$  максимальное. В этом случае при приведении оценочной функции к линейному виду можно получить

$$f_0 = (x_1 + x_2) \rightarrow \max. \quad (7.19)$$

Преобразование технических ограничений к линейному виду и представление их в виде системы неравенств в совокупности с оценочной функцией дает математическую модель процесса резания металлов.

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 + y_v x_2 \leq b_1 \\ n_z x_1 + y_z x_2 \leq b_2 \\ x_1 + x_2 \geq b_3 \\ x_1 \geq b_4 \\ x_1 \leq b_5 \\ x_2 \geq b_6 \\ x_2 \leq b_7 \\ n_z x_1 + y_z x_2 \leq b_8 \\ n_z x_1 + y_z x_2 \leq b_9 \\ n_y x_1 + y_y x_2 \leq b_{10} \\ n_s x_1 + y_s x_2 \leq b_{11} \\ k_2 x_1 + k_3 x_2 \leq b_{12} \end{array} \right. \quad (7.20)$$

Применительно к математической модели (7.19)–(7.20) задача определения оптимального режима резания сводится к отысканию среди всевозможных неотрицательных значений  $x_1$  и  $x_2$  системы таких значений  $x_{1\text{опт}}$  и  $x_{2\text{опт}}$ , при которых линейная функция принимает максимальное значение  $f_{0\text{max}}$ .

Математическая модель процесса резания может быть изображена в графическом виде (рисунок 7.8).

При графическом изображении каждое техническое ограничение представляется граничной прямой, которая определяет полуплоскость, где возможно существование решений системы неравенств. При пересечении граничных прямых образуется многоугольник ABCDEF, внутри которого любая точка удовлетворяет всем условиям неравенств без исключения. Поэтому этот многоугольник принято называть *многоугольником решений* (см. рисунок 7.8).

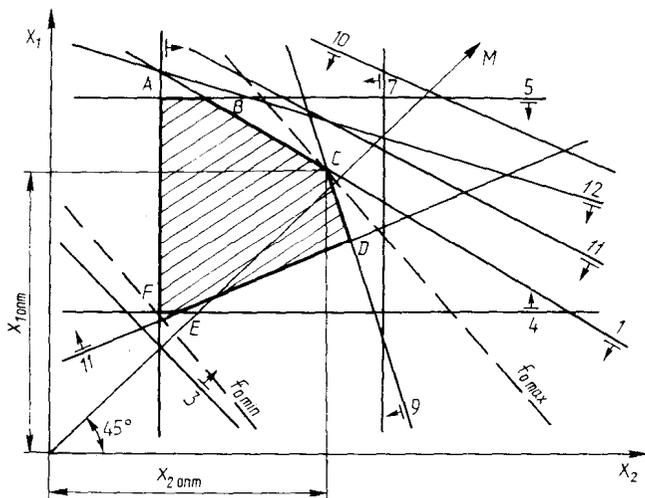


Рисунок 7.8 – Графическое изображение математической модели процесса резания

Теория линейного программирования показывает, что экстремальное значение оценочной функции (при выпуклом многоугольнике решений) обеспечивается для  $x_1$  и  $x_2$ , находящихся в точке, лежащей на одной из граничных прямых или их пересечении. Поэтому задача отыскания оптимальных значений  $x_{1\text{опт}}$  и  $x_{2\text{опт}}$  сводится к последовательному вычислению координат всех возможных точек пересечения граничных прямых и затем определению для них наибольшей суммы

$$f = (x_1 + x_2)_{\max}$$

После определения координат  $x_{1\text{опт}}$  и  $x_{2\text{опт}}$  вычисляют оптимальные значения элементов режима резания по формулам:

$$n_{\text{опт}} = \exp(x_{1\text{опт}}); \quad s_{\text{опт}} = \exp(x_{2\text{опт}})/100.$$

Для автоматизации решения задачи, заданной системой линейных уравнений и неравенств, обычно используется метод полного перебора точек, образующих выпуклый многоугольник возможных решений. Определяются попарно точки пересечения прямых и подставляются координаты этих точек в неравенства системы. Точка, координаты которой удовлетворяют всем без исключения прямым (проверка на совместимость системы уравнений), и одновременно сумма координат которой ( $x_1 + x_2$ ) является наибольшей, является точкой оптимального решения.

Последовательность решения задачи следующая:

1. Рассматривается пара прямых и производится их проверка на параллельность.
2. Если прямые параллельны, то рассматривается следующая пара, а если нет, то определяются координаты  $x_1$  и  $x_2$  точки их пересечения.
3. Проверяются знаки координат. Если координаты положительны, то путем подстановки в каждое из неравенств найденных значений  $x_1$  и  $x_2$  определяют, находится ли точка в области возможных решений. Если хотя бы одно из неравенств не удовлетворяется, то эта точка отбрасывается и проводится такой же анализ следующей пары.
4. Если  $x_1$  и  $x_2$  положительны и удовлетворяют всем без исключения неравенствам, то определяется сумма координат  $t_0 = x_1 + x_2$  и запоминается в виде некоторого значения А. Все вышеописанные действия производятся до тех пор, пока не будут рассмотрены все пары прямых.

5. В случае противоречивости исходных данных может оказаться, что области возможных решений нет. Признаком несовместности системы является равенство нулю величины А, которая в противном случае равна сумме координат  $x_1 + x_2$ , являющихся решением задачи.

6. Если решение находится на прямой, параллельной прямой оценочной функции, то в качестве решения принимаются координаты той точки, у которой больше координата  $x_2$  (т. е. при большем значении подачи).

7. Если система неравенств совместима и найдена точка, сумма координат которой  $x_1 + x_2$  является наибольшей, то оптимальная частота вращения шпинделя  $n = e^{x_1}$  и оптимальная величина подачи  $s = e^{x_2} / 100$ .

Эту задачу можно также решить графически. Оценочная функция  $f_0 = x_1 + x_2$  изображается прямой, перпендикулярной к вектору максимизации  $M$  (рисунок 7.8). Так как направление вектора  $M$  есть направление возрастания линейной функции  $f_0$ , то следует ожидать, что в первой точке касания  $F$  с многоугольником решения она примет минимальное значение  $f_{0\min}$ , а в последней точке  $C$  – максимальное значение  $f_{0\max}$ . Следовательно, вершина многоугольника решений  $C$  является точкой оптимума, а ее координаты  $x_{1c}$  и  $x_{2c}$  – оптимальным решением системы уравнений.

## 8. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ ДЛЯ СТАНКОВ С ЧПУ

Одним из основных условий эффективного использования станков с числовым программным управлением (ЧПУ) является оперативная подготовка для них управляющих программ (УП).

Практика показывает, что на один станок с ЧПУ ежегодно разрабатывается в среднем 20...40 УП. Для нормальной эксплуатации станка с ЧПУ необходимо иметь библиотеку, содержащую около 60 УП в условиях производства с повторяющейся номенклатурой обрабатываемых деталей и около 110 УП – в условиях производства с изменяющейся номенклатурой. Эти показатели свидетельствуют о важности задач оперативной подготовки УП с минимальными затратами.

### 8.1. Методы разработки управляющих программ

Существуют следующие методы разработки УП:

- ручной;
- автоматизированный с помощью устройства ЧПУ станка со встроенной микроЭВМ – цеховое программирование;
- автоматизированный вне станка с использованием персонального компьютера и соответствующих систем программирования.

Ручное программирование основано на использовании технологической информации, взятой из операционных карт обработки, и геометрической информации, взятой из чертежа детали (рисунок 8.1). Затем, пользуясь справочниками, инструкциями по программированию и выполняя необходимые расчеты, технолог-программист кодирует каждую команду на выполнение вспомогательных действий, технологических проходов и переходов. Результаты кодирования записываются в карту кодирования информации. Содержимое карты переносится на программноноситель для возможности передачи его устройству ЧПУ.

Этот метод используют при разработке управляющих программ обработки заготовок деталей простой геометрической формы. Для разработки управляющих программ обработки сложно-профильных деталей ручной метод нерационален, так как трудоемкость выполнения расчетов и программирования возрастает настолько, что использование станков с ЧПУ для обработки этих деталей становится неэффективным. По этим же причинам для деталей, имеющих про-

странственно заданные поверхности, ручное программирование практически вообще неосуществимо.

Значительная трудоемкость разработки управляющих программ ручным методом явилась предпосылкой автоматизации программирования с помощью ЭВМ.

В индивидуальном и мелкосерийном производствах при повторяющихся партиях деталей с относительно простой геометрической формой часто ограничиваются разработкой только УП. При этом управляющие программы разрабатывают непосредственно у станка (*цеховое программирование*), используя при этом клавиатуру пульта оператора и возможности систем CNC в части построений и преобразований контуров поверхностей деталей, постоянных циклов, подпрограмм и т. п.

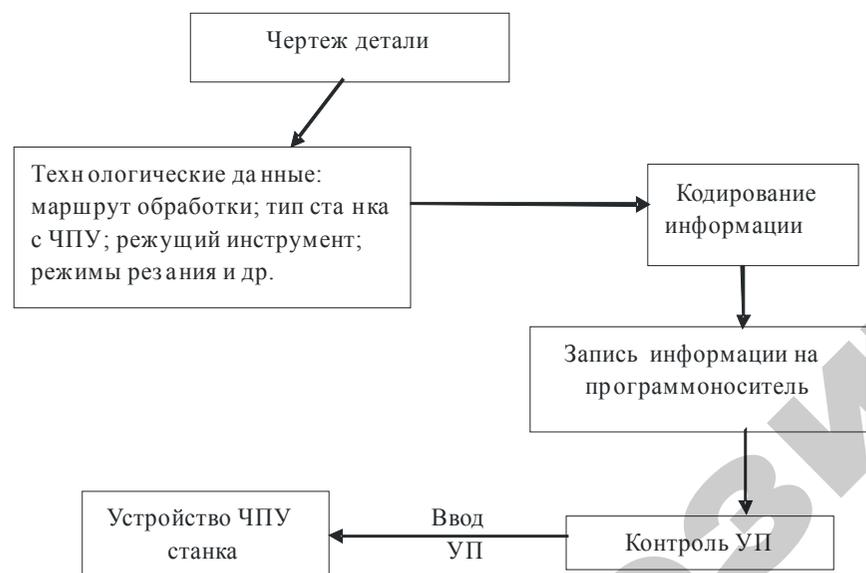


Рисунок 8.1 – Схема разработки управляющих программ ручным способом

За последние годы в связи с развитием микропроцессорных систем ЧПУ для управления металлорежущим оборудованием и оснащением их устройствами (символьно-цифровой клавиатурой, дисплеями, мощными микроЭВМ) для работы в режиме диалога, на-

блюдается устойчивая тенденция разработки управляющих программ автоматизированным способом непосредственно у станка с ЧПУ. При этом станок с ЧПУ на период разработки УП выполняет функции компьютера. Устройства ЧПУ имеют узкоспециализированное программное обеспечение. Для ускорения работ по программированию технологических операций современные устройства ЧПУ (типа Heidenhain, Sinumerik, Fanuc, Мицубиси, 2C42, 3C170, «ИРИС М64» и др.) имеют широкий набор постоянных и технологических циклов обработки, а также подпрограмм.

К постоянным циклам относятся: сверление, зенкерование, нарезание резьбы, растачивание, глубокое сверление, сверление двух рабочих глубин, зенкерование на обратном ходу и др.

К технологическим циклам относятся: однопроходный продольный цикл, однопроходный поперечный цикл, многопроходный черновой продольный цикл, многопроходный черновой поперечный цикл, многопроходный цикл нарезания торцовых или цилиндрических канавок, многопроходный цикл резьбонарезания.

Кроме того, устройства ЧПУ позволяют выполнять функции преобразования геометрических элементов: зеркальную обработку, последовательность точек на прямой или окружности, последовательность точек в форме матриц и др.

При помощи функции по определению геометрических элементов контура детали устройством ЧПУ могут быть вычислены точки, прямые и окружности, которые требуются для составления программы, но отсутствуют непосредственно на чертеже детали.

Этот метод разработки УП предполагает оснащение станков оперативными устройствами ЧПУ и используется при изготовлении деталей простой и средней по сложности геометрических форм.

К достоинствам метода программирования непосредственно у станка следует отнести следующее:

- не требуются услуги технолога-программиста, т. е. нужны меньшие организационные затраты при внедрении станков с ЧПУ;
- лучше используются технологические знания и опыт производственников;
- уменьшаются затраты на корректировку программ, т. к. при их разработке можно учесть текущее (на момент начала обработки заготовки детали) состояние станка с ЧПУ, фактическую номенклатуру применяемых инструментов и приспособлений;
- увеличивается гибкость производства.

Однако при использовании этого метода имеют место простои

станков с ЧПУ, связанные с разработкой и вводом УП, так как станок с ЧПУ используется при этом не по назначению, а в качестве программирующего устройства. Кроме этого, для «цехового программирования» требуются операторы станков с ЧПУ более высокой квалификации.

При автоматизированном программировании вне станка с ЧПУ используются персональный компьютер и соответствующая система разработки управляющих программ (САПР УП). Схема разработки управляющих программ при автоматизированном способе программирования приведена на рисунке 8.2.

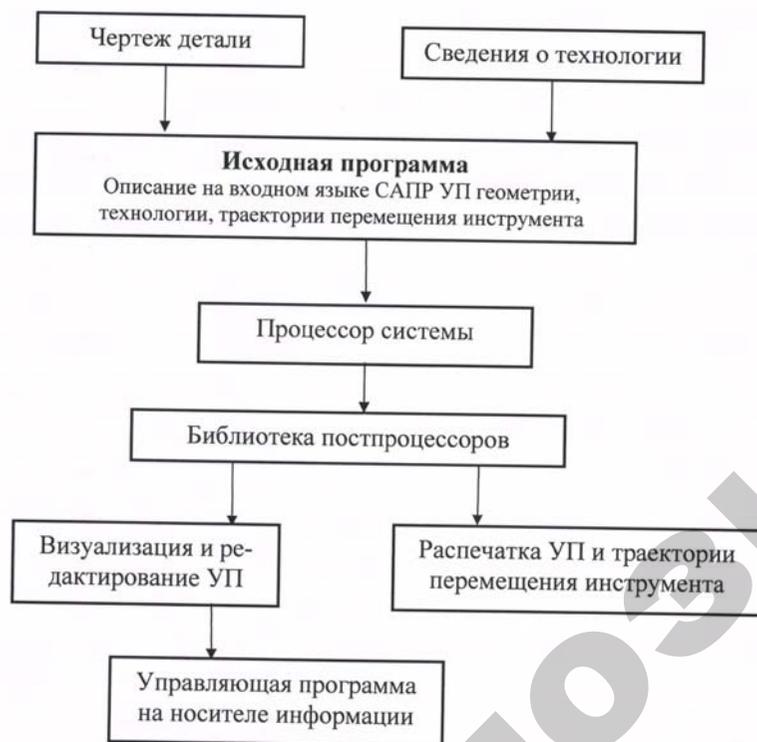


Рисунок 8.2 – Схема разработки управляющих программ при автоматизированном способе

Трудоемкость автоматизированного проектирования одной УП средней сложности характеризуется следующими данными:

- время кодирования исходных данных – 0,5–1,2 ч;
- время ввода информации в ЭВМ – 7–20 мин;
- время расчета УП – 5–8 мин.

## 8.2. Классификация САПР УП

Система автоматизированного проектирования управляющих программ для станков с ЧПУ – комплекс технических, программных, языковых, информационных средств, осуществляющих преобразование данных чертежа детали и технологического процесса ее обработки в коды устройства управления оборудованием с ЧПУ. Это преобразование осуществляется в соответствии с международным стандартом ISO 7bit.

Современные отечественные и зарубежные САПР УП условно можно классифицировать по основным критериям:

- назначению;
- области применения;
- степени автоматизации решения всего комплекса рассматриваемых задач;
- ориентации на использование определенного типа ЭВМ;
- способу задания входных данных;
- режиму обработки данных.

**По назначению** САПР УП подразделяются на специализированные, универсальные и комплексные.

*Специализированные САПР УП* разрабатываются для деталей отдельных классов и уникального оборудования с ЧПУ. Например, с помощью таких систем осуществляется программирование обработки деталей по контуру (форма спирали Архимеда, заданный набор точек), а также программирование обработки колодцев на сложных поверхностях.

*Универсальные САПР УП* предназначены для различных деталей, изготавливаемых на станках с ЧПУ отдельных технологических групп. Такие системы позволяют выполнять сложные геометрические и технологические задачи, поэтому они получили широкое распространение, как в нашей стране, так и за рубежом.

*Комплексные САПР УП* объединяют ряд функций (подсистем) специализированных и универсальных САПР и могут быть использованы для станков с ЧПУ различных технологических групп. Объ-

единение систем возможно на базе единого входного языка и общих блоков, используемых для решения идентичных задач.

Область применения САПР УП определяется конструктивно-технологическими признаками деталей и технологическими возможностями станков с ЧПУ. Различают четыре типа САПР УП, областями применения которых являются:

- обработка отверстий на сверлильных станках с позиционным управлением и обработка поверхностей, параллельных координатным плоскостям, на фрезерных станках с 2,5-координатным управлением;
- комплексная (многоцелевая) обработка корпусных деталей на сверлильно-расточных станках и обрабатывающих центрах;
- обработка поверхностей деталей сложной формы (штампы, пресс-формы, турбинные лопатки и т. п.) на многокоординатных фрезерных станках;
- обработка тел вращения со ступенчатым и криволинейным профилями на токарных станках.

**По степени автоматизации** существующие САПР УП делятся на два вида: *с автоматизацией проектирования технологии* и *без ее автоматизации*.

До середины 90-х годов большинство САПР УП относилось ко второму виду, в настоящее время все САПР УП относятся к первому виду.

Современные САПР УП ориентированы на персональные ЭВМ с большим быстродействием и способностью обработки большого объема информации. Мобильные персональные ЭВМ позволяют использовать САПР УП для подготовки управляющих программ непосредственно на участках станков с ЧПУ.

**По способу задания входной информации** САПР УП бывают трех видов: *с графической, табличной и языковой формой записи*. Графическая форма входной информации используется для задания контуров заготовки и обработки деталей. Табличная запись данных отличается большой наглядностью и простотой, она применяется главным образом в специальных САПР УП. Языковая запись данных представляет собой текстовую информацию, построенную по определенным правилам. Она обладает большой гибкостью, легче, чем табличная, поддается модернизации и поэтому широко используется в наиболее развитых отечественных и зарубежных САПР УП.

В зависимости от системного программного обеспечения и состава внешних устройств, а также возможностей конкретной САПР

УП различают два основных режима автоматизированной разработки УП: *пакетный* и *диалоговый*.

### 8.3. Структура и состав САПР УП

Большинство современных САПР УП построено по принципу «процессор – постпроцессор» (рисунок 8.3) и в общем виде включает:

- процессор;
- библиотеку препроцессоров;

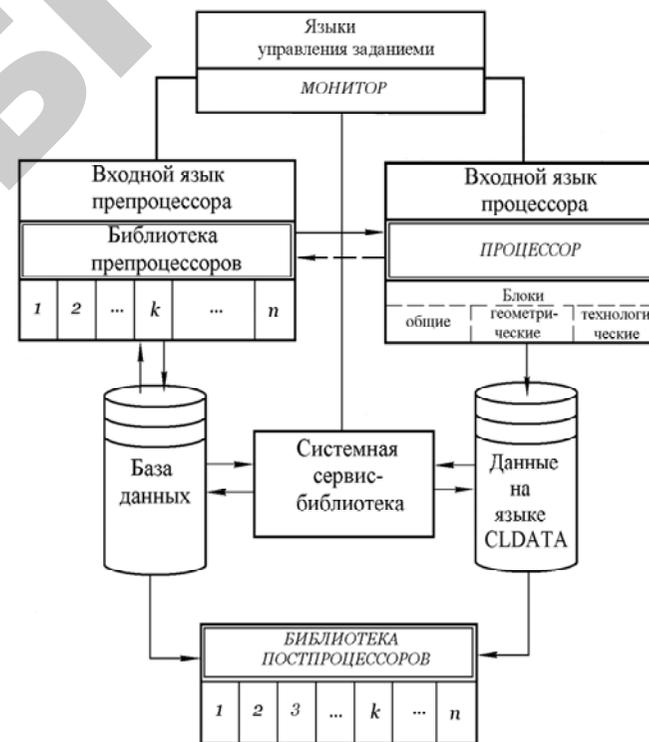


Рисунок 8.3 – Типовая структура САПР УП

- библиотеку постпроцессоров;
- входной язык препроцессоров и процессора (входной язык САПР УП);
- промежуточный язык «процессор – постпроцессор» (CL DATA);

- язык управления заданиями;
- монитор (диспетчер системы);
- системную сервис-библиотеку;
- базу данных.

*Процессор САПР УП* – программное изделие, предназначенное для решения общих геометрических и технологических задач, а также задач управления процессом обработки данных на ЭВМ. Результатом его работы является полностью рассчитанная траектория движения инструмента, представленная в промежуточном унифицированном виде. Для наиболее развитых САПР УП процессор состоит из четырех последовательно работающих блоков:

- трансляции;
- технологического;
- геометрического;
- формирования промежуточной программы.

*Блок трансляции* предназначен для ввода исходной информации с внешнего носителя или с экрана дисплея, синтаксического анализа операторов входного языка и выдачи сообщений об ошибках, преобразования исходной информации из символьной формы в машинные коды ISO 7bit.

*Технологический блок* решает задачи по выбору последовательности обработки, расчету оптимальных режимов резания, подбору режущего инструмента, нормированию операций, подготовке технологических документов, формированию технологических команд.

*Геометрический блок* ориентирован на решение задач, связанных с расчетом и построением траектории движения инструмента: определяет точки и линии пересечения различных геометрических элементов, проводит аппроксимацию кривых и таблично-заданных функций, обеспечивает построение эквидистантного контура с учетом размеров инструмента и заданного направления его движения, выполняет диагностирование геометрических ошибок.

*Блок формирования промежуточной программы* приводит информацию, полученную в предшествующих блоках, к стандартному виду и формирует данные для работы постпроцессора на языке CL DATA.

*Препроцессор САПР УП* – программное изделие, решающее определенные целевые задачи и формирующее исходные данные для процессора. Характерными задачами для препроцессора являются:

- перевод исходных данных из одной системы координат в другую (например, полярных в декартовы);

- проектирование операционных технологических процессов;
- разработка УП для группы деталей, различающихся только значениями отдельных параметров;
- решение специальных задач и т. д.

В современных САПР УП совместно с одним процессором могут работать несколько препроцессоров.

*Постпроцессор САПР УП* – программное изделие, предназначенное для адаптации УП к конкретному оборудованию с ЧПУ. В основные функции постпроцессора входит:

- считывание сформированных процессором данных на языке CL DATA и их обработка;
- формирование команд, обеспечивающих цикл смены инструмента;
- вывод информации УП для ее распечатки;
- диагностика ошибок;
- выполнение ряда сервисных функций (расчет машинно-оперативного времени УП, управление графопостроителем, вывод информации для контроля геометрии обрабатываемого контура и т. д.);
- принятие специальных решений, связанных с особенностями программирования для конкретной комбинации «станок–УЧПУ».

Для разработки управляющих программ к конкретным станкам с ЧПУ в состав САПР УП должна быть включена *библиотека соответствующих постпроцессоров*. По мере увеличения числа моделей станков с ЧПУ система пополняется новыми постпроцессорами. В некоторых САПР УП вместо библиотеки постпроцессоров применяют универсальные (обобщенные) постпроцессоры. Каждый из них предназначен для целой группы однотипных станков и устройств ЧПУ. Особенности моделей станков учтены в обобщенном постпроцессоре, разрабатываемом в соответствии со специальной анкетой, заполняемой технологом-программистом.

*Входной язык САПР УП* – проблемно-ориентированный язык, предназначенный для описания исходных данных о детали и технологическом процессе ее обработки на оборудовании с ЧПУ.

*Промежуточный язык «процессор–постпроцессор» (CL DATA)* – внутренний проблемно-ориентированный язык САПР УП, служащий для представления данных, передаваемых от процессора к постпроцессору.

*Язык управления заданиями* – язык оперативного управления работой системы (обеспечивает обработку заданий в пакетном и диа-

логовом режиме).

*Монитор* (диспетчер) системы – головной блок системы в оперативной памяти ЭВМ, основными функциями которого являются:

- обработка управляющей информации;
- автоматическая загрузка блоков из системных библиотек;
- передача промежуточных данных между блоками;
- обработка сбойных ситуаций, возникающих из-за неправильной организации пакета заданий и преждевременного прекращения работы некоторых блоков системы.

*Системная сервис-библиотека* – совокупность программ, решающих определенные задачи проектирования, например редактирование исходных данных и управляющих программ, графический контроль геометрической информации УП на графопостроителях или графических дисплеях и др.

*База данных* – информационные массивы, используемые более, чем в одной программе проектирования. Сюда входят сведения о станках, устройствах ЧПУ, инструментах, приспособлениях, обрабатываемых материалах и т. д. В процессе функционирования САПР УП база данных пополняется и корректируется. Используется база данных для автоматизации технологических решений.

Объединение систем автоматизированного конструирования, технологического проектирования с системами автоматизированного проектирования управляющих программ (системы CAD/CAM) позволяет в значительной степени ускорить процесс подготовки УП, повысить эффективность технологии изготовления деталей и практически полностью избежать ошибок в подготовке исходных данных.

#### 8.4. Характеристики САПР УП

Для оценки САПР УП выделяют следующие основные показатели:

- уровень автоматизации,
- адаптируемость,
- надежность,
- и оперативность.

*Уровень автоматизации САПР УП* определяется по характеру и объему решаемых технологических задач. Различают три уровня автоматизации САПР УП: низкий, средний и высокий. На *низком уровне* автоматически решаются только геометрические задачи. На *среднем уровне* автоматизации, кроме геометрических задач, решаются

некоторые технологические (назначение режимов обработки, выбор режущего инструмента, выбор черновых проходов и т. д.). На *высоком уровне* все геометрические и технологические задачи решаются автоматически. Количественно уровень автоматизации системы определяют отношением трудоемкости ручной подготовки УП к трудоемкости подготовки УП на ЭВМ.

*Адаптируемость САПР УП* характеризуется ее способностью настраиваться на условия пользователя, т. е. набором «потребительских» свойств системы. Определяющими признаками здесь являются:

- конфигурация ЭВМ,
- тип операционной системы,
- состав библиотеки препроцессоров и постпроцессоров,
- организация базы данных.

*Надежность САПР УП* определяется вероятностью получения качественной УП и зависит от ряда факторов. Основными из них являются надежность программного обеспечения и надежность контроля исходных данных. Последний фактор обеспечивается созданием простых и удобных конструкций входного языка САПР УП, а также разработкой специальных программ автоматического определения ошибок с помощью ЭВМ.

*Оперативность САПР УП* характеризуется минимальными затратами времени на разработку УП за счет непосредственного доступа технолога-программиста к ЭВМ.

САПР УП в процессе проектирования обеспечивает:

- расчет траектории движения центра режущего инструмента;
- определение подачи и частоты вращения шпинделя;
- формирование технологических команд управления станком;
- расчет и формирование технологических циклов выборки металла по различным схемам («петля», «зигзаг» и т. п.);
- расчет эквидистанты;
- расчет и формирование технологических циклов (нарезания резьбы резцом, обработки отверстий осевым инструментом, точение и растачивание, нарезания резьбы метчиком и т. п.);
- расчет и обработку аналитически и таблично заданных кривых;
- смену плоскости обработки;
- повторение участков обработки.

В составе систем предусмотрено использование аппарата макроопределений. Под макроопределением понимают программу обработки по типовой схеме (сверление групп отверстий, выборка колдцев и др.) или типового элемента детали, описанного конкрет-

ным геометрическим контуром (параболой, гиперболой, спиралью Архимеда и др.).

Технолог-программист на основе чертежа детали и данных технологии разрабатывает исходную программу (ИП). Исходная программа, являясь математической моделью для программирования обработки, задается в диалоговом режиме последовательно с декомпозицией сложных поверхностей деталей на геометрические элементы. При этом диалог состоит в последовательности запросов и указаний, содержащихся в меню и позволяющих описывать геометрию обрабатываемых поверхностей деталей, последовательность движений режущих инструментов, технологические режимы обработки, параметры инструмента и другую информацию.

Для разработки исходной программы в интерактивном режиме с использованием меню и экранных форм САПР УП, как правило, включает основные модули:

- базу данных геометрической информации и управляющих программ;
- геометрический редактор для построения плоских и объемных поверхностей;
- средства формирования траектории инструмента для различных видов обработки;
- средства объединения траекторий инструмента в инвариантную программу на языке системы;
- редактор текста инвариантной программы, обеспечивающий ее визуализацию;
- средства визуализации инвариантной программы;
- набор постпроцессоров, транслирующих инвариантную программу в управляющую программу станка с ЧПУ;
- генератор постпроцессоров.

База данных САПР УП обеспечивает хранение, обновление, удаление и другие функции обработки информации, создаваемой в процессе моделирования и подготовки управляющих программ.

Геометрический редактор предназначен для формирования в интерактивном режиме плоских и объемных геометрических примитивов: точек, отрезков прямых, многоугольников, дуг окружностей, плоских и пространственных кривых. С использованием этих примитивов описываются поверхности обрабатываемых заготовок деталей.

Для описания поверхностей детали в геометрическом редакторе его меню может содержать следующие основные разделы: утилиты

редактора, маркер, отрезок, дуга, кривая, контуры, измерить, преобразовать, пересечения, модифицировать, текст, примитивы, ввод/вывод и др.

## 8.5. Задание геометрической информации в САПР УП

Исходные данные для САПР УП представляют собой описание на специальном входном языке детали, заготовки и технологических переходов.

Описание детали и заготовки производится непосредственно по соответствующим чертежам, без каких-либо расчетов. Для задания порядка обработки детали технолог описывает в необходимой последовательности каждый технологический переход.

Процесс подготовки исходных данных можно условно разбить на следующие этапы:

- задание общей информации;
- задание геометрической информации;
- задание технологической информации.

Геометрическая информация представляет собой описание элементов (точек, прямых, окружностей), составляющих формообразующие контуры детали.

Обработка исходных данных осуществляется процессором системы, который решает следующие задачи:

- синтаксический, логический и геометрический контроль исходных данных с выдачей диагностических сообщений в случае обнаружении ошибок;
- построение контуров детали и заготовки;
- обработка данных информационной базы;
- построение траекторий движения инструментов;
- построение эквидистанты (при необходимости);
- расчет частоты вращения шпинделя;
- формирование технологических команд;
- формирование циклов (подпрограмм) для станков с устройствами ЧПУ типа CNC;
- нормирование операции.

Результатом работы процессора является УП на унифицированном промежуточном языке «процессор–постпроцессор» (массив данных CL DATA).

Преобразование массива данных CL DATA в УП для конкретной модели станка и устройства ЧПУ осуществляет соответствующий постпроцессор.

В результате проектирования получают:

- изображение контура детали и траекторий движения инструментов;
- карту кодирования информации с текстом управляющей программы;
- операционную карту;
- карту наладки инструментов;
- карту эскизов, содержащую эскиз обрабатываемой детали и схематическое изображение режущих инструментов.

Типовая последовательность разработки управляющих программ с использованием САПР УП содержит следующие операции:

- **в архиве данных создается папка (файл), в котором будет размещаться информация об обрабатываемой детали;**
- описывается геометрия детали с использованием геометрического редактора системы. При этом линии, описывающие поверхности детали, являются составными, образованными отрезками прямых, окружностей, других кривых, предусмотренных в редакторе системы. Линии, описывающие зоны обработки, объединяются в контуры. При необходимости используются преобразования геометрических элементов, включающие копирование, перенос, поворот, зеркальное отражение и др.;
- выполняются вспомогательные построения в геометрическом редакторе, например построение контуров, ограничивающих зону обработки, проекций кривых на плоскости, контуров прижимов, закрепляющих заготовку детали на столе станка и т. п.;
- к контурам поверхностей деталей строятся эквидистанты, определяющие границу перемещения инструмента с учетом ограничений зоны обработки. Строятся участки траекторий подхода инструмента к обрабатываемому контуру и отхода от него. Для карманов определяются области, обрабатываемые фрезой данного радиуса;
- формируются программы описания траектории перемещения инструмента при обработке заготовки детали;
- к описанной траектории перемещения инструмента добавляются отрезки, соединяющие ее с исходной точкой, а также технологические параметры (подача, частота вращения шпинделя, включение смазочно-охлаждающей жидкости и др.). Управляющие программы записываются в инвариантном коде;

- управляющая программа просматривается в редакторе программ и при необходимости корректируется. Затем на экране дисплея имитируется перемещение инструмента, т. е. осуществляется просмотр программы в динамике;
- производится постпроцессирование программы определенным постпроцессором, в результате получается окончательная управляющая программа в кодах устройства ЧПУ конкретного станка;
- редактирование управляющей программы.

Поэтому главное меню САПР УП должно содержать следующие пункты:

- работа с архивом данных;
- геометрический редактор и обработка;
- кодирование геометрической и технологической информации;
- построение исходной программы;
- редактирование исходной программы;
- визуализация;
- постпроцессоры;
- редактирование управляющей программы.

При описании геометрии детали проставляются все опорные точки, входящие в элементы контуров поверхностей деталей (две крайние точки отрезка прямой, три точки дуги окружности, базовые точки кривой линии – начальная и конечная, промежуточные точки, задающие характеристическую ломаную кривой).

Способ построения кривых линий определяется выбором одного из пунктов меню: эллипс, спираль Архимеда, эвольвента, кривая 2-го порядка, задание кривой в параметрическом виде, интерполяция, преобразование сплайна и др. Интерполяция позволяет по заданному множеству опорных точек, характеризующих кривую линию, провести сплайн так, что расстояние до него от любой опорной точки описываемой кривой будет меньше значения, указанного в таблице параметров. Количество узлов интерполирующего сплайна выбирается автоматически.

Использование пункта меню «Преобразование сплайна» позволяет аппроксимировать с заданной точностью кривую линию в контур, состоящий из гладко сопряженных дуг окружностей и отрезков и воспринимаемый устройством ЧПУ.

Конечной целью работы с геометрическим редактором системы является создание набора контуров, описывающих поверхности обрабатываемой заготовки детали. Условием возможности объединения двух простых элементов в контуре является совпадение коор-

динат хотя бы одного из концов элемента. Один и тот же элемент может входить в любое число контуров. Геометрический редактор позволяет также модифицировать контуры, полученные в результате других построений. При этом система предлагает все возможные варианты расположения, пересечения, сопряжения или касания указываемых технологом-программистом геометрических примитивов (точек, дуг окружностей, кривых линий) и ему необходимо определить только те, которые обеспечивают правильность описания геометрии детали.

С целью удобства работы технолога-программиста основное меню геометрического редактора САПР УП, как правило, содержит раздел «Утилиты редактора», в котором формализованы и объединены дополнительные геометрические операции с контурами и группами контуров, связанными с построением траектории обработки.

Типовыми примерами таких операций являются:

- построение контура, эквидистантного к одному или нескольким исходным контурам;
- скругление участков контура;
- вписывание фрезы в контур, эквидистантно сдвинутый на радиус фрезы относительно заданного контура;
- вписывание токарного резца в контур при построении траектории движения расчетной точки токарного резца при бесподрезной обработке контура с учетом ограничений;
- построение траектории подхода (отхода) инструмента к контуру и др.

При построении траектории подхода-отхода инструмента к контуру должны быть обеспечены следующие условия:

- фреза плавно по касательной подходит к точке начала обработки контура с тем, чтобы избежать подрезов стенок заготовки детали, вызванных деформацией фрезы при обходе участка контура;
- при программировании обработки контура с использованием коррекции на радиус инструмента в траекторию движения инструмента должен быть вставлен отрезок прямой, на котором включается коррекция. Этот отрезок должен быть перпендикулярен к контуру в точке начала его обработки или в начальной точке линии плавного подхода инструмента к контуру. Аналогично, участок отхода инструмента от контура должен иметь отрезок плавного выхода и следующий за ним прямолинейный участок включения коррекции.

Имеющиеся в настоящее время системы отличаются входными языками и определенным уровнем интеллектуализации интерфейса, характеризующими их возможности и области применения.

В некоторых САПР УП входной язык может быть алгоритмическим и по своей сущности близким к формально-словесному способу описания обработки. Основное достоинство этого способа состоит в том, что запись процесса обработки получается весьма наглядной и понятной для широкого круга специалистов, знакомых с обычной математической символикой и различными способами геометрических построений. С другой стороны, во входном языке САПР УП имеются строгие правила записи процессов обработки, благодаря чему устраняется опасность неоднозначного понимания сделанной записи. Такие САПР УП наиболее понятны технологом-программистам высокой квалификации.

Входной язык САПР УП содержит, как правило, следующие типы операторов:

- геометрические, включающие различные способы описания точек, прямых, окружностей, векторов, плоскостей, контуров, упорядоченных множеств точек, а также средства перехода из одной системы координат в другую;
- операторы движения, описывающие как позиционные перемещения инструмента из точки в точку, так и перемещения вдоль контуров, состоящих из отрезков прямых, дуг окружностей и других кривых;
- операторы преобразования, позволяющие осуществлять сдвиг, поворот, зеркальное отображение и масштабирование произвольных частей траектории движения инструмента;
- операторы управления, предназначенные для управления шпинделем, подачей, загрузкой и сменой инструмента и заготовок, охлаждением, технологическим остановом и т. п.;
- специальные операторы, включающие описание начала и конца программы, описание и вызов подпрограмм, условных и безусловных переходов, комментариев и др.

Каждый оператор образуется из основных элементов в соответствии с правилами, установленными синтаксисом входного языка.

Все слова входного языка можно разделить на две группы: главные и дополнительные.

Главные слова – определяют тип переменной, дополнительные – уточняют переменную в случае неоднозначности ее определения.

С помощью главных слов определяют следующие типы переменных:

- геометрические величины и поверхности (Т – точка, ПР – прямая, ОКР – окружность, ПЛ – плоскость и т. п.);
- стандартные функции (Sin, Cos и т. п.);
- операторы управления (ШПИНД/ВКЛ – включение шпинделя, УСКПОД – ускоренная подача, ЦИКЛ – вызов постоянного цикла и т. п.);
- операторы перемещения (ИДИ – начало обработки и т. п.);
- параметры обработки.

Дополнительные слова (модификаторы) обычно используются в качестве определителей или селекторов (условий выбора). Различают модификаторы положения геометрического элемента или режущего инструмента (СЛ – слева, СПР – справа, ХБ – «х – большее» и т. п.), перемещения (ПОЧС – по часовой стрелке, ПРЧС – против часовой стрелки и т. п.), действия (ВКЛ, ВЫКЛ, ОТМЕН и т. п.) и некоторые другие.

При описании процесса обработки на станках с ЧПУ приходится выполнять действия с различными объектами – переменными, функциями и т. п. Для удобства выполнения этих действий вводятся условные обозначения (идентификаторы). Идентификатор присваивается объекту в момент его определения с тем, чтобы иметь возможность ссылаться на этот объект в случае использования его в последующих операторах. Идентификаторы используют для обозначения простых скалярных и геометрических переменных, индексированных скалярных и геометрических переменных, обрабатываемого контура, подпрограмм и др. Например, оператор  $T1 = T / 50, 100, 80$  определяет точку, координаты  $X, Y, Z$  которой соответственно равны 50, 100, 80. Последующие операторы исходной программы могут обращаться к этой точке, используя идентификатор T1.

В процессе проектирования УП система использует данные из информационной базы (анкеты станков, инструментов, материалов, приспособлений) для выбора параметров режущего инструмента и назначения режимов обработки. В случае необходимости технолог может задавать в исходных данных информацию, отличающуюся от содержащейся в анкетах.

### 8.6. Задание элементов контура

При задании элементов геометрического контура имеется вероятность нескольких вариантов решений. Для выбора приемлемого

из них при определении геометрических объектов в языке САПР УП могут использоваться следующие модификаторы:

- ХБ, ХМ, УБ, УМ – устанавливают соотношение указанных координат ( $X$  или  $Y$ ) двух точек. Использование этих модификаторов равносильно знакам «>», «<» и означает выбор той точки, координаты которой удовлетворяет требованию;
- СЛ, СПР – указывают положение объекта (слева, справа) относительно направленной прямой. Они используются в тех случаях, когда необходимо указать, с какой стороны окружности находится одна из двух возможных точек касания;
- НАР, ВН – указывают относительное положение двух касательных окружностей (НАР означает, что касание наружное, ВН – что одна из окружностей целиком находится внутри другой);
- БОЛЬШЕ, МЕНЬШЕ – позволяют выбрать окружность с большим или меньшим радиусом;
- ПРЛ (параллельно), ПРП (перпендикулярно), УГ (угол), РАСТ (расстояние), ЦТР (центр), ПРС (пересечение), КАС (касание), ХОУ (плоскость ХОУ), ПО (по точку, следующую за этим модификатором), РАД (радиус) – используются для уточнения способа определения геометрического объекта. Модификаторы ПРЛ, ПРП, ПРС, КАС уточняют взаимное расположение двух объектов, остальные придают определенный смысл скалярным или геометрическим переменным, перед которыми они указываются;
- КРУГ (круговое); ЛИН (линейное); РО (координата  $\rho$ ); РОФИ (координаты  $\rho, \psi$ ; СЛОЖН (сложное) – определяют вид упорядоченного множества точек или вид полярных координат.

Для упрощения программирования могут использоваться операторы местной системы координат (МСК), которые дают возможность описывать геометрические объекты в удобной системе координат с последующим автоматическим пересчетом в систему координат детали.

Оператор имеет вид: МСК / идентификатор матрицы

Оператор МСК служит признаком начала преобразования всех определяемых после него геометрических объектов до оператора МСК/ОТМЕН, который является признаком окончания данного преобразования, т. е. перехода в основную систему координат (систему координат детали).

Вид преобразования задается соответствующей матрицей, идентификатор которой указан в операторе МСК. Это преобразование может быть любой комбинацией вращения, параллельного переноса, зеркального отображения, масштабирования и указывается в

операторе МАТР, модификаторы которого определяют вид матрицы преобразования системы координат:

- ВРАЩ  $XU$  – вращение в плоскости  $XOU$ ;
- ВРАЩ  $YZ$  – вращение в плоскости  $YOZ$ ;
- ВРАЩ  $ZX$  – вращение в плоскости  $ZOX$ ;
- МАСШТ – масштабирование;
- СДВИГ – сдвиг (параллельный перенос);
- ЗЕРК – зеркальное отражение.

Имеется также возможность преобразования траектории движения инструмента с повторением отдельных участков траектории и дополнительными преобразованиями.

В качестве примера рассмотрим принятое в САПР УП «PRAMEN» задание контуров деталей типа «тела вращения», которые можно описать, используя только прямые и окружности (рисунок 8.4).

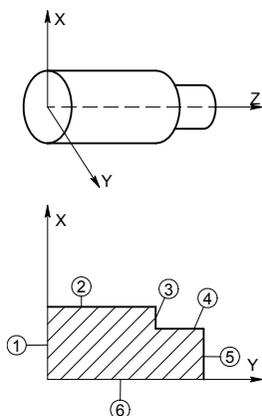


Рисунок 8.4 – Контур детали типа «тел вращения»

Каждому геометрическому элементу технолог должен присвоить номер. У двух различных прямых, окружностей или у прямой и окружности не должно быть одинаковых номеров.

При описании элемента может понадобиться задание точки. Номер точки может совпадать с номером прямой или окружности, но не должен повторять номер другой точки.

Нумерация элементов должна производиться по часовой стрелке, начиная с крайнего левого элемента (обычно это левый торец детали).

Контур должен быть замкнут. Если деталь или заготовка не имеют сквозного отверстия, то их контуры замыкают осью вращения.

Рекомендуется присваивать соседним элементам последовательно возрастающие номера, однако выполнение этого условия необязательно.

Номер элемента не должен быть больше 999. общее количество геометрических элементов в исходных данных не должно превышать 150.

Так как «тела вращения» симметричны относительно оси, то описание половины сечения дает полное представление о детали. В системе принято рассматривать верхнюю половину сечения детали вне зависимости от расположения суппорта относительно оси вращения шпинделя. Описание элементов ведется в системе координат  $Z - X$ . Начало координат располагается в центре левого торца детали, ось  $Z$  совпадает с осью вращения шпинделя (рисунок 8.4). Положение каждого геометрического элемента должно быть однозначно определено в указанной системе координат.

Язык системы позволяет описывать точки, прямые и окружности, используя информацию чертежа без какого-либо пересчета. Кроме контура детали необходимо описывать контур заготовки. Часть его элементов может совпадать с элементами контура детали, остальные – необходимо описать дополнительно. Описание геометрических элементов и контуров (детали и заготовки) может быть размещено в любом месте исходных данных и в любой последовательности.

Для удобства чтения и проверки исходных данных рекомендуется описывать в порядке возрастания номеров сначала элементы детали и ее контур, затем элементы и контур заготовки. При необходимости задания других геометрических элементов, не входящих в контуры, они описываются там, где это удобно технологу.

В таблице 8.1 приведен пример принятых в языке САПР ТП обозначений, используемых при задании точек, прямых и окружностей.

Таблица 8.1 – Задание на входном языке точек, прямых и окружностей

Т	– точка	ПЕР	– перпендикулярно
ПР	– прямая	ПАР	– параллельно
КР	– окружность	КОНЦ	– концентрично
Д	– диаметр	R	– радиус
Г	– градус	X	– координата X
М	– минута	Z	– координата Z
С	– секунда	ХМ	– координата X меньше
Ч	– через	ХБ	– координата X больше
Ц	– центр	ZM	– координата Z меньше
К	– касательно	ZБ	– координата Z больше

Способы задания точек приведены в таблице 8.2, прямых – в таблице 8.3, окружностей – в таблице 8.4.

Номер элемента записывается в графе «КОД», описание элементов – в графе «ОПИСАНИЕ».

Двоеточие между номером и описанием в таблицах означает, что эти записи указываются в соседних графах. Двоеточие соответствует вертикальной линии – разделителю граф. Кроме двоеточий для упрощения изложения материала в таблицах 8.2, 8.3, 8.4 в тексте введены скобки вида <...>. В такие скобки заключается сообщение о том, какая информация должна задаваться на месте этих скобок. Непосредственно при кодировании такие скобки не используются.

Углы, используемые при описании элементов, задаются следующим образом:

$$\pm\alpha\beta\gamma\text{С},$$

где  $\alpha$  – число градусов;

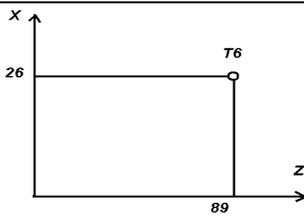
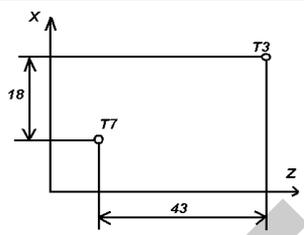
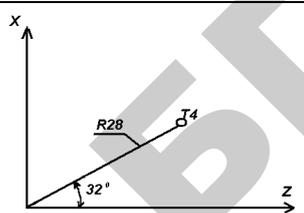
$\beta$  – число минут;

$\gamma$  – число секунд.

Отсчет угла ведется от положительного направления оси Z. Если угол откладывается против часовой стрелки, то его величина считается положительной и задается со знаком «+» или без знака; если по часовой стрелке, то угол считается отрицательным и его величина задается со знаком «-». Аналогичным способом определяется знак при задании углового положения прямой конусностью.

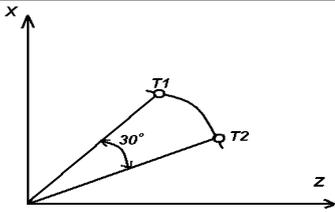
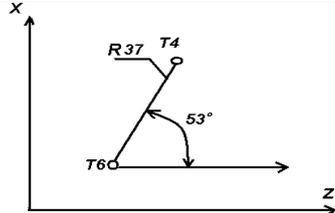
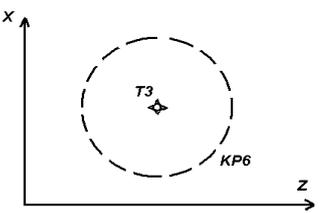
Методические подходы описания геометрических объектов и составления исходных программ носят общий характер. Каждая из существующих САПР УП со своими достоинствами и недостатками может отличаться от других операторами входного языка, соответствующих установленному в них синтаксису, однако методики описания геометрических объектов и разработки программ являются аналогичными описанным выше.

Таблица 8.2 – Способы задания точек

Способы задания точек	Задание в общем виде	Примеры
Координатами	$TN : z, x$	 <p><math>T6:89,26</math> или <math>T6:89,Д52</math></p>
Приращениями координат относительно другой точки	$TN : Tn, \Delta z, \Delta x$	 <p><math>T3:T7,43,18</math></p>
Полярными координатами	$TN : Rr, \pm\alpha\Gamma$	 <p><math>T4:R28,32\Gamma</math></p>

184

Продолжение таблицы 8.2

Способы задания точек	Задание в общем виде	Примеры
Приращением угла относительно другой точки	$TN : Tn, \pm\alpha\Gamma$	 <p><math>T2:T1, -30\Gamma</math></p>
Полярными координатами с началом координат в точке $Tn$	$TN : Tn, Rr, \pm\alpha\Gamma$	 <p><math>T4:T6, R37,53\Gamma</math></p>
Центром окружности	$TN : Ц, KPn$	 <p><math>T3:Ц, KP6</math></p>

Окончание таблицы 8.2

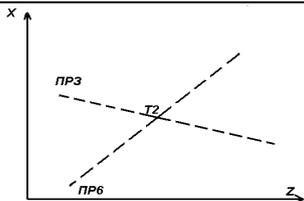
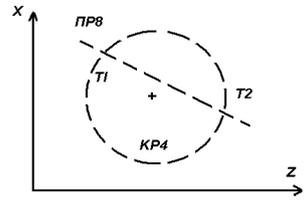
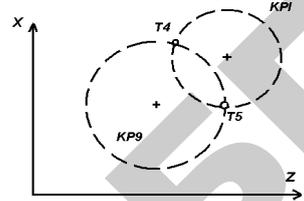
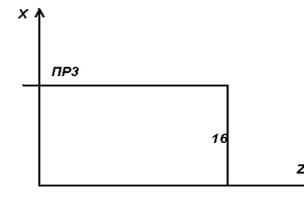
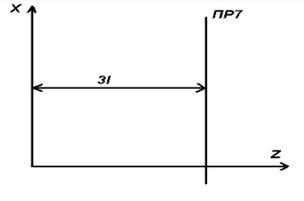
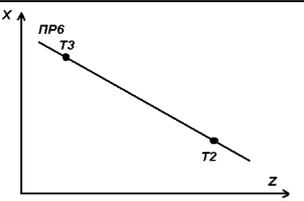
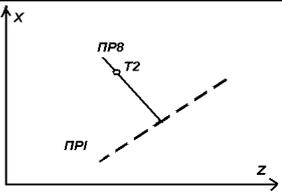
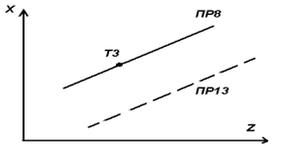
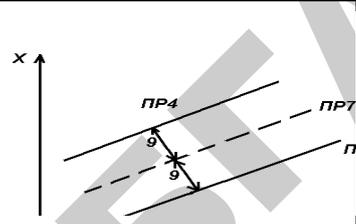
Способы задания точек	Задание в общем виде	Примеры
Пересечением прямых линий	$TN : PPn1, PPn2$	 <p><math>T2:PP3, PP6</math></p>
Пересечением (касанием) прямой и окружности	$TN : PPn1, KPn2, <признак>$ Признак определяет положение искомой точки относительно второй возможной точки пересечения заданных элементов (при касании элементов признак опускается)	 <p> <math>T1:PP8, KP4, ZM</math>  <math>T2:PP8, KP4, XM</math> </p>
Пересечением двух окружностей	$TN : KPn1, KPn2, <признак>$ Признак определяет положение искомой точки относительно второй возможной точки пересечения заданных элементов (при касании окружностей признак опускается)	 <p> <math>T4:KP9, KP1, ZM</math>  <math>T5:KP9, KP1, XM</math> </p>

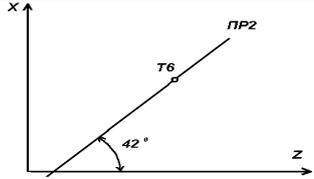
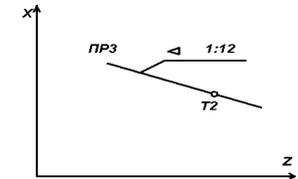
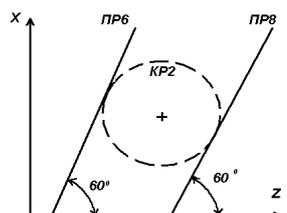
Таблица 8.3 – Способы задания прямых линий

Способы задания прямых линий	Задание в общем виде	Примеры
Координатой X или диаметром (прямая, параллельная оси Z)	$N : Xx$ или $N : Dd$	 <p> <math>3:X16</math>                      или  <math>3:D32</math> </p>
Координатой Z (прямая параллельная оси X)	$N : Zz$	 <p><math>7:Z31</math></p>
Двумя точками	$N : Ч, Tn1, Tn2$	 <p><math>6:Ч, T3, T2</math></p>

Продолжение таблицы 8.3

Способы задания прямых линий	Задание в общем виде	Примеры
Точкой и прямой, перпендикулярной к искомой прямой	$N : Ч, T_n, ПЕР, ПРm$	 <p>8:Ч, T2, ПЕР, ПР1</p>
Точкой и прямой, параллельной искомой прямой	$N : Ч, T_n, ПАР, ПРm$	 <p>8:Ч, T3, ПАР, ПР13</p>
Прямой, параллельной искомой, и расстоянием между ними	$N : ПАР, ПРn, a, <признак>$ (a – расстояние) Признак определяет положение искомой прямой относительно заданной прямой (например, если искомая прямая лежит выше заданной, то следует записать признак ХБ)	 <p>4:ПАР, ПР7, 9, ХБ 2:ПАР, ПР7, 9, ХМ</p>

Продолжение таблицы 8.3

Способы задания прямых линий	Задание в общем виде	Примеры
Точкой и углом между искомой прямой и положительным направлением оси Z	$N : Ч, T_n, \pm\alpha\Gamma$	 <p>2:Ч, T6, 42Г</p>
Точкой и конусностью	$N : Ч, T_n, \pm\Delta d/\Delta z$	 <p>3:Ч, T2, - 1/12</p>
Окружностью, касательной к искомой прямой и углом между этой прямой и положительным направлением оси Z	$N : К, КРn, \pm\alpha\Gamma, <признак>$ Признак определяет положение точки касания искомой прямой и заданной окружности относительно центра этой окружности	 <p>6:К, КР2, 60Г, ZM 8:К, КР2, 60Г, ZM</p>

Окончание таблицы 8.3

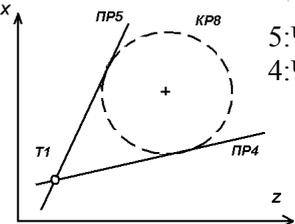
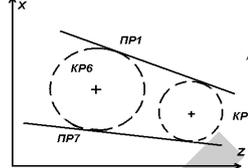
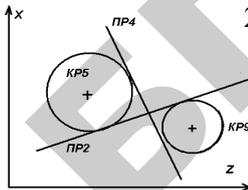
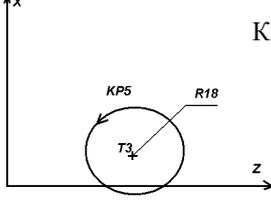
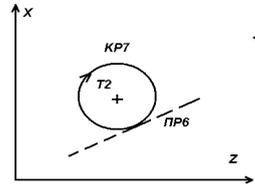
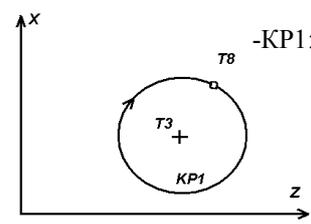
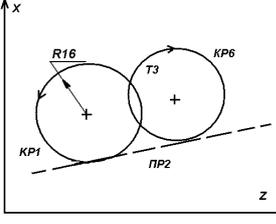
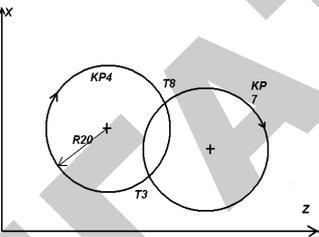
Способы задания прямых линий	Задание в общем виде	Примеры
Точкой и касательной окружностью	$N : Ч, Tn, K, KPrn, <признак>$ Признак определяет положение точки касания искомой прямой и заданной окружности относительно точки касания этой же окружности с другой прямой, проходящей через заданную точку (если заданна принадлежит окружности, опускается)	 <p>5:Ч, T1, K, KPr8, ZM                      4:Ч, T1, K, KPr8, XM</p>
Двумя окружностями, касательными к искомой прямой	$N : K, KPrn1, KPrn2, <признак-1>, <признак-2>$ Признак-1 определяет положение точки касания искомой прямой с окружностью KPrn1 относительно прямой, проходящей через центры заданных окружностей Признак-2 определяет положение точки касания искомой прямой с окружностью KPrn2 относительно прямой, проходящей через центры заданных окружностей	 <p>1:K, KPr6, KPr3, XB, XB                      7:K, KPr6, KPr3, XM, XM</p>  <p>4:K, KPr5, KPr9, XB, XM                      2:K, KPr5, KPr9, XM, XB</p>

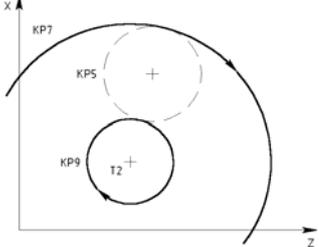
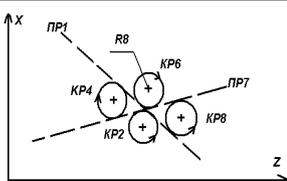
Таблица 8.4 – Способы задания окружностей

Способы задания окружностей	Задание в общем виде	Примеры
Центром и радиусом	$\pm KPN : Tn, Rr$	 <p>KPr5:T3, R18</p>
Центром и прямой, касательной к исходной окружности	$\pm KPN : Tn, K, PPrn$	 <p>-KPr7:T2, K, PPr6</p>
Центром и точкой, через которую проходит искомая окружность	$\pm KPN : Tn1, Ч, Tn2$	 <p>-KPr1:T3, Ч, T8</p>

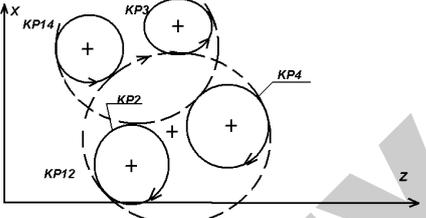
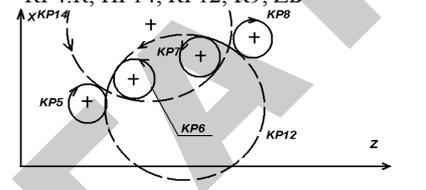
Продолжение таблицы 8.4

Способы задания окружностей	Задание в общем виде	Примеры
<p>Радиусом, касательной прямой и точкой, через которую проходит искомая окружность</p>	<p><math>\pm KPN : K, PP_n, \checkmark, T_m, R_r, &lt;признак&gt;</math>                      Признак определяет положение центра искомой окружности относительно центра второй возможной окружности, проходящей через заданную точку, касательно заданной прямой</p>	 <p>KP1:K, PP2, <math>\checkmark</math>, T3, R16, ZM                      -KP6:K, PP2, <math>\checkmark</math>, R16, XB</p>
<p>Радиусом и двумя точками, через которые проходит искомая окружность</p>	<p><math>\pm KPN : \checkmark, T_{n1}, T_{n2}, R_r, &lt;признак&gt;</math>                      Признак определяет положение центра искомой окружности относительно центра второй возможной окружности с тем же радиусом, проходящей через заданные точки</p>	 <p>-KP4:<math>\checkmark</math>, T8, T3, R20, ZM                      -KP7:<math>\checkmark</math>, T8, T3, R20, ZB</p>

Продолжение таблицы 8.4

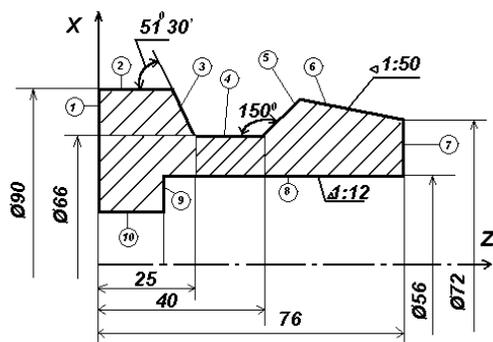
Способы задания окружностей	Задание в общем виде	Примеры
<p>Центром и окружностью, касательной к искомой окружности</p>	<p><math>\pm KPN : T_n, K, KP_m, &lt;признак&gt;</math>                      Признак определяет положение точки касания относительно центра заданной окружности (если центр искомой окружности принадлежит заданной окружности, признак опускается)</p>	 <p>-KP9:T2, K, KP5, ZM                      -KP7:T2, K, KP5, XB</p>
<p>Радиусом и двумя пересекающимися прямыми, касательными к искомой окружности</p>	<p><math>\pm KPN : K, PP_{n1}, PP_{n2}, &lt;признак-1&gt;, &lt;признак-2&gt;</math>                      Признак-1 определяет положение центра искомой окружности относительно прямой PPn1. Признак-2 определяет положение центра искомой окружности относительно прямой PPn2</p>	 <p>KP2:K, PP1, PP7, R8, ZM, XM                      -KP4:K, PP1, PP7, R8, ZM, XB                      -KP6:K, PP1, PP7, R8, ZB, XB                      -KP8:K, PP1, PP7, R8, ZB, XM</p>

Окончание таблицы 8.4

Способы задания окружностей	Задание в общем виде	Примеры
<p>Радиусом и двумя окружностями, касательными к искомой окружности</p>	<p><math>\pm K P_n : K, K P_n, K P_n 2, R_r, \langle \text{признак} \rangle</math>                      Признак определяет положение центра искомой окружности относительно прямой, проходящей через центры заданных окружностей                      Выбор внутреннего и внешнего касания искомой окружности с каждой из заданных окружностей производится алгоритмически с учетом направлений обхода окружностей</p>	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;">  <p style="margin-top: 10px;">                         KP1:K, ПР14, KP12, R9, ZM                          -KP2:K, ПР14, KP12, R9, ZM                          KP3:K, ПР14, KP12, R9, ZБ                          -KP4:K, ПР14, KP12, R9, ZБ                     </p>  <p style="margin-top: 10px;">                         -KP5:K, ПР14, KP12, R9, ZM                          KP6:K, ПР14, KP12, R9, ZM                          -KP7:K, ПР14, KP12, R9, ZБ                          KP8:K, ПР14, KP12, R9, ZБ                     </p> </div>

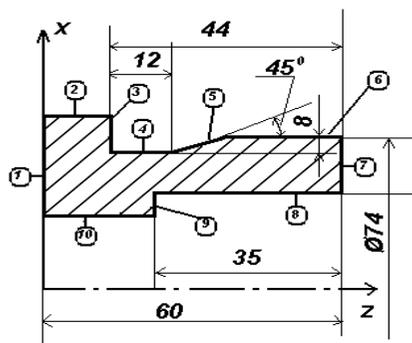
РЕПОЗИТОЙ

На рисунках 8.5 и 8.6 приведены примеры различных способов описания геометрических элементов.



- 3: Ч, 25, Д66, -51Г30М
- 5: Ч, 40, Д66, 30Г,
- 6: Ч, 76, Д72, -1/50
- 8: Ч, 76, Д56, 1/12

Рисунок 8.5 – Пример задания прямой, расположенной под углом к оси Z



- 3: Z (7)–44
- 4: X (6)–8
- 5: Ч, (3)+12, (6)–8, 45Г
- 6: Д74
- 7: Z60
- 9: Z (7)–35

Рисунок 8.6 – Пример задания координат расстояния от элементов контура

### 8.7. Функции САПР УП в составе гибких производственных систем

Достижения в развитии микроэлектроники открыли принципиально новые возможности для осуществления высокоэффективной автоматизации процессов механической обработки в непоточных многономенклатурных производствах. Реализация этих возможностей нашла отражение в создании высокопроизводительного техно-

логического оборудования с числовым программным управлением, и на его базе – гибких производственных систем (ГПС), являющихся основой создания автоматических цехов и предприятий.

Под ГПС (в соответствии с ГОСТ) понимают совокупность в разных сочетаниях оборудования с ЧПУ, роботизированных технологических комплексов, гибких производственных модулей, отдельных единиц технологического оборудования и систем обеспечения их функционирования в автоматическом режиме в течение заданного интервала времени, обладающую свойством автоматизированной переналадки при производстве изделий произвольной номенклатуры в установленных пределах значений их характеристик.

При разработке УП применяют персональные компьютеры, они более доступны технологу-программисту, занимают мало места и их можно располагать непосредственно в цеховых службах. Кроме того, персональные компьютеры используются также в качестве управляющих машин, что позволяет эффективно использовать их в составе ГПС.

Если чертеж детали выполнен с помощью системы автоматизированного проектирования, то при разработке управляющих программ используется математическое описание геометрии детали (математическая модель) путем ее непосредственного восприятия САПР УП. В этом случае рабочее место технолога-программиста сопряжено с интегрированной САПР более высокого уровня (системой CAD/CAM).

Из отечественного и зарубежного опыта следует, что ГПС в машиностроении используются для обработки широкой номенклатуры деталей, объединяемых технологической общностью и габаритами обрабатываемых поверхностей и запускаемых в производство партиями.

Структура операций, выполняемых ГПС, определяется технологическими возможностями станков, входящих в систему. Например, ГПС для обработки деталей типа «тела вращения» выполняет токарные и фрезерно-сверлильные операции.

Что касается мелкосерийного производства, то основные проблемы его автоматизации вызваны широкой номенклатурой обрабатываемых деталей и необходимостью частой переналадки оборудования. Это снижает эффективность использования ГПС в таком производстве.

Для обеспечения нормальной загрузки одного станка с ЧПУ в мелкосерийном производстве требуется подготовка и отладка до

200 управляющих программ в год. Первоочередными задачами, которые необходимо решить при создании ГПС в таком производстве, являются автоматизация технологической подготовки производства и сокращение времени переналадки станков. Предпосылкой успешного решения указанных задач является группирование деталей по конструктивно-технологическим признакам с целью организации их групповой обработки. Определяющим признаком при комплектовании в группы деталей является сходство выполняемых операций.

Эффект групповой технологии в условиях ГПС заключается в удовлетворении двух противоположных требований: разнообразия и стандартизации.

Обработка деталей по групповым технологиям в условиях гибких производственных систем имеет ряд преимуществ:

- использование групповых наладок, т. е. одних и тех же приспособлений и инструментов для деталей каждой отдельной группы;
- использование одного нулевого положения инструмента (или детали) и величин коррекции инструмента для обработки всех деталей группы;
- значительное сокращение времени на переналадку (при удачном подборе деталей в группу переналадка на обработку следующей партии деталей заключается в вызове другой управляющей программы из библиотеки программ);
- возможность распространения режимов резания, отработанных для операции на одной детали, на операции всех деталей группы.

В связи с тем, что детали, объединенные в группы, близки по технологическим признакам, изготавливаются из одинакового материала, достаточно разработать управляющую программу для одной детали-представителя группы и отразить в исходной информации для ЭВМ специальными пометками элементы, по которым детали группы отличаются друг от друга (обычно - геометрические элементы). В дальнейшем, при разработке управляющей программы для любой детали из технологической группы необходимо в исходной информации заменить размеры помеченных элементов действительными размерами конкретной детали. УП после использования можно либо сохранить в библиотеке программ ЭВМ, либо аннулировать, так как ее легко восстановить по управляющей программе на деталь-представитель.

Такие автоматизированные системы разработки технологии и управляющих программ позволяют эффективно и оперативно про-

водить все подготовительные работы для запуска последующей партии деталей за время обработки предыдущей партии.

Применение групповых методов обработки позволяет также использовать в составе ГПС эффективные автоматизированные устройства загрузки и контроля качества обрабатываемых деталей, что обычно затруднено в мелкосерийном производстве в связи с их широкой номенклатурой.

В средне- и крупносерийном производствах объем работ по подготовке и отладке управляющих программ, а также по переналадке станков с ЧПУ с обработки одной заготовки на другую, на порядок меньше, чем в мелкосерийном. При создании ГПС в этих производствах первоочередной задачей является автоматизация транспортно-складских операций, а также установка заготовок на станок и снятие готовых деталей. Поэтому при группировании деталей серийного производства определяющим является не только сходство выполняемых операций и подобие геометрической формы, но и близость размеров поверхностей, являющихся базовыми при транспортировании, установке и снятии деталей.

Таким образом, основой разработки управляющих программ для оборудования гибких производственных систем является принцип групповой технологии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Тимковский В.Г. Дискретная математика в мире станков и деталей. – Москва : Наука, 1992. – 145 с.
2. Красильникова, Г. Автоматизация инженерно-графических работ / Г. Красильникова, В.Самсонов, С. Тарелкин. – Санкт-Петербург : Издательство «Питер», 2000. – 256 с.
3. Майника, Э. Алгоритмы оптимизации на сетях и графах / Э. Майника. – Москва : Наука, 1981.–323с.
4. Банди, Б. Основы линейного программирования / Б. Банди. – Москва : Радио и связь. 1989.–176с.
5. Холод, Н.И. Пособие к решению задач по линейной алгебре и линейному программированию / Н.И. Холод. – Минск : Изд. БГУ, 1971. – 176 с.
6. Филонов, И.П. Проектирование технологических процессов в машиностроении : учеб. пособие для вузов / И.П. Филонов [и др.]; под ред. И.П. Филонова. – Минск : Технопринт, 2003. – 910 с.
7. Мрочек, Ж.А. Основы технологии автоматизированного производства в машиностроении : учеб. пособие / Ж.А. Мрочек, А.А. Жолобов, Л.М. Акулович. – Минск : Техноперспектива, 2008. – 303 с.
8. Корчак, С.Н. Системы автоматизированного проектирования технологических процессов, приспособлений и режущих инструментов : учебник / С.Н. Корчак [и др.]; под общ. ред. С.Н. Корчака. – Москва : Машиностроение, 1988. – 352 с.
9. Климович, Ф.Ф. Математическое моделирование технологических задач в машиностроении : учеб.-метод. пособие по лабораторным работам для студентов машиностроительных специальностей высших учебных заведений / Ф.Ф. Климович, А.Ф. Присевок. – Минск : БГПА, 2000. – 88 с.
10. Автоматизация проектирования технологических процессов и средств оснащения / под ред. А.Г.Раковича. – Минск : Институт технической кибернетики НАН Беларуси, 1997. – 276 с.
11. Аверченков, В.И. Автоматизация проектирования технологических процессов : учеб. пособие для вузов / В.И. Аверченков, Ю.М. Казаков – Брянск : БГТУ, 2004.
12. Система автоматизированного проектирования технологических процессов механической обработки деталей PRAMEN. Руководство пользователя. ОРГС 4664.013.ИЗ.

Учебное издание

**Акулович Леонид Михайлович**

## **КОМПЬЮТЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ И САПР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

*Пособие*

Ответственный за выпуск *В.М. Капцевич*  
Редактор, корректор *М.А. Макрецькая*  
Технический редактор *М.А. Макрецькая*  
Компьютерная верстка *М.А. Макрецькая*

Подписано в печать 21.05.2009 г. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman. Ризография.  
Усл. печ. л. 11,62. Уч.-изд. л. 9,09. Тираж 120 экз. Заказ 482.

Издатель и полиграфическое исполнение  
Белорусский государственный аграрный технический университет  
ЛИ № 02330/0131734 от 10.02.2006. ЛП № 02330/0131656 от 02.02.2006.  
220023, г. Минск, пр-т Независимости, 99, к. 2.