



Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Технологии машиностроения»

А. В. Петухов

## **ОСНОВЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

Учебное пособие по дисциплине «Системы автоматизированного проектирования технологических процессов» для студентов специальности 1-36 01 01 «Технология машиностроения» дневной и заочной форм обучения

Гомель 2017

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический университет  
имени П.О.Сухого»

Кафедра «Технология машиностроения»

А. В. Петухов

# **ОСНОВЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

**Учебное пособие по дисциплине «Системы автоматизированного проектирования технологических процессов» для студентов специальности 1-36 01 01 «Технология машиностроения» дневной и заочной форм обучения**

Гомель 2017

# Содержание

Введение .....	6
1 Особенности технологической подготовки машиностроительного производства .....	10
1.1 Направления развития машиностроения и роль подготовки производства .....	10
1.2 Основные термины и определения, используемые в САПР .....	17
1.3 Современные требования к ТПП и задачи ее автоматизации .....	19
1.4 Системы компьютерного проектирования в машиностроении .....	21
1.5 Интегрированные САПР .....	33
1.6 Уровни автоматизации проектирования технологических процессов .....	38
1.7 Стандарты ЕСТПП .....	40
Контрольные вопросы .....	40
2 Виды обеспечения САПР технологических процессов .....	42
2.1 Техническое обеспечение .....	43
2.2 Математическое обеспечение .....	46
2.3 Лингвистическое обеспечение .....	47
2.4 Информационное обеспечение .....	53
2.5 Программное обеспечение .....	60
2.6. Методическое и организационное обеспечение .....	71
Контрольные вопросы .....	72
3 Методические основы автоматизированного проектирования технологических процессов .....	74
3.1 Методы автоматизированного проектирования и состав САПР технологических процессов .....	74
3.2 Системный подход при проектировании технологических процессов .....	86
3.3 Исходная информация для проектирования технологических процессов .....	98
3.4 Методика описания изделий в САПР ТП .....	99
3.5 Последовательность компьютерного проектирования технологических процессов .....	100

3.5.1 Анализ исходных данных для разработки технологического процесса.....	101
3.5.2 Проектирование принципиальной схемы обработки детали (предварительное структурирование ТП).....	103
3.5.3 Выбор исходной заготовки и метода ее изготовления.....	105
3.5.4 Выбор технологических баз.....	106
3.5.5 Составление технологического маршрута обработки.....	107
3.5.6 Разработка технологических операций.....	111
3.5.7 Нормирование технологических операций.....	116
3.5.8 Разработка специальных средств поддержки технологического процесса.....	117
3.5.9 Соблюдение требований охраны труда.....	119
3.5.10 Расчет экономической эффективности технологического процесса.....	119
3.5.11 Оформление технологических процессов и (или) управляющих программ для станков с ЧПУ.....	120
3.6 Формализация задач технологического проектирования:.....	121
3.6.1 Цель формализации и постановка задач.....	121
3.6.2 Использование некоторых положений дискретной математики для решения задач технологического проектирования.....	128
3.6.3 Математическое моделирование в САПР технологических процессов.....	139
3.6.4 Этапы решения задач методом математического моделирования.....	163
3.6.5 Виды алгоритмов.....	167
3.6.6 Принятие решений при технологическом проектировании... ..	168
Контрольные вопросы.....	173
4 Основы оптимизации технологических проектных решений.....	176
4.1 Задачи оптимизации при проектировании технических объектов.....	176
4.2 Критерии оптимальности и методы оптимизации технологических процессов.....	178
4.3 Структурная оптимизация технологических процессов.....	188
4.3.1 Методические основы структурной оптимизации.....	188

4.3.2	Оптимизация выбора метода изготовления заготовки .....	190
4.3.3	Оптимизация выбора технологических операций .....	197
4.3.4	Выбор рациональной системы станочных приспособлений ..	209
4.4	Параметрическая оптимизация технологических процессов механической обработки .....	213
4.4.1	Основные технологические параметры оптимизации .....	213
4.4.2	Постановка задачи расчета оптимальных режимов обработки материалов резанием.....	213
4.4.3	Расчет оптимальных режимов резания методом линейного программирования .....	215
4.4.4	Оптимизация режимов механической обработки для дискретных значений параметров $v$ и $s$ .....	225
	Контрольные вопросы .....	228
	Список использованной литературы .....	232
	Приложение 1 – Виды ассоциативных поверхностей (элементов) .....	236
	Приложение 2 – Состав общих параметров, характеризующих детали машин класса «тела вращения» .....	237
	Приложение 3 – Закрепление за видами наружных элементарных поверхностей класса «тела вращения» характеризующих их параметров.....	239
	Приложение 4 – Фрагмент информационного массива, используемого для выбора ключевого слова технологического перехода и группы операций.....	241

## Введение

Главная задача современного машиностроительного производства – выпуск конкурентоспособной продукции. Это обуславливает необходимость частого (адекватного спросу рынка) обновления объекта производства и быстрого освоения его выпуска, обеспечивающих высокое качество и минимальную себестоимость. Следовательно, производство должно быть быстропереналаживаемым, преимущественно серийного характера. В серийном производстве требования высокой производительности и гибкости традиционно считались альтернативными. Однако использование робототехнических комплексов, станков с числовым программным управлением, гибких производственных модулей и систем стирает резкую грань между серийным и массовым производством по показателям производительности и уровню автоматизации, но при этом значительно увеличивается объем работ по подготовке производства и актуальной становится их автоматизация.

Основными технологическими процессами в машиностроении являются механическая обработка и сборка. На их долю приходится более половины общей трудоемкости изготовления машины. В ходе подготовки производства разрабатываются технологический процесс изготовления каждой детали и технологический процесс сборки каждой сборочной единицы, а также технологические процессы изготовления заготовок, термической обработки деталей, покраски изделий и т.п.

Основными задачами технологической подготовки производства на современном этапе являются:

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

Указанные задачи решаются путем автоматизации технологической подготовки производства и всего производственного процесса. Основная цель создания систем автоматизированного проектирования технологических процессов заключается в экономии труда технологов.

Теория автоматизированного проектирования различных технологических объектов (маршрутных и операционных технологических процессов, режимов резания, режущих инструментов, технологической оснастки, управляющих программ для станков с ЧПУ и т.п.) активно разрабатывалась с 60-х годов XX века. Основное внимание уделялось формализации методов проектирования и расчета

технологических задач, представлению информационной модели в виде необходимой технологической документации. Большой вклад в развитие автоматизации технологической подготовки производства внесли Г.К. Горанский, А.Г. Ракович, В.Д. Цветков, С.П. Митрофанов, Б.Н. Челищев, Н.М. Капустин и другие советские ученые. С появлением персональных ЭВМ и программно-технических средств обработки графической информации круг автоматизируемых технологических задач значительно расширился и стало возможным объединять различные этапы конструкторской и технологической подготовки производства путем создания интегрированных систем.

Во многих современных системах автоматизированного проектирования (САПР) технологических процессов предусмотрено накопление знаний в области технологии машиностроения. В них используются знания опытных технологов: разработанные ими технологические процессы служат аналогами при проектировании новых технологий. Это позволяет минимизировать затраты, сократить сроки разработки оптимальных технологических процессов и повысить общий уровень технологической подготовки производства. Кроме того, использование систем автоматизированного проектирования технологических процессов практически исключает ошибки субъективного характера, в десятки раз повышает производительность труда технолога-машиностроителя и гарантирует качество разрабатываемой технологической документации за счет более полного использования накопленных знаний в данной области.

Системы автоматизированного проектирования технологических процессов являются связующим звеном между известными подходами математического описания методов обработки и построения их алгоритмов, с одной стороны, и прикладными задачами технологического проектирования – с другой. Они основываются на знаниях инженерной и компьютерной графики, материаловедения и технологии конструкционных материалов, метрологии и стандартизации, технологии машиностроения, теории графов, линейного программирования.

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 производство, где технологический процесс представляет собой множество операций обработки на ряде станков.

Предприятие – это совокупность цехов и служб, а сами цехи и участки также являются дискретными объектами.

Одним из путей успешного внедрения интегрированных систем проектирования является реализация групповой технологии, основанной на использовании оборудования, планировании и организации производства по принципу технологической общности деталей. Если выпуск изделий осуществляется с использованием гибких производственных систем, то система автоматизированного проектирования должна, прежде всего, обеспечивать гибкость технологических процессов. Под гибкостью понимается возможность быстрого перехода на новые технологические процессы с учетом изменения факторов, определяющих качество выпускаемых деталей (точность, качество поверхностного слоя и др.) и производительность. Спроектированный технологический процесс должен оперативно реагировать на изменение производственных ситуаций выпуска изделий.

В основу каждой системы автоматизированного проектирования заложена определенная математическая модель, формализующая описание проектируемых изделий и процессов их изготовления. При решении технологических задач методом математического моделирования наиболее часто применяются алгоритмы поиска оптимальных путей в графах. Эти алгоритмы можно использовать в тех случаях, когда существует конечное число вариантов решения прикладной задачи, от выбора которых зависит значение некоторого критерия оптимальности, например, производительности, себестоимости, энергопотребления. 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. Производственные процессы обуславливают специфику методов их математического моделирования. Это приводит к существенному различию, как систем проектирования, так и условий их использования.

В лекционном курсе изложены основные подходы к автоматизации проектирования технологических процессов изготовления деталей в машиностроении. При этом основной акцент сделан на технологию механической обработки, приведены примеры автоматизированного проектирования технологических процессов механической обработки заготовок деталей машин и управляющих программ для станков с ЧПУ в T-Flex ЧПУ и TechnoPro. Последовательность изложения учебного материала обусловлена логическим восприятием задач технологической подготовки производства на предприятиях машиностроительных



отраслей: вначале приводятся сведения об особенностях технологической подготовки в машиностроительном производстве и методические основы автоматизированного проектирования технологических процессов, затем рассматриваются основы оптимизации технологических проектных решений.

В первой лекции рассматриваются направления развития машиностроения, современные требования к технологической подготовке производства и задачи ее автоматизации посредством использования систем компьютерного проектирования в машиностроении, приведены основные термины и определения, классификация САПР и уровни автоматизации проектирования технологических процессов, сведения о стандартах.

Во второй лекции описываются виды обеспечения САПР технологических процессов (техническое, математическое, лингвистическое, информационное, программное, методическое и организационное), необходимые для его функционирования на машиностроительных предприятиях.

В лекциях с третьей по пятую включительно изложены методические основы автоматизированного проектирования технологических процессов, описаны способы задания исходной информации для разработки технологических процессов и методы автоматизированного проектирования, приведена последовательность компьютерного проектирования технологических процессов, методические основы формализации проектных процедур при технологическом проектировании.

Лекции шестая, седьмая и восьмая посвящены описанию основ оптимизации технологических проектных решений. В них рассмотрены задачи оптимизации, критерии оптимальности и методы оптимизации технологических процессов, а также основы структурной и параметрической оптимизации технологических процессов механической обработки.

В конце каждой лекции приводятся вопросы, вынесенные на тестовый контроль для закрепления изложенного материала.

Данное учебное пособие призвано помочь студентам в изучении и освоении методов эффективного использования САПР для качественного решения традиционных технологических задач.

# **1 Особенности технологической подготовки машиностроительного производства**

Особенностью современного машиностроительного производства является необходимость частой сменяемости номенклатуры выпускаемых изделий, что вызвано потребностями рынка. В таких условиях предприятия машиностроительного профиля стремятся обеспечить гибкость производства и иметь технологическое оснащение, соответствующее требованиям серийного производства, что позволяет выпускать продукцию широкой номенклатуры. Однако условия жесткой конкуренции вынуждают минимизировать трудоемкость изготовления изделий, поэтому возросли требования к достижению высокой производительности в мелко- и среднесерийном производстве. Это особенно актуально на стадии подготовки производства в связи с непрерывным увеличением ее доли затрат в себестоимости продукции серийных производств. Основной составляющей в трудоемкости подготовки производства являются затраты инженерного труда на проектирование технологических процессов.

Наметились три направления решения проблемы повышения эффективности инженерного труда в сфере проектирования:

- рационализация системы проектирования, включая систематизацию самого процесса проектирования и улучшение организации труда инженера-проектировщика;
- комплексная автоматизация формальных, нетворческих функций инженера-проектировщика;
- разработка имитационных моделей для воспроизводства на компьютерах умственной деятельности человека, его способности принимать решения в условиях полной или частичной неопределенности проектных ситуаций, разработки эвристических алгоритмов, позволяющих качественно решать сложные задачи проектирования при введении определенных ограничений.

## **1.1 Направления развития машиностроения и роль подготовки производства**

Удовлетворение требований высокой мобильности и производительности достигается путем автоматизации производственных процессов за счет широкого использования станков с ЧПУ, гибких производственных модулей, робототехнических комплексов и гибких производственных систем (ГПС).

Основой производственных процессов являются автоматизированные технологические процессы механической обработки и сборки, обеспечивающие высокую производительность и необходимое качество изделий. Современное машиностроение развивается в направлении автоматизации производства, внедрения гибких технологий, позволяющих быстро и эффективно перестраивать технологические процессы на изготовление новых изделий [3, 29].

Под гибкостью понимается возможность быстрого перехода на новые технологические процессы в связи с изменением факторов, определяющих качество выпускаемых деталей, производительность. При изменении конструктивных параметров детали ГПС должны количественно и качественно перенастраиваться в сжатые сроки при минимальных затратах.

Таким образом, тенденцией современного этапа автоматизации проектирования является создание комплексных систем, включающих конструирование изделий, технологическое проектирование и изготовление изделий в ГПС. Спроектированный технологический процесс должен оперативно реагировать на изменение производственных ситуаций изготовления изделий.

Автоматизация проектирования технологии и управления производственными процессами – один из основных путей интенсификации производства, повышения его эффективности и качества выпускаемой продукции. Использование ГПС и технологических модулей позволяет изготавливать детали в любом порядке и варьировать их выпуск в зависимости от производственной программы, сокращает затраты и время на подготовку производства, повышает коэффициент использования оборудования, изменяет характер работы персонала, повышая удельный вес творческого, высококвалифицированного труда [4, 21, 22].

Одна из тенденций современного этапа проектирования – создание комплексных систем автоматизированного проектирования и изготовления, включающих конструирование изделий, технологическое проектирование, подготовку управляющих программ для оборудования с ЧПУ, изготовление деталей, сборку узлов и машин, упаковку и транспортирование готовой продукции.

В основу производственной деятельности предприятий машиностроительных отраслей заложена предметная специализация. Производственные структуры таких предприятий характеризуются:

- отсутствием ярко выраженной технологической специализации производств;

– недостаточной гибкостью оборудования при переходе предприятия к выпуску новой продукции.

Переход на выпуск принципиально новой продукции в условиях сложившихся производственных структур требует коренной перестройки с привлечением дополнительных инвестиций. В рыночных условиях на смену постоянным организационным структурам промышленных предприятий с предметной специализацией должна прийти переменная структура. В этом случае промышленное производство представляется как система предприятий корпоративного типа, состоящая из головного предприятия, определяющего вид выпускаемой продукции, и набора технологически специализированных предприятий. Состав и количество таких предприятий определяются видом выпускаемых изделий. Такая структура легко изменяется в зависимости от запросов рынка. Ее формирование тесно связано с особенностями современного машиностроительного производства:

– создается сфера информационных технологий инжиниринга, рынка предоставления информационных услуг, которые превращаются в самостоятельную отрасль, имеющую приоритетное значение для развития машиностроения;

– наука становится самостоятельным элементом производительных сил общества. Растет объем производства наукоемких изделий. Их разработки базируются на опережающих фундаментальных исследованиях, а не на ранее доминирующем эмпирическом подходе к созданию новых изделий;

– в качестве важнейшего фактора развития предприятий выступает конкуренция при регулирующей роли государства;

– происходит реструктуризация предприятий на основе рыночных законов экономики. Структура предприятия обеспечивает выполнение полного жизненного цикла изделий. Корпоративные стремления находят развитие в виде создания виртуальных предприятий;

– индивидуализация заказов, частая сменяемость изделий приводят к повышению доли затрат на технологическую подготовку производства и относительно уменьшению трудоемкости изготовления продукции;

– основными показателями эффективности деятельности предприятий становятся время и надежность сроков выполнения заказов, качество и себестоимость изделий;

– возрастает роль информационных технологий инжиниринга, существенным образом влияющих на все основные показатели экономики предприятия;

– развитие кооперации между предприятиями и расширение рынков сбыта изделий приводят к необходимости создания единой информационной базы.

Таким образом, современный этап развития машиностроения характеризуется необходимостью обеспечения конкурентоспособности производимой продукции, что означает оперативное реагирование производства на изменение потребительского спроса, обеспечение качества, снижение себестоимости производимой продукции при существенном сокращении сроков ее выпуска. Эта проблема предусматривает решение задачи сокращения времени на технологическую подготовку производства (ТПП), направленную, прежде всего, на расширение номенклатуры выпускаемой продукции при снижении величины партий, что требует создания быстропереналаживаемых производственных систем. 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.

Производственные системы в условиях серийного производства ориентированы на возможность выпуска достаточно широкой номенклатуры изделий. Каждая производственная система изначально ориентирована на выпуск определенных видов изделий и имеет технологическое оборудование, выполняющее технологические процессы конкретного вида и организационно не связанное между собой. Поэтому стоит задача разработки методов обеспечения быстрой переналадки и адаптации производственных систем для изготовления деталей широкой номенклатуры с различной программой выпуска. Изделия с большим объемом выпуска также целесообразно изготавливать в условиях гибкого производства, начиная с небольших партий. Это позволяет «довести» конструкцию изделия, отработать технологичность и тем самым сократить время освоения объема выпуска.

**Технологическая подготовка, является основной частью технической подготовки производства.** При этом главная задача ТПП – обеспечение освоения выпуска нового изделия в короткие сроки и с наименьшими затратами. ТПП включает: разработку технологических процессов, проектирование и изготовление средств технологического оснащения, обеспечивающих технологическую готовность предприятий к выпуску изделий заданного качества при установленных сроках, объемах и затратах.

При поверхностном взгляде технологическая подготовка производства включает:

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

Содержание, объем и организация ТПП во многом зависят от типа производства. В единичном и мелкосерийном производствах объем технологической подготовки составляет около 25%, в серийном – 40-50%, в крупносерийном и массовом – 60-70% от всего объема работ по технической подготовке производства новых изделий [2, 11, 21, 23, 34].

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 ТПП сокращает трудоемкость изготовления деталей и сборки изделия, длительность производственного цикла, снижает себестоимость изготовления продукции и производственный брак, уменьшает расход металла, повышает качество машин и т.д.

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 оборудования и оснастки на других предприятиях.

В комплексе работ по ТПП можно выделить следующие основные этапы:

- организация и управление ТПП;
- конструкторско-технологический анализ изделия;
- обеспечение технологичности конструкции изделия;
- организационно-технический анализ производства;
- проектирование технологических процессов;
- разработка технологических нормативов;
- проектирование средств технологического оснащения;
- изготовление технологической оснастки;
- отладка технологического оборудования.

С функциональной точки зрения значение этапа *проектирования технологических процессов* наиболее велико. Разработанные

технологические процессы определяют методы обеспечения точности при сборке и 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 этапам 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, проектирование технологических процессов является центральным звеном всей системы ТПП и решающим образом влияет на сроки подготовки и освоения новых изделий, повышение их качества и конкурентоспособность.

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, получаемых 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, управляющих программ и оснастки, изготовление пробной партии изделий.

При этом первостепенное значение приобретает максимальное уменьшение длительности циклов подготовки производства. Использование вычислительной техники при ТПП обусловлено необходимостью сокращения ее сроков, снижения трудоемкости и многовариантности технологического проектирования, быстрого поиска оптимального проектного решения. Все это требует коренных изменений методов проектирования. Наибольший эффект от применения ЭВМ при разработке технологических процессов достигается при комплексном

решении технологических задач. Поэтому используемые системы ТПП являются подсистемами автоматизированной системы управления (АСУ) предприятием [2, 11, 23].

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

*Таблица 1.1*

Ориентировочная усредненная трудоемкость выполнения этапов ТПП

Технологическая задача	Время, ч	
	минимальное	максимальное
Разработка технологии:		
маршрутной	1	22
операционной	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

По мере совершенствования конструкций машин и ужесточения технических требований, предъявляемых к ним, усложняются технологические задачи и повышаются требования к квалификации инженеров-технологов. В то же время сроки, отводимые для ТПП, часто бывают весьма ограничены, что обусловлено рыночной конкуренцией. Вследствие этого возрастает степень влияния ТПП на эффективность деятельности предприятия и его конкурентоспособность.

В этих условиях нет альтернативы использованию систем автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП) изготовления изделий.

В проектных, конструкторских и технологических организациях, на предприятиях САПР ТП используют:

– для повышения качества проектируемой и выпускаемой продукции;



– повышения технико-экономического уровня объектов проектирования;

– уменьшения сроков и трудоемкости проектирования.

Независимо от типа производства технологический процесс, относящийся к изделиям одного наименования, типоразмера и исполнения, называется единичным. При разработке единичных технологических процессов каждый раз решаются все задачи технологического проектирования: выбор вида заготовки и последовательности операций, назначение типов оборудования, проектирование технологической оснастки и т.д.

*Технологическая подготовка на базе единичных технологических процессов* предусматривает проектирование единичных технологических процессов на всю номенклатуру деталей, подлежащих запуску в производство. Однако в зависимости от типа производства, сложности изделий и сроков на технологическое проектирование степень глубины проработки задач проектирования различна. Для единичного производства, как правило, достаточно разработать маршрутные ведомости, для серийного – маршрутные, маршрутно-операционные или операционные технологические процессы, а для массового – подробные технологические процессы (выполняются все работы ТПП).

При ТПП на базе единичных технологических процессов объем работ, выполняемый на этапе технологического проектирования, велик. Поэтому такая форма подготовки производства оправдана, когда изделие выпускается в большом количестве и длительное время.

## **1.2 Основные термины и определения, используемые в САПР**

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, осуществляемое в процессе 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 в виде, выполненном 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 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. Фактически операция заключается 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 данных и программы в оперативной памяти обеспечивает возможность автоматического выбора дальнейшего хода вычислений в зависимости от промежуточных результатов.

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

*Основная функция САПР* – выполнение 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 – получить в соответствии с замыслом такую информационную систему-модель, которая позволяет создать систему-оригинал, полностью соответствующую замыслу.

### **1.3 Современные требования к ТПП и задачи ее автоматизации**

Одной из особенностей современного машиностроительного производства является постоянный рост объемов и сложности проектных работ в сфере технологической подготовки производства, что обусловлено следующими причинами:

- увеличивается номенклатура и сложность выпускаемых машин и приборов, которые характеризуются использованием новых конструкционных 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 важным 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. В массовом производстве главное требование к оборудованию – высокая производительность, а в серийном и единичном – гибкость (универсальность и мобильность), вызванная необходимостью частой сменяемости выпускаемых изделий.

До недавнего времени понятия автоматизации и гибкости считались альтернативными. Однако в последние годы граница между указанными требованиями к технологическому оборудованию в массовом и серийном производствах заметно «размывается». 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. Поэтому в настоящее время независимо от типа производства (массовое, серийное, единичное) к

технологическому оборудованию в качестве главных предъявляются требования высокой производительности и гибкости.

Таким образом, *главная задача автоматизации* – производительность и гибкость.

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.

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, размерные связи, технические требования;

– создание информационных массивов, содержащих сведения о наличном парке металлорежущего оборудования и его технических характеристиках, режущем, вспомогательном и мерительном инструментах, 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 которых базируется процесс автоматизированного проектирования, их алгоритмизация, формализация, размещение в памяти ЭВМ для 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, при создании систем автоматизированного проектирования технологических процессов необходимо решить следующие задачи:

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.

#### **1.4 Системы компьютерного проектирования в машиностроении**

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

Деятельность современного инженера-технолога немислима без применения ЭВМ. С помощью компьютерного проектирования при технологической подготовке производства решаются задачи разработки технологического маршрута изготовления изделий, операционных технологических карт, расчета режимов резания, определения норм времени, формирования комплекта технологической документации, разработки управляющих программ для технологического оборудования и др. Для решения указанных задач в производствах машиностроительных предприятий стран СНГ используются интегрированные САПР, основу которых составляют системы автоматизированного проектирования

технологических процессов, такие как ADEM, NATTA, Pro/TechDoc, SprutTP, SWR-технология, TECHCARD, Technologi CS, Techwind, T-FLEX Технология, «Автомат», ВЕРТИКАЛЬ, Импульс, КАРУС, Темп, Технолог Гепард, Компас-Автопроект, ТехноПро, САПР ТП УП «Институт Белорганкинпром».

Теоретические основы создания САПР ТП закладывались в 1970-1980 гг. учеными А.П. Соколовским, С.П. Митрофановым (типовая и групповая технология), Г.К. Горанским (САПР ТП на основе таблиц кодированных сведений), В.Д. Цветковым (многоуровневая итерационная система проектирования ТП тел вращения), А.Г. Раковичем (САПР приспособлений), В.Г. Старостиним и В.Е. Лелюхиным (синтез ТП на основе матричного представления детали), В.Х. Гольдфельдом и А.А. Саратовым (формализация выбора баз для деталей типа «тела вращения»), Б.Е. Челищевым (анализ графовых структур для синтеза ТП), Б.С. Балакшиным (модульная технология) и др.

На основе их трудов было разработано, реализовано и принято в промышленную эксплуатацию большое число отдельных программ, пакетов программ и систем программирования для развития и совершенствования технологической подготовки производства. Выпускались тематические каталоги по совершенствованию ТПП, публиковались отчеты по исследованиям в области конструкторских и технологических САПР и их интеграции. Основой автоматизированного проектирования являлись принципы технологической унификации и стандартизации, разработка типовых унифицированных ТП. На правительственном уровне было решено систематически собирать и классифицировать данные по деталям типа «тела вращения» на металлообрабатывающих предприятиях. Было предложено методы типизации применять не только при проектировании ТП, но и его этапов, а также отдельных технологических решений. Основная идея типизации заключалась в расчленении детали на обрабатываемые поверхности, распознавании обрабатываемых элементарных поверхностей и использовании соответствующих модулей обработки. Такая идея разрабатывалась В.Д. Цветковым и Б.М. Базровым. Унифицированные решения ТП предложены в виде обобщенных технологических маршрутов обработки для типовых в машиностроении классов деталей (валы, диски, рычаги). Они использовались в качестве моделей для автоматизированного проектирования ТП.

В настоящее время исследования в области теории и разработки систем автоматизации проектирования технологических процессов в Республике Беларусь проводятся в Объединенном институте проблем

информатики (ОИПИ) НАН Беларуси, ОАО «Институт Белоргстанкинпром» и в ряде учреждений образования – Белорусском национальном техническом университете, Витебском технологическом университете, Белорусско-Российском техническом университете, Полоцком государственном университете. Особо следует отметить научные работы Г.М. Левина, Е.В. Владимирова, Л.Н. Ламбина, В.И. Махнача, М.М. Жадовича, А.А. Жолобова, И.А. Каштальяна, И.Л. Ковалевой, Ж.А. Мрочека, М.М. Кане, А.И. Медведева, И.П. Филонова, Г.Я. Беляева, Л.В. Курча, Е.И. Махаринского, В.И. Ольшанского, Н.В. Белякова, М.Л. Хейфеца, С.В. Кухты, М.Ф. Пашкевича, В.М. Пашкевича.

Работы [1, 6, 17, 18, 25, 26] по основам проектирования технологических процессов механической обработки посвящены дальнейшему совершенствованию методов и средств автоматизации, в частности:

- развитию методики проектирования типовых и групповых технологических процессов;
- разработке рекомендаций общего характера по организационному, методическому и математическому обеспечению САПР, проектированию технологии;
- описанию систем проектирования технологических процессов.

Анализ тенденций развития зарубежных САПР ТП показывает, что автоматизация проектирования ТП механической обработки идет в следующих направлениях:

- развитие идей типовой и групповой технологии, особенно для деталей типа валов и втулок;
- совершенствование диалоговых систем проектирования;
- использование типовых математических моделей;
- поддержание и развитие организационного и методического обеспечения САПР.

Основной отличительной особенностью зарубежных САПР ТП является то, что они создавались и развивались обособленно: в пределах предприятий или корпораций. В большинстве случаев технология является ноу-хау предприятия. Это обусловило появление и развитие универсальных экспертных систем на основе баз знаний, которые призваны осуществлять поддержку решения на различных предприятиях. Особое внимание уделяется разработке теоретических основ построения графических редакторов и технологической документации на базе групповой технологии, автоматизации проектирования ТП сборки, динамического анализа моделей. Формирование семейства групп деталей осуществляется по технологическому признаку. Кодирование ведется в

диалоговом режиме. Код детали заносится в файл семейства. Оборудование для обработки выбирается на основе кодового номера по алгоритму: определяется ТП в соответствии с особенностями детали; проверяются возможности оборудования; определяется сложность детали; деталь включается в семейство. При выборе модели станка определяется его возможность обработать данную деталь. Например, для разработки технологии токарной обработки необходимо ввести в систему данные о станке (мощность, диапазон частот вращения и подач, наибольший диаметр обрабатываемого на станке изделия) и в режиме диалога вызвать токарные и расточные блоки программ. После ввода данных о начальном и конечном диаметре изделия, материале инструмента и др. происходит расчет режимов резания, норм времени, распечатка операционных карт механической обработки.

Автоматическое проектирование зарубежные машиностроительные фирмы используют редко по следующим причинам: технологи плохо владеют основами автоматизации обработки данных, а программисты – знаниями технологии; необходимо много времени для анализа полученного ТП; отсутствует единое информационное пространство по технологическим основам и базам данных на разных предприятиях. Поэтому выход был найден в использовании чисто диалоговых систем проектирования.

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.

Система автоматизированного проектирования – это комплекс средств автоматизации, взаимосвязанных с необходимыми подразделениями проектной организации или коллективом специалистов (пользователей системы), выполняющих 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 при взаимодействии 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 необходимы в первую очередь проектирование (конструирование) этих изделий и разработка технологических процессов их изготовления. Поэтому в машиностроении получили наибольшее развитие и широко используются два основных вида систем автоматизированного проектирования:

- САПР изделий;
- САПР технологических процессов изготовления изделий.

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

*САПР изделий* (САПР И) (CAD – от англ. Computer Aided Design, т.е. проектирование с помощью компьютера) – системы, выполняющие объемное и плоское геометрическое моделирование, инженерные расчеты и анализ, оценку проектных решений, изготовление чертежей.

В САПР изделий научно-исследовательский этап иногда выделяют в самостоятельную *автоматизированную систему научных исследований* (АСНИ) (CAE – от англ. Computer Aided Engineering, т.е. автоматизированная система инжиниринга) – систему, поддерживающую процесс принятия человеком новых нестандартных решений, иногда и на уровне изобретений.

*Основу автоматизированной системы технологической подготовки производства* (АСТПП) (CAM – от англ. Computer Aided Manufacturing, т.е. автоматизированная технологическая подготовка производства) составляют САПР ТП (CAAP – от англ. Computer Aided Assembly Planning, т.е. автоматизированное проектирование процессов сборки). С помощью этих систем разрабатывают технологические процессы и оформляют их в виде маршрутных, операционных и маршрутно-операционных карт, проектируют технологическую оснастку, разрабатывают УП для станков с ЧПУ.

*Автоматизированная система управления производственным процессом* (АСУПП) содержит конкретное описание технологии в виде управляющих программ обработки на оборудовании с ЧПУ. Основу АСУПП составляют СААР (CAPP – от англ. Computer Aided Process Planning) и ЧПУ (CNC – от англ. Computer Numerical Control, т.е. компьютерное числовое управление). Техническими средствами, реализующими данную систему, могут быть системы ЧПУ станков и

компьютеры, управляющие автоматизированными технологическими модулями и робототехническими комплексами.

Различают также *автоматизированную систему управления производством* (АСУП) (PPS – от нем. Produktionsplanungssystem, т.е. производственное планирование и управление, ERP – от англ. Enterprise Resource Planning, т.е. планирование и управление предприятием, MRP – от англ. Manufacturing (Material) Requirement Planning, т.е. планирование производства, SCADA – от англ. Supervisory Control And Data Acquisition, т.е. диспетчерское управление производственными процессами) и *автоматизированную систему управления качеством* (АСУК) (CAQ – от англ. Computer Aided Quality Control, т.е. управление качеством с помощью компьютера).

Конструирование является частью процесса проектирования и сводится к определению свойств изделия. Работы, связанные с автоматизацией 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 и CAM дает экономический эффект, который может быть существенно увеличен их интеграцией в системы типа CAD/CAM/CAPP. Такая интегрированная система 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 CAM на оборудовании с ЧПУ).

Этапы проектирования и изготовления изделий могут осуществляться 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 связывается с внедрением модели *компьютерно-интегрированного производства* (КИП) (CIM – от англ. Computer Integrated Manufacturing).

Кроме вышеназванных, в машиностроительном производстве используются системы: PLM – Product Life Cycle Management (управление жизненным циклом изделия), PDM – Product Data Management

(управление проектными данными о продукте (изделии); CRM – Customer Relationship Management (управление взаимоотношениями с заказчиками); S&SM – Sales and Service Management (управление продажами и обслуживанием); MES – Manufacturing Execution System (производственная исполнительная система); SCM – Supply Chain Management (управление цепочками поставок); CPC – Collaborative Product Commerce (совместный электронный бизнес) [1, 6, 16-19, 25, 26, 37].

Современные информационные технологии дают возможность создания интегрированной системы поддержки решений для всего жизненного цикла изделия. В последнее время все большее распространение получают CALS-технологии (от англ. Computer Aided Acquisition and Life-Cycle Support) – информационные технологии, обеспечивающие автоматизированную поддержку решений на отдельных этапах жизненного цикла изделия, а также информационную интеграцию всех его этапов. Возможность интеграции обеспечивается применением компьютерных сетей и стандартизацией форматов данных.

Для решения трудноформализуемых задач используются системы DSS (поддержки принятия решений) – Decision Support Systems. Они ориентированы не на полную автоматизацию функций лица, принимающего решения, а на предоставление ему необходимой информационной помощи в поиске наилучшего решения.

В структуре компьютерно-интегрированного производства можно выделить три основных иерархических уровня компьютерного проектирования:

1. **Верхний уровень** (уровень планирования) включает подсистемы, выполняющие задачи планирования производства (АСУП).

2. **Средний уровень** (уровень проектирования) включает подсистемы САПР И, технологических процессов и управляющих программ для станков с ЧПУ (АСТПП).

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

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

– 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.

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.

Сравнительный анализ возможностей некоторых САПР ТП по основным параметрам приведен в табл. 1.2 [7, 8, 10, 24, 28, 38-44].

Подсистемы автоматизации технологического проектирования охватывают разработку технологических процессов следующих видов производств (рис. 1.1):

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 УП 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 УП для прессов с ЧПУ);

4) механической обработки ( типовые, групповые и единичные технологические процессы, автоматные операции, техническое нормирование, разработка УП для станков с ЧПУ);

5) сборки (операционные технологические процессы сборки, разработка УП для промышленных роботов);

б) химико-термического, термомеханического, электроэрозионного, нанесения металлопокрытий, окраски и др.

Таблица 1.2

Сравнительный анализ возможностей САПР ТП по основным параметрам

Характеристики	Системы автоматизированного проектирования ТП														
	ADEM	NATTA	Pro/Tech Doc	SprutTP	TECHCARD	Technologi CS	T-FLEX Технология	Автомат	ВЕРТИКАЛЬ	Темп	Технолог Гелард	Компас-Автопроект	ТехноПро	САПР ТП PRAMTN	Интермех
Метод проектирования ТП: диалоговый	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+
на базе типового и группового ТП	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
по модульному принципу	-	+	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-	-
Автоматический режим проектирования для деталей: типа «тела вращения»	-	-	-	-	-	+	-	+	-	-	-	-	-	+	+
призматических корпусных	-	-	-	-	-	+	-	+	-	-	-	-	-	-	+
корпусных	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Передача данных из САД	-	+	+	-	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	+
Интеграция с САМ	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+
Дерево формирования ТП	+	+	-	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+
Построение операционных эскизов	+	-	-	+	+	+	+	-	+	+	-	+	+	+	+
Редактор бланков	-	-	-	-	+	+	+	-	+	-	+	+	-	-	+
Размерный анализ ТП	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-
Наличие экспертных компонентов	+	+	-	-	+	-	+	-	-	-	-	-	-	+	+
Расчет режимов резания	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+
Расчет норм времени	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+

Примечания: 1. Знак «+» указывает на наличие характеристики, знак «-» – на ее отсутствие.

2. САПР ТП корпусных деталей в автоматическом режиме находится в стадии разработки.



Рис. 1.1 Функциональная структура комплексной САПР ТП машиностроительного предприятия

САПР ТП механической обработки позволяет решить следующие задачи:

- разработка типовых групповых и единичных технологических процессов;
- решение задач технического нормирования;
- подготовка программ для станков с ЧПУ;
- разработка автоматных операций.

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, осуществляющая 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 есть 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 технологической документации по каждому виду технологических работ обеспечивают передачу по каналам связи промежуточной информации от одной подсистемы к другой.

Для 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, в свою очередь, классифицируется на ряд группировок.

По типу объекта проектирования предусматривается разделение САПР на восемь классификационных группировок. Например, САПР изделий машиностроения и приборостроения; САПР технологических процессов машиностроения и приборостроения; САПР объектов строительства; САПР организационных систем.

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.

По сложности объекта проектирования стандарт предусматривает следующие группировки:

- САПР простых объектов с числом составных систем до  $10^2$ ;

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

По уровню автоматизации стандарт предусматривает следующие группировки САПР:

- низкоавтоматизированное (автоматизируется до 25 % проектных процедур, выполняемых при проектировании объектов данного типа);
- среднеавтоматизированное (автоматизируется от 25 до 50 %);
- высокоавтоматизированное (автоматизируется свыше 50 %).

По комплексности автоматизации проектирования предусмотрено разделение САПР:

- на одноэтапные;
- многоэтапные;
- комплексные.

По характеру выпускаемых проектных документов различают САПР:

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

По числу 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  $10^6$ ).

По числу уровней в структуре технического обеспечения различают САПР:

- 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 (рис. 1.2). 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 все системы получают информацию планового характера, а также информацию о фактическом наличии ресурсов. 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.

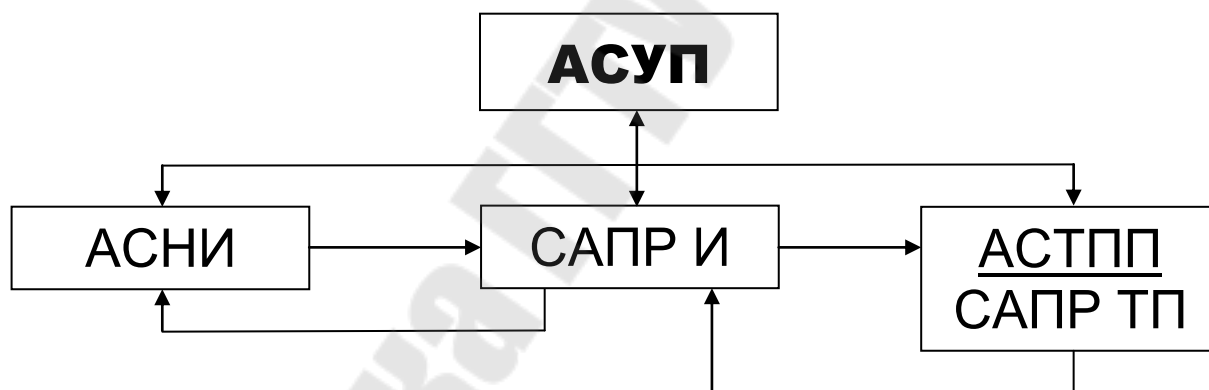


Рис. 1.2. Схема взаимодействия систем автоматизации производства

Из автоматизированной системы научных исследований в САПР И направляется информация о технических требованиях на проектируемые изделия, об отдельных технических и конструкторских решениях, выработанных в результате исследования математической модели объекта.

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 включает в себя САПР ТП и является одновременно подсистемой комплексной системы автоматизированного проектирования изделия и технологии 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. В качестве примера на рис. 1.3 приведена схема интегрированной системы подготовки производства механической обработки деталей машин с использованием станков с ЧПУ.

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 CAD/CAM/CAPP особенно эффективно при подготовке производства и программировании обработки геометрически сложных деталей.

Созданию систем CAD/CAM/CAPP должны предшествовать работы по унификации конструктивных решений и упорядочению процессов конструирования и технологической подготовки. Целесообразно применение специализированных (объектно-ориентированных) интегрированных подсистем для конструирования изделий определенного вида, разработки технологии и УП изготовления деталей однородных технологических групп.

В масштабах предприятия широко используют системы проектирования CAD/CAM/CAE, позволяющие обеспечить автоматизированную поддержку работ инженеров и специалистов на всех стадиях цикла проектирования и изготовления новой продукции.

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



Рис. 1.3. Схема структуры интегрированной системы подготовки производства механической обработки

Основой интеграции систем является объединение иерархически сгруппированных, самостоятельных, связанных и взаимодополняющих друг друга систем проектирования. Использование таких систем открывает возможности создания «безлюдных» технологий. 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:

- 1) информационную интеграцию (единая классификация, единая система документации);
- 2) организационную интеграцию (единая система сбора, поиска и передачи информации);
- 3) математическую интеграцию (унифицированные математические методы анализа решаемых задач);
- 4) программную интеграцию (унификация программного обеспечения);
- 5) 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.* Цели комплексной автоматизации проектных процедур – исключение ошибок субъективного характера, повышение производительности труда проектировщиков, улучшение качества проектной документации, сокращение сроков создания новых изделий. Основным направлением комплексной автоматизации в области проектирования является интеграция САПР различного назначения.

Интегрированной считается система обработки информации, в которой между конструкторской и 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 специальную программу, которая называется *интерфейсом*.

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 интерфейса. Если между какими-либо подсистемами САПР отсутствует

программная связь, то функцию интерфейса между ними выполняет человек.

Это, например, имеет место при кодировании чертежей деталей для последующего автоматизированного проектирования процессов их изготовления. В этом случае говорят, что интерфейсную связь конструкторского и технологического этапов выполняет человек.

В настоящее время наиболее часто используются следующие виды интегрированных систем в области САПР:

CAD/CAM/CAPP (CAD/CAM и (или) 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. К их числу относятся Pro/Engineer (компания PTC), Unigraphics (фирма EDS), CATIA (IBM). Это сложные, многофункциональные системы, в которые входит большой набор модулей различного функционального назначения, из которых как типовые выделяются:

- графическое ядро для создания геометрических моделей отдельных деталей, узлов и изделия в целом;

- модуль создания и оперирования процессами сборки;

- модули для инженерного анализа, моделирования кинематики и динамики механизмов;

- модули конструирования систем управления (гидравлических, пневматических, электрических и др.) и систем жизнеобеспечения (вентиляция, кондиционирование, теплоснабжение, электропитание и т.п.);

- набор модулей для технологической подготовки производства, в основном модули генерации управляющих программ для различных видов механообработки, литья, штамповки и других техпроцессов;

- модули обмена данными в различных графических форматах (IGES, STEP, DXF, VDA-FS и др.);

- модули управления данными выполняемых проектов;

- модули подготовки и выпуска проектной и конструкторской документации (разработки чертежей по геометрическим моделям, подготовки спецификаций).

## 1.6 Уровни автоматизации проектирования технологических процессов

В зависимости от степени автоматизации проектных процедур стандарт предусматривает три уровня автоматизации проектирования ТП: низкоавтоматизированное (до 25 %), средне- (от 25 до 50 %) и высокоавтоматизированное (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, а технолог в режиме диалога заполняет документ, используя заранее подготовленные формы, формулировки операций и переходов, 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 работает САПР ТП. Работа проектных модулей базируется на использовании 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 (рис. 1.4).

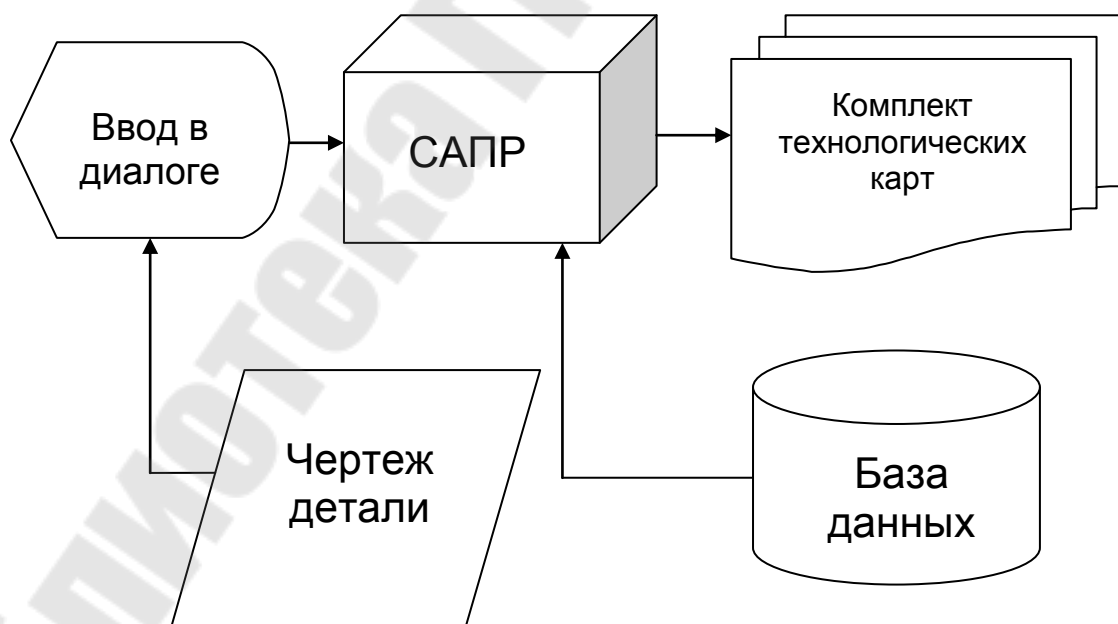


Рис. 1.4. Схема автоматизации проектирования ТП при ручном вводе информации

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

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

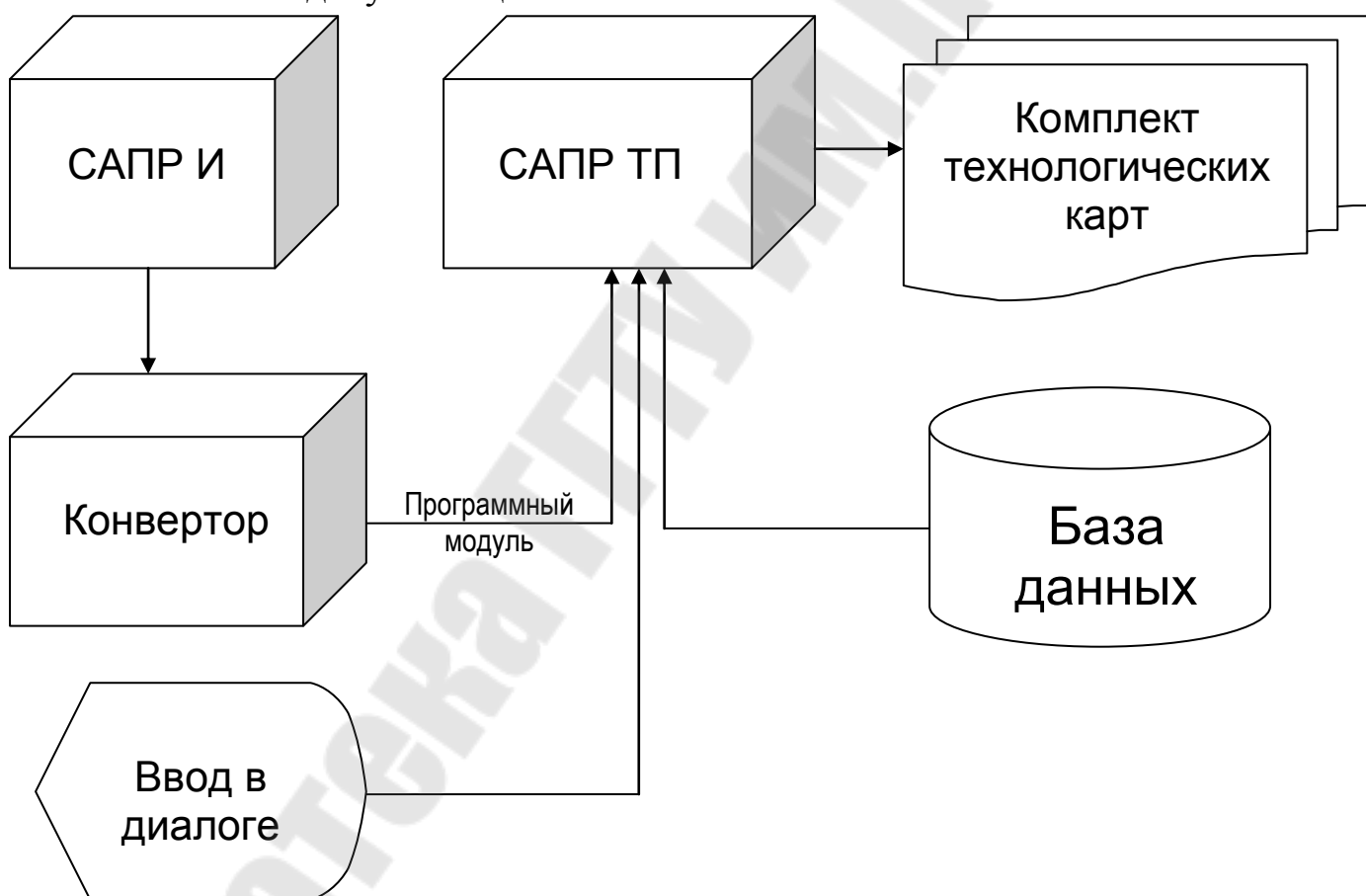


Рис. 1.5. Схема автоматизации проектирования ТП при использовании графических моделей

Наибольший эффект от применения систем третьего уровня достигается при совместном использовании подсистем САПР И и САПР ТП. Для этого используются специальные программные комплексы конвертора, которые преобразуют графические модели (ГМ) 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 (рис. 1.5).

### **1.7 Стандарты ЕСТПП**

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

Стандарты ЕСТПП подразделяются на четыре группы. В эти группы входит более сорока различных ГОСТов, которые определяют единые принципы и направления совершенствования технологической подготовки производства на предприятиях страны. Одновременно с созданием ЕСТПП разработан 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. основополагающим стандартом этой группы является ГОСТ 14.401-73 «ЕСТПП. Правила организации работ по механизации и автоматизации решения инженерно-технических задач и задач управления ТПП».

#### **Контрольные вопросы**

- 1 Какие задачи в процессе технологической подготовки производства являются основными?
- 2 В чем заключается основная цель создания САПР ТП?
- 3 Какую роль выполняет технологическая подготовка производства в машиностроении?



4 Какие данные являются исходными для технологической подготовки производства?

5 Какие виды работ выполняются на основных стадиях технологической подготовки производства?

6 Что понимается под управляющей программой металлорежущим станком?

7 Что понимается под технологической информацией?

8 Что понимается под геометрической информацией?

9 Каковы основные задачи, которые необходимо решать при создании систем автоматизированного проектирования технологических процессов?

10 В каких направлениях идет развитие зарубежных САПР ТП механической обработки:

11 Что называют автоматизированным проектированием?

12 Что называют автоматическим проектированием?

13 Какие основные иерархические уровни можно выделить в структуре компьютерно-интегрированного производства?

14 За счет чего организация компьютерно-интегрированных производств значительно сокращает общее время производственного цикла?

15 Из каких подсистем состоит САПР ТП?

16 Какие задачи решает САПР технологических процессов механической обработки?

17 Какие задачи позволяют решать для различных подсистем технологического проектирования подсистемы конструирования средств технологического оснащения?

18 Укажите отличительные особенности разрабатываемых комплексных САПР ТП

19 Какие признаки классификации САПР установлены согласно ГОСТ 23501.108-85?

20 Какие группировки САПР стандарт предусматривает по уровню автоматизации?

## 2 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, программное, информационное, лингвистическое, методическое, организационное.

*Техническое обеспечение* – совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих технических средств, предназначенных для выполнения автоматизированного проектирования. К этому виду обеспечения относятся различные технические средства: ЭВМ, периферийное оборудование и устройства их связи.

*Математическое обеспечение* – совокупность математических методов, математических моделей и алгоритмов проектирования, необходимых для выполнения автоматизированного проектирования. Сюда 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.

*Программное обеспечение* – совокупность машинных программ, необходимых для выполнения автоматизированного проектирования и представленных в заданной форме. Это обеспечение включает комплексы программ специального и общего назначения.

*Специальное программное обеспечение* представляется в виде текстов прикладных программ, ориентированных на решение специальных задач (решение задач динамики, 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 и подготовки программ из ППП к исполнению на ЭВМ. Эти функции обычно выполняют программы, входящие в состав операционных систем ЭВМ.

*Информационное обеспечение* – совокупность сведений, необходимых для выполнения автоматизированного проектирования и представленных 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*.

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

**Методическое обеспечение** – совокупность документов, устанавливающих состав, а также правила отбора и эксплуатации средств обеспечения автоматизированного проектирования, необходимых для решения проектных задач.

**Организационное обеспечение** – 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.

Рассмотрим подробнее указанные виды обеспечения САПР ТП.

## **2.1 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 выдачи информации по запросу.

Общий принцип действия и функциональные возможности КТС определяются его структурой, которую принято называть конфигурацией, и функциональным назначением входящих в него 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 используют персональный компьютер. Пример обозначения параметров компьютера: Конфигурация ПК на базе Intel Core i3 6100. Комплектующие Ориентировочная стоимость, \$

Процессор Intel Core i5 6500 Soc-1151 (3.2GHz/Intel HD Graphics 530) – 230\$;

Материнская плата MSI H170A PC MATE Soc-1151 Intel H170 4xDDR4 ATX AC`97 8ch(7.1) GbLAN RAID RAID1 RAID5 RAID10+VGA+DVI+HDMI – 113\$

Память DDR4 8Gb 2133MHz Crucial CT8G4DFD8213 OEM PC4-17000 CL15 DIMM 288-pin 1.2В – 58\$

Жесткий диск SSD A-Data SATA III 240Gb ASP550SS3-240GM-C 550 2.5" – 88\$

Видеокарта MSI PCI-E N730-4GD3V2 nVidia GeForce GT 730 4096Mb 128bit DDR3 700/1000 DVIx1/HDMIx1/CRTx1/HDCP – 85\$

Блок питания FSP ATX-550PNR 550W, 120mm fan, ATX, Active PFC, OEM – 47\$

Корпус черный без БП ATX – 20\$

Монитор LG 23.8" 24MP58D-P черный IPS LED 16:9 DVI матовая 250cd 1920x1080 D-Sub FHD 3.2кг – 184\$

ИТОГО: 825\$

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 генерации (установке) сети можно сформировать и совмещенный сервер, работающий как рабочая станция.

*Рабочие станции (терминалы)* – 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. Программы выполняются на терминальном сервере, а терминалы служат только для отображения информации и передачи управляющих команд.

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, предназначенной 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 (Мбит/с, Гбит/с)* – важнейший показатель эффективности сети. Скорость передачи информации в настоящее время свыше 1,0 Гбит/с.

Сетевые карты физически могут быть встроены в материнскую плату или установлены 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 часто используют аппаратуру

обычных телефонных линий. Однако при этом скорость передачи информации невысокая. Дополнительным устройством является *модем*. Когда информация с компьютера передается по телефонной линии, передаваемые сигналы подвергаются модуляции, а когда принимается – демодуляции. Отсюда и название – модем. Назначение модема – замена двоичного сигнала компьютера (сочетания 0 и 1) аналоговым сигналом.

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 отпадет.

## **2.2 Математическое обеспечение**

**Математическое обеспечение (МО)** – это совокупность математических методов, математических моделей и алгоритмов проектирования, необходимых для выполнения автоматизированного проектирования ТП. Сюда 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 осуществлять формализацию процесса проектирования и сохранять его целостность.

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

**Специальное МО** отражает специфику объекта проектирования, физические и информационные особенности его функционирования. Эта часть МО 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, включающая математическое описание условий решаемой задачи и определение аналитических выражений, которые подлежат решению на ЭВМ. Окончательный 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 делятся на три группы: управляемые, неуправляемые и производные.

При создании МО САПР учитывают следующие требования: универсальность, алгоритмическую 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.

### **2.3 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 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 рис. 2.1.



Рис. 2.1. Классификация языков САПР ТП

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



Требования, предъявляемые к языкам программирования: удобство использования, универсальность и эффективность использования объектных программ (т.е. 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.

*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 исполнение 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 АСАД. 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 C++, Delphi.

*Языки проектирования* предназначены для описания информации об объектах и задачах проектирования. Они 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 действий 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 входные, сопровождающие, выходные, управления, промежуточные и внутренние.

Место входного, выходного и внутреннего языков проектирования на различных этапах переработки информации в САПР ТП (один из вариантов) показано на рис. 2.2.

*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, вторые – заданий на выполнение проектных операций и процедур.

Языки описания объектов, в свою очередь, делятся на языки схемные, графические и языки моделирования. Их используют для описания исходной информации, представленной соответственно в виде некоторой схемы, конструкторского чертежа, алгоритма функционирования.

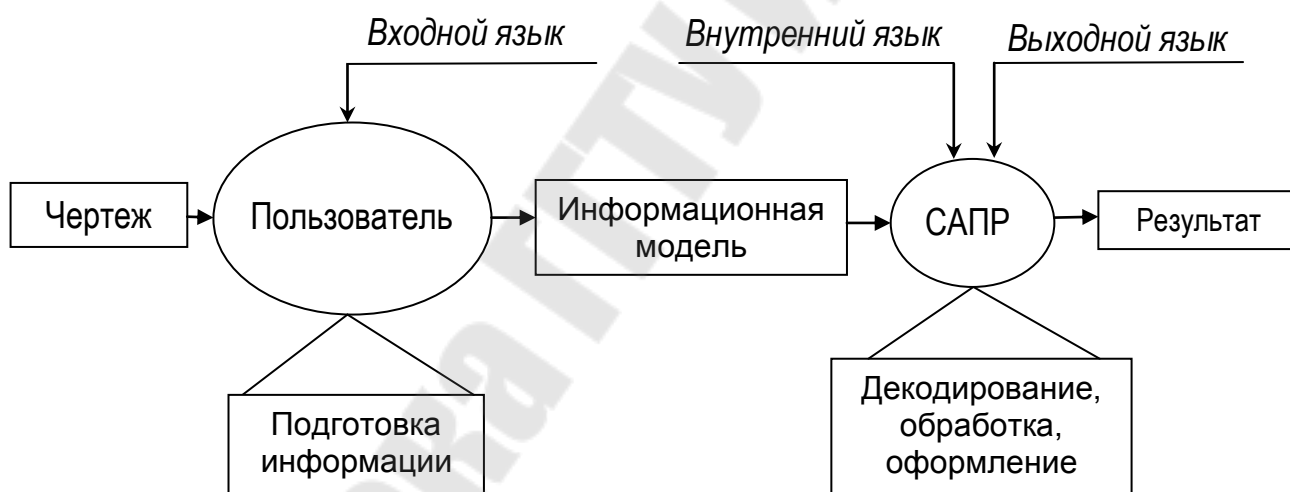


Рис. 2.2. Использование языков проектирования на различных этапах преобразования информации в САПР ТП

*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.

*Языки управления* используются для организации процесса проектирования.

*Промежуточные и внутренние языки* предназначены для представления информации на определенных стадиях ее переработки в ЭВМ

Достоинство этих языков в том, что они, в отличие от выходных языков, которые характеризуются большим разнообразием, узкой проблемной ориентацией и изменчивостью при адаптации САПР к конкретным условиям, 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, называемой конвертером, 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 конвертер с этого языка на промежуточный. При этом наиболее сложная часть системы – основной языковой процессор – остается без изменений.

*Языки процедурные и не процедурные* – это языки проектирования, предназначенные для описания развивающихся во времени процессов.

Обычно они оказываются близкими к языкам описания алгоритмов и называются процедурными языками. Языки проектирования, предназначенные для описания структур проектируемых объектов, называются непроцедурными языками.

Пример процедурных языков – языки описания заданий и языки моделирования систем, непроцедурных – схемные языки.

Как правило, для пользования в САПР ТП непроцедурные языки более удобны. С их помощью 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.

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 и активные диалоговые языки.

В *пассивном диалоговом режиме* инициатива диалога принадлежит ЭВМ. Прерывание вычислительного процесса в нужных местах при реализации маршрута проектирования и обращение к пользователю осуществляется с помощью диалоговых программных средств. 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 ввести в шаблон требуемые данные в виде чисел или отдельных фраз. 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. Эти сообщения не требуют реакции пользователя.

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

В *активном диалоговом режиме* инициатива начала диалога может быть двусторонней – 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.

## **2.4 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 БД в распределенной или централизованной форме. Организация БД обеспечивает их оптимальное использование в конкретных вариантах применения;

- совокупность БД САПР должна удовлетворять принципу информационного единства, т.е. использовать термины, символы, классификаторы, условные обозначения и способы представления данных, принятые в САПР объектов конкретных видов;

- информационная совместимость проектирующих и обслуживающих подсистем САПР;

- независимость данных на логическом и физическом уровнях, в

том числе инвариантность к программному обеспечению;

- возможность одновременного использования сведений из различных БД и разными пользователями;
- возможность интеграции неоднородных БД для совместного их использования различными подсистемами САПР;
- возможность наращивания БД;
- контролируемая избыточность данных.

В соответствии с ГОСТ 23501.101-87 создание, поддержка и использование БД, а также взаимосвязь между информацией в базе данных и обрабатывающими ее программными модулями осуществляется 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 нормативах, типовых деталях (узлах), оборудовании, оснастке, режущем и мерительном инструменте и т.п. 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 разных этапах процесса проектирования. Применительно к САПР ТП она содержит сведения о маршруте обработки заготовки, технологических операциях, режимах резания, графических изображениях операционных эскизов и инструментальных наладок.

В БД можно выделить отдельные части (рис. 2.3), играющие различную роль в процессе проектирования: справочник, проект, массивы переменных.

*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.

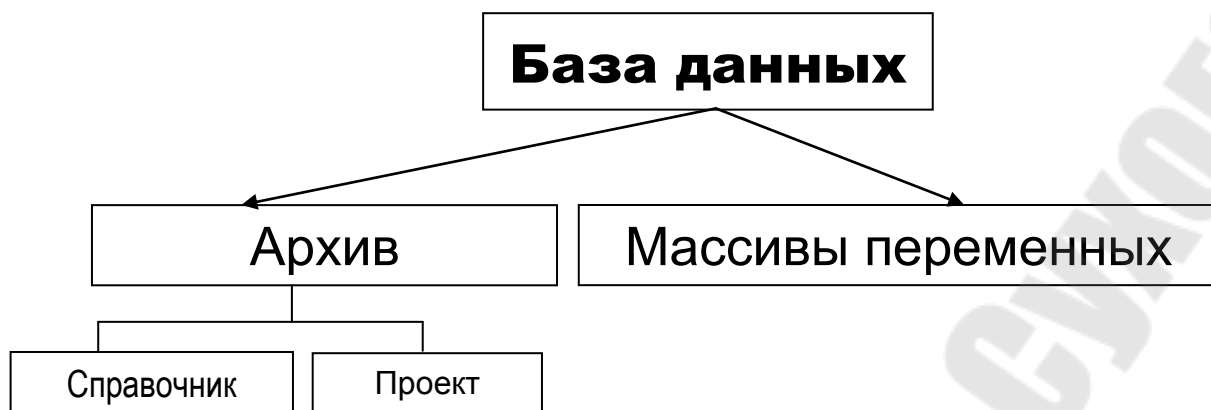


Рис. 2.3. Структура базы данных САПР ТП

**Проект** содержит сведения о решениях, получаемых в процессе проектирования. Это результаты решения проектных задач (различного типа схемы, спецификации, таблицы, тексты и др.), имеющиеся в настоящий момент. Проект пополняется или изменяется по мере завершения очередных операций на этапах проектирования. Эта часть называется полупеременной.

*Массивы переменных* необходимы для решения одной конкретной задачи проектирования. Эта часть БД называется переменной.

Массивы данных, входящие в справочник и проект, объединяют под общим названием *архив* (см. рис. 2.3).

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, следовательно, и организации списка различают подмассивы списковой и табличной структуры. Пример списковой структуры – паспортные данные оборудования, табличной структуры – таблицы зависимости шероховатости обработки от величины подачи инструмента.

Для использования БД необходимо специальное программное обеспечение, которое выполняет 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). Его создают как обслуживающую подсистему и используют для автоматизированного обеспечения необходимыми данными подсистем САПР ТП.

Обслуживание АБД осуществляет специалист или группа специалистов, обеспечивающих целостность и 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;
- предоставление стандартных или описанных пользователем ответов на ошибочный запрос.

Наглядность АБД реализуется за счет выполнения двух условий:

- 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 представление БД и ее реляционные модели.

*Логическое представление БД* отражает состав сведений без указаний о размещении информации в конкретных запоминающих устройствах. Это представление применяют в прикладных программах, в которых используется уже заданная БД. С позиции логического представления БД в сведениях можно выделить простейшие части, которые называются *элементами данных*.

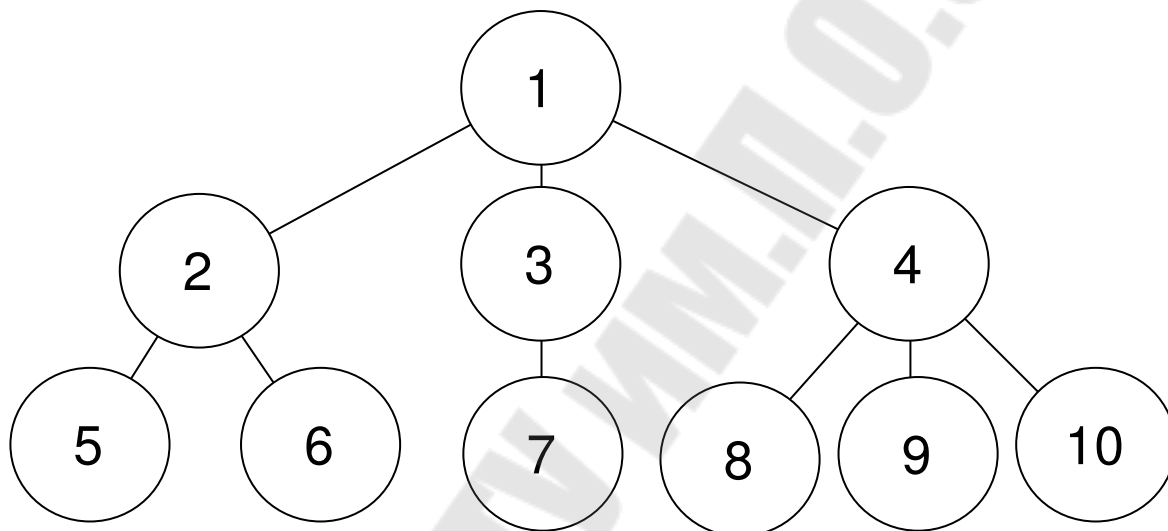
При описании свойств объекта обычно фигурируют некоторые группы взаимосвязанных элементов, называемых «записи». Однотипные



записи, содержащие близкую информацию, можно объединить под общим заголовком. Например, в записи «Наименование инструмента» можно объединить: номер и наименование инструмента, принадлежность к той или иной нормали или ГОСТу.

Записи одного типа могут иметь связь с записями других типов. Изображая каждую группу однотипных записей в виде очередной вершины, а связи между записями – в виде ветвей, можно представить структуру БД в виде графа. Различают сетевые и древовидные структуры, которые проще для реализации в БД (рис. 2.4).

*а*



*б*

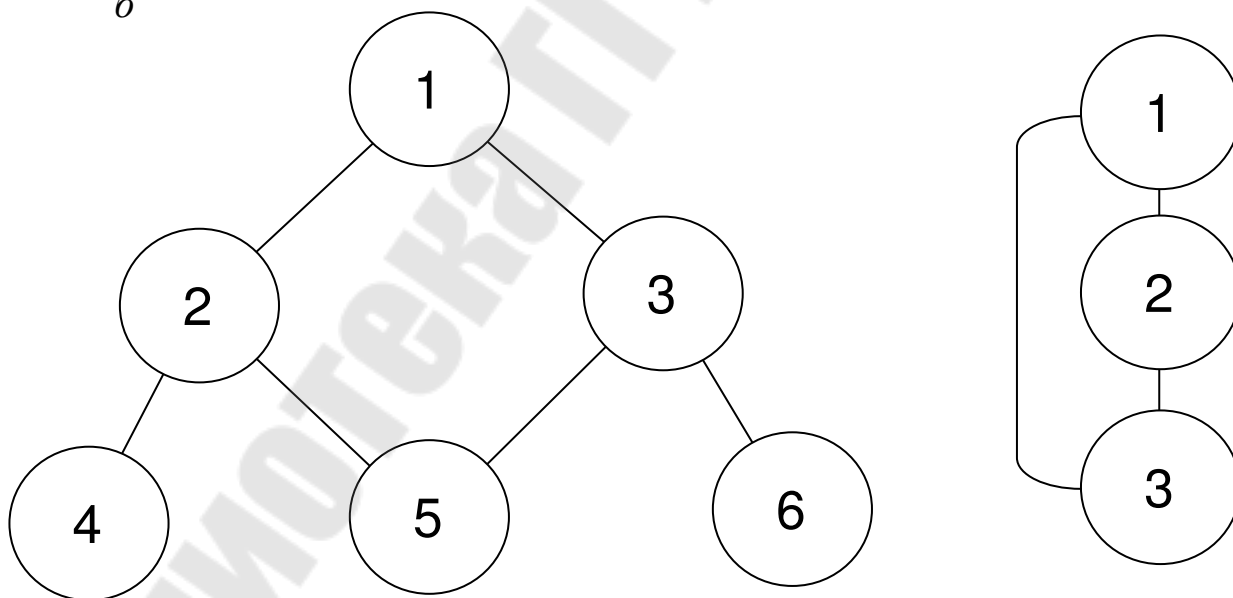


Рис. 2.4. Представление структуры БД в виде графов:  
*а* – древовидный граф; *б* – сетевые (замкнутые) графы

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. Например, экземпляру записи станка (станок) соответствуют два экземпляра записи оснастки (патрон, центры).

Простейшим случаем отношения является отношение 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.

*Реляционная модель* представляется в виде списков или таблиц. Табличный вид – реляционная структура, наиболее приемлемая для представления информации в БД.

В структуре отношения (связь между элементами данных) выражают двухмерными таблицами, каждая строка которых соответствует записи соответствующего отношения. Каждый столбец таблиц содержит домен, т.е. набор значений элементов данных, участвующих в отношениях (рис. 2.5).

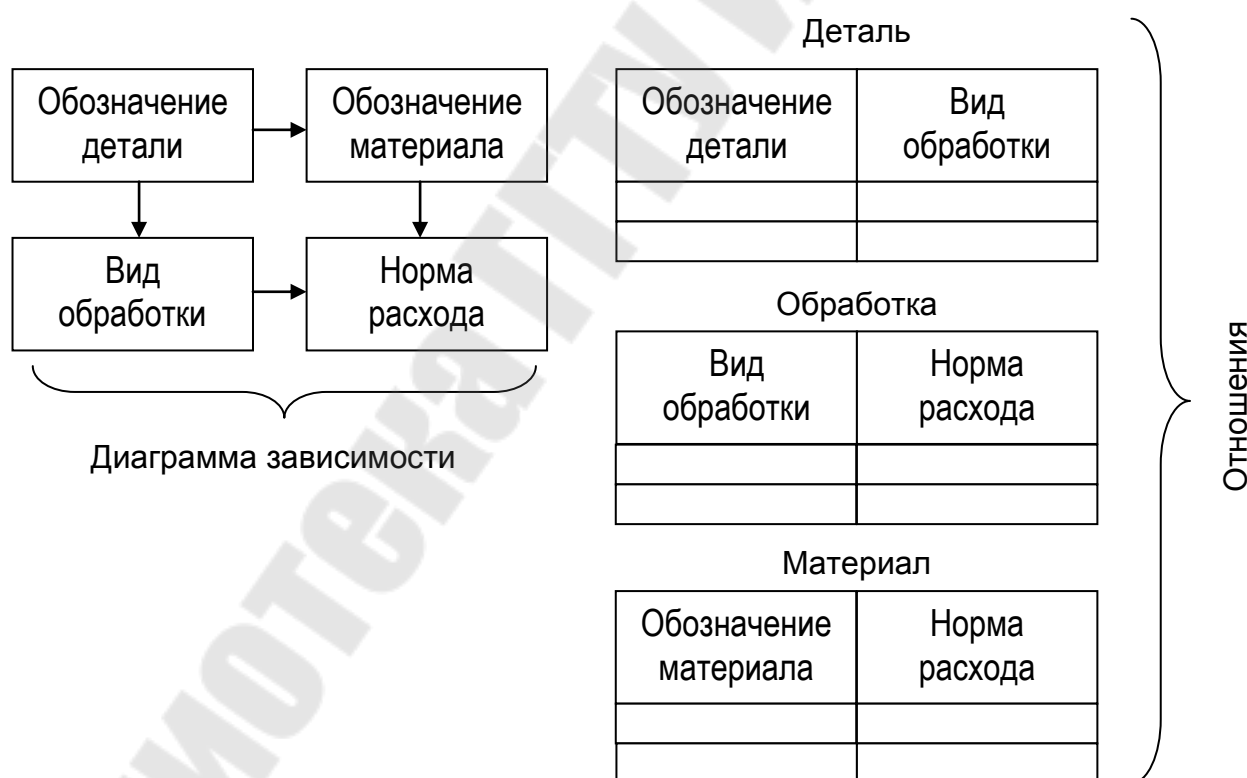


Рис. 2.5. Варианты представления структуры БД в виде таблиц

Простейшими являются *плоские таблицы*, состоящие из двух столбцов (включающие два 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 имеют ряд преимуществ:

- 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.

База данных в виде информации располагается 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.

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

При *блочном поиске* экземпляры записи упорядочиваются по ключу и весь диапазон значения ключа разделен по подразделам. 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.

При способе половинного деления весь диапазон значений ключа делится пополам, затем определяется та половина диапазона, в которой находится заданное значение. Эта половина, в свою очередь, делится пополам и т.д., пока в результате деления не получится часть БД, состоящая из единственной записи.

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

## **2.5 Программное обеспечение**

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

*Программой* называют законченную совокупность команд, необходимых для выполнения определенной задачи. Процесс составления программы называют *программированием*.

Состав и структура ПО САПР определяются составом и структурой как подсистем, так и САПР в целом. По функциональному назначению ПО САПР можно разделить на ряд *программных комплексов* (ПК), представляющих собой совокупность программных, информационных, методических, математических и лингвистических компонентов, предназначенных для выполнения заданных функций. Среди них можно выделить следующие ПК: проектирующие, обслуживающие и инструментальные.

**Проектирующие** ПК предназначены для получения законченного проектного решения и делятся на проблемно- и объектно-ориентированные. Проблемно-ориентированные ПК выполняют унифицированные проектные процедуры, независимые от объекта проектирования. Объектно-ориентированные ПК используются для проектирования объектов определенного класса. Проектирующие ПК входят в состав специализированного ПО.

**Обслуживающие** ПК предназначены для поддержания работоспособности проектирующих и входят в состав общесистемного ПО.

**Инструментальные** ПК представляют собой технологические средства, предназначенные для разработки, развития и модернизации ПО САПР.

*Проектирование ПО САПР* осуществляется на основе принципов системного единства, развития, совместимости и стандартизации.

*Принцип системного единства* – при создании, функционировании и развитии ПО САПР связи между компонентами должны обеспечивать ее целостность.

*Принцип развития* – ПО САПР должно создаваться и функционировать с учетом пополнения, совершенствования и обновления ее компонент.

*Принцип совместимости* – языки, символы, коды, информация и связи между компонентами должны обеспечивать их совместное функционирование и сохранять открытую структуру системы в целом.

*Принцип стандартизации* – при проектировании ПО САПР необходимо унифицировать, типизировать и стандартизовать ПО, инвариантное к проектируемым объектам. Одной из проблем, возникающих при проектировании ПО САПР, является создание единого информационно совместимого между собой ПК, предназначенного для выполнения автоматизированного проектирования.

Требования к компонентам программного обеспечения:

- компоненты ПО, 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, сбор статистической информации;

- программный модуль должен регламентировать функционально законченное преобразование информации, должен быть написан на одном из стандартных языков программирования и удовлетворять соглашениям о предоставлении данных, принятым в используемой САПР.

Программное обеспечение САПР разрабатывается после создания математического, лингвистического и информационного обеспечения. При этом должны быть последовательно решены 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 БД, составление списка массивов переменной части БД, выбор структуры этих массивов;
- составление технического задания (ТЗ) на разработку модулей;
- программирование модулей, разработка тестовых задач макетов нижестоящих модулей и проведение тестирования модулей.

Программное обеспечение подразделяют на базовое, общесистемное и специальное.

*Базовое программное обеспечение* не является предметом разработки при создании ПО САПР, общесистемное является инвариантным к объектам проектирования.

*Общесистемное 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. 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.

*Операционная система (ОС)* – это комплекс программ, который загружается в оперативную память при включении компьютера. Она осуществляет диалог с пользователем и управление компьютером, его ресурсами (оперативной памятью, местом на дисках и т.п.), запускает прикладные программы на выполнение заданных команд, выполняет 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, а 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 дисководов, установить читающие головки на определенный цилиндр и т.д. Для выполнения даже такого несложного действия, как копирование файла со съемного носителя на винчестер или наоборот, необходимо осуществить большое

количество элементарных операций. Операционная система скрывает от пользователя эти сложные и ненужные подробности и предоставляет ему удобный интерфейс для работы с компьютером.

В настоящее время в САПР ТП персональные компьютеры работают под управлением операционной системы Windows различных версий: Windows 2000, Windows XP, Windows Vista.

Операционная система типа Windows предоставляет программистам следующие возможности:

- независимость программ от внешних устройств. Любая программа Windows может работать с любым внешним устройством. Программы (драйверы) для связи с наиболее распространенными устройствами входят в Windows, а для остальных устройств – поставляются вместе с ними;

- необходимые средства для построения пользовательского интерфейса: окон, меню, запросов, списков и т.д. При этом стиль пользовательского интерфейса практически стандартный и считается одним из лучших;

- доступность всей оперативной памяти (а не только ее части), что облегчает создание больших программ;

- обмен данными между приложениями Windows, организация встроенных справочных программ и другие возможности.

Возможности, предоставляемые пользователям Windows:

- единый пользовательский интерфейс. Пользовательский интерфейс Windows в значительной степени унифицирован, поэтому пользователям не надо изучать для каждой программы новые принципы организации взаимодействия между программами;

- многозадачность, т.е. возможность одновременного выполнения нескольких программ, переключения с одной задачи на другую, управления приоритетами выполняемых программ;

- поддержка мультимедиа. При подключении соответствующих устройств можно воспринимать звуки от микрофона или компакт-диска, изображения от цифрового фотоаппарата, цифровой видеокамеры или с компакт-диска, выводить звуки на колонки или в наушники и движущиеся изображения на экран монитора.

Кроме ОС, существует множество прикладных программ: редакторы текстов, трансляторы с различных языков программирования, графические пакеты (ACAD), системные оболочки (Windows).

Для создания программ используются языки (среды) программирования.

*Специальное программное обеспечение* функционирует в операционной среде, которая состоит из базового и общесистемного ПО.

Основной его функцией в САПР ТП является получение проектных решений. Специальное ПО представляется в виде текстов прикладных программ, ориентированных на решение специальных задач (расчет точности, проектирование маршрутных и операционных ТП, техническое нормирование и др.).

Специальное ПО реализует алгоритмы для выполнения проектных операций и процедур. Программы специального ПО в САПР группируют 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.

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. Получить рабочие программы можно методом компиляции и методом интерпретации.

*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.

*Метод компиляции* означает, что для каждой арифметической операции вычислительного процесса в рабочей программе формируется своя отдельная команда, занимающая ячейку памяти. Полученная 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) и 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 возрастают, но сокращаются затраты машинной памяти (не нужно хранить всю скопированную рабочую программу).

На 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.

*Методы разработки ПО САПР ТП.* Способ управления сложными системами был известен еще в древности: *divide et impera* (разделяй и властвуй). При проектировании сложной программной системы не обходимо составлять ее из небольших подсистем, каждую из которых можно отладить независимо от других. В этом случае учитываются возможности человеческой памяти: при разработке любого уровня системы нужно будет одновременно держать в уме информацию не о всех, а лишь о немногих ее частях.

К основным методам программирования, ориентированным на получение надежных, пригодных для отладки, испытаний и сопровождения программ, следует отнести:

- метод структурного программирования «сверху-вниз»;
- метод организации потоков данных;
- объектно-ориентированное программирование.

Большинство существующих программ написано в соответствии с одним из этих методов.

Основное требование к ПО – выбор такой структуры программ и способов их реализации, которые способствовали бы уменьшению затрат времени и средств на их разработку и сопровождение.

Наибольшее распространение получило *структурное программирование*, способствующее организации эффективной разработки ПО САПР. При использовании метода структурного программирования «сверху-вниз» (комбинированный метод) программа в целом принимает форму дерева, в котором одни подпрограммы в процессе работы вызывают другие подпрограммы. При структурном программировании используется подход алгоритмической декомпозиции, в котором большие задачи разбивают на маленькие, так как основной базовой единицей является подпрограмма.

К основным принципам структурного программирования относятся:

- модульный принцип построения ППП;
- иерархия модулей;
- нисходящее и восходящее проектирование.

Современная концепция *модульного проектирования* включает в себя следующие положения:

– программа 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. Модули могут определять доступные для использования данные, операции обработки данных (подпрограммы и т.д.);

- в САПР ТП модули могут быть расширены, заменены, изъяты;
- изменение одного модуля не должно требовать перетрансляции других, использующих данный модуль;
- каждый модуль содержит, как правило, одну точку входа и одну точку выхода.

Состав модулей определяется рядом факторов: методикой разработки САПР ТП; выбранным методом решения разработанных алгоритмов; видом используемого периферийного оборудования; возможностями операционной системы; базовым алгоритмическим языком.

При этом обеспечивается возможность организации совместной работы больших коллективов разработчиков, так как относительно малый размер и небольшая сложность модулей позволяют провести более полную проверку программы.

Построение ППП по модульному принципу имеет ряд преимуществ:

- относительная самостоятельность модулей позволяет параллельно разрабатывать несколько модулей;
- упрощается отладка программ, что позволяет присоединять модули к ранее отлаженным. После каждого такого присоединения неверная работа программы сигнализирует о присутствии ошибки в новом модуле, а не в уже отлаженном;
- 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.

В структурном программировании разделение модулей на *иерархические уровни* производится по принципу вложенности. При этом используется вертикальное управление, для которого характерно то, что обращение к любому модулю может происходить только из 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.

Структурное программирование, наряду с иерархическим подходом, допускает и операционный подход, при котором модули разрабатываются в порядке их выполнения в маршруте проектирования.

Оба подхода можно проиллюстрировать на примере системы, состоящей из модулей *A – H* (рис. 2.6). Если при иерархическом подходе любой из модулей *D – H* должен проектироваться после модулей *A, B, C*, то при операционном подходе допускается сначала разрабатывать модули *A, B, D, E*, а затем – *C, F, G, H*.

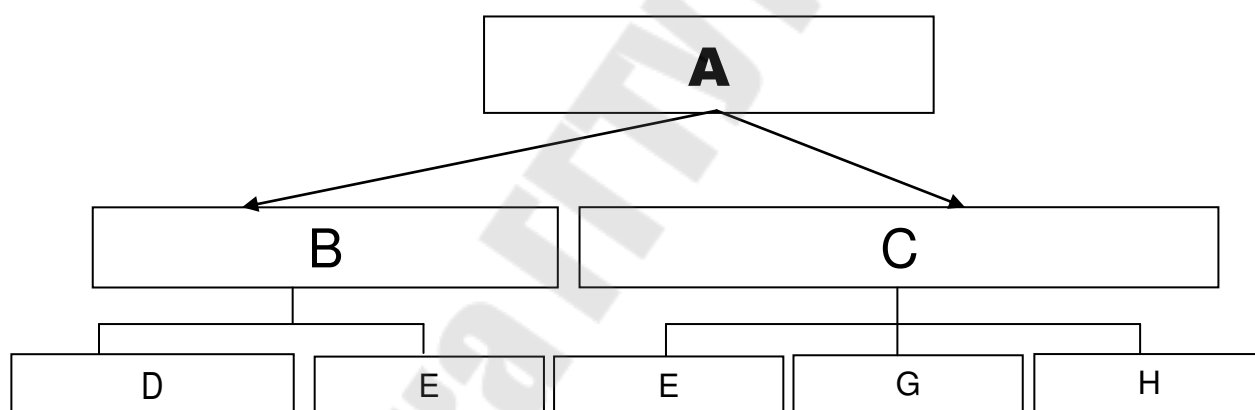


Рис. 2.6. Схема иерархии модулей ПО

Важным направлением в ПО является стандартизация правил оформления модулей, что позволяет обеспечить:

- единообразие оформления программной документации САПР;
- информационную программную совместимость модулей;
- унификацию и развитие программного обеспечения;
- обмен модулями между разработчиками.

*Нисходящее проектирование* заключается в том, что планирование, реализация и контроль программной системы ведутся сверху вниз (пошаговая детализация), т.е. сначала производится проектирование модулей высших, а затем низших иерархических уровней. Если раньше

выполняются этапы, связанные с низшими иерархическими уровнями, то такое проектирование называют *восходящим*.

У каждого из этих двух видов проектирования есть преимущества и недостатки. При нисходящем проектировании система разрабатывается в условиях, когда ее элементы еще не определены и, следовательно, сведения об их возможностях и свойствах носят предположительный характер. При восходящем проектировании, наоборот, элементы проектируются раньше системы и, следовательно, предположительный характер имеют требования к элементам. В обоих случаях из-за отсутствия исчерпывающей исходной информации существуют отклонения от потенциально возможных оптимальных технических результатов. Подобные отклонения при блочно-иерархическом подходе к проектированию неизбежны, однако какой-либо приемлемой альтернативы блочно-иерархическому подходу при проектировании сложных объектов нет. Поэтому оптимальность результатов блочно-иерархического проектирования следует рассматривать с позиций технико-экономических показателей, включающих в себя, в частности, материальные и временные затраты на проектирование. В связи с этим часто требуется повторное выполнение проектных процедур предыдущих этапов после выполнения проектных процедур последующих этапов. Такие повторения обеспечивают последовательное приближение к оптимальным результатам и обуславливают итерационный характер проектирования. Следовательно, итерационность относится к важным принципам проектирования сложных объектов.

На практике обычно сочетают восходящее и нисходящее проектирование. Например, восходящее проектирование используется на всех иерархических уровнях, на которых используются унифицированные элементы. Очевидно, что унифицированные элементы, ориентированные на применение в ряде различных систем определенного класса, разрабатываются раньше, чем та или иная конкретная система этого класса.

Нисходящее программирование довольно распространенный метод разработки модульных программ. Достоинство нисходящего проектирования в том, что оно позволяет разработчикам сосредоточиться на основных для данного этапа проблемах и отложить принятие всех решений, которые должны приниматься на последующих этапах. Нисходящее проектирование требует сначала ставить и решать наиболее фундаментальные задачи, откладывая частные вопросы для последующего рассмотрения. Преимущества нисходящего программирования:

– на ранних стадиях проектирования могут быть получены исходные тексты модулей верхних уровней, что во многих случаях является важным, так как точность и полнота представления программы на реальном языке программирования значительно выше, чем при использовании псевдокода или схем алгоритмов;

– в процессе программирования могут быть обнаружены противоречия, которые, как правило, долгое время бывают незамеченными;

– нисходящее проектирование может быть совмещено с выполнением отладки программы нисходящим методом.

Тем не менее, структурный подход не может обеспечить создание предельно сложных систем, и он, как правило, неэффективен при использовании объектно-ориентированных языков программирования.

При использовании метода *организации потоков данных* структура программной системы строится на основе преобразований входных потоков в выходные. Этот метод, так же как и структурный, успешно применялся при решении ряда сложных задач, в частности в системах информационного обеспечения, где существуют прямые связи между входными и выходными потоками и где не уделяется много внимания быстродействию.

В основе *объектно-ориентированного программирования* лежит представление о том, что программную систему необходимо проектировать как совокупность взаимодействующих друг с другом объектов, рассматривая каждый объект как экземпляр определенного класса; классы при этом образуют иерархию. Объектно-ориентированный подход отражает топологию новых языков высокого уровня, таких как C++, Delphi.

При создании ПО необходимо учитывать этапы жизненного цикла, отражающие его различные состояния, начиная с момента возникновения необходимости в данном программном продукте и заканчивая моментом завершения его использования всеми пользователями. Традиционно выделяют следующие основные этапы жизненного цикла ПО:

- анализ требований;
- проектирование (программирование);
- тестирование и отладка;
- эксплуатация и сопровождение.

Жизненный цикл образуется в соответствии с принципом нисходящего проектирования, и реализованные этапы циклически повторяются в соответствии с изменениями требований и внешних условий, введением ограничений и т.п. На каждом этапе жизненного цикла создается определенный набор документов и технических решений,

при этом для каждого этапа исходными являются документы и решения, полученные на предыдущем этапе.

Наибольшее распространение получила *спиральная структура жизненного цикла*, определяющая последовательность выполнения этапов, их взаимосвязей, процессов, действий и задач (рис. 2.7).

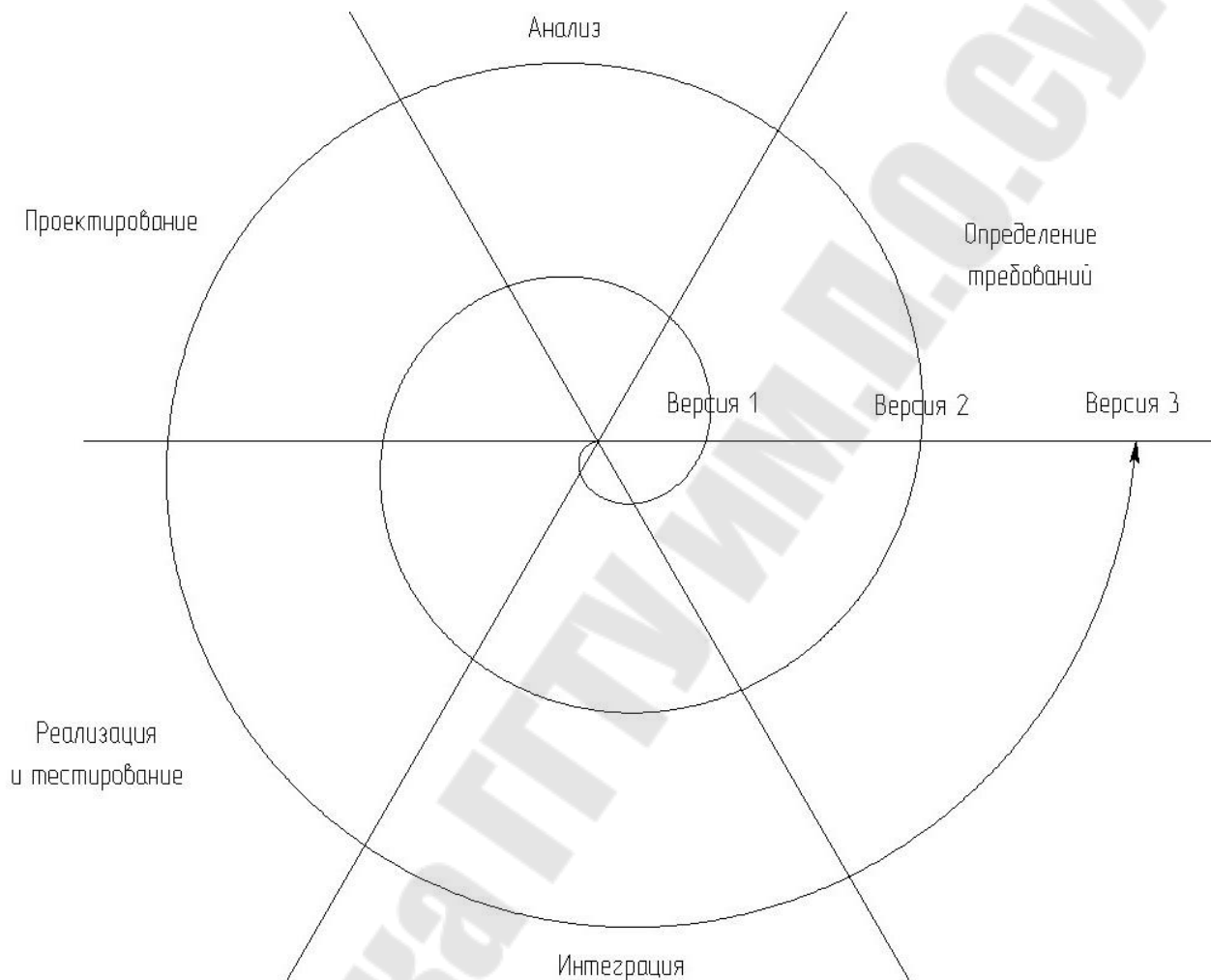


Рис. 2.7. Схема спиральной структуры жизненного цикла ПО

Каждый виток спирали соответствует модели поэтапного создания версии программного обеспечения. На каждом этапе уточняются цели и характеристики проекта, определяется его качество, планируются работы следующего витка спирали. Таким образом, углубляются и последовательно конкретизируются детали проекта, в результате чего выбирается обоснованный вариант его реализации.

Единая система *программной документации* устанавливает следующие виды эксплуатационных документов:

- ведомость – перечень эксплуатационных документов на программу;
- формуляр – определяет основные характеристики программы, комплектность и сведения об эксплуатации;
- описание применения – содержит сведения о назначении, области применения программы, методах и классе решаемых задач;
- руководство программиста – содержит сведения, необходимые при эксплуатации программ;
- руководство системного программиста – содержит сведения для проверки, обеспечения функционирования и настройки программы на условия конкретного применения;
- описание языка – определяет синтаксис и семантику языка взаимодействия пользователя с программой;
- руководство пользователя – содержит сведения, необходимые для обеспечения процедуры общения оператора ЭВМ в процессе выполнения программы;
- руководство по техническому обслуживанию – описание применения текстовых и диагностических программ при обслуживании технических средств.

## **2.6. Методическое и организационное 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 характера, 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.

**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.

Среди пользователей САПР можно выделить три квалификационные категории:

- разработчики – специалисты в области использования ЭВМ для решения прикладных задач, способные разрабатывать базовые методы автоматизации проектирования, общесистемное ПО, инструментальные и технологические средства проектирования, осуществлять генерацию и настройку САПР на условия конкретного применения;
- прикладные программисты – высококвалифицированные специалисты, знающие методологию проектирования и алгоритмы прикладной области и способные разрабатывать специализированное ПО;
- проектировщики – специалисты в области проектирования, хорошо освоившие все возможности САПР. Проектировщики не являются профессионалами в области вычислительной техники, но имеют прямой доступ к ресурсам ЭВМ.

### **Контрольные вопросы**

- 1 Каковы основные виды обеспечения САПР?
- 2 Какие возможности должны предоставлять компоненты технического обеспечения?
- 3 Что такое ЛВС?
- 4 Из каких основных элементов состоит ЛВС?
- 5 Что такое сервер?
- 6 Что такое рабочие станции?
- 7 Что такое скорость передачи информации?
- 8 Что такое специальное математическое обеспечение?
- 9 Что такое общее математическое обеспечение?
- 10 Что характеризует универсальность математического обеспечения?
- 11 Что характеризует алгоритмическая надежность математического обеспечения?



- 12 Какие языки относят к компонентам лингвистического обеспечения?
- 13 На какие виды делится исходная информация?
- 14 Какую информацию содержит справочник?
- 15 Какие сведения содержит проект?
- 16 Какие преимущества имеют реляционные модели?
- 17 Что такое проектирующие программные комплексы?
- 18 Что такое обслуживающие программные комплексы?
- 19 Что такое инструментальные программные комплексы?
- 20 В чем заключаются принципы системного единства, развития, совместимости и стандартизации?

### **3 Методические основы автоматизированного проектирования технологических процессов**

Автоматизация проектирования за короткий период прошла большой путь развития от машинной подготовки проектной документации до современных систем, автоматизирующих практически все этапы проектирования и изготовления новых изделий. Наиболее трудоемким этапом проектирования является разработка технологических процессов. Основу любой САПР ТП составляет определенная математическая модель, которая формализует последовательность действий инженера по проектированию технологических процессов. Многообразие производственных процессов обуславливает специфику методов их математического моделирования. Разумеется, чем сложнее прорабатываемое изделие, тем более сложной и многофункциональной должна быть САПР. На первом этапе автоматизации на предприятиях появились системы разработки конструкторской документации, несколько позже – системы моделирования, позволяющие исследовать проектируемые изделия на моделях, определять их оптимальные размеры и конфигурации, а затем – САПР ТП для определения оптимальных параметров различных технологических процессов и оснастки. Это значительно сокращает сроки выполнения отдельных стадий проектирования и повышает качество проектов.

Следующим этапом стало поколение систем CAD/CAM/CAE, основанных на использовании единой структуры базы данных проекта, что заложило фундамент для так называемой параллельной инженерии (concurrent engineering). При таком подходе все проектировщики работают с одной единой математической моделью, а не с набором различных модулей.

#### **3.1 Методы автоматизированного проектирования и состав САПР 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 в виде  $S_{ТП} = \{V, S\}$ .

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



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 [14, 27, 31, 33, 36] 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, выбора баз, а параметрический – на уровне определения межоперационных размеров, расчета режимов резания и т.д. (см. рис. 3.1).

В зависимости от степени полноты реализации синтеза (главным образом структурного) и анализа при автоматизированном проектировании технологических процессов можно выделить три основных метода: метод прямого проектирования, анализа (адресации, аналога) и 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. То есть 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 ИПС. Заранее создается и заполняется технологическая БД, включающая в себя информацию об имеющихся на

предприятия заготовках, станках, приспособлениях, инструментах и т.д. База данных имеет структурированный характер, т.е. четко поделена на разделы, подразделы, страницы, отдельные поля (фразы). В БД этой системы должны находиться поисковые образцы деталей и их технологические процессы. Сначала с помощью ИПС технологического назначения находят детали-аналоги. Далее на основе номеров чертежей в БД находят 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 на разных уровнях проектирования представляются меню 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, когда отсутствуют унифицированные технологические процессы (УТП) обработки заготовок.

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

При проектировании структуры единичных технологических процессов механической обработки деталей машин традиционно используют типовые и групповые ТП.

Типовые ТП 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 конструктивно-технологического элемента (КТЭ), при различных значениях свойств этих элементов (размеров, свойств материала и т.п.).

Групповые ТП 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.

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), которые при необходимости дорабатываются.

Доработка заключается в следующем:

- 1) проверяется возможность использования приспособления при заданной схеме базирования;
- 2) производится удаление отдельных переходов в заданной структуре УО;
- 3) выполняется расчет режимов резания;
- 4) 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 необходимую подготовительную работу. Из множества деталей заводской номенклатуры формируются группы, имеющие общие конструктивно-технологические признаки и 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. Сначала при разработке индивидуального технологического процесса из типового технологического процесса, как правило, исключаются лишние операции и переходы. Иногда, что бывает гораздо реже, недостающие операции и переходы могут добавляться в режиме ручного редактирования технологического процесса. Затем 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. Или, другими словами, из группового технологического процесса сначала исключаются лишние операции и переходы. Затем выполняется, как и в первом случае, так называемая параметрическая настройка: уточнение оборудования и технологической оснастки, выбор или расчет режимов резания и т.д.

После создания общего (типового или группового) технологического процесса можно приступать к автоматическому проектированию индивидуальных технологических процессов. Для этого достаточно создать описание конструкции детали, для которой необходимо спроектировать технологический процесс обработки.

Описание конструкции детали можно составить на входном языке САПР ТП или использовать электронную версию параметрического чертежа детали, созданного посредством системы геометрического моделирования. Описание чертежа детали заключается в заполнении общих сведений о детали (данные из штампа и технические требования

чертежа) и параметров элементов конструкции (поверхностей), имеющих на чертеже. После описания детали назначается общий технологический процесс соответствующей ей 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 данный метод не нарушает существующей специализации и традиций производственных подразделений, упрощает процесс проектирования, не требует трудно формализуемых процедур синтеза новых технологических процессов.

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

Разновидностями этого метода являются: метод, основанный на анализе размерных связей детали, и 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 его основе существенно отличаются друг от друга по следующим причинам:

– процедуры разработки (синтеза) технологических процессов относятся к разряду трудно формализуемых;

– ряд САПР ТП, построенных по методу синтеза, ориентированы на проектирование технологических процессов изготовления деталей определенного класса (например, «тел вращения»);

– 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.

Проектирование ТП на уровнях формирования последовательности этапов, операций и переходов складывается из двух фаз: структурного и параметрического синтеза.



Задача *структурного синтеза* заключается в формировании последовательности технологического процесса на соответствующем уровне. Задача *параметрического синтеза* – формирование свойств элементов каждого уровня, включенных в технологический процесс. Основными операциями параметрического синтеза являются выбор средств технологического оснащения (станков, приспособлений, инструмента) и нормирование, включающее расчет режимов обработки.

Источник информации и степень инвариантности знаний структурного синтеза определяются иерархическим уровнем решаемой проблемы: проектирование маршрута изготовления детали (набора этапов и операций), проектирование операционной технологии (набора переходов обработки КТЭ). Необходимо отметить, что знания для структурного синтеза существенно зависят от организационно-технической структуры предприятия и его традиций. Они индивидуальны для каждого предприятия. Знания же для параметрического синтеза заимствуются из справочников, методических пособий и нормативных материалов. Знания этого уровня относительно инвариантны и могут с минимальными изменениями использоваться на различных предприятиях.

Одним из важнейших показателей уровня САПР ТП является простота и удобство представления знаний для структурного и параметрического синтеза.

На рис. 3.2 показаны схемы моделей различных видов представления знаний для структурного синтеза технологических процессов. *Типовая модель* имеет фиксированную структуру. Структура рабочего процесса в *групповой модели* формируется путем удаления лишних технологических действий (операций или переходов). Наиболее общей является *метамодель*, представляющая собой И/ИЛИ-граф. В местах разветвлений на этом графе проставляются условия  $C_1, C_2, C_3$ , 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 виртуальная деталь содержит на одной и той же поверхности взаимоисключающие элементы, например дополнительные элементы, связанные со шпоночным или шлицевым соединением на одном и том же основном элементе (цилиндрической ступени вала).

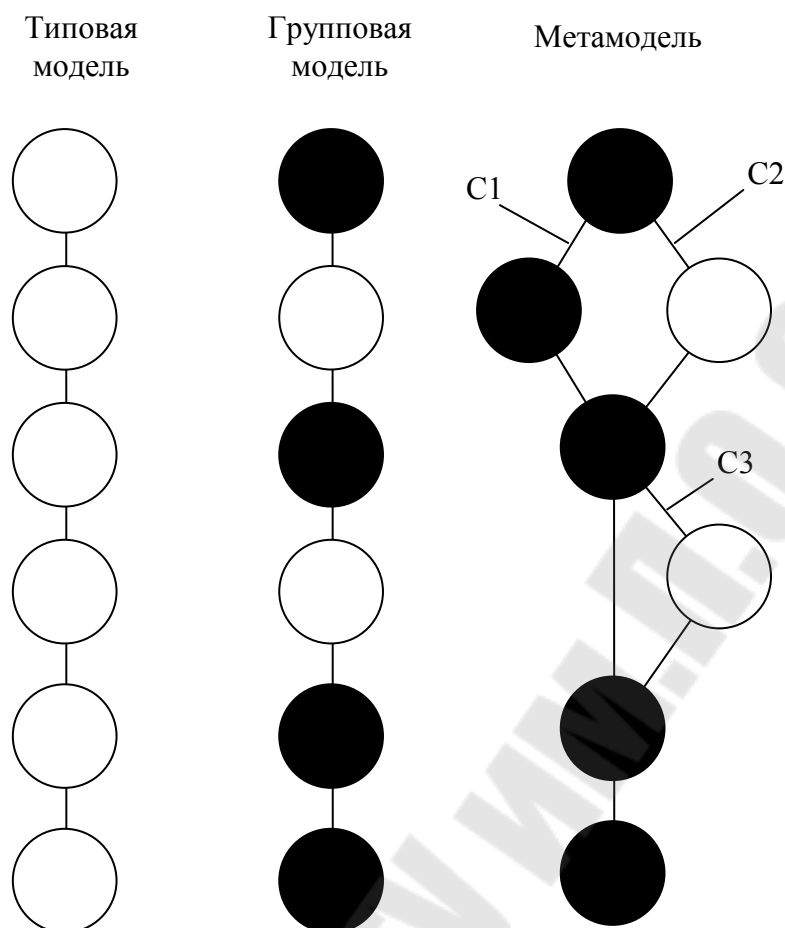


Рис. 3.2. Схемы моделей представления знаний для структурного синтеза технологических процессов:

Метамоделю интегрирует 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 изображении на экране И/ИЛ И-графа с постановкой в соответствующих местах на его ребрах условий выбора решений. Сам граф в целом также имеет условия своего применения. На основе такой информации автоматически генерируются программные средства базы знаний, которые затем используются при проектировании ТП. Для принятого набора КТЭ с использованием общемашиностроительных нормативных материалов разрабатывают базу знаний для структурного синтеза технологических процессов механической обработки.

Самым простым способом представления знаний для параметрического и структурного 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). Выполняемые при этом действия используют: расчеты по формулам; выбор данных из многовходовых таблиц, которые могут содержать как константы, так и формулы; выбор информации из баз данных; генерацию графических изображений и т.д. Например, при расчете режимов резания производится два действия: первое – расчет по формуле, второе – выбор коэффициентов, необходимых для расчета по этой формуле. Условием применения обоих действий (правил) является значение «Сверлить» в переменной «Вид перехода».

Проектирование нового технологического процесса с использованием САПР ТП занимает считанные минуты. Технологию с помощью простейшего интерфейса необходимо описать деталь, а затем наблюдать за генерацией структуры технологического процесса, отвечая на 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. При этом качество спроектированного ТП практически не зависит от квалификации технолога и определяется содержимым баз знаний.

Таким образом, метод синтеза в САПР технологических процессов реализует следующие основные этапы последовательности проектирования:

- 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 и готовой детали и на синтезе структуры операции.

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

*Состав 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 (рис. 3.3). *Подсистема* – это самостоятельный программный комплекс, решающий некоторую определенную задачу и функционирующий самостоятельно. В каждой подсистеме решается функционально законченная последовательность задач.

Различают два вида подсистем [28, 34]:

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

*Подсистемы общего назначения* обеспечивают 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, так как 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 (ИПС), которая 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.



Рис. 3.3. Типовой состав 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 УП для станков с ЧПУ.

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

### **3.2 Системный подход при проектировании технологических процессов**

В отличие от традиционных методов формализации системный подход основан на том, что сложные объекты и составляющие их элементы, а также свойства этих элементов рассматриваются как система, учитывающая их взаимосвязь и развитие [2, 4, 11, 22].

Под системным подходом понимается такой метод изучения объектов или явлений, который основывается на диалектико-материалистических принципах их целостного рассмотрения

Системный подход при проектировании ТП предусматривает использование следующих основных принципов:

- технологический процесс рассматривается, с одной стороны, как простой перечень отдельных его элементов (операций, переходов и т.д.), а с другой – как совокупность взаимосвязанных и взаимообусловленных элементов;

- процесс проектирования ТП представляется, с одной стороны, как простой перечень отдельных его этапов (выбор заготовки, определение маршрута обработки детали и т.д.), а с другой – как совокупность взаимосвязанных и взаимообусловленных этапов;

- процесс проектирования разбивается на рациональные части (выбор типа заготовки, расчет режимов резания и т.д.);

- принятие оптимальных решений;

- рациональное сочетание традиционных (иногда «ручных») методов проектирования и достижений других современных системных наук, ориентированных на использование ЭВМ.

Использование принципов системного подхода при проектировании позволяет систематизировать знания в любой области. В качестве примера на рис. 3.4 приведены варианты полученного результата при систематизации знаний (кружочками обозначены объекты, а прямыми линиями – связи между ними). Эти примеры показывают, чем отличается представление знаний без использования принципов системного проектирования и с их использованием.

При проектировании технологических процессов особенно важно правильно выбрать стратегию, которая в дальнейшем определяет методику автоматизированного проектирования и эффективность

использования для этих целей САПР. Ниже приведены некоторые из возможных стратегий проектирования технологических процессов.

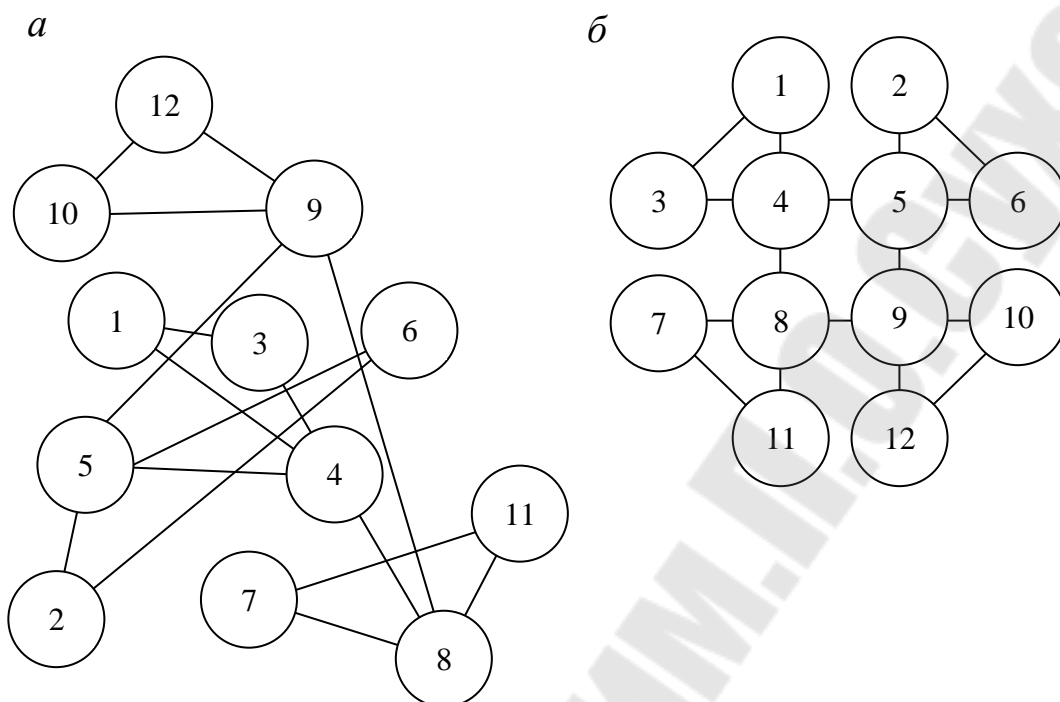


Рис. 3.4. Варианты представления знаний при их систематизации: *а* – без использования принципов системного проектирования; *б* – с использованием принципов системного проектирования

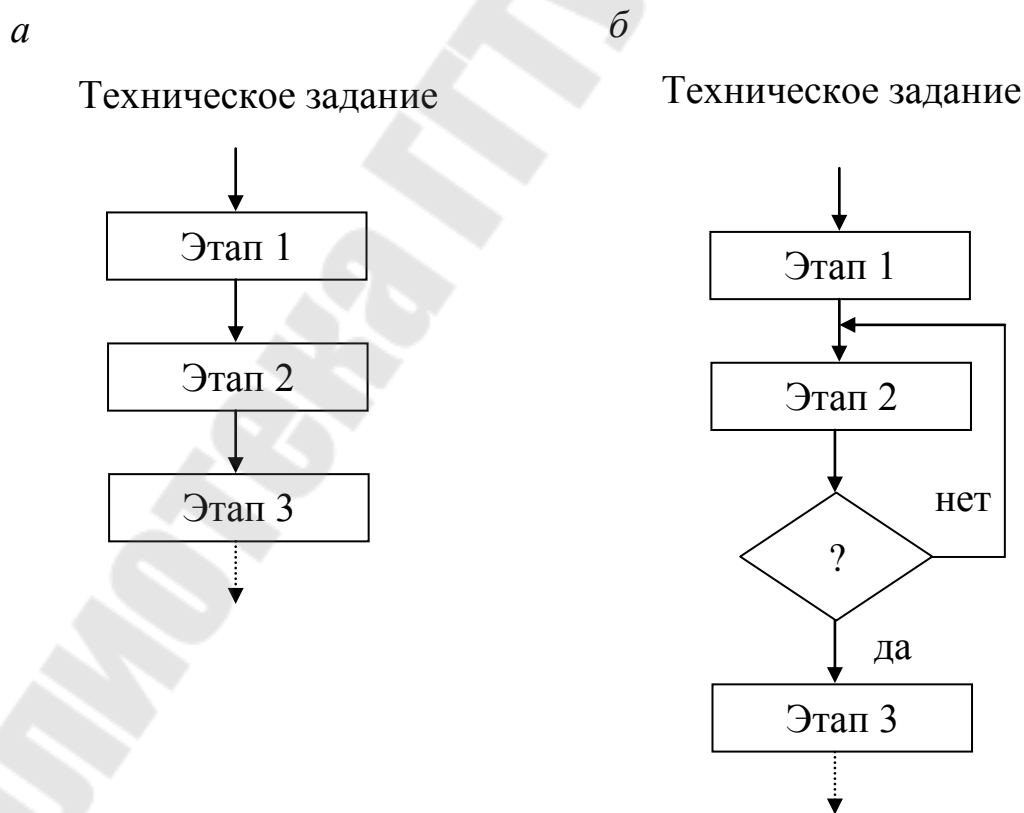


Рис. 3.5. Схемы проектирования с использованием линейной (*а*) и циклической (*б*) стратегий

*Линейная стратегия проектирования* (рис. 3.5, а) является наиболее оптимальной, так как обеспечивает минимальную трудоемкость и максимальную надежность.

*Циклическая стратегия* (схема с петлями) (рис. 3.5, б) характерна для многих компьютерных программ. Она называется итерационным методом, т.е. это процесс последовательного приближения к цели путем совершенствования разрабатываемых вариантов.

Наличие параллельных этапов в *разветвленной стратегии проектирования* (рис. 3.6) очень выгодно, так как позволяет уменьшить сроки проектирования.

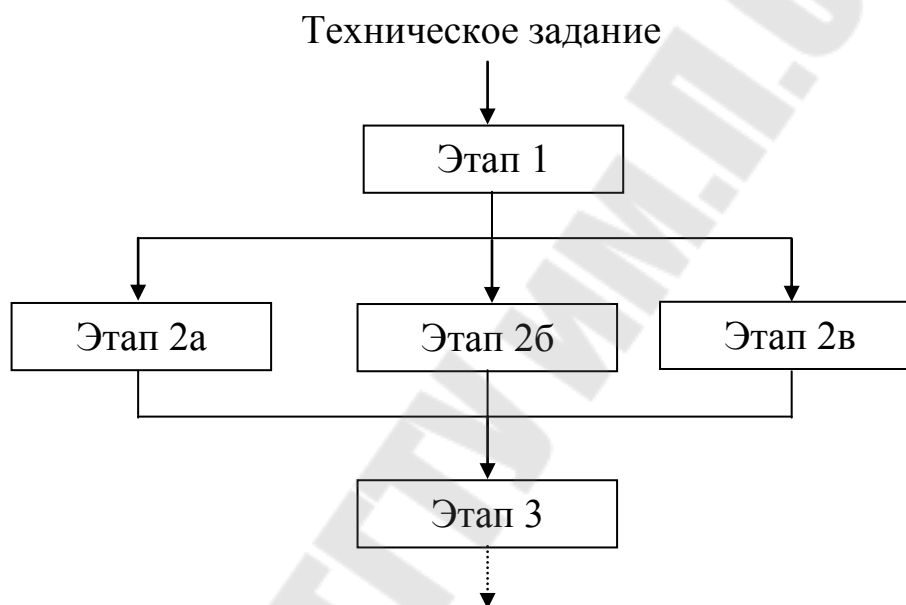


Рис. 3.6. Схема проектирования с использованием разветвленной стратегии

В *адаптивных стратегиях проектирования* (рис. 3.7) первое действие определяется только на первом этапе. В дальнейшем выбор каждого последующего действия зависит от результатов выполнения предыдущего. Это самая рациональная стратегия, так как проектирование производится с использованием наиболее полной информации. Она применяется при создании систем искусственного интеллекта.



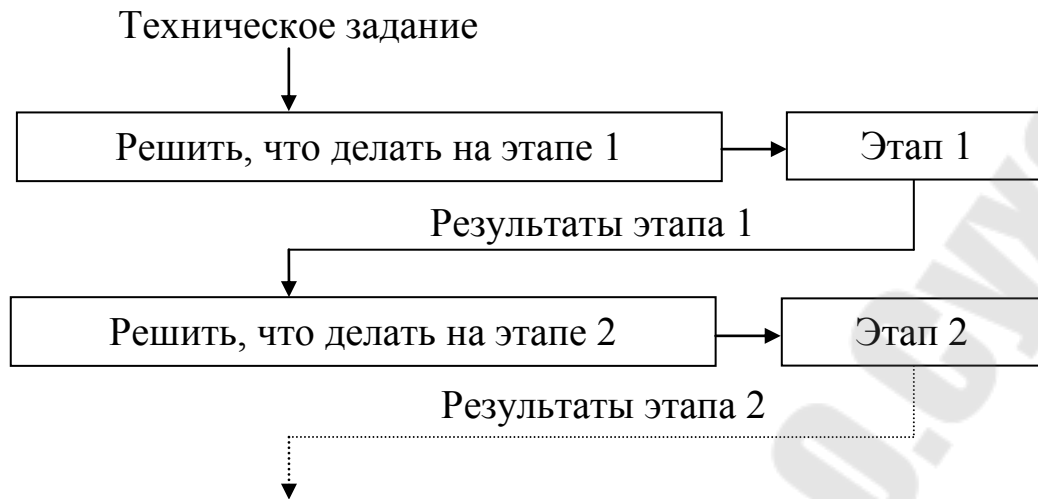


Рис. 3.7. Схема проектирования с использованием адаптивной стратегии

Стратегия случайного поиска (рис. 3.8) отличается абсолютным отсутствием плана. Она используется в новаторском проектировании, например при разработке технологических процессов по новым видам обработки.

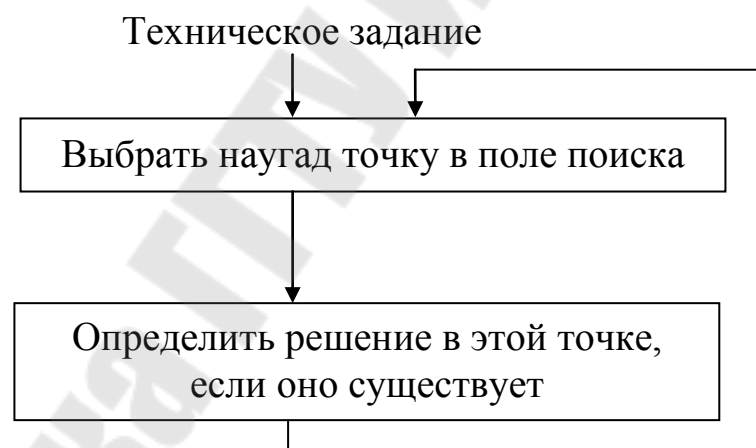


Рис. 3.8. Схема проектирования с использованием стратегии случайного поиска

Как видно из рис. 3.5-3.8 стратегия проектирования может детализироваться при переходе от одного уровня проектирования к другому. На определенных этапах проектирования целесообразно вводить методы управления стратегией (рис. 3.9). При этом необходимо добиваться максимальной линеаризации процесса проектирования с включением параллельных этапов и стараться исключить цикличность, особенно на верхних уровнях проектирования. Однако недостаточность информации не всегда позволяет реализовать линейную стратегию

проектирования, поэтому целесообразно процесс проектирования разбивать на частные задачи. Результат выполнения каждой задачи оформляется в виде технического задания, которое дает информацию о последующем плане (стратегии) ее дальнейшего решения.

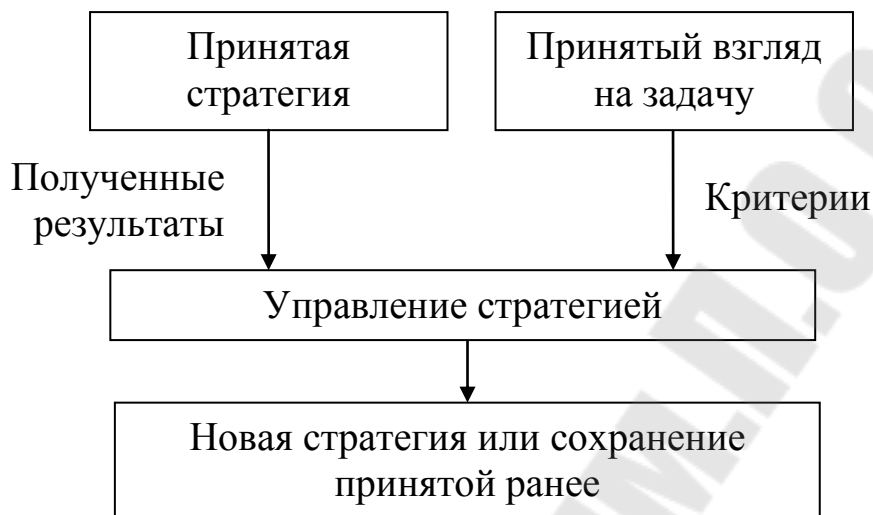


Рис. 3.9. Схема управления стратегией проектирования

Таким образом, процесс проектирования технологических объектов представляется в виде нескольких уровней или этапов. На каждом уровне проектирования исходными данными являются техническое задание (ТЗ) и набор элементов и их параметров, характеризующих рассматриваемый уровень. В результате проектирования разрабатывается техническая документация, описывающая отдельные стороны объекта, и ТЗ для продолжения проектирования на следующих уровнях. Системный подход включает комплекс методов, позволяющих анализировать сложные объекты как целое, рассматривать многие альтернативы (варианты), каждая из которых описывается большим числом переменных, и обеспечивать полноту каждой альтернативы. Система может рассматриваться как совокупность взаимосвязанных элементов, имеющих определенную структуру и допускающих их иерархию. 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 анализ как методология решения проблем дает возможность наметить необходимую последовательность взаимосвязанных операций, состоящую из формирования проблемы, разработки (конструирования) методов ее решения и реализации. 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.

Таким образом, 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  $C_{и}$ . 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  $C_3 \rightarrow C_{и}$ . В соответствии с разделением технологического процесса на операции общая функция расчленяется на ряд операционных функций  $\varphi_j$ . Функция каждой  $\varphi_j$ -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. 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 в условиях 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 свойства.

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

В технологии машиностроения предложена следующая *иерархическая классификация элементов технологических процессов* (рис. 3.10):

– 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; выполняется 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 их служебное назначение.

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

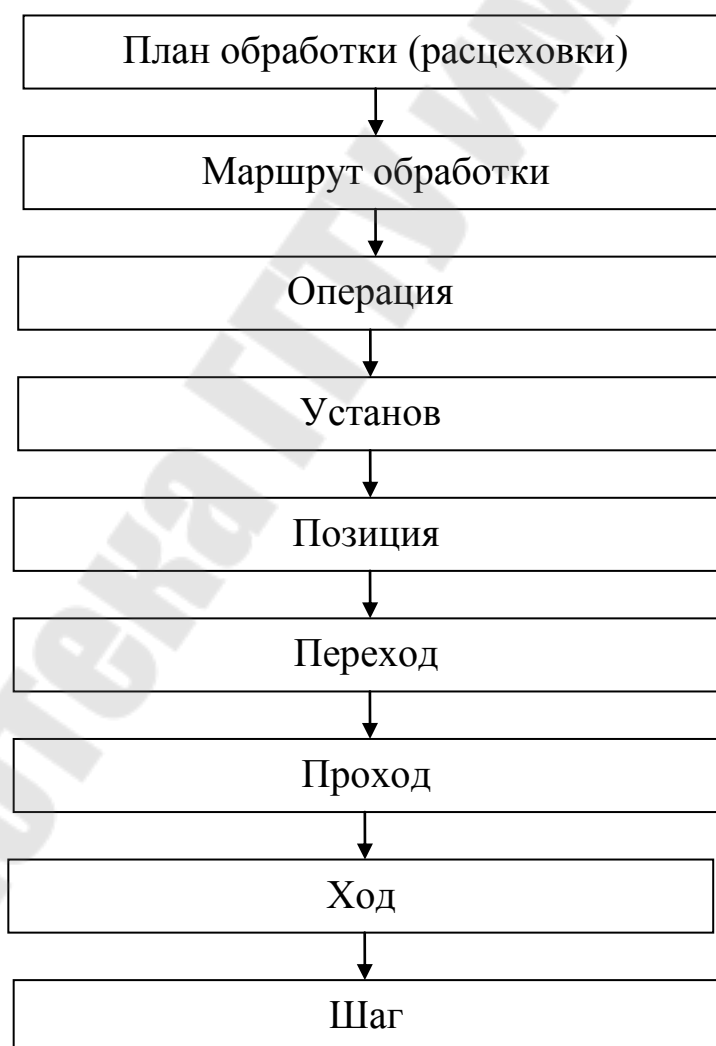


Рис. 3.10 Системная иерархия элементов технологических процессов

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

Системное единство САПР ТП 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).

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 по мере необходимости их модифицируют.

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:

- типизацию технологических операций и процессов;
- метод групповой обработки 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 [30]. Она базируется на классификации процессов, основанной на классификации деталей. В качестве классификационных признаков 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 быстроперенастраиваемых средств технологического оснащения.

Характерной особенностью данного метода является наличие групповых операций, которые проектируются таким образом, чтобы с одной наладкой на станке можно было производить обработку заготовок всех деталей, входящих в данную группу. Метод групповой обработки был предложен С.П. Митрофановым [20].

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 метода основаны на унификации конструктивных и технологических элементов, которая выполняется на разных уровнях проектирования:

- на уровне технологического перехода;
- на уровне технологической операции;
- на уровне технологического 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 (рис. 3.11) состоит из двух унифицированных переходов: «Сверлить отверстие *A*»; «Зенкеровать отверстие *B*, выдерживая размер *h*».

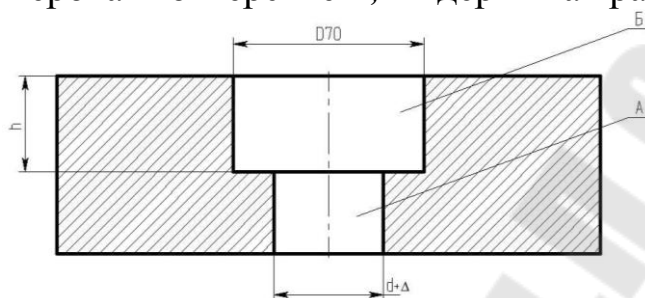


Рис. 3.11. Вариант типового сочетания элементарных поверхностей

Параллельно с унификацией переходов разрабатывают классификаторы переходов, режущих инструментов и элементарных поверхностей, 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 некоторой, заранее установленной совокупности поверхностей; технологическое оборудование; схемы базирования; вид приспособлений.

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

Принципы групповой технологии базируются на технологической общности деталей, что позволяет использовать одно и то же оборудование, облегчает планирование и организацию производства. Методы типовой и групповой технологии позволяют свести к минимуму индивидуальные технологические разработки, применять наиболее совершенные методы обработки и обеспечивать при этом наивысшую производительность, экономичность и качество.

Типовые ТП находят применение главным образом в крупносерийном и массовом производствах. Принцип групповой технологии лежит в основе переналаживаемой технологии в мелко- и среднесерийном производствах. В отличие от типизации ТП при

групповой технологии общим признаком объединения деталей в группы является общность обрабатываемых поверхностей и их сочетаний, т.е. общность оборудования, необходимого для обработки детали или отдельных ее поверхностей. Поэтому групповые методы обработки характерны для обработки деталей широкой номенклатуры. Типизация ТП и метод групповой технологии являются основными направлениями унификации технологических решений, повышающей эффективность производства.

### **3.3 Исходная информация для проектирования технологических процессов**

Основным и наиболее ответственным этапом технологической подготовки производства является проектирование технологических процессов с оформлением комплекта необходимой технологической документации. Этот этап охватывает основной круг вопросов технологической подготовки производства и решающим образом влияет на сроки подготовки и освоения новых изделий, обеспечение их качества. В процессе автоматизированного проектирования технологических процессов перерабатываются большие объемы 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 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 ЕСТП, соответствующих отраслевым стандартам и стандартах 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:

– описаниях 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.).

### **3.4 Методика описания изделий в САПР ТП**

Для создания интегрированных конструкторско-технологических систем требуется соответствующая методика описания деталей и сборочных единиц. Однако во многих из существующих конструкторских САПР модели изделий являются геометрическими, в то время как для автоматизации проектирования технологических процессов необходимы модели концептуальные, соответствующие принятой разработчиком концепции построения САПР.

Геометрическая модель позволяет рассчитывать траектории инструментов при обработке деталей на станках с ЧПУ и поэтому способна обеспечить основу для построения систем класса CAD/CAM. Однако на станках с ЧПУ обрабатываются далеко не все детали; да и для тех деталей, которые подлежат такой обработке, она составляет только часть маршрутного технологического процесса.

Концептуальная модель детали может основываться на понятии конструктивно-технологического элемента (КТЭ). Такой элемент является конструктивным в том плане, что он выполняет определенную функцию в конструкции детали (см. рис. 3.11). Например, обеспечивает базирование

детали в сборочной единице (цилиндрические и конические поверхности, шпоночные пазы и т.п.) или соединяет деталь в сборочном узле (резьбы, зубчатые венцы и т.п.). Вместе с тем, КТЭ имеет один или несколько технологических маршрутов его изготовления, сформированных из набора переходов.

Фрагмент перечня видов ассоциативных поверхностей (элементов), используемых в системе автоматизированного проектирования технологических процессов ТехноПро приведен в приложении 1. Состав общих параметров, характеризующих детали машин класса «тела вращения» приведен в приложении 2. Иллюстрация к закреплению за видами наружных элементарных поверхностей класса «тела вращения» характеризующих их параметров приведена в приложении 3. Фрагмент информационного массива, используемого для выбора ключевого слова технологического перехода и группы операций, приведен в приложении 4.

### **3.5 Последовательность компьютерного проектирования технологических процессов**

Проектирование технологического процесса сопряжено с неоднозначностью информации и многовариантностью технологических решений. Автоматизация решения такой многокритериальной инженерной задачи требует определенных 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 макро- и микрогеометрию, 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 величину 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 при эксплуатации (например, требования гарантированной величины дисбаланса и условий утилизации, требования к состоянию необрабатываемых поверхностей).

Рассмотрим подробнее последовательность этапов проектирования технологических процессов. Каждый из шагов проектирования представляет собой процедуру процесса проектирования. При этом необходимо иметь в виду, что САПР – это человеко-машинная система. В каждой конкретной САПР (а их более 20; см табл. 1.2) автоматизирован тот или другой этап (шаг), и принятие решения осуществляет либо пользователь, либо компьютер. Поэтому описанные ниже этапы проектирования технологических процессов отражают общую последовательность без указания методов их автоматизации.

### **3.5.1 Анализ исходных данных для разработки технологического процесса**

Основные документы, необходимые для решения задачи на этом этапе:

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

На рис. 3.12 представлена схема последовательности выполнения анализа исходных данных (АИД) при разработке ТП.

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

**Шаг 1.2. Оценка технологичности конструкции** (технологическая отработка чертежа детали):

- сравнение с аналогичными деталями, принятыми в качестве базовых по трудо- и материалоемкости, унификации конструктивных элементов, требованиям к точности изготовления;
- выявление возможных трудностей при обеспечении параметров шероховатости поверхности, размеров, форм и расположения поверхностей;
- увязка с возможностями методов окончательной обработки, возможностями оборудования и метрологических средств;
- анализ конфигурации и размерных соотношений детали;

- установление обоснованности требований точности;
- выявление возможных изменений, не влияющих на параметры качества детали, но облегчающих изготовление и позволяющих применять высокопроизводительные технологические методы и режимы обработки;
- 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;
- анализ специальных технических требований (балансировка, подгонка по массе, термическая обработка, нанесение покрытий и т.п.), а также условий их выполнения в ТП и методов контроля;
- утверждение изменений в рабочие чертежи и технические требования на изготовление.

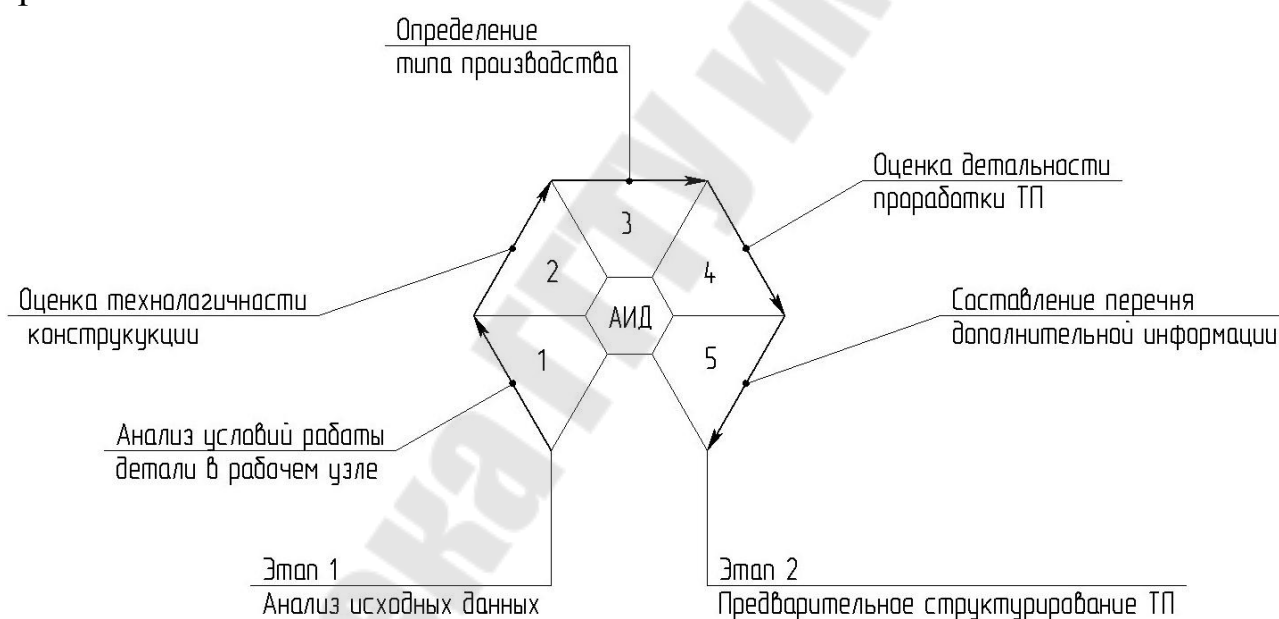


Рис. 3.12 Схема последовательности анализа исходных данных при разработке ТП

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

**Шаг 1.4. Оценка (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 на операционном уровне);
- 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 этапе 1 в связи с неглубокой детальностью проработки ТП производятся по приближенным зависимостям из-за недостаточности информации для точных расчетов.

Пример формализации работ для автоматизации технологического анализа конструкторской документации, в частности размерных соотношений детали приведен в 3.6.3.

### 3.5.2 Проектирование принципиальной схемы обработки детали (предварительное структурирование ТП)

Цель этого этапа – провести первое структурирование ТП по уровням точности обработки, выделить однородные виды обработки и определить соответствующие им маршруты деталей.

Основные документы, необходимые для решения задачи на данном этапе:

- конструкторская документация на изделие;
- технологический классификатор изделий;
- 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, а в случае принятия решения о необходимости разработки нового ТП формулируются основные принципы его построения.

Исходными данными является информация о форме, размерах и точности обрабатываемой детали, программа выпуска.

Техническими ограничениями, определяющими возможные варианты принципиальной схемы ТП, будут набор применяемых на заводе

прогрессивных методов обработки поверхностей различных видов и их характеристика.

На рис. 3.13 представлена схема, поясняющая последовательность действий при выполнении этапа 2.

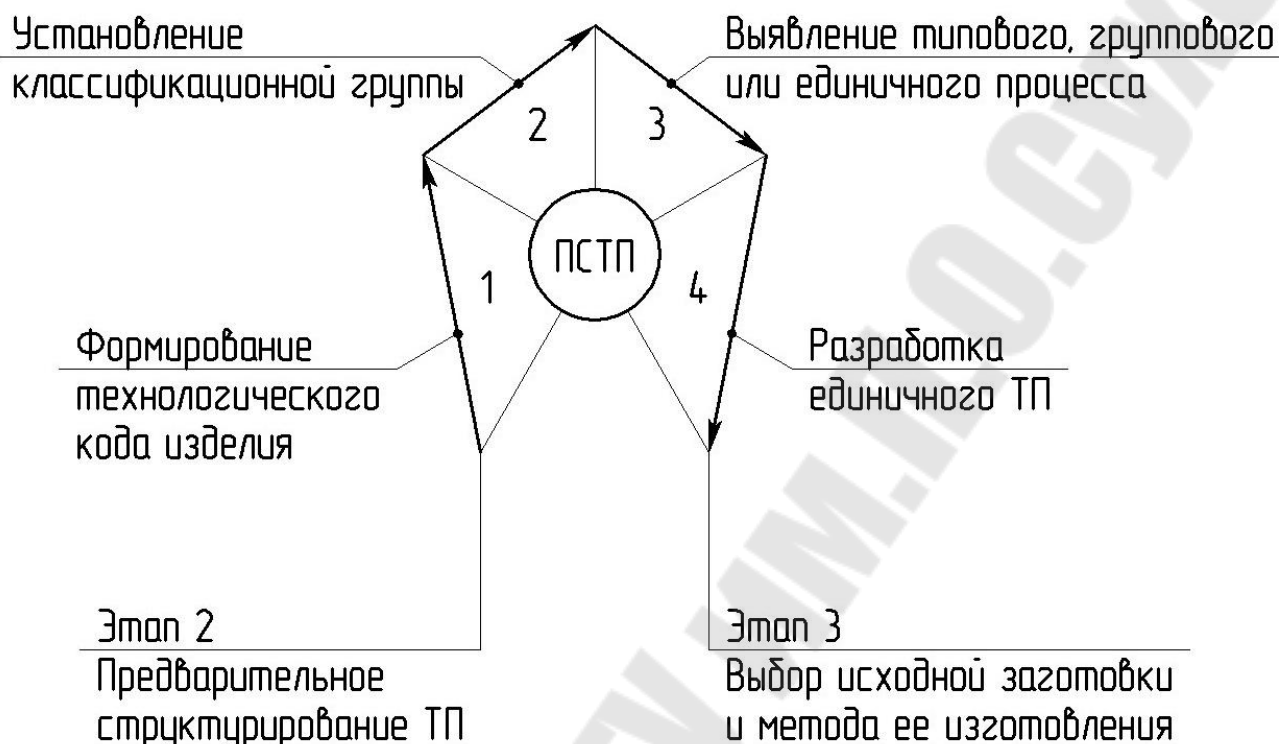


Рис. 3.13. Схема последовательности действий при предварительном структурировании технологического процесса

**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:

– выбор возможных способов получения заготовки без детальной разработки технологии;

– 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 по существу, происходит синтез переходов



обработки (но не операций) без привязки к определенным моделям оборудования и детального анализа процесса обработки;

– дифференцирование технологических переходов по видам обработки (черновая, получистовая, чистовая, термическая, гальваническая и т.д.).

*Примечание.* По сути, на этапе 2 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.

### 3.5.3 Выбор исходной заготовки и метода ее изготовления

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 рис. 3.14 представлена схема последовательности действий при выборе исходной заготовки.

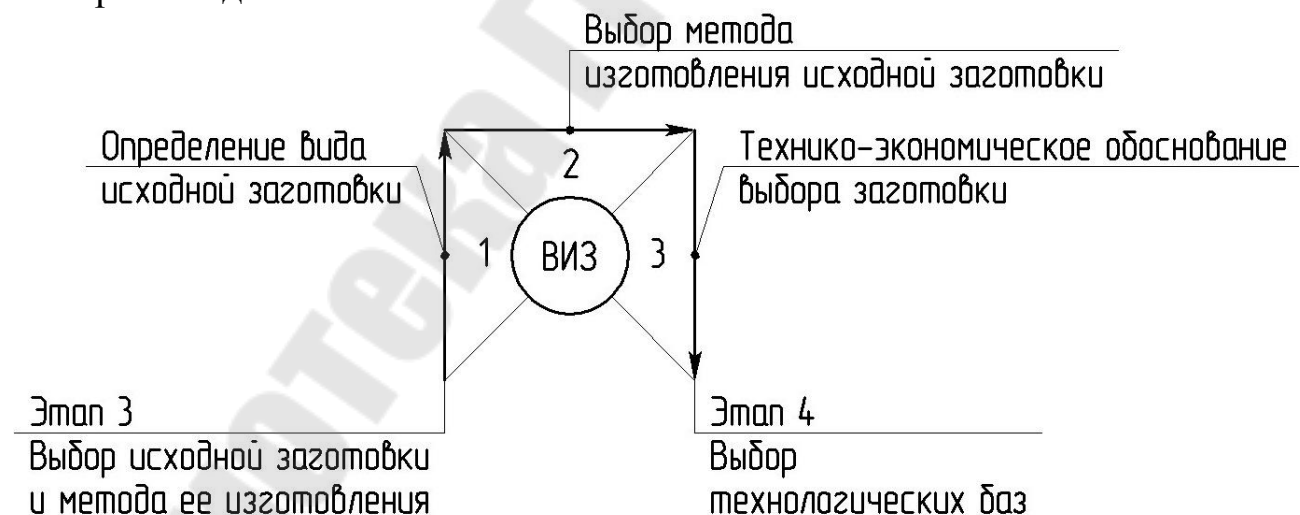


Рис. 3.14. Схема последовательности действий при выборе исходной заготовки

**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.

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 низкая себестоимость заготовки повышает себестоимость механической обработки;

- на использовании методов группового получения заготовок.

### 3.5.4 Выбор технологических баз

Основные документы, необходимые для решения задач этого этапа:

- классификатор способов базирования;
- методика выбора технологических баз.

Последовательность действий при выборе технологических баз представлена на рис. 3.15.



Рис. 3.15. Схема последовательности действий при выборе технологических баз

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 системы координат.

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

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

В сложных деталях часто встречаются поверхности одинакового ранга. Это приводит к невозможности установления последовательности операций обработки из-за равнозначности поверхностей. В таком случае установление наиболее рациональной последовательности укрупненных операций производят на основе анализа размерных цепей, руководствуясь принципом совмещения технологических баз с конструкторскими.

Принцип совмещения баз требует, чтобы в роли технологической базы (установочной, исходной, измерительной) по отношению к каждой поверхности детали использовался тот же ее элемент, 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 позволяет 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.**

*Примечание.* Если проектирование ведется на основе комплексного (типового) технологического процесса, то базы в нем заранее predeterminedены, поэтому задача выбора баз сводится к отысканию поверхности в частной детали, соответствующей комплексной.

### **3.5.5 Составление технологического маршрута обработки**

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

- документация типового, группового или единичного технологического процесса;
- чертеж детали, созданный в системе конструкторско-технологической параметризации;
- полученные на предыдущих этапах несколько наиболее рациональных вариантов принципиальных схем ТП, сведения о форме, размерах и точности детали и заготовки, программе выпуска.

Постановка задачи – 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.

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

На рис. 3.16 представлена схема последовательности действий при составлении технологического маршрута обработки.

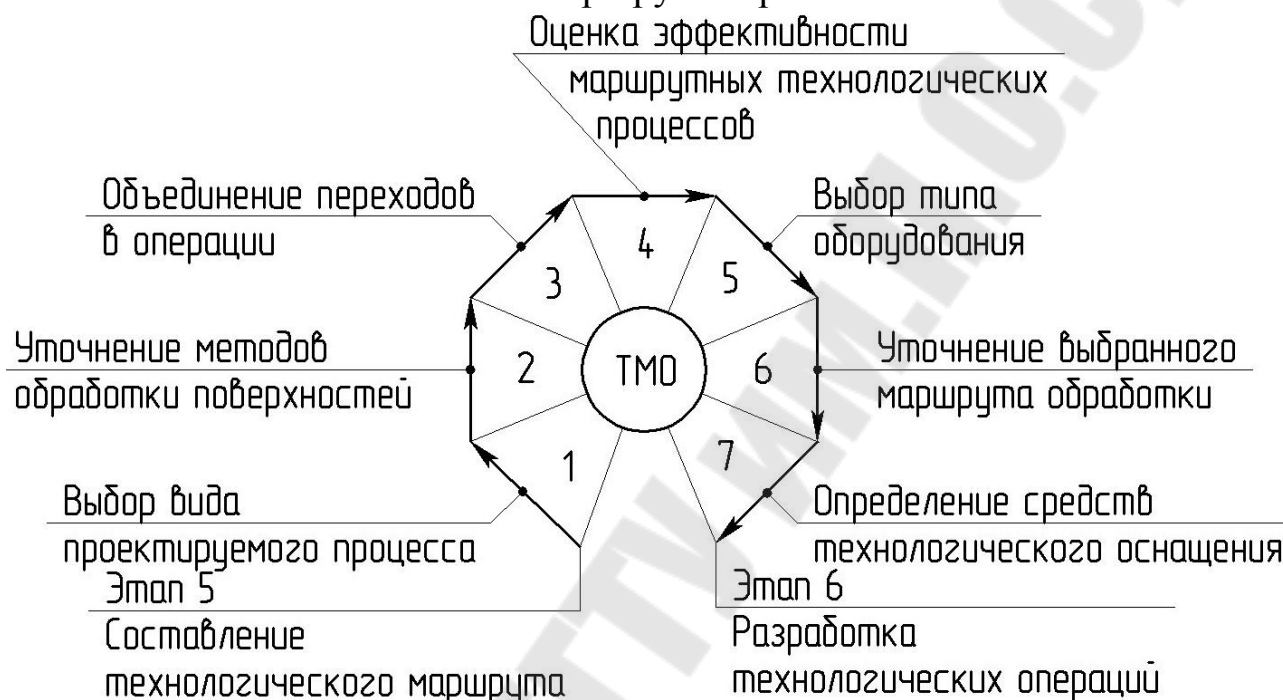


Рис. 3.16. Схема последовательности действий при составлении технологического маршрута обработки

**Шаг 5.1.** Выбор вида проектируемого технологического 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.

**Шаг 5.5.** Выбор типов оборудования.

**Шаг 5.6.** Уточнение выбранного маршрута обработки (по типовому или групповому технологическому процессу).

При формировании алгоритмов последовательности операций необходимо учитывать:

- 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.

Если обрабатываемые поверхности не связаны жесткими допусками и техническими требованиями или их величина настолько велика, что не оказывает влияния на последовательность обработки, то должны учитываться расстановка оборудования и опыт 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 на склад или на сборку.

Использование в алгоритмах опыта проектирования технологии на конкретном предприятии позволяет учесть влияние организационных и других факторов на последовательность операций, которое на сегодняшний день не поддается расчету. Например, на многих станкостроительных заводах 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 этапе 5 принимается окончательное решение о способе получения заготовки, а при установлении общей последовательности обработки рекомендуется учитывать следующие положения:

- каждая последующая операция должна уменьшать погрешности предыдущей обработки и улучшать качество поверхности;

- в первую очередь следует обрабатывать поверхности, которые будут служить технологическими базами для последующих операций;
- далее необходимо обрабатывать поверхности, с которых снимается наибольший слой металла, что позволит своевременно обнаружить возможные внутренние дефекты заготовки;
- операции, при которых возможно появление брака из-за внутренних дефектов в заготовке, нужно производить на ранних стадиях ее обработки;
- обработка остальных поверхностей ведется в последовательности, обратной степени их точности, т.е. чем точнее должна быть поверхность, тем позже надо ее обрабатывать. 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);
- заканчивается процесс изготовления детали обработкой той поверхности, которая должна быть наиболее точной и имеет наибольшее значение для эксплуатации детали. Если она была обработана до выполнения других смежных операций, то может возникнуть необходимость ее повторной обработки;
- отверстия нужно сверлить в конце технологического процесса, за исключением тех случаев, когда они служат базами;
- 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 иногда их выполняют за одну операцию чтобы избежать трудоемких переустановок крупногабаритных и тяжелых заготовок. Такое построение маршрутной технологии характерно для мелкосерийного производства. Во всех случаях выполнения черновой и чистовой обработок за одну операцию рекомендуется сначала провести черновую обработку всех поверхностей, а затем выполнить чистовую обработку тех поверхностей, для которых она необходима;
- если деталь по ходу технологического процесса подвергается термической обработке, то механическая обработка делится на две части: до термической обработки и после нее;
- 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;

– 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. Составление маршрутов обработки существенно упрощается при использовании типовых ТП на данную группу деталей.

### **3.5.6 Разработка технологических операций**

Основные документы, необходимые для решения задач этапа:

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

Постановка задачи – 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:

- набор типоразмеров оборудования, применяемого в цехах завода для выполнения указанной операции;
- набор универсальных, групповых и специализированных установочно-зажимных приспособлений, используемых на каждом типе станков;

– технологические нормативы на припуски и напуски, время выполнения отдельных элементов операции, поправочные коэффициенты для расчета режимов резания и другие технико-экономические данные.

На рис. 3.17 представлена схема последовательности действий при разработке технологических операций.

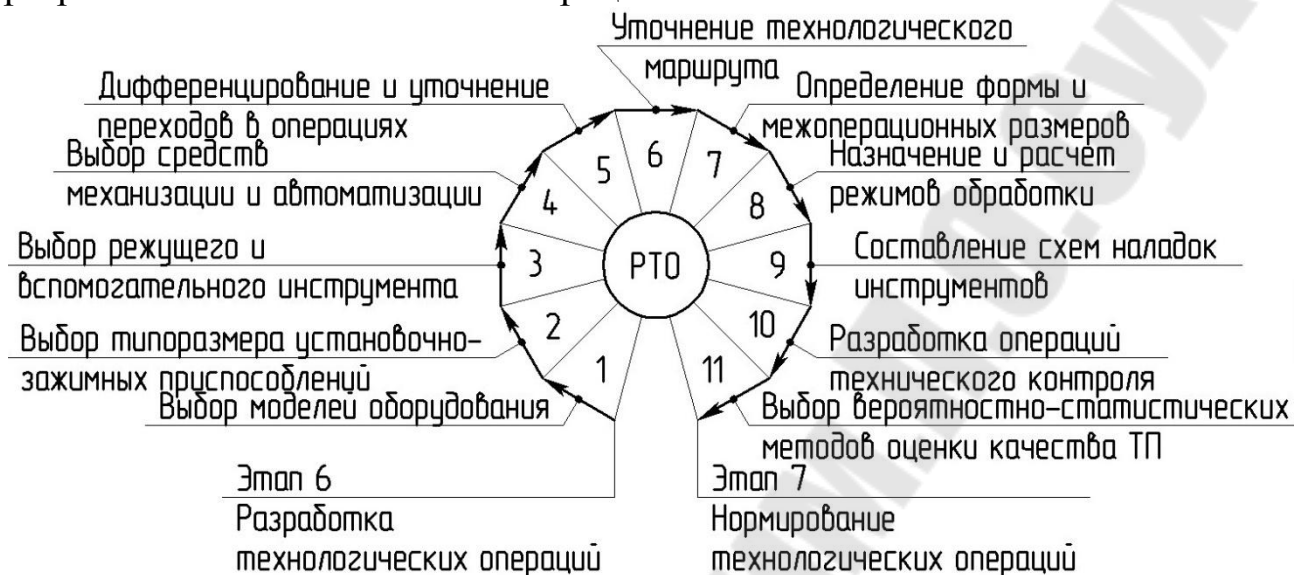


Рис. 3.17. Схема последовательности действий при разработке технологических операций

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

Выбор модели станка определяется, прежде всего, возможностью обработки на нем поверхностей требуемых размеров, формы и качества. Если эти требования могут обеспечить станки нескольких моделей, то одну из них выбирают из следующих соображений:

- соответствия основных размеров габаритам изготавливаемых деталей, устанавливаемых по принятой схеме обработки;
- соответствия производительности заданному типу производства;
- возможности работы с оптимальными режимами резания;
- соответствия станка требуемой мощности;
- возможности механизации и автоматизации выполняемой обработки;
- обеспечения наименьшей себестоимости обработки;
- необходимости использования имеющихся станков;
- возможности приобретения станка;
- в условиях массового производства нужно стремиться к тому, чтобы количество станков на одной операции было не больше двух. Если это условие не выполняется, следует выбрать более производительную модель станка (например, многошпиндельного, многопозиционного или



агрегатного).

**Шаг 6.2. Выбор (уточнение) типоразмера установочно-зажимного приспособления:**

- выбор (уточнение) схемы базирования и установки детали;
- поиск информации о имеющихся на предприятии приспособлениях происходит в следующей последовательности:
  - ✓ поиск технической документации на разработку существующих приспособлений;
  - ✓ поиск информации о приспособлениях, имеющихся на складе или задействованных в производстве;
  - ✓ формирование заказа на производство и (или) поставку со склада (закупку у производителя) приспособления существующего типоразмера;
- при отсутствии готовых приспособлений и (или) технической документации на них выполняют:
  - поиск информации об аналогичных приспособлениях;
  - разработку принципиальных схем оригинальных приспособлений при отсутствии приспособлений-аналогов;
  - 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 транспортных средств:**

- выбор устройств механизированной или автоматизированной загрузки и разгрузки заготовок, межоперационных транспортных средств, бункерных и магазинных устройств и накопителей, средств автоматического контроля и др.;
- определение целесообразности использования средств механизации и автоматизации на основе расчета технико-экономических показателей;
- 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 включает проектирование технологических переходов и формирование допустимых вариантов структуры операции.**

Структура перехода для одной и той же поверхности может быть различной. Например, точение торца можно производить с помощью продольной и поперечной подач, комбинированным способом на предварительно настроенном станке или методом пробных проходов. В

зависимости от выбранного способа выполнения перехода различными будут 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 для проектирования технологических переходов:

- схема установки детали, сведения о жесткости основных узлов технологической системы, ряды частот вращения шпинделя и величин подач 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 и мерительного инструмента, 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.

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:**

- назначение припусков расчетно-аналитическим или опытно-статистическим методом;

- расчет межоперационных размеров и допусков на них;

- проверка возможности получения детали из ранее спроектированной заготовки. При неудовлетворительном результате – корректировка размеров заготовки;

- назначение напусков на заготовку (если невозможно использовать стандартизованную заготовку, ее проектирует технолог механического цеха).

**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;

- корректировку 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);

- корректировку расчетных значений величины скорости, определение частоты вращения шпинделя станка;

- определение основного технологического времени.

*Примечание.* Как правило, режимы резания рассчитывают 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:

– определение номенклатуры контролируемых параметров качества детали и этапа ТП, после или перед которым необходим контроль этих параметров;

– определение средств контроля;

– определение доли деталей, подвергаемых окончательному, а в случае необходимости – промежуточному контролю.

*Примечание.* Наличие отдельного рабочего места контролера не исключает контроль результатов обработки на рабочем месте самим рабочим или с использованием средств автоматического контроля. Контроль на стадии проектирования технологического процесса по обеспечению требуемых чертежом допусков линейных и угловых размеров может осуществляться на основе размерного анализа.

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

Все действия, выполняемые на этапе 6, лишь детализируют предшествующий ему этап, так как они уже были выполнены на этапе разработки маршрутной технологии, но с недостаточной степенью детальности.

### 3.5.7 Нормирование технологических операций

**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 рис. 3.18 представлена схема действий при нормировании технологических операций.

**Шаг 7.1.** Анализ исходных данных для расчета 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 (масса материала, из которого изготавливается деталь, не анализируется) и потребности в энергоресурсах (электроэнергия, вода, сжатый воздух и др.).

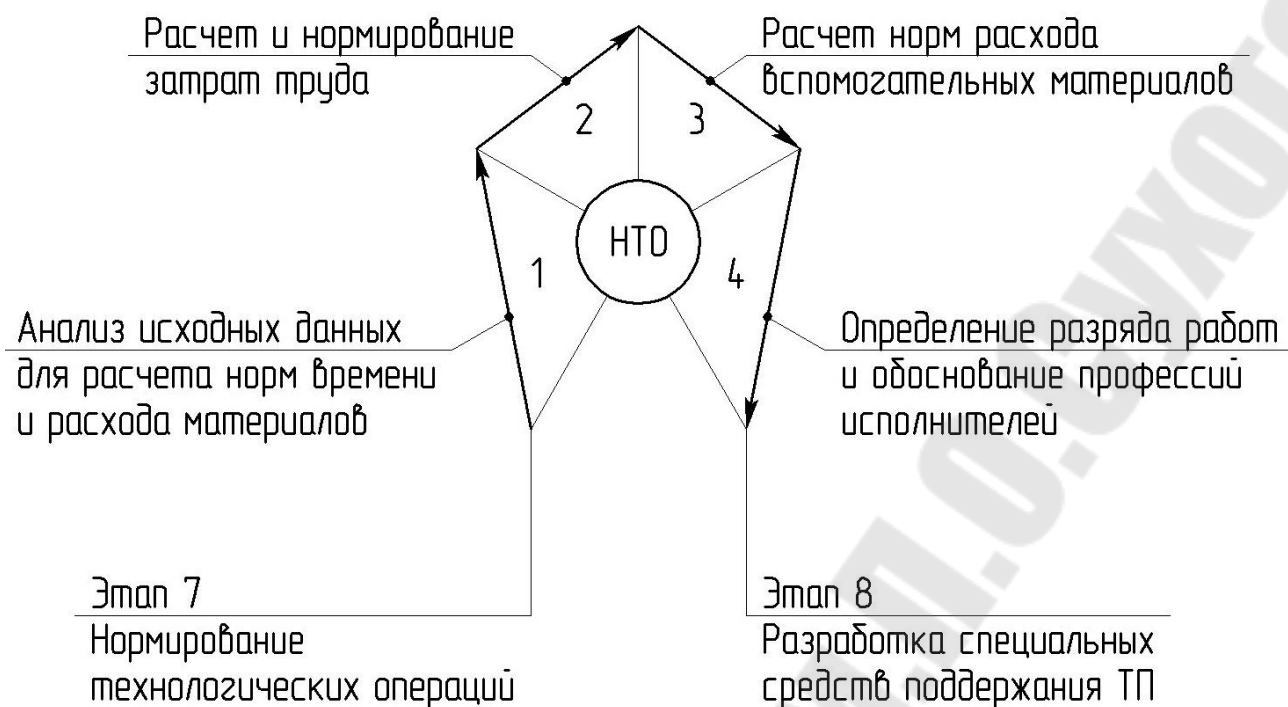


Рис. 3.18. Схема последовательности действий при нормировании технологических операций

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

*Примечание.* На этапе 7 обычно производится лишь количественная оценка затрат времени и материальных ресурсов на производство одной детали. По сути, здесь выполняется первая часть экономических расчетов, которые не относятся к кругу основных задач технолога. Данный этап является последним из этапов построения технологии, на которых технолог является наиболее квалифицированным специалистом, принимающим решения, поскольку имеет всю информацию в законченном виде. Последующие технико-экономические расчеты лучше выполнит экономист, 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.

### 3.5.8 Разработка специальных средств поддержки технологического процесса

На рис. 3.19 представлена схема последовательности действий при разработке специальных средств поддержки технологического процесса.

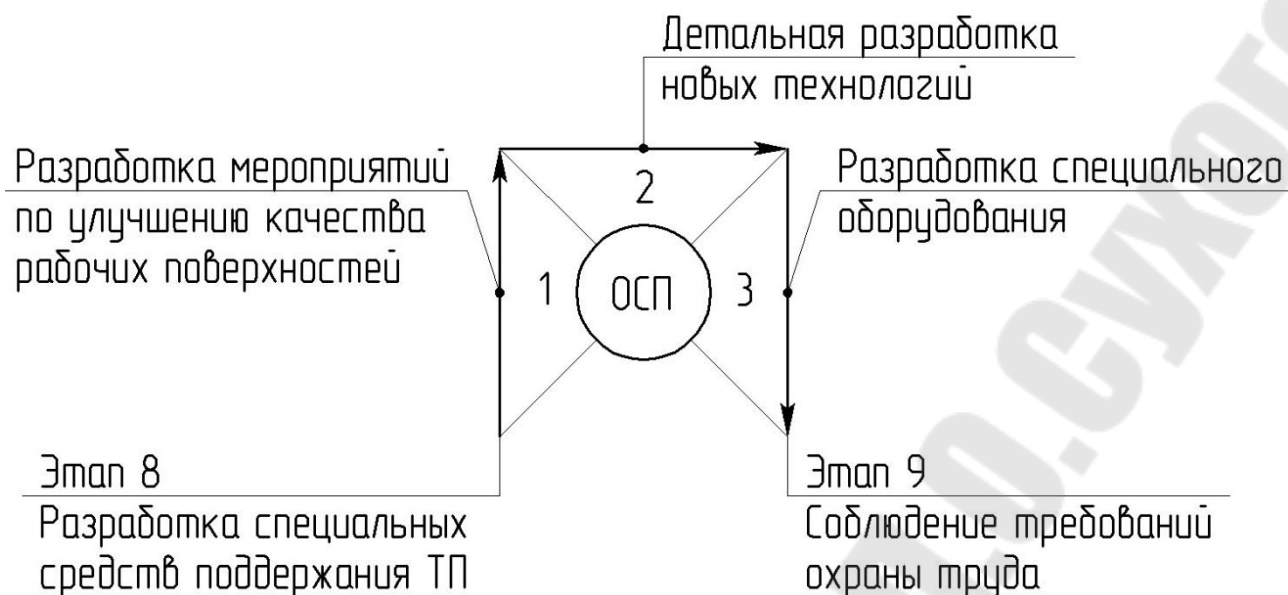


Рис. 3.19. Схема последовательности действий при разработке специальных средств поддержки технологического процесса

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

- выбор методов улучшения;
- разработка технологических операций упрочнения поверхностей и других операций;
- проектирование технологического оборудования и оснастки, режимов обработки, оборудования и режимов испытаний или контроля для вышеуказанных операций;
- расчет технико-экономической эффективности внедрения мероприятий.

**Шаг 8.2.** Детальная разработка новых технологий. На этом шаге 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.

### 3.5.9 Соблюдение требований охраны труда

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 этапа 9 может привести к остановке производства органами госнадзора.

### 3.5.10 Расчет экономической эффективности технологического процесса

Цель – предоставить «организаторам производства» возможность выбора «наилучшего» варианта процесса производства детали из числа наиболее технологически выгодных. Основным документом, необходимым 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 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 такой ситуации: спроектированный процесс требует использования специального оборудования, которого нет 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. Его обычно называют *производственно-оптимальным*.

Следовательно, в методике выбора оптимального ТП должна быть заложена возможность учета особенностей реального производства.

*Примечание.* Этап 10 обычно приводит к выбору конкретного варианта техпроцесса, поэтому в той или иной степени детализации он 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.

### 3.5.11 Оформление технологических процессов и (или) управляющих программ для станков с ЧПУ

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

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

На рис. 3.20 представлена схема действий при оформлении технологической документации.

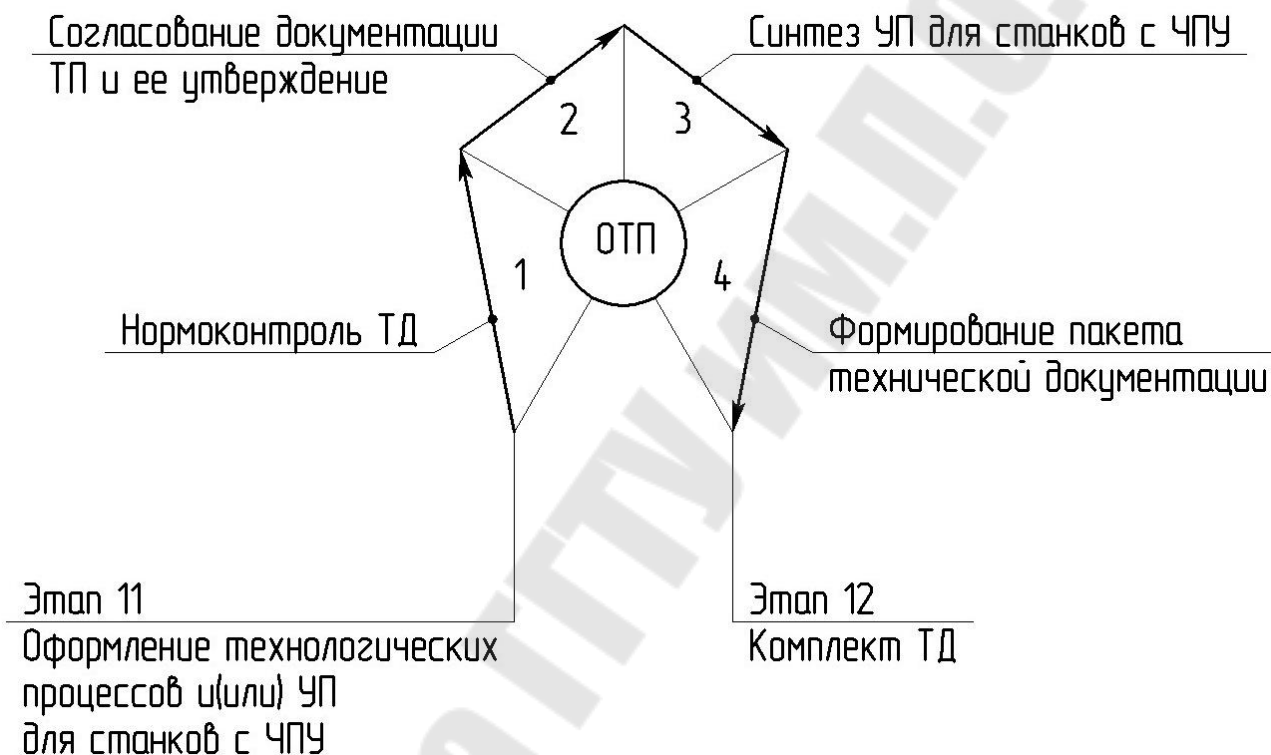


Рис. 3.20. Схема последовательности действий при оформлении технологических процессов и(или) управляющих программ для станков с ЧПУ

**Шаг 11.1.** Нормоконтроль технологической документации.

**Шаг 11.2.** Согласование документации технологических процессов со всеми заинтересованными службами и ее утверждение.

**Шаг 11.3.** Синтез УП 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 программоноситель;
- печать ведомостей технологического процесса, норм расхода материала, оборудования, оснастки и т.п.

Приведенная последовательность этапов служит основой построения алгоритмов автоматизированного проектирования и является условной, так как при проектировании любого ТП в условиях производства обычно необходимо несколько раз повторять отдельные этапы, т.е. процесс проектирования ТП является итерационным. Это вызвано необходимостью получения при проектировании недостающей информации, часть которой может не совпадать с первоначальными предположениями технолога. Алгоритмы автоматизированного проектирования ТП предусматривают использование интерактивно-алгоритмического метода, при котором один или несколько шагов либо этапов выполняются в автоматическом режиме, затем на определенном шаге или этапе пользователем принимается решение в интерактивном режиме. Далее чередование режимов повторяется до получения проектного решения.

### **3.6 Формализация задач технологического проектирования:**

#### **3.6.1 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 производит технолог путем сравнения нескольких вариантов процессов при введении оценок на элементы, составляющие его.

Практическому использованию теоретических основ технологии машиностроения 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, инструменты, режимы обработки и др.).

Решение любой задачи на ЭВМ требует наличия аналитических или других видов зависимостей, отражающих количественную, а не качественную сторону процесса проектирования. Поэтому для

осуществления автоматизации технологического проектирования с помощью ЭВМ необходимо провести *формализацию технологии* (или ее части), т.е. провести замену (преобразование) содержательных предложений формулами.

*Формализацией* называется процесс замены (преобразования) содержательных предложений формулами, функциональными зависимостями и логическими соотношениями.

Формализация позволяет создавать универсальные алгоритмы и программы, описывающие формы и размеры детали, характер производства, характеристики оборудования и оснастки. Тем самым она способствует более эффективному применению ЭВМ в проектировании различных технологических процессов для деталей разных типов и любой сложности: корпусов, валов, рычагов и т.п.

Формализация задач превращает технологическое проектирование 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.

Одной из трудностей процесса формализации является то, что существующие в технологии машиностроения эмпирические зависимости количественных отношений выражаются громоздкими таблицами с большим числом значений либо эмпирическими формулами, не охватывающими всего спектра условий 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, 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 влияет на постановку технологических задач, а также требует решения дополнительных задач.

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

1. Ввод в ЭВМ сведений о детали. Графическую информацию для работы в среде автоматизированного технологического проектирования либо задают кодированием, либо частично САПР ТП «берет» ее из графической модели, построенной в графическом редакторе. 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 в виде буквенно-цифровых массивов. Поэтому к такому виду необходимо привести всю информацию о детали: описание ее конфигурации, размерных связей, технические требования.

2. Ввод в ЭВМ сведений о наличном парке металлорежущего оборудования, заготовительном производстве, технических характеристиках станков, режущем, вспомогательном и мерительном инструментах, станочных приспособлениях, ГОСТах, нормалях, необходимых руководящих и нормативных материалах. 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. При автоматизированном проектировании необходимо организовать информационно-справочную службу для обеспечения процесса проектирования необходимой справочной документацией.

3. Ввод в ЭВМ множества типовых решений и алгоритмов их выбора, на которые базируется процесс автоматизированного проектирования. Их также нужно формализовать, организовать ввод, размещение в памяти ЭВМ и предусмотреть возможность оперативной работы с ними.

4. Вывод результатов проектирования в виде, удобном для технологов и рабочих-станочников. Необходимы программы вывода результатов работы ЭВМ в виде распечатки технологических карт или другой документации, состав и форма представления которой определяются стандартами (табл. 3.1).

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

- разработать систему формализованного описания исходной конструкторской документации;
- организовать ИПС;
- 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.

Таблица 3.1

Виды основных технологических документов

Вид документа	Обозначение документа	Содержание документа
<i>Документы общего назначения</i>		
Титульный лист	ТЛ	Оформление первого листа комплекта технологических документов
Карта эскизов	КЭ	Пояснение выполнения ТП, операции или перехода
<i>Документы специального назначения</i>		
Маршрутная карта	МК	Описание ТП маршрутного или маршрутно-операционного либо указание всех технологических операций с данными об оборудовании, технологической оснастке, материальных нормативах и трудовых затратах

Вид документа	Обозначение документа	Содержание документа
Карта ТП	КТП	Описание операционного ТП в технологической последовательности по всем операциям одного вида формообразования, обработки, сборки или ремонта с указанием переходов, технологических режимов и данных о средствах технологического оснащения, материальных и трудовых затратах
Карта типового (группового) ТП	КТТП	Описание типового (группового) ТП в технологической последовательности по всем операциям одного вида формообразования, обработки, сборки или ремонта с указанием переходов, технологических режимов и данных о средствах технологического оснащения, материальных и трудовых затратах
Операционная карта	ОК	Описание технологической операции с указанием последовательного выполнения переходов, данных о средствах технологического оснащения, режимах и трудовых затратах
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

В процессе автоматизации проектирования ТП обрабатывается большой объем 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. 3.3).

Анализ существующих методов моделирования показывает, что наиболее информативными являются обобщенные модели систем в виде «черного ящика», представляющие собой средство преобразования входных данных и знаний о предметной области в выходную информацию (рис. 3.21).

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 первым шагом системного анализа в этой ситуации является системологическое исследование двух

компонентов: проектируемых технологических процессов и процессов их проектирования.



Рис. 3.21 Функциональная модель САПР ТП

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

В процессе формализации описания конструкторской информации можно выделить два подхода:

- 1) кодирование на базе известных классификаторов;
- 2) 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 еще такие признаки, как 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 табл. 3.2-3.4.

Таблица 3.2

Фрагменты кодов 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...30	1	0,2...0,5
2	10...16	2	2	2	0,5...0,8

Таблица 3.3

Фрагменты кодирования группы материала

Код	Материал	
01	Стали углеродистые с содержанием углерода, %	До 0,25
02		0,25...0,6
03		Свыше 0,6

Таблица 3.4

Пример кодирования детали по виду ТП

Код	Вид технологического процесса
1	Литье
2	Ковка, горячая штамповка
3	Холодная штамповка
4	Обработка резанием

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

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

Таким образом, на базе классификации формируется конструкторско-технологический шифр детали [9]. 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 и расположения элементарных поверхностей, шероховатости. Эти сведения описываются в таблицах кодированных сведений (ТКС).

### 3.6.2 Использование некоторых положений дискретной математики для решения задач технологического проектирования

*Понятия теории множеств.* Понятие множества является фундаментальным неопределяемым понятием, как и понятие точки или линии. Интуитивно под *множеством* понимают совокупность определенных вполне различаемых объектов  $x$ , рассматриваемых по некоторому признаку как единое целое:  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ .

Отдельные объекты  $x$ , из которых состоит множество  $X$ , 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 *инфимумом* 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 [13, 15, 32].

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  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ ,  $A = \{a_{ij} \mid i, j \in V\}$ , 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 рис. 3.22 приведен пример неориентированного графа с множеством вершин  $V = \{1, 2, 3, 4, 5\}$  и множеством ребер  $A = \{a_{12}, a_{13}, a_{14}, a_{32}, a_{52}, a_{45}, a_{55}, a_{34}\}$ .

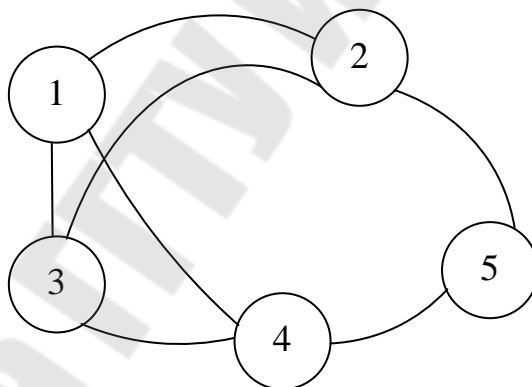


Рис. 3.22. Пример неориентированного графа

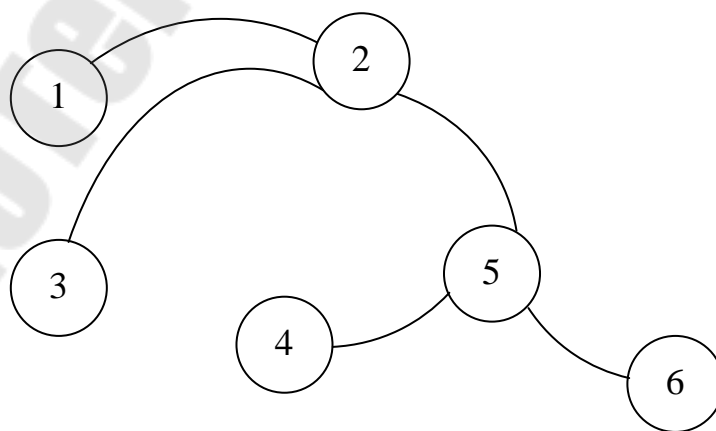


Рис. 3.23 Пример дерева

*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 вершине, то такая вершина называется *конечной (висящей) вершиной* маршрута. Любая вершина графа, принадлежащая двум соседним ребрам, называется *внутренней или промежуточной вершиной*.

Пример пути из вершины 1 в вершину 4 (рис. 3.22):  $1, a_{14}, 4; 1, a_{12}, a_{25}, a_{54}, 4$ . Начальная вершина маршрута – 1, конечная вершина – 4.

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

Граф называется *связным*, если для любых двух различных вершин существует, по крайней мере, один соединяющий их путь. Частным случаем связных ориентированных и неориентированных графов являются деревья

*Деревом* называется граф, не имеющий циклов (рис. 3.23). *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 рис. 3.24 и 3.25.

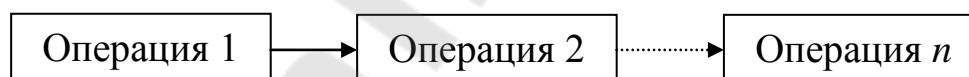


Рис. 3.24 Представление структуры технологического процесса в виде графа

Проведем 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.

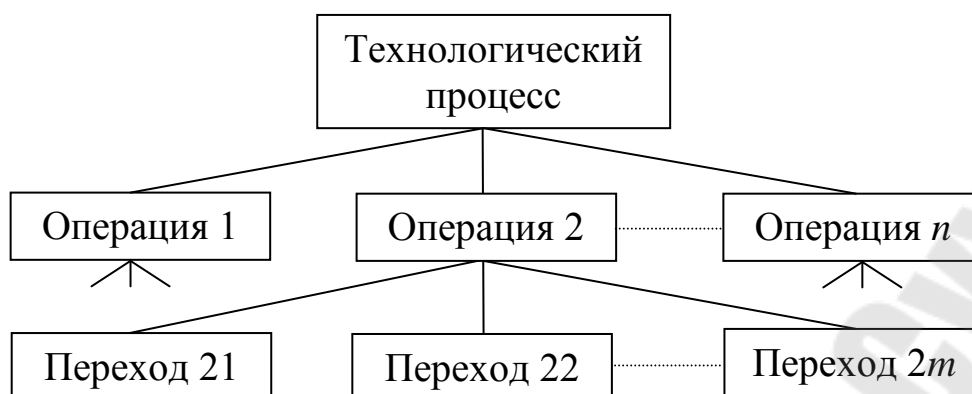


Рис. 3.25. Представление структуры технологического процесса в виде дерева

Проектирование общего маршрута обработки заготовки обычно начинается с установления методов и последовательности обработки отдельных ее поверхностей. При выборе метода обработки необходимо исходить из технологических возможностей типовых методов обработки конкретных видов поверхностей в области:

- обеспечения точности и качества поверхности;
- величины снимаемого припуска;
- затрат времени на обработку.

Для наружной поверхности вращения можно выделить шесть стадий механической обработки:

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

Выбор конкретного метода обработки производят с помощью таблиц средней экономической точности различных методов обработки (табл. 3.5).

Черновое точение применяют для обработки поверхностей с припуском на предварительную обработку свыше 5 мм. При этом величина макроотклонений составляет 160...500 мкм на 1 м длины.

Получистовое точение применяют для повышения точности, уменьшения погрешностей геометрической формы и пространственных отклонений (до 80...200 мкм на 1 м длины), в качестве окончательной обработки после чернового точения либо как метод промежуточной обработки перед последующей чистовой обработкой.

Таблица 3.5

Массив операций обработки элементарных наружных поверхностей  
вращения

Стадия обработки	Операция	Код операции	Квалитет точности	Шероховатость $Ra$ , мкм
I	Токарная черновая	1	12...16	12,5...40,0
II	Токарная	2	10...12	5,0...12,5
III	Токарная чистовая	3	8...11	2,5...5,0
	Шлифовальная	4	8...10	1,6...2,5
IV	Токарная тонкая	5	7...9	0,8...1,6
	Шлифовальная	6	7...8	0,63...1,25
V	Шлифовальная	7	6...7	0,25...0,63
VI	Накатная	8	6...7	0,16...0,25
	Суперфинишная	9	5	0,063...0,080
	Полировальная	10	6	0,040...0,063

Чистовая обработка применяется либо как окончательный вид обработки (если точность укладывается в заданную чертежом), либо как промежуточная операция под последующую тонкую или отделочную обработку. Однократной чистовой обработке подвергают заготовки и поверхности, полученные точными методами (кокильное литье, штамповка по первой группе точности и т.п.).

Тонкая обработка резцами применяется для окончательной отделки наружных и внутренних цилиндрических поверхностей и заменяет шлифование. Выполняется при высоких скоростях резания, малых глубинах резания (0,05...0,50 мм) и малых подачах (0,05...0,15 мм/об) на специальных станках. Тонкое точение (расточивание и обтачивание) обеспечивает высокую точность при незначительной шероховатости цилиндрических, конических, сферических, плоских торцевых и фасонных поверхностей вращения. Сущность тонкого растачивания или обтачивания заключается в снятии стружки очень малого сечения при высоких скоростях резания. Скорость резания при тонком точении в зависимости от обрабатываемого материала составляет: для чугунных заготовок – 100...150 м/мин, для стальных – 150...250 м/мин, для заготовок из цветных сплавов – 1000 м/мин и выше. Подача при обработке устанавливается для предварительного прохода 0,15 мм/об, а для окончательного – 0,01 мм/об. Соответственно и глубину резания принимают 0,2...0,3 и 0,05...0,01 мм.

Тонкое растачивание широко применяется для обработки точных отверстий под подшипники качения и скольжения: отверстий в коробках передач, задних мостах, шатунах, цилиндрах двигателей, компрессорах и

т.д. Тонкое обтачивание применяется реже, например, для обработки поршней автотракторных двигателей и т.п. Тонкая обработка резцами часто применяется перед такими операциями, как хонингование, суперфиниширование, полирование.

Для элементарных поверхностей стадия обработки обычно совпадает с операцией или переходом. Причем число операций, обеспечивающих близкие по значению требования качества изготовления детали, в пределах одной стадии может быть различным (см. табл. 3.5).

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 (рис. 3.26), в вершинах которого отражены характеристики точности и шероховатости, а ребра сопоставлены с кодами операций (см. табл. 3.5).

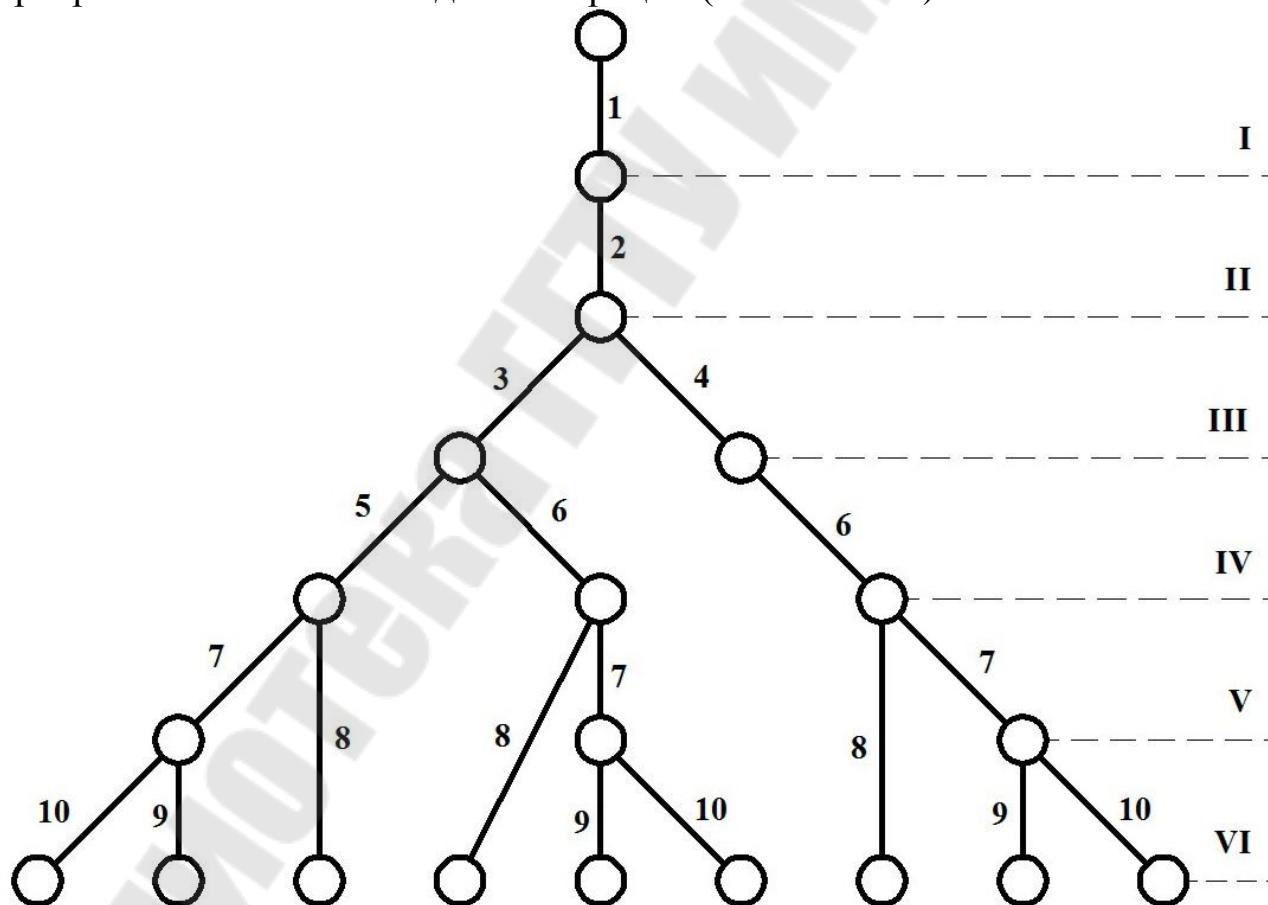


Рис.3.26 Граф технологического маршрута обработки элементарной наружной поверхности вращения

Подобные графы разрабатываются на основе общих правил построения маршрутов обработки типовых элементарных поверхностей,









Рассматривая  $x_1$ , и  $x_2$  как координаты точки на плоскости, определим область на плоскости, описываемую первым неравенством системы (3.8). В данном случае – это прямая, задаваемая уравнением

$$a_1x_1 + b_1x_2 + c_1 = 0. \quad (3.9)$$

В прямоугольной системе координат строим эту прямую (рис. 3.27). Она разбивает всю плоскость на две полуплоскости, в одной из которых выполняется неравенство  $a_1x_1 + b_1x_2 + c_1 > 0$ , а в другой –  $a_1x_1 + b_1x_2 + c_1 \leq 0$ . Сама прямая считается принадлежащей каждой из двух указанных полуплоскостей.

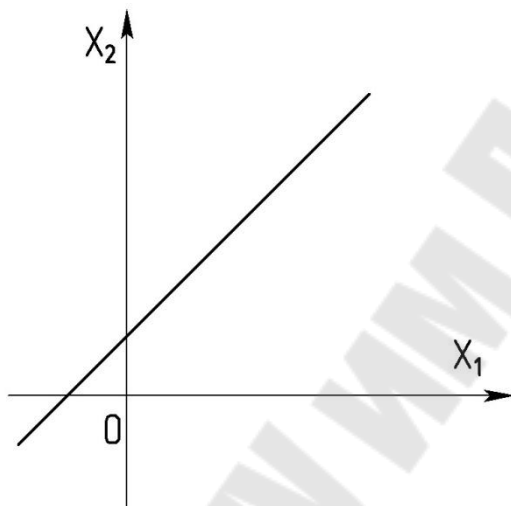


Рис. 3.27. График прямой вида  $a_1x_1 + b_1x_2 + c_1 = 0$

Область решений каждого неравенства определим подстановкой начала координат. Если какая-либо пара чисел  $(x_1, x_2)$  удовлетворяет всем неравенствам системы (3.7), 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 (рис. 3.28).

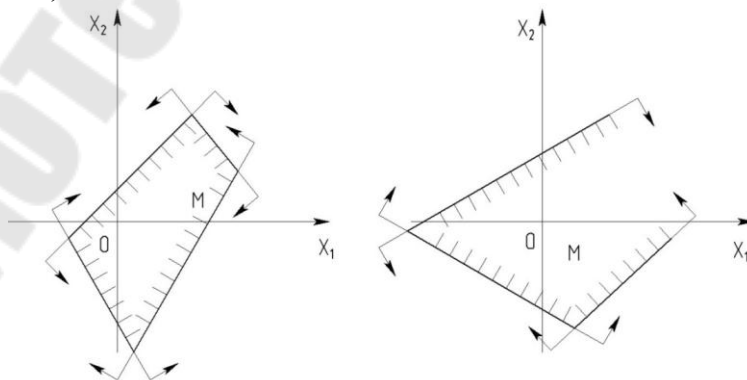


Рис. 3.28. Примеры областей решений систем неравенств

Возможен случай, когда нет ни одной точки, принадлежащей одновременно всем рассматриваемым полуплоскостям, т.е. область «пуста». Это означает, что система (3.7) несовместима (рис. 3.29).

Рассмотрим пример нахождения области решений системы неравенств

$$\begin{cases} 3x_1 + 2x_2 \geq 9 \\ 2x_1 - 3x_2 \leq 8 \\ -x_1 + x_2 \leq 2 \\ x_2 \leq 5 \end{cases} \quad (3.10)$$

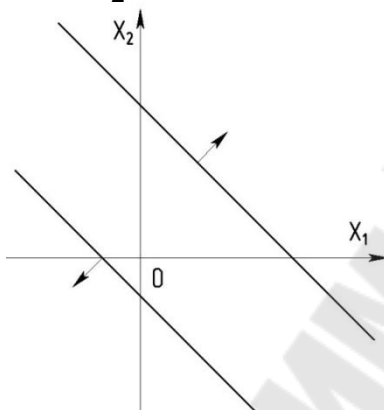


Рис. 3.29. Пример «пустой» области решений

Заменяя знаки неравенства на знаки равенства, получим систему уравнений четырех прямых:

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

Строим прямые I–IV в прямоугольной системе координат. Областью решений системы неравенств (3.10) является многоугольник  $ABCDE$  (рис. 3.30).

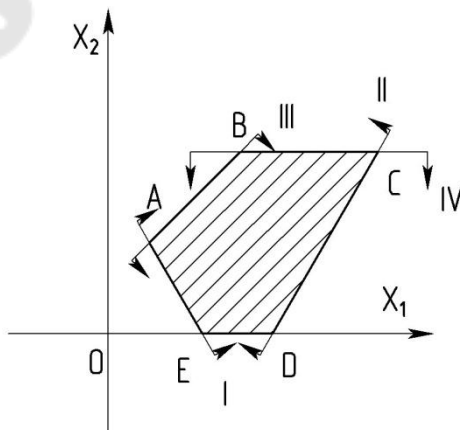


Рис. 3.30. Область решения системы неравенств (3.10)

Пример нахождения области решений системы неравенств применительно к технологии машиностроения приведен в 4.4.3.

### 3.6.3 Математическое моделирование в САПР технологических процессов

Математика представляет собой инструмент для решения различных задач, возникающих в различных направлениях науки и в практической деятельности человека. Этим инструментом, как и любым другим, надо уметь пользоваться. Методы математической формализации и решения задач, возникающих в различных областях деятельности человека, называют *математическим моделированием*. 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.

*Математическая формулировка задачи при технологическом проектировании.* При решении задач методом математического моделирования объект, подлежащий изучению (реальная технологическая система, процесс, производственная ситуация, проектная задача и т.п.), заменяется математической моделью [12]. **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 свойства, особенности и закономерности 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 все возможные взаимосвязи между всеми параметрами моделируемого объекта, в подавляющем большинстве случаев, с одной стороны, просто невозможна из-за их сложности. С другой стороны, 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 ее удастся свести к математическим задачам, для которых известны методы решения. В противном случае прикладная проблема сводится к математической, 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.

В процессе проектирования с помощью САПР в качестве промежуточных и окончательных решений используют математические модели следующих видов [25]:

- **иконические**, отображающие оригинал в двух- или трехмерном измерении в уменьшенном или увеличенном масштабе, – это плоские и объемные изображения объектов проектирования, выполненные в соответствии с правилами ЕСКД, ЕСТД, ЕСТПП (чертежи, схемы, карты эскизов, фотографии);

- **аналоговые**, воссоздающие, например, статические и динамические свойства оригинала (графы, диаграммы, циклограммы, сетевые графики, физические модели, в которых используется подобие явлений и процессов, и имитационные (статистические) модели, отображающие с помощью ЭВМ поведение оригинала в разных реальных ситуациях, в которых может оказаться будущий объект проектирования). Для технологического процесса – это его структура, представленная в виде маршрутной, операционной карты, для процесса проектирования – его структура, представленная в виде графа;

- **символические**, отображающие свойства и отношения оригинала с помощью слов или математических символов (описания с использованием естественного или специализированного языка,

логические модели, переводящие реальную систему и отношения в ней на язык математической логики);

– **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.д.

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

Под *количественными целями* подразумевают цели, которые заключаются в стремлении увеличить (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, принимая решение, необходимо учитывать возможность достижения нескольких количественных целей, поэтому приходится учитывать несколько частных критериев

эффективности. Наиболее простым выходом в данной ситуации является построение *обобщенного критерия*, который представляет определенную совокупность частных критериев.

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

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

То есть математическую модель (ММ) можно представить в виде

$$MM = \begin{cases} \text{ЦФ (целевая функция)} \\ \text{ОГР (ограничения)} \\ \text{ГРУ (граничные условия)} \end{cases}$$

Итак, в процесс моделирования входят 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 необходимая 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 методы оптимизации выбирают 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 математическими моделями технологических процессов, представляющих систему математических объектов (чисел, переменных, множеств, графов, матриц и т.д.) и

отношений между ними, отражающих некоторые свойства технологического процесса.

В САПР ТП применяются 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 такой модели каждому набору условий соответствует единственный вариант проектируемого технологического процесса. Поэтому табличные модели используют для поиска типовых проектных решений.

Для примера 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 (рис. 3.31) имеет поверхности с определенными свойствами  $F_1, F_2, F_3$  и т.д.:

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

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

$$F(d_3) = \{F_1, F_2, F_5, F_8\} = F_3'.$$

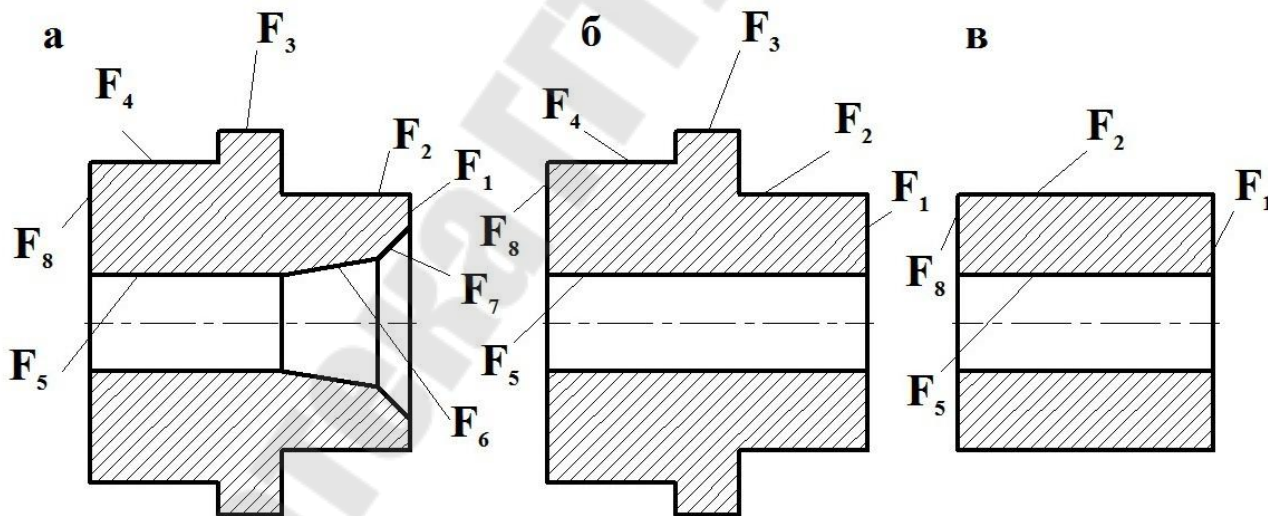


Рис. 3.31. Эскизы заготовок деталей при токарной обработке

На рис. 3.32 в виде графов представлены табличные модели взаимосвязей переходов при обработке деталей  $d_1, d_2, d_3$ .

Для представления данных на языке, удобном для программирования, информация об обработке деталей на указанной

операции может быть описана в виде табл. 3.6 и 3.7, которые можно превратить в массивы.

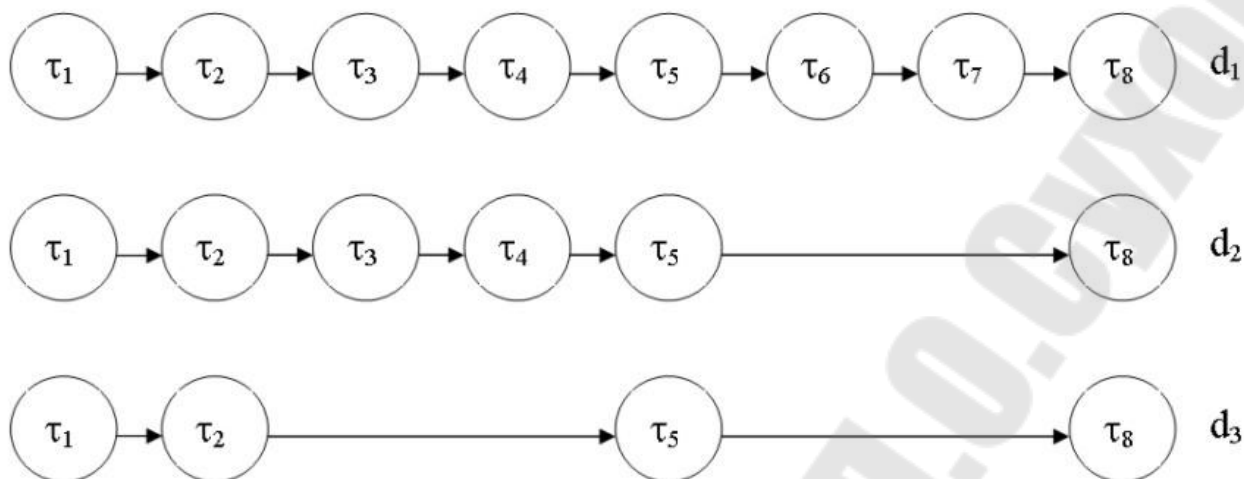


Рис. 3.32 Графы взаимосвязей переходов при обработке деталей: а – деталь  $d_1$ ; б – деталь  $d_2$ ; в – деталь  $d_3$ ,  $\tau_1, \tau_2 \dots, \tau_8$  – операторы (технологические переходы):  $\tau_1$  – подрезка торца;  $\tau_1 - \tau_4$  – точение наружной цилиндрической поверхности;  $\tau_5$  – 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 одинаковый.

Таблица 3.6

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

Примечание. Логическая единица обозначает наличие связи, нуль – ее отсутствие.



Таблица 3.7

Связи между совокупностями свойств деталей и операторами  
(технологическими переходами)

$\tau_i$	$F_i'$		
	$F_1'$	$F_2'$	$F_3'$
$\tau_1$	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
$\tau_8$	0	1	1

Рассмотрим сетевую модель технологического проектирования маршрута обработки детали «зубчатое колесо» (рис. 3.33).

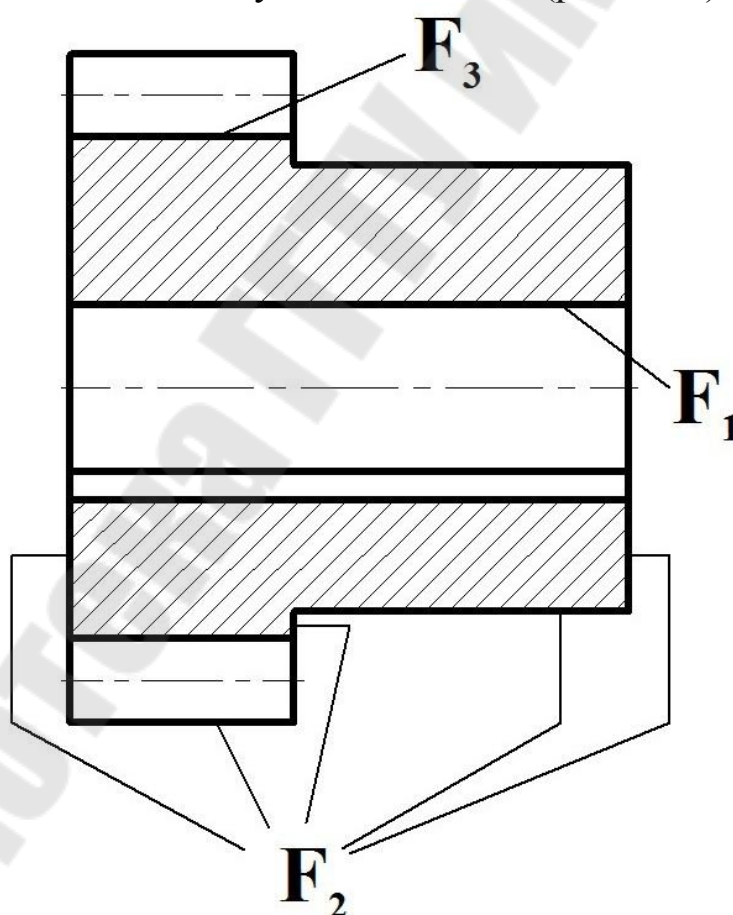


Рис. 3.33 Эскиз детали «зубчатое колесо»

На рис. 3.34 показан граф взаимосвязи операторов (технологических операций) по возможной последовательности их выполнения.

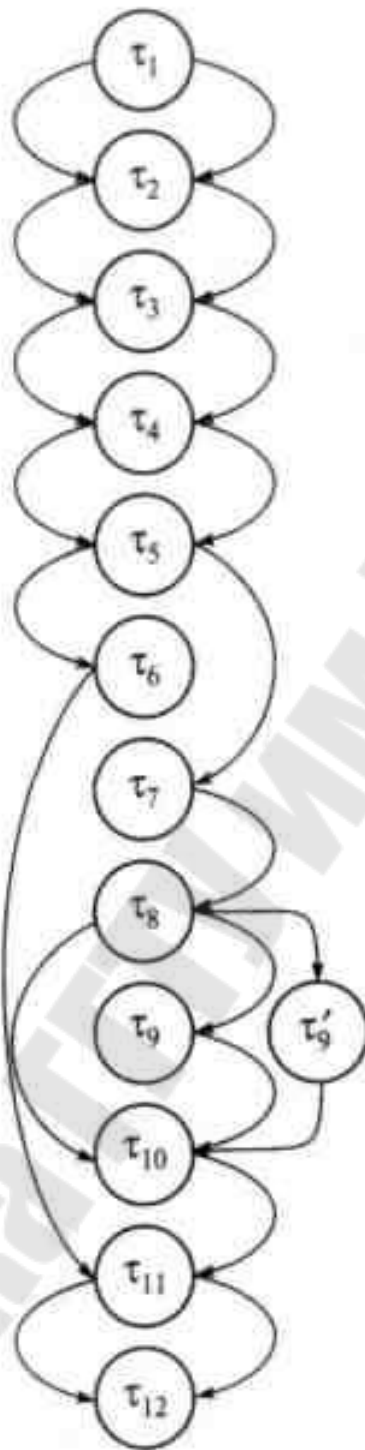


Рис. 3.34. Граф взаимосвязи операторов  $\tau_i$ , по возможной последовательности их выполнения:

$\tau_1$  – заготовительная;  $\tau_2$  – протяжная (протягивание базового отверстия);  $\tau_3$  – черновая токарная (черновое точение контура зубчатого колеса);  $\tau_4$  – чистовая токарная (чистовое точение контура зубчатого колеса);  $\tau_5$  – зубофрезерная черновая (черновая нарезка зубьев);  $\tau_6$  – зубофрезерная чистовая (чистовая нарезка зубьев);  $\tau_7$  – термическая (объемная закалка);  $\tau_8$  – внутришлифовальная (шлифование базового отверстия);  $\tau_9$  – зубошлифовальная (шлифование зубьев);  $\tau'_9$  – зубошевинговальная (шевингование зубьев);  $\tau_{10}$  – притирочная (притирка зубьев);  $\tau_{11}$  – моечная (мойка детали);  $\tau_{12}$  – контрольная (контроль технических требований детали)

Этот граф можно представить в виде матрицы (здесь не приводится), которая, в свою очередь, может быть без труда записана в виде массива информации (массивы являются неизменными атрибутами любого языка программирования).

Сетевая модель включает в себя таблицу связей свойств поверхностей детали и операторов технологического процесса (табл. 3.8).

Таблица 3.8

Связи между совокупностями свойств деталей 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

Перестановочные модели описывают множество структур технологического процесса, отличающихся количеством и (или) составом элементов структуры при изменении отношения порядка. Отношения порядка в этих моделях задаются с помощью графа, содержащего ориентированные циклы (рис. 3.35).

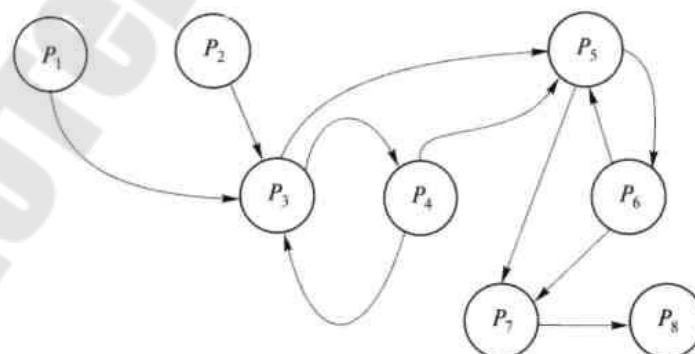


Рис. 3.35. Граф, отображающий расцеховку при изготовлении детали:

$P_1$  – литейный цех;  $P_2$  – кузнечный цех;  $P_3$  – механический цех;  $P_4$  – термический цех;  $P_5$  – механосборочный цех;  $P_6$  – цех узловой сборки;  $P_7$  – испытательный цех;  $P_8$  – упаковочный цех

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

Примерами *функциональных моделей* являются математические модели, используемые при расчете и оптимизации режимов резания.

*Технологический анализ конструкторской документации.* 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 обработке не выполняется и представляет собой результат формирования всех остальных звеньев цепи, граф размерных связей детали в одном координатном направлении является *деревом* (рис. 3.36, а).

Если на чертеже детали имеются размерные связи более чем в одном координатном направлении, то граф, которым они описываются, называется *цепью* или *мультиграфом* (рис. 2.36, б). На 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.

Чертежи деталей являются исходными документами для проектирования технологических процессов. Рабочий чертеж с технологической точки зрения должен удовлетворять двум условиям, касающимся правильности построения размерных цепей деталей, которые можно сформулировать следующим образом:

1) чертеж должен давать однозначную и исчерпывающую характеристику детали, точно и четко отражать конструктивные требования и требования взаимозаменяемости;

2) чертеж не должен ограничивать технологических возможностей выбора различных вариантов технологического процесса.

При выполнении анализа конструкторской документации технологом должен быть решен целый комплекс задач, в их числе:

1) преобразование конструкторской документации в форму, удобную для принятия технологических решений;

2) проверка правильности простановки размеров и технических требований на чертежах.

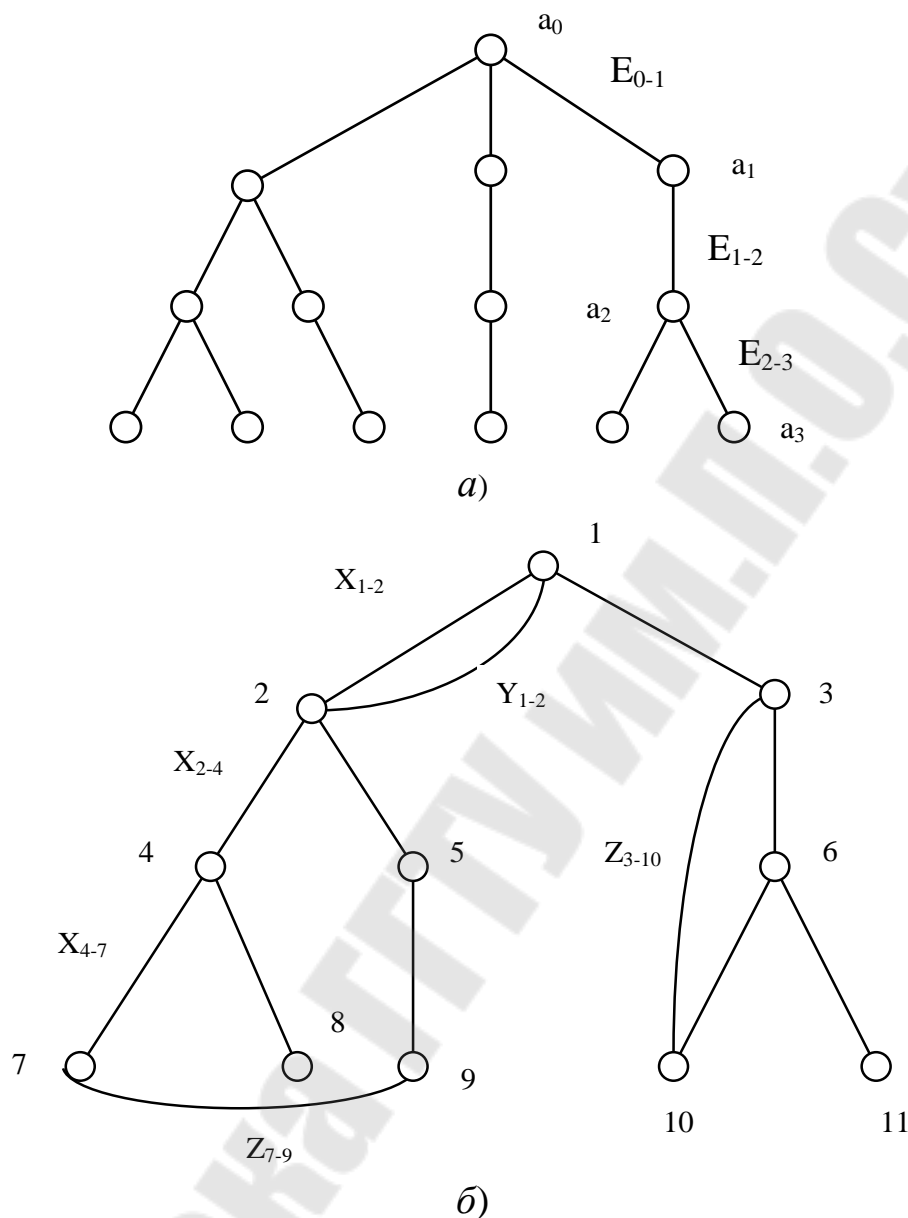


Рис. 3.36. Графы размерных связей типа «дерево» (а) и «мультиграф» (б)

В процессе выполнения *первой задачи* необходимо произвести формализацию описания деталей и их поверхностей, для этого надо:

- отнести данную деталь к соответствующему классу, подклассу и группе;
- выделить на чертежах деталей комплексы поверхностей, образующих основные и вспомогательные базы, исполнительные поверхности, и наметить размерные связи между ними;
- разделить все поверхности на две группы: поверхности, обрабатываемые резанием, и поверхности, формообразование которых

завершилось на стадии заготовительных операций (литье, обработка давлением и т.д.);

- произвести классификацию всех поверхностей согласно классификатору;

- оценить необходимую точность и шероховатость поверхностей каждой классификационной группы;

- выделить поверхности, для которых заданы дополнительные требования к точности относительного расположения.

Такое преобразование конструкторской документации позволяет принимать решения не для каждой отдельной поверхности, а для группы однородных поверхностей.

На рабочих чертежах деталей из литых и получаемых обработкой давлением заготовок, часть поверхностей которых подвергается обработке резанием, проставляют две группы размеров:

- 1) размеры, связывающие между собой поверхности, полученные в окончательном виде на заготовительных операциях. Такие размеры и поверхности называют исходными;

- 2) размеры, связывающие поверхности, окончательное формообразование которых завершается на стадии обработки резанием.

Эти группы поверхностей должны быть связаны между собой только одним размером на каждой из координатных осей.

Для выполнения *второй задачи* – проверки правильности простановки размеров на чертежах – можно воспользоваться графами размерных связей и соответствующими матрицами. Граф на плоскости изображается множеством соответствующих поверхностям вершин, соединенных ребрами, каждое из которых обозначает размер, связывающий две поверхности.

Граф размерных связей строится для каждой из координатных осей. На рис. 3.37 приведен пример проверки правильности простановки размеров по оси  $z$  с помощью графа размерных связей [6, 17, 25, 26].

Необрабатываемые, т.е. исходные, поверхности на эскизе обозначены 2 и 4, а обрабатываемые — 1, 3, 5 и 6. Штриховка на эскизе не показана, чтобы не затемнять изображение. На рис. 3.37, б исходные поверхности отмечены двойной окружностью. Цифры внутри окружностей соответствуют номеру поверхности. Есть определенные особенности в обозначении на графах симметричных поверхностей, например тел вращения: они обозначаются двумя вершинами, одна из которых представляет собой ось симметрии, а другая – условную поверхность, номер которой состоит из символов  $O$  и  $N$  ( $N$  – номер поверхности).

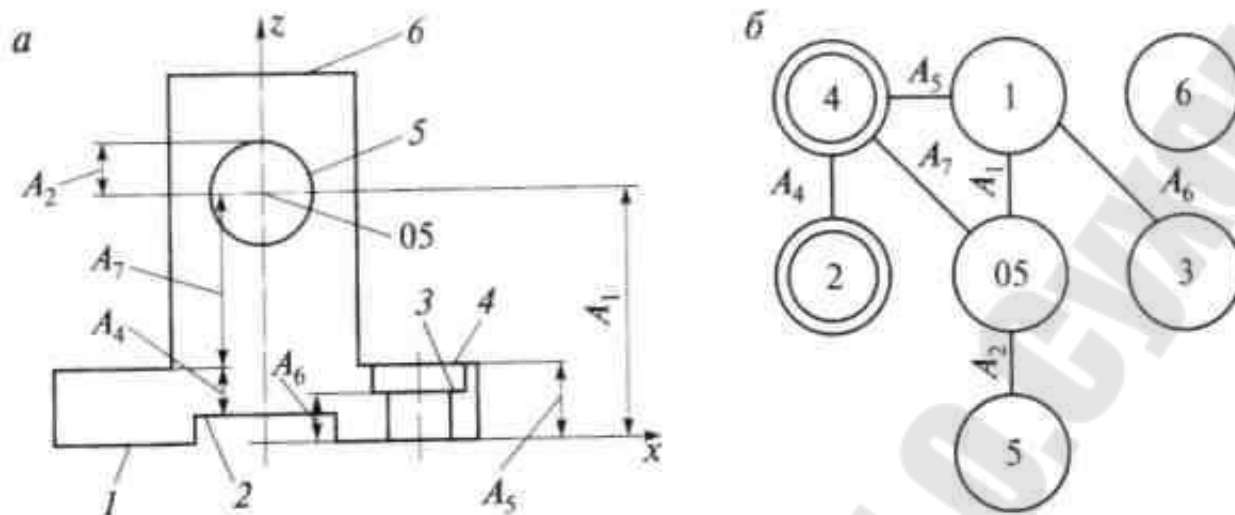


Рис. 3.37. Эскиз детали (а) и граф размерных связей (б)

При правильной простановке размеров граф отвечает следующим требованиям:

- 1) на графе нет оторванных групп вершин (если они есть, то это значит, что не хватает размеров или технических требований);
- 2) на графе нет замкнутых контуров (если они присутствуют, то это значит, что проставлены лишние размеры);
- 3) группы исходных и обработанных поверхностей имеют только одно общее ребро.

Анализируя граф (см. рис. 3.37, б), отображающий способ простановки размеров детали по оси  $z$ , можно сделать вывод, что при простановке размеров допущено три ошибки:

- 1) имеются обособленные (оторванные) вершины (вершина 6 оторвана от общего графа);
- 2) между исходными и обработанными поверхностями существует несколько связей (ребра  $A_5$  и  $A_7$ );
- 3) на графе имеется замкнутый контур (цикл) 1-4-05, чего быть не должно.

Если, как в данном случае, в простановке размеров обнаружены ошибки, необходимо их устранить, разработав новую схему и соответствующий ей граф (рис. 3.38) с сохранением всех обозначений размеров и поверхностей.

На рис. 3.38 представлен только один из возможных вариантов исправления схемы простановки размеров на рабочих чертежах деталей и соответствующего графа размерных связей. Обрабатываемые поверхности на чертежах обозначают знаком шероховатости. На графе исходные (необрабатываемые) поверхности показаны двойной окружностью, а

обрабатываемые – одной. Симметрично расположенные поверхности, в данном случае поверхности вращения, обозначают двумя вершинами, одна из которых – ось симметрии.

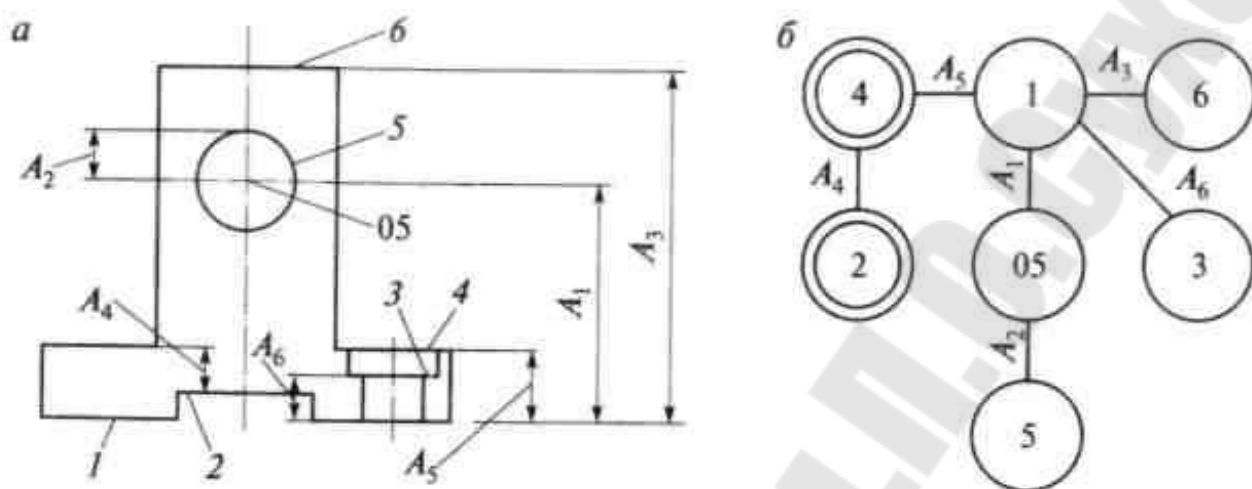


Рис. 3.38. Исправленные эскиз детали (а) и граф размерных связей (б)

Как видно из рис. 3.38, б, новая простановка размеров позволила избежать ошибок, обнаруженных при анализе, а именно:

- на новом графе в связи с введением размера  $A_3$ , вершина 6 перестала быть оторванной;
- исчез цикл 1-4-05, так как был снят лишний размер  $A_7$ ;
- из-за исчезновения ребра  $A_7$  группы обрабатываемых и необрабатываемых поверхностей имеют только одно общее ребро.

Представление размерных связей в виде графа удобно и наглядно для человека, но для ЭВМ предполагается использование матричного представления графов. Для этого графическая информация преобразуется в матрицу смежности. Квадратная таблица вида

$$R_{(x,y,z)}^{cm} = \|V_{i,j}\|_{m \times m}$$

называется *матрицей смежности* размерных связей детали, если ее элементы образуются по правилу:

$$V_{i,j} = \begin{cases} A(T) \\ 0 \end{cases}$$

где  $A(T)$  – соответствующий линейный размер и численное значение допуска на него; может, в свою очередь, иметь метку 1 или 2.

Причем, если вершина  $\bar{n}_i$  соединена с  $\bar{n}_j$  ребром, то  $A(T)$  – в противном случае.



Таким образом, в общем виде матрица смежности поверхностей имеет вид

$$R_{(x,y,z)}^{cm} = \begin{array}{c|cccccc} & \bar{n}_1 & \bar{n}_2 & \dots & \bar{n}_i & \bar{n}_m \\ \hline \bar{n}_1 & 0 & A_{1,2} & \dots & A_{1,i} & A_{1,m} \\ \bar{n}_2 & A_{1,2} & 0 & \dots & 0 & A_{2,m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \bar{n}_i & A_{1,i} & 0 & \dots & 0 & A_{i,m} \\ \bar{n}_m & A_{1,m} & A_{2,m} & \dots & A_{m,j} & 0 \end{array}$$

Строки и столбцы матрицы  $R_{(x,y,z)}^{cm}$  соответствуют вершинам графа. На пересечении  $i$ -й строки  $j$ -го столбца ставится элемент  $r_{i,j}$  – соответствующий численному значению допуска на размер, соединяющий вершины  $\bar{n}_i$  и  $\bar{n}_j$ . Метка 1 присваивается тому элементу матрицы, который соединяет между собой обрабатываемые вершины, метка 2 – элементу матрицы, когда соединяются между собой необрабатываемые вершины и если ребро соединяет вершины, обозначающие обрабатываемую и необрабатываемую поверхности.

На рис. 3.39 представлены матрицы смежности размеров детали, эскиз которой показан на рис. 3.38.

	1	2	3	4	5	05	6
1	0	0	$A_6$	$A_5$	0	$A_1$	$A_3$
2	0	0	0	$A_4$	0	0	0
3	$A_6$	0	0	0	0	0	0
4	$A_5$	$A_4$	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	$A_2$	0
05	$A_1$	0	0	0	$A_2$	0	0
6	$A_3$	0	0	0	0	0	0

	1	2	3	4	5	05	6
1	0	0	1	2	0	1	1
2	0	0	0	2	0	0	0
3	1	0	0	0	0	0	0
4	2	2	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	1	0
05	1	0	0	0	1	0	0
6	1	0	0	0	0	0	0

Рис. 3.39. Матрицы смежности размерных связей детали, представленной на рис. 3.37:

а – в общем виде; б – с присвоением меток 1 и 2

Рассмотрим вариант оценки правильности простановки размеров на чертеже с помощью матриц смежности. Для этого необходимо проверить следующее:

1) число вершин на графе должно быть на единицу больше числа ребер, т.е. должно выполняться условие  $KI/2 = m - 1$  ( $KI$  – сумма строк и столбцов, не равных 0); если  $KI/2 < m - 1$ , то на чертеже детали недостаточно линейных размеров, если  $KI/2 > m - 1$ , то на чертеже  $KI/2 - (m + 1)$  лишних размеров;

2) на графе не должно быть оторванных вершин, т.е. в матрице не должно быть нулевых строк и столбцов (рис. 3.40; 2-я строка и 2-й столбец – нулевые);

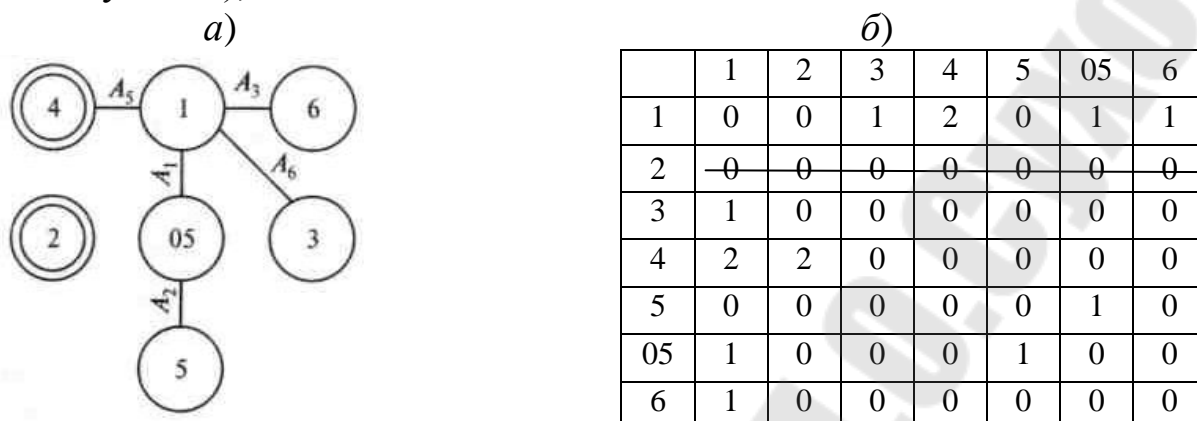


Рис. 3.40. Пример проверки условия на «оторванные» вершины:  
а – модифицированный граф; б – матрица смежности

3) на графе должна быть единственная связь между комплексами обрабатываемых и необрабатываемых поверхностей. Это значит, что строки или столбцы матрицы, соответствующие номерам обрабатываемых поверхностей, должны иметь единственный элемент с меткой 2, а необрабатываемые – с меткой 1 (рис. 3.41; строки/столбцы 1 и 05);

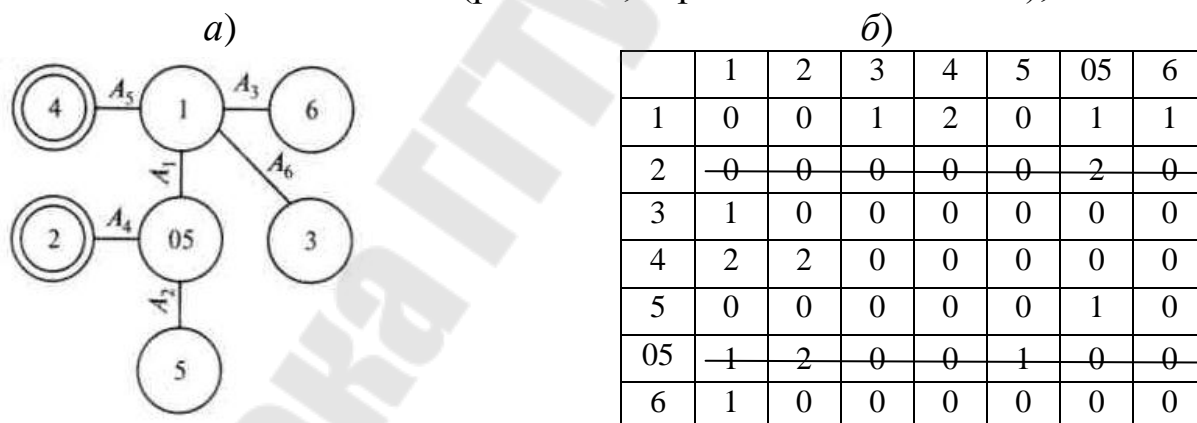


Рис. 3.41. Пример проверки условия на отсутствие лишних связей между комплексами обрабатываемых и необрабатываемых поверхностей:  
а – граф линейных размеров; б – строки и столбцы в матрице смежности с меткой 2

4) на графе не должно быть замкнутых контуров. Для проверки этого условия в строке (столбце) матрицы отыскивают единственные ненулевые элементы (рис. 3.42, а, б). Далее эти строки (столбцы) обнуляются, т.е. в графе отсекаются вершины (рис. 3.42, в, г). В результате появляется новая матрица, в которой соответствующие элементы строк (столбцов) нулевые, в ней снова производится обнуление конечных ветвей и т.д. Поиск

прекращается при получении на двух последних шагах двух одинаковых матриц (рис. 3.42, *б*, *е*).

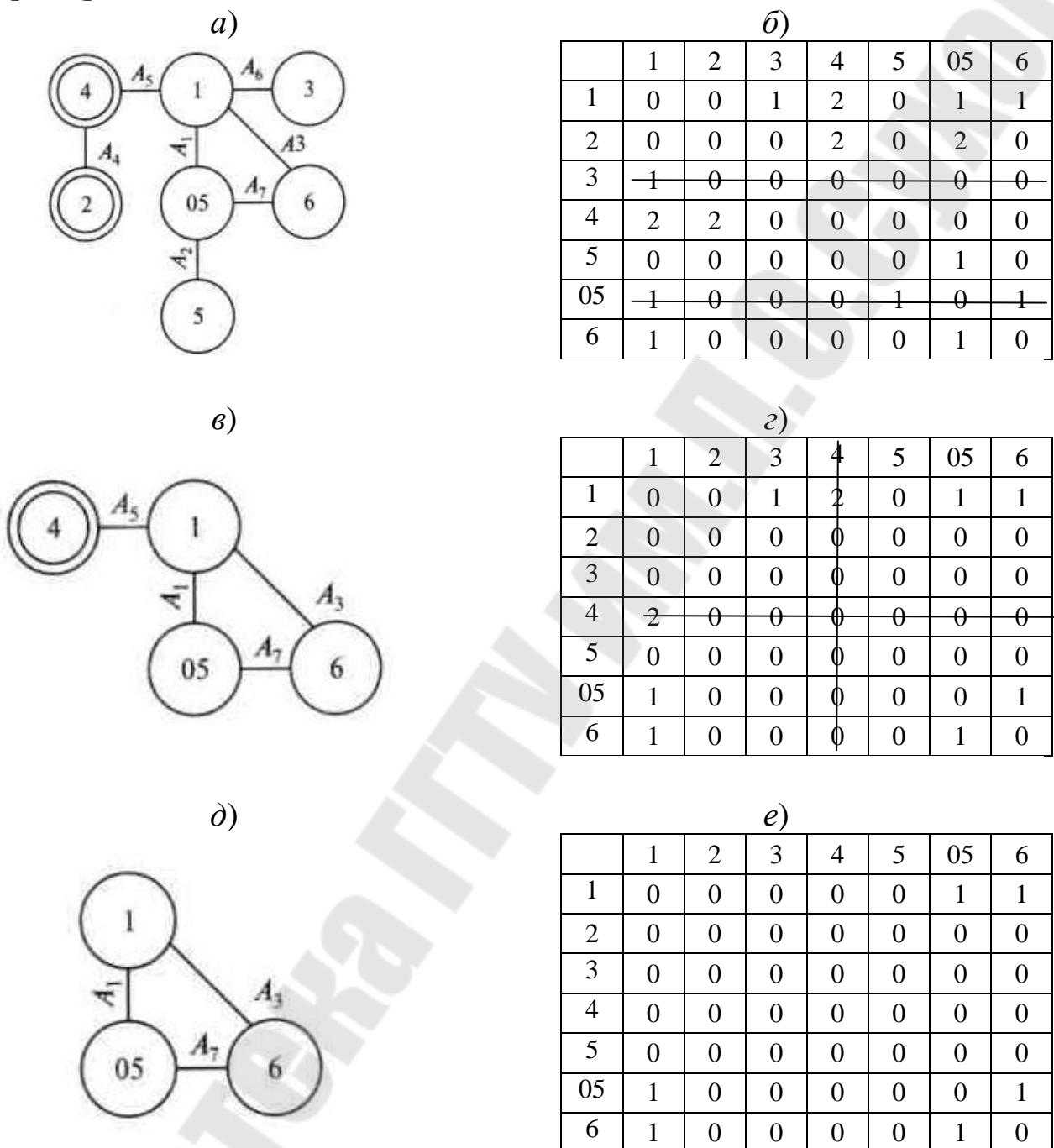


Рис. 3.42. Пример выявления замкнутого контура (цикла) с помощью графа и матрицы смежности:

*а* – граф линейных размеров с замкнутым контуром; *б* – строки (столбцы) в матрице смежности с единственным ненулевым элементом; *в* – граф с отсеченными вершинами; *г* – матрица смежности с обнуленными единственными ненулевыми элементами; *д* – замкнутый контур на графе; *е* – матрица смежности после обнулений, соответствующая замкнутому контуру на графе

На основании проведенного графического (с использованием графа размерных связей) и математического (с помощью матрицы смежности) анализа делается заключение о правильности назначения размеров.

Аналогичный анализ может быть проведен для размеров, проставленных в других координатных направлениях, при формализации этапа «Технологическая отработка чертежа детали» (см. 3.5) с учетом увязки с возможностями используемых на предприятии методов окончательной обработки, имеющегося оборудования и метрологических средств, а также обоснованностей требований точности.

*Использование теории графов для анализа размерных связей деталей при синтезе технологического маршрута.* На основе графа может быть создана формализованная модель геометрической структуры детали. Для этого необходимо, чтобы исходная геометрическая информация о детали была полностью описана в цифровой форме. Следовательно, задача построения формализованной модели геометрической структуры детали сводится к распознаванию ее размерных связей в таблице кодированных сведений и построению матрицы смежности соответствующего графа.

При неавтоматизированном проектировании для распознавания размерных связей технолог визуально анализирует параметры точности, выявляет необходимые связи между ними, исходя из конкретных условий производит анализ размерных цепей и их пересчет 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 (ТКС), заполненной согласно принятой для данной САПР ТП системе кодирования (язык описания детали). Для решения рассматриваемой задачи ТКС должна содержать определенный набор реквизитов (сведений), необходимых для построения формализованной модели. К реквизитам, описывающим положение отдельной поверхности в общей конструкции детали, относятся:

- номер элемента *НЭ*,
- код элемента *КЭ*,
- номер базы *НБ*,
- размеры  $(x, y, z)$ ,
- верхнее отклонение размера *ВО*,
- нижнее отклонение размера *НО*.

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 в координатном направлении  $z$  для детали типа «вал» (рис. 3.43). По вышеизложенным правилам для этой детали составлена табл. 3.9 выборки сведений из ТКС.

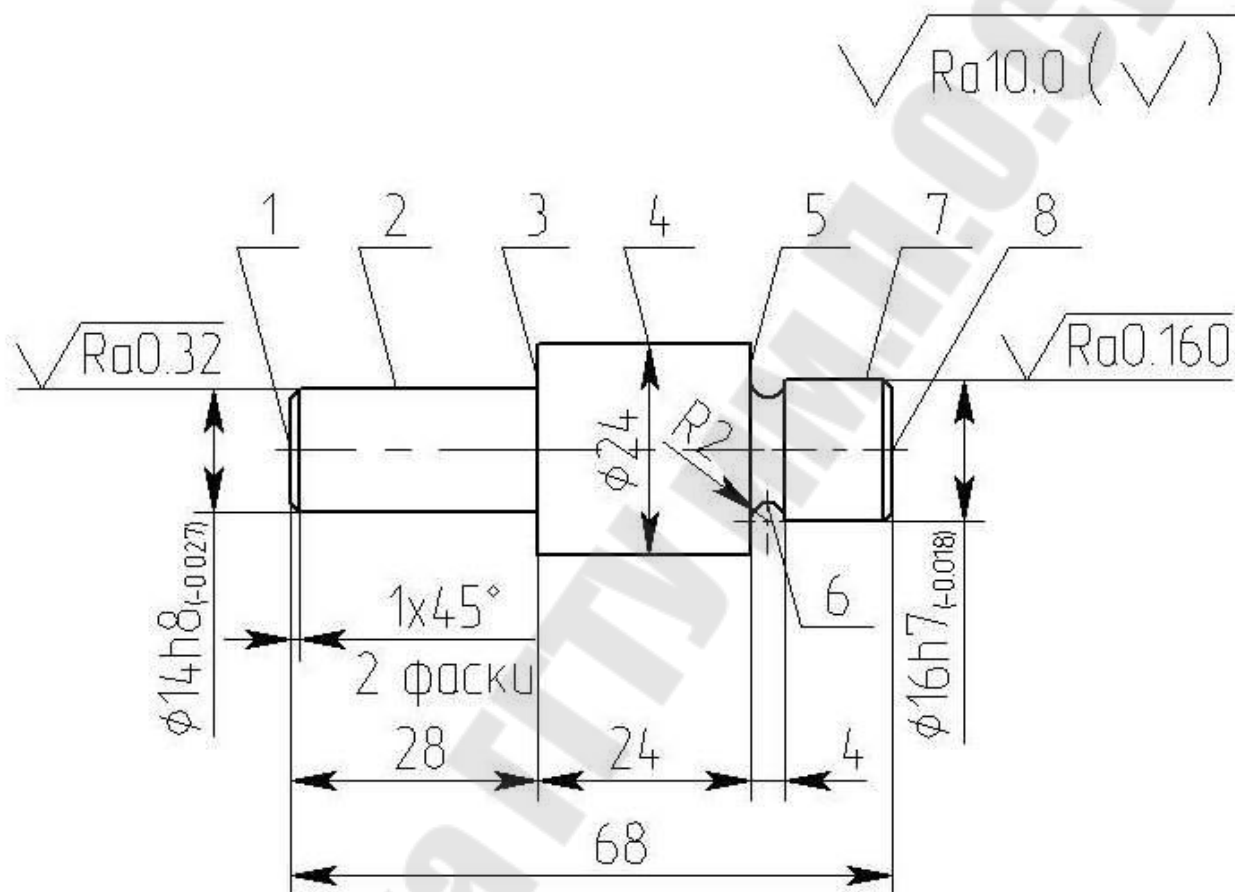


Рис. 3.43 Эскиз детали типа «вал»

Чтобы построить граф размерных связей детали в автоматизированном режиме, необходимо сформировать матрицу смежности. Для ее построения следует из множества поверхностей детали выделить базовую поверхность, которую принимает пользователь 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) определяют висящие вершины первого дерева графа. С этой целью из сформированной табл. 3.9 (по третьему столбцу) выбирают номера элементов, связанные с базовой поверхностью, и заносят их в матрицу смежности графа (рис. 3.44).

Таблица 3.9

Таблица выборки сведений из ТКС (по оси z)

НЭ	КЭ	НБ	z	ВО	НО
1		1			
2		1			
3		1	-28		
4		3			
5		3	-24		
6		5	-4		
7		5			
8		1	-68		

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.

	1	2	3	4	5	6	7	8
1			1					1
2								
3	1				1			
4								
5			1					
6								
7								
8	1							

Рис. 3.44 Матрица смежности графа размерных связей по оси z

В рассматриваемом примере в качестве базовой принята поверхность с номером 1. С этой поверхности начинается формирование матрицы смежности.

Граф размерных связей детали можно рассматривать 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 да, то повторяется последовательность выбора элементов с висящими вершинами по отношению к этой базовой поверхности.

После заполнения матрицы смежности графа может быть сформирован граф размерных связей по оси  $z$  (рис. 3.45).

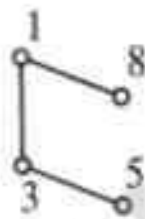


Рис. 3.45. Граф размерных (по оси  $z$ ) связей детали типа «вал»

В памяти ЭВМ граф размерных связей детали описывается массивом (назовем его, например, ГРАФ), который используется в дальнейшем как математическая модель при выборе технологических баз и проектировании технологических маршрутов.

Граф размерных связей детали можно рассматривать как формализованную модель структуры детали, определяющую последовательность обработки технологических баз. В этой модели 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 ориентируются другие поверхности детали.

Известно, что для обработки ответственных поверхностей детали необходимо предварительно обработать соответствующую ей (по размерным связям) базовую поверхность до требуемой степени точности и шероховатости. При этом часто конструкторские базы не могут быть использованы в качестве технологических, поэтому приходится определять *дополнительные* или вводить *искусственные базы*. Например, для деталей типа «тела вращения», у которых длина превышает диаметр, в качестве искусственных опорных баз используются центровые отверстия,

поэтому для них формируется граф размерных связей с искусственными опорными базами. Для детали типа «вал» (см. рис. 3.43) такой граф представлен на рис. 3.46. В граф размерных связей детали введены две искусственные опорные базы (80 и 10) как третий и четвертый элементы массива, получившего название массива графа размерных связей с опорными базами (МГ ОБ). При проектировании технологических процессов в САПР ТП широко используются наработанные типовые решения различных подзадач для типовых элементов технологических процессов, например, типовые планы обработки. Такой подход позволяет наиболее рационально сочетать объективные факторы проектирования технологических процессов (размерные характеристики деталей) с типовыми решениями, характеризующими специфику конкретного предприятия. Поэтому синтез технологического маршрута изготовления детали производится на основе планов обработки элементарных и типовых поверхностей.

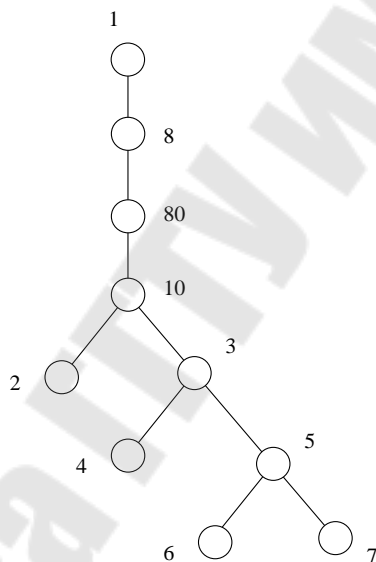


Рис. 3.46 Граф размерных связей с опорными базами для детали типа «вал» (массив МГ ОБ)

*Планы обработки* на отдельные поверхности, обеспечивающие получение требуемой точности и качества, разрабатывают расчетным либо статистическим методом, и на первом этапе происходит формирование плана обработки. Выбор плана обработки производится на основе анализа *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  $W_i$ , принимаются вид (код) обрабатываемого элемента поверхности КЭ, вид термообработки ТО, шероховатость поверхности,



кавалитет точности  $KT$ , отклонения взаимного расположения  $\Delta$ , диаметр обработки  $D$ , расположение отверстий  $OT$ , вид отверстия  $BO$  и др. В зависимости от этих условий из таблицы типовых планов обработки поверхностей (табл. 3.10) выбирают планы  $W_i$  на каждую обрабатываемую поверхность и формируют таблицу планов обработки поверхностей детали. Для детали типа «вал» (см. рис. 3.43) сформирована табл. 3.11 – массив МПО  $W$ .

Таблица 3.10

Планы обработки поверхностей (массив ПЛОБ)

Планы обработки $W_i$	Коды методов обработки	Методы обработки	Условия применения планов обработки
01	101	Точение черновое	Квалитет 9-10 $Rz=40$ 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 центр. отв.	Центровые отверстия

Таблица 3.11

Планы обработки поверхностей детали типа «вал» (массив МПО  $W$ )

НЭ	1	10	2	3	4	5	6	7	8	80
$W_i$	01	05	03	01	01	01	02	04	01	05

Описанная концепция [33] рекомендуется для проектирования технологических процессов обработки заготовок деталей типа «тел вращения» при анализе размерных связей в одном координатном направлении. Существуют и другие методы анализа графов для определения технологического маршрута [27, 31, 36]. Так, например, в работе [31] описан метод оперирования геометрической информацией о поверхностях детали в виде шестимерных векторов. Анализ совокупностей этих векторов позволяет определять маршрут обработки заготовок и базы, а также решать другие задачи проектирования.

Третьим этапом синтеза технологического маршрута является объединение одноименных технологических методов обработки

(имеющие общий код КМО), принадлежащих разным вершинам вторичного графа (рис. 3.47). 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.

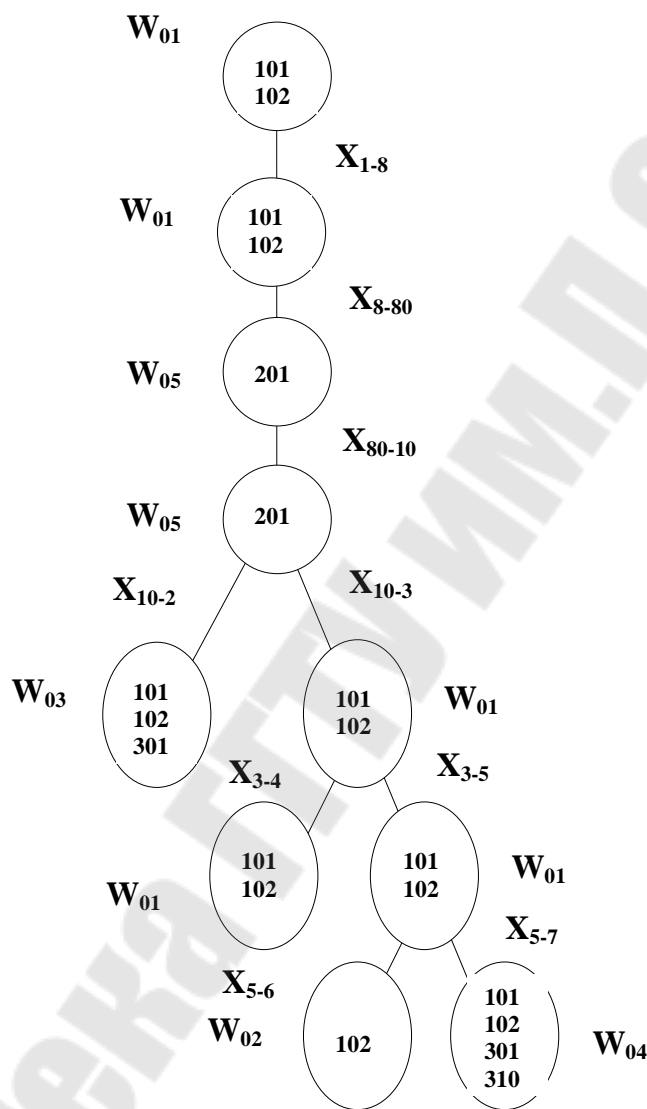


Рис. 3.47. Вторичный граф размерных связей детали типа «вал»

На заключительном этапе синтеза технологического маршрута назначается последовательность 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.

Для проверки операций на совместимость служит таблица, в которой операции записаны в порядке их возможного выполнения. Эта таблица

строится разработчиками САПР ТП на основе положений технологии машиностроения, согласно которым вначале подготавливают технологические базы, затем выполняют черновые, чистовые и отделочные операции.

В результате проектирования сформирован технологический маршрут механической обработки заготовки детали «вал» (табл. 3.12).

Таблица 3.12

Технологический маршрут детали «вал»

Номер операции	Код операции	Операции	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 с учетом технических ограничений, обусловленных наборами типоразмеров оборудования, применяемого в цехах завода для выполнения указанной операции, универсальных, групповых и специализированных установочно-зажимных приспособлений, используемых на каждом типе станков, и другими условиями (см. 2.5).

### 3.6.4 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 устанавливают, какие из признаков объекта оригинала являются существенными с точки зрения решаемой задачи. Определяют исходные данные, характеризующие эти признаки, возможна разработка конструктивной или функциональной схемы объекта и т.п.

3. **Разработка физической модели** и обоснование ее соответствия по существенным признакам моделируемому объекту. На этом этапе формулируют ограничения и предположения, которые упрощают

описание объекта-оригинала, не нанося при этом существенного ущерба достоверности получаемых результатов исследования. Этап особенно важен, поскольку большинство реальных технических объектов являются очень сложными и без упрощения их математическое моделирование зачастую просто невозможно.

#### 4. Разработка математической модели.

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 предприняемого исследования будут известными, а какие – искомыми. Например, параметры, которые считаются известными при решении задач анализа, будут неизвестными (искомыми) при решении задач синтеза, и наоборот.

5. Разработка компьютерной программы или пакета программ. Обычно для этих целей используют языки программирования высокого уровня, такие как C++, Delphi.

6. Отладка и тестирование программ. Этот этап часто является самым трудоемким, поскольку 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, в свою очередь, может привести к необходимости отказа от разработанной математической модели и разработке новой.

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

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

– погрешности формализации, которые возникают при переходе от объекта-оригинала к его физической модели и обусловлены степенью соответствия объекта-оригинала 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 и возможностей вычислительной техники.

Этапы решения задач автоматизированного проектирования технологического процесса механической обработки КТЭ детали в работе [25] представлены в виде четырех блоков и ряда процедур, основными из которых являются:

1) предварительный этап, включающий анализ конструкторской информации, содержащейся в чертеже детали, и выбор метода получения заготовки;

2) этап синтеза, включающий синтез маршрутов обработки типовых КТЭ детали, синтез комплектов технологических баз и назначение порядка выполнения переходов внутри этапов механической обработки, синтез схем установки и определение ее погрешности;

3) этап анализа, включающий определение допусков, минимальных припусков, размерный анализ технологического процесса;

4) завершающий этап, включающий нормирование операций и определение затрат, выбор или проектирование конструкций приспособлений.

Цель анализа конструкторской информации – преобразование данных чертежа в форму, удобную для ее обработки и принятия технологических решений при последующих этапах проектирования. Для этого осуществляют разбиение детали на типовые компоненты, которые объединяются в однородные группы. Затем определяют линейные и угловые размеры между ними и их точность, а также показатели качества

поверхностей. То есть для решения задач технологической подготовки производства с помощью ЭВМ осуществляют переход от вербальной модели через чертеж, символическую и логическую модель к внутримашинной (базе данных).

*Маршрут изготовления типовых компонентов детали* может формироваться двумя способами:

- с помощью стандартных типовых маршрутов;
- с помощью синтеза различных вариантов.

Стандартные типовые маршруты применяют при типовом проектировании технологии для детали-аналога или конструктивного элемента. Алгоритмы формирования плана обработки компонентов деталей строят на основе классификатора типовых переходов и их кодирования. Для реализации алгоритма формируется  $n$ -значный код перехода, отражающий его класс и вид, а также особенности его выполнения и требования к качеству обработки. Типовое и групповое проектирование основано на принципах технологической унификации и разработке классификаторов типовых деталей и техпроцессов-аналогов. Для проектирования технологического процесса с помощью типовой и групповой технологии (как при ручном, так и при автоматизированном проектировании) на основании классификации деталей для каждого класса заранее проектируют типовой технологический процесс, имеющий принципиально общий маршрут и содержание операций, типовые схемы базирования и конструкцию оснастки. На базе этого технологического процесса его пользователь составляет технологические процессы на конкретные детали данного класса, пользуясь типовым технологическим процессом как прототипом. Проектирование типовых и групповых технологических процессов способствует сокращению сроков и стоимости технологической подготовки производства.

Задача синтеза маршрута обработки поверхностей решается с помощью поиска кратчайшего пути на сети состояний поверхности. Сеть состояний представляют в виде матрицы процесса обработки поверхности, строки которой соответствуют состоянию поверхности перед началом обработки, столбцы – различным состояниям во время обработки. На пересечении соответствующих строк и столбцов записывают рассчитанные величины стоимостей технологических переходов. Поэтому на основании совокупности исходных матриц можно формировать две сводные матрицы: матрицу методов обработки и матрицу стоимостей обработки (см. рис. 3.39).

### 3.6.5 Виды алгоритмов

Для автоматизированного решения любой задачи 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 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 распространенные формы представления (описания) алгоритма: словесное и операторное описание, описание в виде таблицы принятия решений, в виде математических зависимостей и в виде граф-схем [14].

*Словесное описание* – общее описание процедур (текст). Степень детализации вычислительного процесса является весьма низкой, формализация процесса практически отсутствует. Положительным моментом является емкое и компактное описание задачи целиком.

*Операторное описание* – подробное описание 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 его программирование значительно упрощается. Такую форму представления алгоритма целесообразно применять для несложных и малых по объему расчетных задач.

*Описание в виде таблицы принятия решений* следует рассматривать как специальную форму алгоритмов. Они особенно хорошо подходят для постановки технологических задач.

Преимущества представления алгоритма в виде таблиц принятия решений следующие:

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

*Описание в виде математических зависимостей* – это достаточно краткая и рациональная форма представления алгоритмов. Функциональные зависимости, записанные в виде формул, обеспечивают минимизацию объема памяти ЭВМ.

### **3.6.6 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.

*Первая группа* – это задачи, легко поддающиеся формализации. К ним 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 использовать ЭВМ для решения. Однако таких задач при технологическом проектировании немного.

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

Например, при выборе метода обработки отверстия заданных размеров и точности 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) и 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. Однако зенкеры изготавливают диаметром до 150 мм, поэтому 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 отверстий больших диаметров применяют чистовое растачивание. В массовом производстве часто используют протягивание.

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

Чтобы получить полное описание геометрии любой машиностроительной конструкции, необходимо описать 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 соответствующее типовое решение принимается.

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.

Допустим, что на предприятии имеются шлифовальные станки трех моделей, которые и составляют *множество типовых решений* (МТР):

$$\text{МТР} = \{3У12В, 3У131М, 3М163В\}.$$

Сформируем комплекс условий применимости выявленных типовых решений. *Комплекс условий применимости* – это множество параметров, проверка которых с достаточной достоверностью позволит 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  $L$  (рис. 3.48) должны находиться в пределах, допустимых рабочей зоной станка.

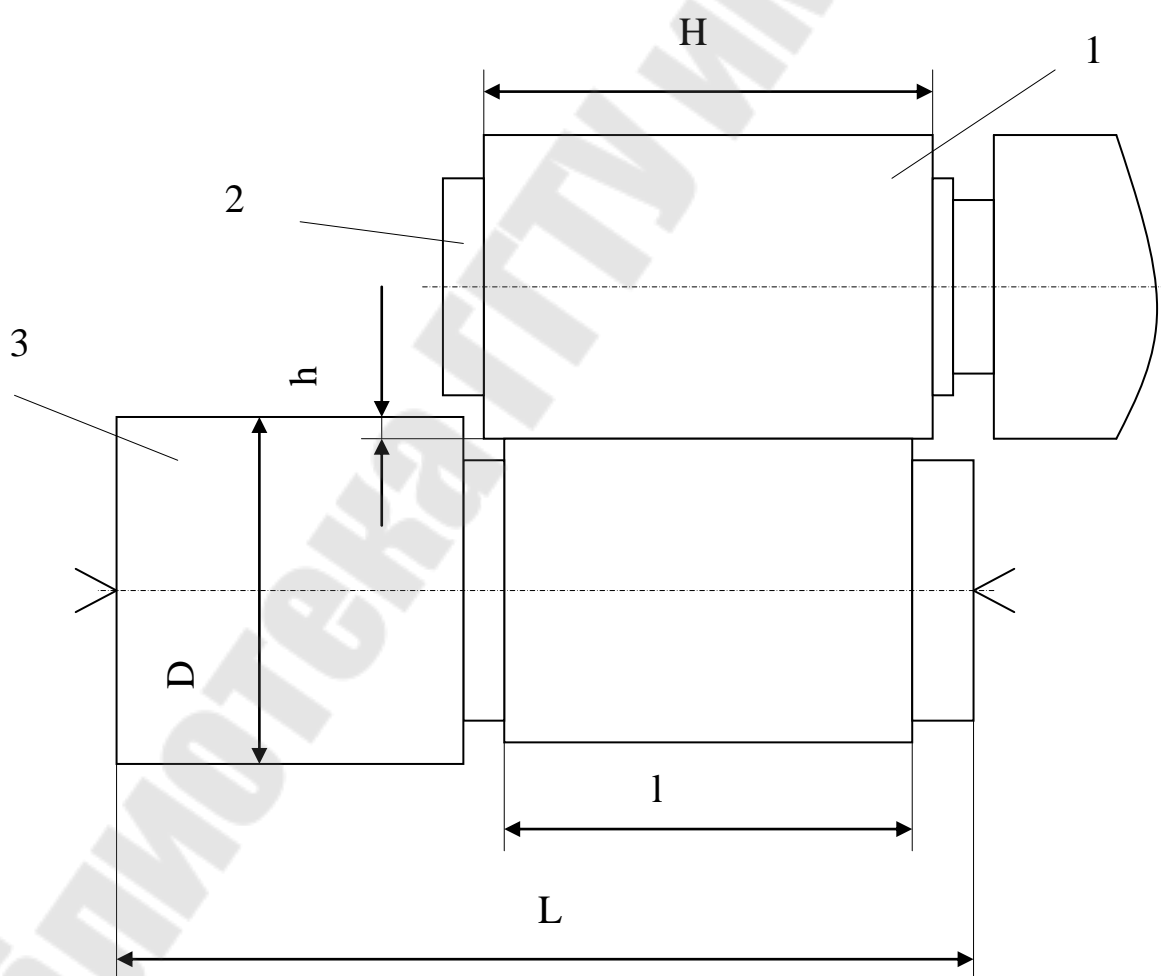


Рис. 3.48. Схема установки заготовки детали на шлифовальном станке

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

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

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

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

В соответствии с комплексом параметров применимости формируются исходные данные задачи и характеристики типовых решений.

Для решения задачи нужно выявить допустимые для каждого типового решения диапазоны параметров применимости. Соответствующие характеристики шлифовальных станков и обрабатываемых деталей приведены в табл. 3.13.

Таблица 3.13

Условия применимости шлифовальных станков

Модель станка	Параметры станков, мм			
	D	L	l	h
3У12В	≤200	≤500	≤40	≤50
3У131М	≤580	≤700	≤50	≤75
3М163В	≤280	≤1400	≤200	≤75

Затем формируется массив условий применимости (МУП):

$$\text{МУП} = \begin{matrix} 3УУ12 \\ 3УУ131 \\ 3ММ163 \end{matrix} = \begin{pmatrix} D & L & l & h \\ 200 & 500 & 40 & 50 \\ 280 & 700 & 50 & 75 \\ 280 & 1400 & 200 & 75 \end{pmatrix}$$

В соответствии с комплексом условий применимости для заданного набора исходных данных (параметров деталей)  $U_{\delta} = \{D_{\delta}, L_{\delta}, l_{\delta}, h_{\delta}\}$  из трех имеющихся принимается то решение, которое удовлетворяет неравенствам КУП.

Процедуру проверки приведенных условий можно описать при помощи *формального алгоритма* (рис. 3.49). На основе этого алгоритма может быть составлена программа для ЭВМ, позволяющая для любого набора  $U_1$  выбрать модель шлифовального станка.

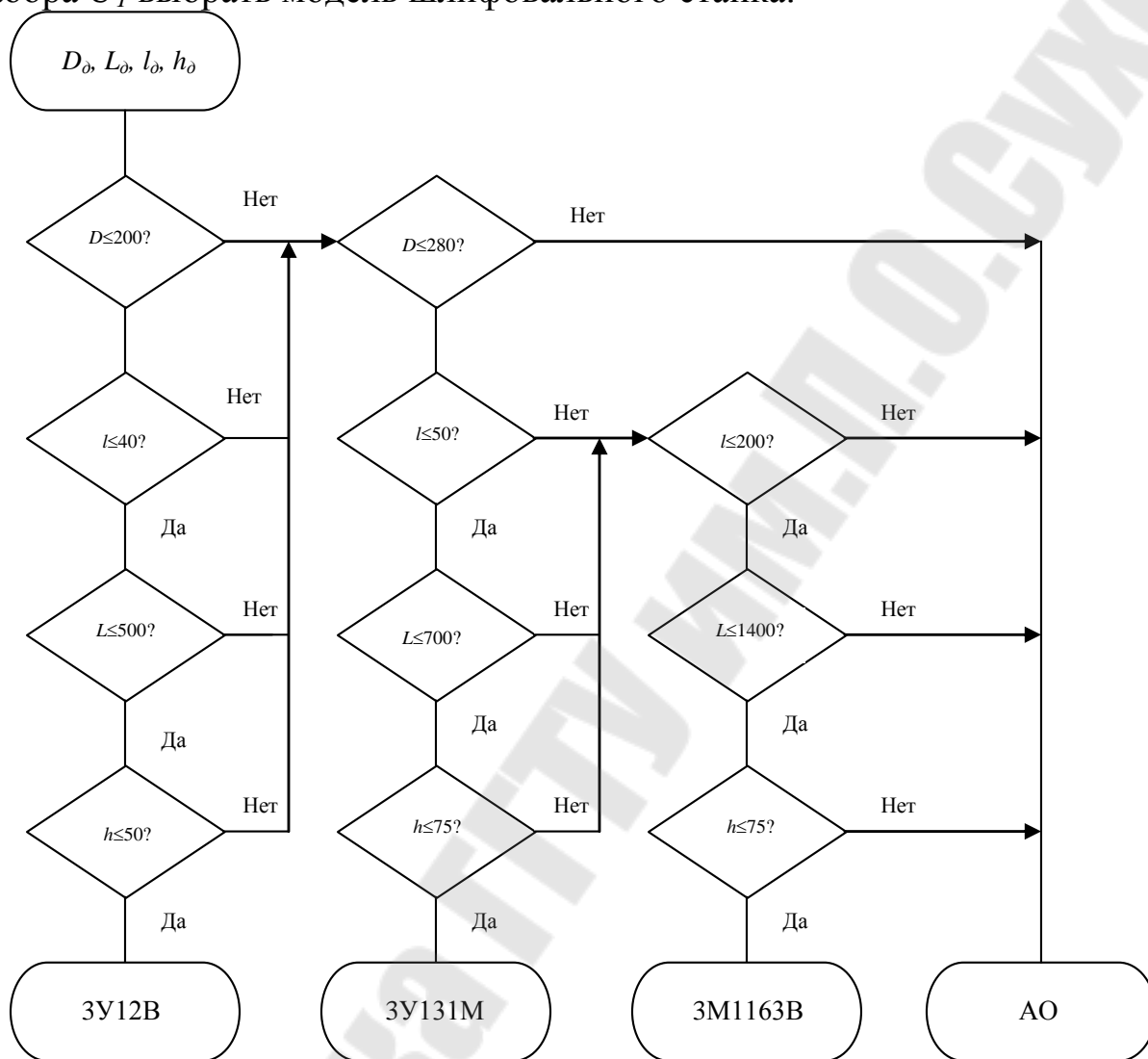


Рис. 3.49 Схема алгоритма выбора шлифовального станка:  
АО – модель отсутствует по условиям применимости

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

Таким образом, при решении *любых технологических задач с применением ЭВМ* необходимо в каждом случае сформировать множество типовых решений, комплекс условий применимости каждого типового решения, массив условий применимости, а также разработать правила проверки этих условий – алгоритм решения. Для всех *частных*

*технологических задач*, которые являются составными элементами технологического процесса, также решается весь комплекс вопросов технологического проектирования. На основании полученных решений формируется полный технологический процесс.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое «анализ технических объектов»?
2. Что такое «синтез технических объектов»?
3. На чем основан метод прямого проектирования?
4. На использовании чего базируется структура индивидуального процесса при его проектировании методом анализа?
5. Для каких деталей используются типовые технологические процессы?
6. Для каких деталей используются групповые технологические процессы?
7. Какие подходы существуют при использовании метода анализа на конкретном предприятии?
8. На чем основан метод синтеза технологических процессов?
9. По каким причинам существенно отличаются друг от друга алгоритмы построения САПР на основе метода синтеза?
10. В чем заключается задача структурного синтеза технологического процесса?
11. В чем заключается задача параметрического синтеза технологического процесса?
12. В какой последовательности реализуются основные этапы проектирования технологических процессов при использовании метода синтеза?
13. В чем заключается линейная стратегия проектирования?
14. В чем заключается циклическая стратегия проектирования?
15. В чем заключается разветвленная стратегия проектирования?
16. В чем заключается адаптивная стратегия проектирования?
17. В чем при проектировании заключается стратегия случайного поиска?
18. Какую задачу синтеза называют структурной оптимизацией?
19. Какую задачу называют параметрической оптимизацией?
20. Какая иерархическая классификация элементов технологических процессов предложена в технологии машиностроения?
21. Какие документы необходимы для анализа исходных данных при разработке технологического процесса?

22. Перечислите шаги выполнения анализа исходных данных для разработки технологического процесса

23. Что является целью проектирования принципиальной схемы обработки детали?

24. Какие основные документы необходимы для проектирования принципиальной схемы обработки детали?

25. Перечислите шаги проектирования принципиальной схемы обработки детали

26. Какие основные документы необходимы для выбора исходной заготовки и метода ее изготовления?

27. Перечислите шаги, необходимые для выбора исходной заготовки и метода ее изготовления

28. Какие основные документы необходимы для выбора технологических баз?

29. Перечислите шаги, необходимые для выбора технологических баз

30. Какие основные документы необходимы для составления технологического маршрута обработки?

31. Перечислите шаги, необходимые для составления технологического маршрута обработки

32. Какие основные документы необходимы для разработки технологических операций?

33. Что является исходными данными для проектирования технологической операции?

34. Перечислите шаги, необходимые для проектирования технологической операции

35. Какие основные документы необходимы для нормирования технологических операций?

36. Перечислите шаги, необходимые для нормирования технологических операций

37. Перечислите шаги, необходимые для разработки специальных средств поддержки технологического процесса

38. Какие основные документы необходимы для решения задач на этапе формирования требований охраны труда?

39. Какова цель расчета экономической эффективности технологического процесса?

40. Перечислите шаги, необходимые для оформления технологических процессов.

41. Что характерно для практического использования теоретических основ технологии машиностроения?

42. Что называется формализацией?
43. С чем неразрывно связана формализация процессов технологического проектирования?
44. Какие основные задачи необходимо решать при автоматизированном проектировании технологических процессов с помощью ЭВМ?
45. Что необходимо сделать для организации автоматизированного проектирования технологических процессов с помощью ЭВМ?
46. Из чего состоит граф?
47. Что называется путем, маршрутом или цепью из узла  $i$  в узел  $j$  на графе?
48. Что называется начальной вершиной маршрута?
49. Что называется конечной вершиной маршрута?
50. Что называется общей задачей линейного программирования?
51. Какая система называется системой канонического вида?
52. Что представляет собой математическая модель?
53. Математические модели каких видов используют в процессе проектирования с помощью САПР?
54. На какие группы делятся переменные в математических моделях?
55. На какие группы подразделяются структурно-логические математические модели?
56. Что такое размерная цепь?
57. Последовательное выполнение каких этапов представляет собой исследование объектов методом математического моделирования в общем случае?
58. На какие группы можно разбить все погрешности в зависимости от происхождения?
59. Что следует понимать под степенью формализации?
60. Назовите наиболее распространенные формы представления (описания) алгоритма.

## **4 Основы оптимизации технологических проектных решений**

В инженерной практике используется термин «оптимальное решение», или «оптимальный проект», под которым в этом случае понимается наилучшее из некоторого множества решение, удовлетворяющее всем требованиям, предъявляемым к проектируемому объекту. Процесс оптимизации лежит в основе инженерной деятельности, направленной на проектирование новых, более эффективных и менее дорогостоящих технических объектов.

Проектирование технологических процессов в машиностроении является многовариантным как в рамках множества однотипных предприятий, так и для отдельно взятого предприятия. Это обусловлено тем, что модель производства любого предприятия является динамичной (изменение состава средств технологического оснащения, используемых материалов, параметра оптимизации, зависящего от внешних факторов и т.п.).

Теория оптимизации в современном представлении включает совокупность фундаментальных математических результатов и численных методов, ориентированных на нахождение наилучших из множества альтернативных вариантов и позволяющих избежать полного перебора возможных вариантов и их сравнения. Достижение этих двух основных целей любого процесса проектирования сопряжено, как уже отмечалось, с синтезом различных элементов, анализом множества их состояний и выбором из них состояния, обеспечивающего наилучшие показатели функционирования технического объекта. Проведение расчетов по оптимизации технических объектов весьма трудоемкий процесс, поэтому при неавтоматизированном проектировании в технологии машиностроения задачи оптимизации практически не решались. Становление теории оптимизации во многом связано с появлением численных методов.

### **4.1 Задачи оптимизации при проектировании технических объектов**

При создании систем автоматизации проектирования технических объектов в основе общего подхода к этому процессу лежит алгоритм (рис. 4.1), включающий три этапа: синтез, анализ и принятие решения.



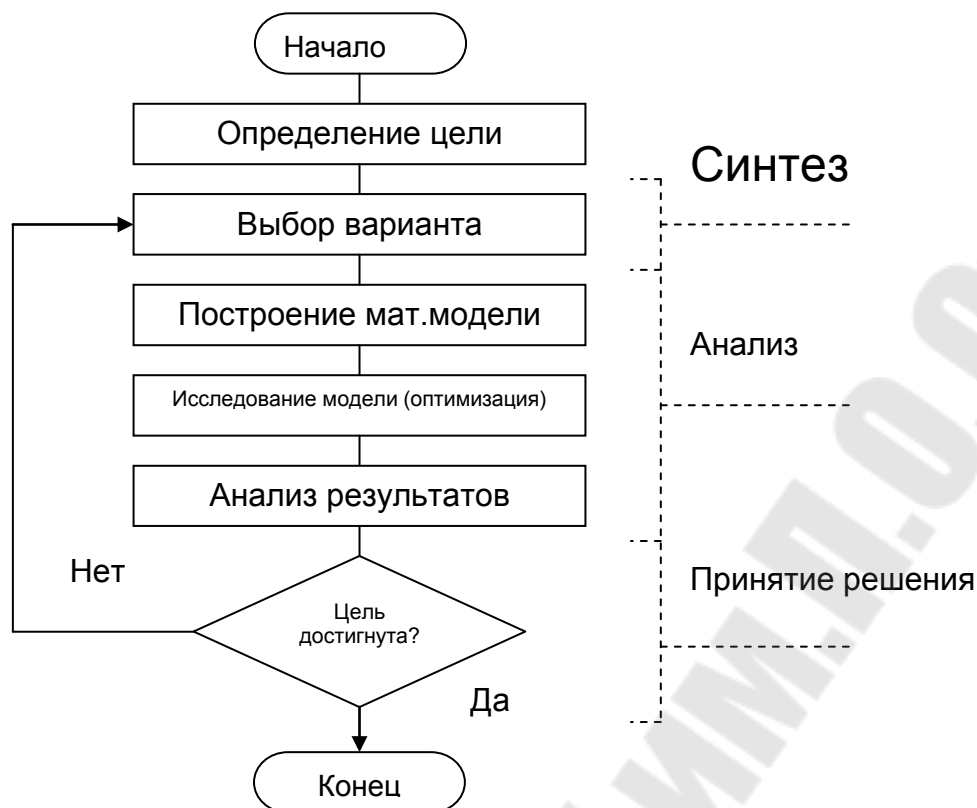


Рис. 4.1 Схема алгоритма процесса проектирования технического объекта

После определения цели проектирования формируются возможные варианты (альтернативы) решения проектной задачи. Этот этап называется *синтезом* и охватывает наиболее творческие виды работ по описанию объекта. В современных САПР на этом этапе могут генерироваться принципиально новые технические решения.

Второй этап – *анализ* – направлен на детализацию намеченных вариантов, решение задачи (определение структуры и отдельных параметров проектируемого объекта) и проверку возможных условий функционирования объекта. Определяющими видами работ на данном этапе являются математическое моделирование объекта и его исследование на основе этой модели с целью выявления основных функциональных свойств объекта.

Информация, полученная в результате анализа, используется на третьем этапе – *принятие решений*. Это весьма ответственный этап.

Его цель – выявить среди возможных вариантов единственное решение задачи. На этом этапе наиболее универсальными являются многошаговые методы принятия решения, когда каждый последующий шаг сужает область поиска и ограничивает число альтернатив.

Из рис. 4.1 видно, что основные задачи, решаемые на этапе анализа, связаны с оптимизацией технических объектов.

*Оптимизация* (от лат. optimum – наилучший) – это процесс нахождения экстремума некоторой количественной величины (параметра) проектируемого объекта, представляемой в виде функции. Если эта функция характеризует положительное свойство объекта, то осуществляют поиск ее максимального значения, если отрицательное – минимального.

Большинство методов оптимизации являются по своей сути инвариантными и могут использоваться при решении различных проектных задач. В настоящее время разработаны десятки численных методов оптимизации, оформленных в виде стандартных процедур (алгоритмов) и хранящихся в библиотеках прикладных программ вычислительных центров, которые открыты для доступа различным пользователям. В этих условиях перед проектировщиком встает задача правильного выбора метода и соответствующих наборов программ. Так, при расчете оптимальных режимов резания могут использоваться стандартные программы симплекс-метода или других методов линейного программирования. Однако при этом достаточно сложной задачей является стыковка принятой математической модели объекта с соответствующими программами оптимизации. Поиск оптимальных технических решений в технологии машиностроения затруднен в связи с низким уровнем формализации существующих методов проектирования технологических процессов и сложностью построения соответствующих математических моделей. Следовательно, главным вопросом оптимизации технологических процессов при создании САПР ТП является разработка математических моделей различных технологических объектов и их информационное обеспечение.

#### **4.2 Критерии оптимальности и методы оптимизации технологических процессов**

Под основной целью технологического процесса или операции в машиностроении обычно понимается обеспечение заданных характеристик качества изделия наиболее производительным путем при минимальных затратах. В этом случае оптимальность технологического процесса можно определить как меру его соответствия поставленной цели. Чем эффективнее технологический процесс, тем выше его производительность и экономичность.

В задачах, встречающихся в условиях оптимизации ТП, критерии оптимальности могут быть разными, однако все они должны удовлетворять определенным требованиям:

- обладать достаточной полнотой описания объекта;

- иметь определенный физический смысл;
- быть количественными и выражаться однозначно некоторым числом;
- иметь простой математический вид;
- определяться с допустимой точностью.

В зависимости от вида и уровня задач оптимизации (расчет режимов резания, проектирование операции и технологического процесса или оценка работы предприятия в целом) основные используемые критерии оптимальности можно подразделить на следующие виды:

- экономические – минимальная себестоимость, наибольшая прибыль, уровень рентабельности, наименьшие приведенные затраты (минимальные затраты на все виды энергии, на основные и вспомогательные материалы, на заработную плату и др.);
- технико-экономические – максимальная производительность, наименьшее штучное время, максимальный коэффициент полезного действия оборудования и т.п.;
- технологические – точность изготовления изделия и его физико-химические свойства, стойкость инструмента, показатели качества поверхности изделия (шероховатость, волнистость, микротвердость, остаточные напряжения и др.);
- эксплуатационные – износостойкость, усталостная прочность, контактная жесткость и другие показатели долговечности изделий;
- прочие – психологические, эстетические, эргономические.

Наибольшее распространение при решении задач оптимизации технологического проектирования получили экономические и технико-экономические критерии оптимальности. Это связано с тем, что в основе разработки любого ТП или решения более частной задачи, например, расчета режимов резания, лежат два принципа: технический и экономический. В соответствии с первым принципом технологический процесс должен гарантировать выполнение всех требований на изготовление изделия. Второй принцип определяет условия, обеспечивающие минимальные затраты труда и наименьшие издержки производства.

Из группы технико-экономических критериев наиболее полно отражает результат оптимизации технологического проектирования максимальная производительность, а из группы экономических критериев – минимальная себестоимость.

*Производительностью* рабочей машины называют количество продукта, обрабатываемого за единицу рабочего времени. *Штучная*

производительность  $\Pi$  (шт./мин) на операции определяется величиной, обратной штучно-калькуляционному времени на эту операцию:

$$\Pi = \frac{1}{t_{шт-к}} \quad (4.1)$$

Таким образом, за критерий оптимальности принимаем *минимальное штучно-калькуляционное время*  $t_{шт-к}$ , которое состоит из штучного времени  $t_{шт}$  и подготовительно-заключительного  $T_{п.з.}$  на всю партию деталей  $N$ :

$$t_{шт-к} = t_{шт} + \frac{T_{п.з.}}{N}$$

В свою очередь штучное время состоит из основного, или машинного  $t_m$ , вспомогательного  $t_b$ , времени перерывов на отдых  $t_{отд}$  и обслуживания рабочего места  $t_{обс}$ , т.е.

$$t_{шт} = t_o + t_b + t_{отд} + t_{обс}$$

Анализ элементов  $t_{шт}$  показывает, что режимы резания определяют  $t_m$ , а также время смены и подналадки инструмента  $t_{см}$ , которое является составной частью  $t_{обс}$ , т.е.

$$t_{обс} = t'_{обс} + t_{см}$$

Тогда формулу (4.1) можно записать в следующем виде:

$$\Pi = \frac{1}{(t_m + t_{см}) + \left( t_b + t'_{обс} + t_{отд} + \frac{T_{п.з.}}{N} \right)} \quad (4.2)$$

Обозначим часть штучно-калькуляционного времени, зависящую от режимов резания,  $t_{шт-к.р.}$ , т.е.

$$t_{шт-к.р.} = t_{маш} + t_{см} \quad (4.3)$$

Запишем машинное время в общем виде:

$$t_{маш} = t_p + t_x,$$

где  $t_p$  – время резания, мин;  $t_x$  – время холостого хода, мин. Если ввести коэффициент резания  $\lambda = L_{раб.х.}/L_d$ , представляющий отношение длины детали  $L_d$  к длине рабочего хода  $L$ , получим

$$t_{маш} = \lambda t_{рез} \quad (4.4)$$

Для наиболее распространенных методов обработки металлов резанием (точение, сверление, фрезерование) величина  $t_p$  может быть найдена по формуле

$$t_p = \frac{L}{ns} i = \frac{Lh}{nst} \quad i = \frac{h}{t} \quad (4.5)$$

где  $n$  – частота вращения заготовки, об./мин;  $s$  – подача, мм/об;  $t$  – глубина резания, мм;  $L$  – длина обрабатываемой поверхности, мм;  $h$  – величина припуска, мм;  $i$  – число проходов.

Время смены и подналадки инструмента для одной детали

$$t_{\text{мех}} = \frac{T_{\text{см}} t_p}{T} = t_{\text{см}} \quad (4.6)$$

где  $T_{\text{см}}$  – время, затрачиваемое на каждую смену инструмента, мин;  $T$  – период стойкости инструмента, мин.

Подставив выражения (4.4)-(4.6) и  $n = 1000v/\pi D$  в формулу (4.3), получим

$$t_{\text{шт.-к.р}} = \frac{\pi DLh}{1000 v s t} \left( \lambda + \frac{T_{\text{см}}}{T} \right) \quad (4.7)$$

Формула (4.7) в таком виде не может использоваться для оптимизации режимов резания, так как в нее входит переменная величина – стойкость инструмента  $T$ , зависящая от этих же режимов согласно формуле определения скорости резания:

$$v = \frac{C_v}{T^m t^{X_v} s^{Y_v}} k_v. \quad (4.8)$$

После подстановки зависимости (4.8) в формулу (4.7) и соответствующих преобразований получим окончательное выражение для критерия оптимальности — *минимальное штучное время резания*:

$$t_{\text{шт.р}} = \frac{\pi DLh}{1000 v s t} \left( \lambda + \frac{T_{\text{см}} v^{1/m} t^{X_v/m} s^{Y_v/m}}{C_v^{1/m} \cdot k^{1/m}} \right) \quad (4.9)$$

Анализ формулы (4.9) показывает, что в наиболее общем виде этот критерий по отношению к оптимизируемым параметрам  $v$ ,  $s$  и  $t$  является нелинейным.

Экономический критерий – *минимальная себестоимость* – охватывает широкий круг затрат общественного труда, а также учитывает затраты прошлого труда, овеществленного в средствах производства (помещения и оборудование, энергия, вспомогательные материалы, мерительный инструмент).

Цеховая себестоимость технологической операции  $C_{\text{оп}}$  без учета затрат на заготовку определяется следующим образом:

$$C_{\text{оп}} = C_{\text{з.с}} + C_a + C_{\text{рем}} + C_{\text{эн}} + C_v + C_{\text{пр}} + C_{\text{ин}} + C_n,$$

где  $C_{\text{з.с}}$  – заработная плата станочников (с начислением в фонд социального страхования);  $C_a$  – амортизационные отчисления на замену станка;  $C_{\text{рем}}$ ,  $C_{\text{эн}}$ ,  $C_v$ ,  $C_{\text{пр}}$ ,  $C_{\text{ин}}$ ,  $C_n$  – затраты соответственно на ремонт станка, силовую электроэнергию, вспомогательные материалы,

амортизацию и ремонт универсальных приспособлений, амортизацию, ремонт и заточку универсальных режущих инструментов, а также затраты, связанные с использованием помещения.

С позиций экономического критерия процесс обработки заготовки резанием характеризуется двумя факторами: временем  $t_{шт}$ , требуемым для обработки, и зависящей от него себестоимостью. Значения этих факторов зависят от режимов обработки, однако простой зависимости между ними не существует, так как режимы обработки изменяются. Например, изменение каждого фактора зависит от величины износа инструмента.

Изменение условий обработки в направлении повышения производительности может привести к таким большим расходам на инструмент, что они превысят сокращение расходов за счет уменьшения времени обработки. И наоборот, недостаточное использование режущих способностей инструмента может резко повысить общие расходы (суммарную себестоимость обработки), связанные с временным фактором.

Характер влияния различных затрат на себестоимость операции показан на рис. 4.2. Суммарная себестоимость обработки (линия 4) включает три вида затрат:

1. затраты, не зависящие от режимов резания (затраты на вспомогательное время и приходящаяся на заготовку часть подготовительно-заключительного времени  $T_{п.-з}/N$ ) (линия 1);

2. затраты, пропорциональные производительности обработки, которые уменьшаются с сокращением машинного времени (все затраты, которые снижаются с уменьшением  $t_o$ , за исключением затрат на инструмент; линия 2);

3. затраты, пропорциональные производительности обработки (инструментальные затраты, зависящие от скорости, подачи, глубины резания, а также инструментального и обрабатываемого материалов) (линия 3).

Кривая 4 имеет минимум, положение которого зависит от характера кривых 2 и 3. В большинстве случаев она имеет вид гиперболы, зависящий от стоимости станко-минуты и стоимости амортизации рабочего места.

При определении технологической себестоимости операции могут использоваться бухгалтерский метод расчета, метод определения себестоимости станко-часа и метод поэлементного расчета, который является наиболее точным методом и поэтому используется в дальнейших расчетах.

Элементы технологической себестоимости можно условно разделить на две группы, одна из которых не зависит ( $C_{рем}$ ,  $C_в$ ), а вторая зависит от

режимов резания ( $C_{з.с}$ ,  $C_a$ ,  $C_{пр}$ ,  $C_{ин}$ ,  $C_{эн}$ ,  $C_n$ ). Вторая группа элементов себестоимости операции пропорциональна штучному времени, поэтому ее целесообразно привести к 1 минуте работы оборудования ( $C'_{з.с}$ ,  $C'_a$ ,  $C'_{пр}$ ,  $C'_{ин}$ ,  $C'_{эн}$ ,  $C'_n$ ).

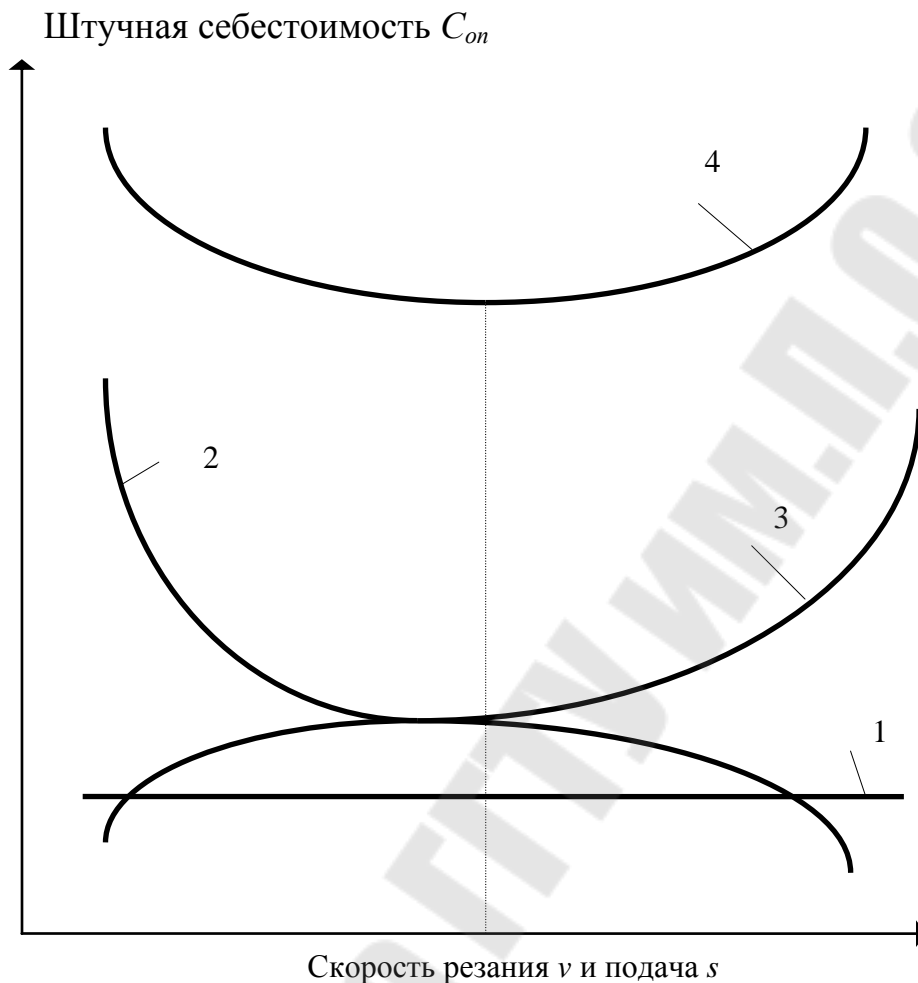


Рис. 4.2 Зависимости себестоимости обработки от скорости резания  $v$  и подачи  $s$

Затраты на заработную плату станочника

$$C_{з.с} = Z_{мин} K_m T_{шт.р}, \quad (4.10)$$

где  $Z_{мин}$  – тарифная ставка 1-го разряда данной категории рабочих, тыс.руб./мин;  $K_m$  – тарифный коэффициент;  $t_{шт.р}$  – часть штучно-калькуляционного времени, зависящая от режимов резания, мин.

Проведя замену в рассматриваемой формуле, можно получить

$$C_{з.с} = C'_{з.с} T_{шт.р}.$$

Аналогично могут быть найдены затраты, определяющие элементы себестоимости по амортизации станка  $C_a$ , эксплуатации приспособлений

$C_{np}$ , амортизации помещений  $C_n$  и силовой электроэнергии  $C_{эн}$ , приведенных к 1 мин работы оборудования

$$C_a = C'_a T_{шт.p}; \quad C_{np} = C'_{np} T_{шт.p}; \quad C_n = C'_n T_{шт.p}; \quad C_{эн} = C'_{эн} T_{шт.p}.$$

Тогда себестоимость операции, зависящая от режимов резания, может быть определена по зависимости

$$C_{оп.пер} = C'_{з.с} T_{шт.p} + C'_a T_{шт.p} + C'_{np} T_{шт.p} + C'_n T_{шт.p} + C'_{эн} T_{шт.p} + C_{ин},$$

где  $C_{ин}$  – инструментальные расходы, приведенные к одной заготовке.

Введя обозначение  $R = C'_{з.с} + C'_a + C'_{np} + C'_n + C'_{эн}$  определим положение минимума кривой штучной себестоимости  $C_{оп.пер}$  (рис. 4.2) расчетным путем, используя выражение

$$C_{оп.пер} = RT_{шт.p} + C_{ин}. \quad (4.11)$$

Инструментальные расходы на одну деталь можно определить по формуле

$$C_{ин} = M/q,$$

где  $M$  – инструментальные расходы, приведенные к одному периоду стойкости;  $q$  – число деталей, обрабатываемых за период стойкости.

При этом

$$q = \frac{T}{t_p},$$

где  $t_p$  – время резания инструментом каждой заготовки, мин.

Инструментальные расходы, приведенные к одному периоду стойкости:

$$M = S_{ин}/n_T + C'_{пер} + C'_{зам.ин},$$

где  $S_{ин}$  – покупная (начальная) стоимость инструмента;  $C'_{пер}$  – стоимость переточки инструмента, приведенная к одному периоду стойкости;  $C'_{зам.ин}$  – стоимость замены затупившегося инструмента, приведенная к одному периоду стойкости;  $n_T$  – число периодов стойкости.

После подстановки всех зависимостей

$$C_{оп.пер} = RT_{шт.p} + MT_p/T.$$

Учитывая, что  $T_{шт.p} = T_o + T_{тех}$  а  $T_m = T_p \lambda$ , и введя зависимость (4.5) для времени резания  $t_p$ , получим

$$C_{оп.пер} = \frac{Lh}{nst} \lambda R + \frac{T_{CM}}{T} \frac{LhR}{nst} + \frac{1}{T} M \frac{Lh}{nst}.$$

Для получения окончательного вида оценочной функции «минимальная себестоимость» производится замена переменных  $n$  и  $T$  их зависимостями от скорости резания  $v$ , и после несложных преобразований имеем

$$C_{оп.пер} = \frac{\pi DLh}{10^3 vst} \left( \lambda R + \frac{(RT_{CM} + M)v^{1/m} t^{Xv/m} s^{Yv/m}}{C_v^{1/m} k_v^{1/m}} \right) \quad (4.13)$$



Как видно из этой формулы (4.13), вид критерия оптимальности по параметрам  $v$ ,  $s$  и  $t$  является нелинейным. Это обстоятельство затрудняет разработку методов оптимизации, поэтому в частных случаях стремятся упростить вид критерия оптимизации, что, естественно, вносит определенные погрешности в получаемые результаты. Таким примером является широко используемый метод линейного программирования для расчета оптимальных режимов резания  $v$  и  $s$ . В этом случае критерий «минимальная себестоимость» рассматривается в виде

$$C_{on.пер} = C_1/ns,$$

где  $C_1$  – некоторая постоянная, характеризующая условия обработки.

Расчет оптимальных режимов резания  $v$  и  $s$  с использованием метода линейного программирования описан в 4.4.3.

При решении задач оптимизации, возникающих на разных этапах технологического проектирования, используются различные виды математических моделей и методов оптимизации. Различают математические модели с непрерывными и дискретными значениями переменных.

С точки зрения стратегии поиска оптимума выделяют четыре группы методов оптимизации:

- аналитические;
- рекурсивные;
- итерационные;
- стохастические.

*Аналитические методы* применяются при решении классических задач и задач с ограничениями в виде уравнений. Для решения задач без ограничений используют методы исследования производной функции. Приравнивая производную нулю, отыскивают точки экстремума, а затем исследуют точки с помощью второй производной для отыскания максимума. Таким способом решаются простые технологические задачи: расчет режимов резания, выбор параметров режущего инструмента и др.

*Рекурсивные методы* относятся к методам, позволяющим определить одну переменную за одну расчетную операцию. Решение всей задачи осуществляется путем поочередного определения переменных. Наиболее распространенный из этих методов – динамическое программирование. Его можно использовать при анализе многоэтапных процессов принятия решения, например при оптимизации маршрутных ТП. Однако метод динамического программирования эффективен при небольшом числе ограничений, вводимых в математическую модель.

*Итерационные методы* объединяют наибольшую группу методов поиска оптимумов. К ним относятся способы расчета функции цели в

одной или нескольких вероятностных точках для определения «лучшей» точки. Расчет выполняют до тех пор, пока не приблизятся к назначенному критерию на расстояние, меньшее некоторого заданного значения. Эти методы позволяют устанавливать только локальные оптимумы, однако они могут применяться в случаях, когда оптимизацию проводят в различных исходных точках. Оптимумы, определяемые этими методами, представляют собой достаточно точное решение относительно абсолютного оптимума. Различают два больших класса итерационных методов программирования: линейное и нелинейное программирование.

*Линейное программирование* применяют для решения линейных задач, когда функции цели и ограничения являются линейными, а все переменные – непрерывными функциями. В основу линейного программирования положено утверждение, что точка оптимума целевой функции находится в одной из вершин выпуклого многогранника, определяющего область возможных решений. Наиболее известным итерационным методом решения линейных задач является симплекс-метод.

Для методов *нелинейного программирования* характерно непосредственное отыскание оптимума, например, методы наискорейшего спуска, отыскание оптимума вдоль произвольно выбранного направления. Все методы непосредственного поиска оптимума включают операции выбора направления поиска и длины шага. Большинство методов непосредственного отыскания оптимума не может быть применено к математическим моделям с ограничениями.

*Стохастические методы* оптимизации (методы случайного поиска решений) включают процедуры накопления и обработки информации, в которые сознательно вводится элемент случайности. Преимущества этих методов в их простоте, надежности, достаточной точности и легкости программирования. В результате методы случайного поиска стали одними из наиболее эффективных методов оптимизации. Стохастические методы оптимизации применяют для различных задач технологического проектирования процессов изготовления деталей при наличии большого числа случайных факторов, которые не представляется возможным описать в традиционной математической форме.

Задача оптимизации ТП является комплексной и требует проведения анализа и выбора технологических решений на различных этапах проектирования. При комплексном подходе различают два вида оптимизации проектирования (табл. 4.1): структурную и параметрическую. *Структурная оптимизация* – выбор оптимальных технологического

маршрута, операций, переходов, вида и методов изготовления заготовки, способов базирования, оборудования, приспособлений, инструмента и т.д.

Таблица 4.1

Виды оптимизации на различных этапах проектирования технологических процессов

Этап проектирования ТП	Оптимизация	
	структурная	параметрическая
Выбор заготовки и методов ее изготовления	+	-
Выбор технологических баз	+	-
Составление технологического маршрута обработки	+	-
Разработка технологических операций	+	+
Расчет режимов резания. Нормирование ТП	+	+
Расчет экономической эффективности ТП	-	+

*Примечание.* Знак «+» указывает на наличие, «-» – на отсутствие данного вида оптимизации.

*Параметрическая оптимизация* – выбор оптимальных величин допусков на межоперационные размеры, припусков, режимов резания, геометрических размеров режущего инструмента и др.

Комплексный подход к оптимизации усложняет решение задачи. Так, при параметрической оптимизации необходимо иметь решение о выборе структуры соответствующего уровня. В то же время структурная оптимизация требует знания значений параметров, входящих в соответствующую структуру. Это противоречие может быть устранено при построении алгоритмов оптимизации технологических процессов за несколько итераций.

С точки зрения структурного описания уровней ТП различают этапы проектирования маршрута, операции и переходов. Возможны два подхода к построению принципиальной схемы технологического процесса:

- 1) маршрут → операция → переход;
- 2) переход → операция → маршрут.

При первом подходе производится последовательный синтез сначала вариантов принципиальных схем обработки, а затем вариантов маршрута и операции. На каждом последующем этапе решения предыдущего этапа детализируются. Второй подход основан на анализе отдельных поверхностей и проектировании переходов их обработки. Далее переходы упорядочиваются в операции, а операции – в маршрут обработки детали.

Главной особенностью оптимизации технических решений в рассмотренных подходах является необходимость использования на всех уровнях различных критериев оптимальности. Анализ этих критериев показывает, что с точки зрения согласования оптимальных решений

разных уровней предпочтительнее разработка процессов от наиболее общих вопросов к их детализации, а это более свойственно первому подходу. В результате возникает задача получения оптимального решения при проектировании ТП в целом за счет оптимизации отдельных технологических решений на всех уровнях проектирования.

Для реализации рассматриваемого процесса проектирования в САПР ТП используется итерационный многоуровневый процесс оптимизации, содержанием которого является многократное повторение процедур анализа, синтеза и оценки. Анализ исходных данных, условий и ограничений позволяет установить границы области возможных технологических решений. С помощью процедур синтеза получают технологические решения, допустимые по совокупности граничных условий. Лучшие по некоторому критерию решения отбирают процедурами оценки.

В условиях многоуровневого выбора решений на различных этапах проектирования ТП первоначально решается вопрос структурной оптимизации. После выбора определенной структуры маршрута обработки, операции, позиции, переходов или различных видов технологической оснастки ставится задача их параметрической оптимизации. Однако в большинстве случаев это сделать трудно из-за отсутствия математических моделей, связывающих структурные составляющие технологических процессов с некоторой группой параметров, определяющих технико-экономические показатели этих процессов.

### **4.3 Структурная оптимизация технологических процессов**

#### **4.3.1 Методические основы структурной оптимизации**

В связи со сложностью формализации задач выбора структуры ТП, в первых САПР ТП, как правило, принимали допущения, что возможные варианты элементов структур технологического процесса, их функции и связи определены заранее. Такие допущения вызваны крайней сложностью формализации задач выбора структуры ТП и многовариантностью решений (комбинация элементов по составу, последовательности, связям и функциям).

Недостаточное внимание к структурной оптимизации ТП приводило к существенному снижению качества технологического проектирования. Известно, что эффект от правильного выбора структуры технического объекта во многом превосходит эффект от его параметрической оптимизации. Действительно, при ошибочном выборе структуры маршрута обработки или отдельной операции самые совершенные методы

оптимизации режимов резания не могут компенсировать потерь производительности обработки.

В наиболее общем виде задача структурной оптимизации сводится к выбору наилучшей структуры ТП. Решение поставленной задачи возможно с помощью основных положений теории множеств. Для этого необходимо, во-первых, предъявить определенные требования к совокупности выполняемых операций, т.е. фиксировать некоторое подмножество  $F^o = \{f_i\}$  множества  $F$ , во-вторых, ввести некоторые критерии предпочтения одной структуры ( $S'$ ) другой структуре ( $S''$ ).

Следовательно, по множеству  $F^o \subseteq F$  операций, которые необходимо выполнить, нужно построить множество  $S(F^o)$  допустимых для  $F^o$  структур, т.е. все возможные структуры  $S^\alpha$ ,  $\alpha \in A$ , каждая из которых может сопоставляться с совокупностью функций  $F^{S^\alpha} \subseteq F^o$ , и из них выбрать наилучшую исходя из введенного критерия предпочтения. В приведенных высказываниях использованы следующие обозначения понятий теории множеств: запись  $(F^o \subseteq F)$  обозначает, что  $F^o$  является подмножеством множества  $F$ ; запись  $\alpha \in A$  –  $\alpha$  является элементом множества  $A$ .

Критерий предпочтения является некоторым функционалом  $L(S)$  от структуры. При этом запись  $S' < S''$  эквивалентна записи  $L(S') < L(S'')$ . Этот функционал зависит от условий функционирования (технических ограничений), которые, в свою очередь, описываются некоторым вектором параметров  $v$  (предполагается постоянным). Тогда задача выбора оптимальной детерминированной структуры состоит в поиске структуры, которая наилучшим образом (в смысле выбранного критерия) выполняла бы некоторую заданную совокупность функций  $F^o \subseteq F$  при заданных условиях функционирования  $v$ :

$$\max_{S \in S(F^o)} L(S) = \max_{S \in S(F^o)} \sum_i \left( \sum_j l_{ij} - C_i \right),$$

где  $S(F^o)$  – множество всех структур, отвечающих множеству  $F^o$ ;  $l_{ij}$  – эффективность выполнения объектом  $i$  операции  $j$ ;  $C_i$  – затраты на  $i$ -й элемент.

Задача структурной оптимизации, заключающаяся в определении вида функционала  $F$ , обычно решается методом перебора. Приближенным решением задачи перебора является случайный поиск для нулевых переменных.

Рассмотренный в общем виде математический подход к структурной оптимизации технологических процессов может быть применен на следующих этапах:

- при выборе вида заготовки и методов ее изготовления;
- при проектировании маршрута обработки заготовки, структуры операций и переходов;
- при выборе оборудования, станочных приспособлений, режущего, вспомогательного и мерительного инструментов.

#### **4.3.2 Оптимизация выбора метода изготовления заготовки**

Выбор вида заготовки и метода ее изготовления является важным этапом технологического проектирования, поскольку он во многом определяет не только качество готовых изделий, но и себестоимость их изготовления. Заготовками для деталей машин являются:

- 1) отливки, полученные литьем в песчаные либо металлические формы или другими способами;
- 2) горячекатаный прокат обычной или повышенной точности, а также профильный, фасонный либо другой вид проката;
- 3) поковки, полученные методом свободной ковки, ковки в подкладных кольцах и штампах;
- 4) штамповки (поковки), полученные обработкой давлением – объемной горячей и холодной штамповкой;
- 5) сварные заготовки из проката, отливок и поковок.

Задача выбора вида заготовки возникает на различных этапах подготовки производства, как при конструировании, так и при технологическом проектировании. Часто вид заготовки должен быть выбран при конструировании детали, а оптимальный метод ее изготовления уточнен при технологическом проектировании. *Выбор заготовки* определяется видом детали и основывается на одном из трех вариантов:

- 1) если деталь требует обработки со всех сторон и не предъявляются особые требования к ее физико-механическим свойствам и структуре металла, то выбор заготовки производит только технолог;
- 2) если деталь требует обработки со всех сторон, но к ней предъявляются дополнительные требования, то конструктор, задавая эти требования (например, к расположению волокон металла), косвенно задает возможные методы получения заготовки, но окончательное решение о выборе заготовки принимает технолог;
- 3) если деталь имеет необрабатываемые поверхности, то конструктор предварительно задает определенный тип заготовки,

указывая штамповочные или литейные радиусы, уклоны и другие параметры, а технолог определяет оптимальный метод получения заготовки. Решение о выборе заготовки в этом случае целесообразно принимать совместно конструктору и технологу. При этом, как правило, технико-экономические расчеты не производятся, а решение принимается исходя только из опыта работы.

Оптимизация выбора метода получения заготовки позволяет не только снизить затраты на ее изготовление, но и значительно сократить трудоемкость и себестоимость механической обработки. Выбор оптимальной заготовки должен проводиться по комплексным параметрам с учетом затрат общественного труда на всех этапах ее изготовления и трудоемкости выполнения всех операций механической обработки. При нарушении этого условия может получиться так, что при незначительной себестоимости получения заготовки общая себестоимость изготовления детали окажется высокой из-за значительной трудоемкости механической обработки. В то же время следует иметь в виду, что выбор исходной заготовки предшествует составлению маршрута и проектированию операций механической обработки, когда точные затраты на механическую обработку еще не известны. Анализ используемых на предприятиях машиностроения подходов по выбору заготовок позволяет выделить следующие **критерии выбора метода получения заготовки**: вид материала, серийность выпуска, конструктивная форма детали, масса и размеры детали, требуемая точность заготовки, коэффициент использования металла и др.

Наиболее важными являются первые четыре критерия. Однако учет даже всех перечисленных критериев в ряде случаев не дает однозначного решения по выбору метода получения заготовки и приходится дополнительно проводить технико-экономический анализ. В основу этого анализа может быть положена оптимизация.

В качестве критерия оптимальности используется **минимальная себестоимость изготовления заготовки**  $C_3$ , которая определяется стоимостью материала, переменными составляющими затрат (заработная плата основных рабочих, затраты на амортизацию оборудования, оснастку, инструмент и т.д.) и постоянными составляющими – накладными расходами.

Однако выбор заготовки с минимальным значением  $C_3$  не всегда приводит к оптимальному варианту технологического процесса изготовления детали. Заготовки, полученные различными методами, отличаются припусками, что оказывает влияние на черновую обработку в частности на первые операции ТП механической обработки. Поэтому при

оптимизации выбора заготовки необходимо также учитывать затраты  $C_{\text{мех}}$  на выполнение черновых операций механической обработки. При более точной оценке метода получения заготовки целесообразно принимать во внимание стоимость отходов металла  $C_{\text{отх}}$ , образующихся при механической обработке заготовок с различными припусками. Тогда зависимость критерия оптимальности выбора метода получения заготовки может быть представлена в следующем виде:

$$C = \min(C_3 + C_{\text{мех}} - C_{\text{отх}}).$$

Однако может оказаться, что в конкретных производственных условиях выбор вида заготовки по предлагаемому критерию может быть нецелесообразным. Имеют место случаи, когда лучше использовать заготовку, которая выбирается либо в соответствии с критерием минимальной себестоимости механической обработки  $\min C_{\text{мех}}$ , либо из минимума затрат на материал  $\min(C_{\text{м}} - C_{\text{отх}})$ . Исходя из этого при решении задачи выбора оптимального метода получения заготовки выделяют следующие этапы:

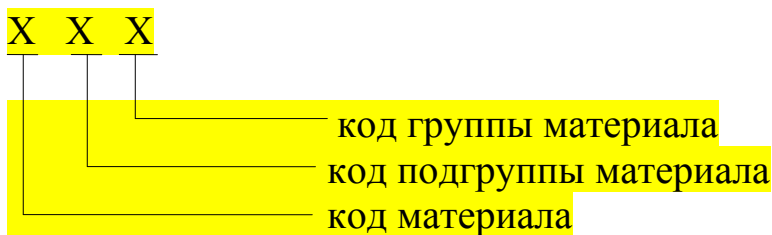
- 1) выбор возможных видов заготовки по материалу детали;
- 2) выбор возможных методов изготовления заготовок исходя из серийности, конструктивной формы, массы и размеров детали;
- 3) определение технических характеристик для выбранных видов заготовок (точности, коэффициента использования металла и др.);
- 4) определение себестоимости заготовки  $C_3$  для выбранных методов ее изготовления;
- 5) определение стоимости затрат на механическую обработку  $C_{\text{мех}}$  для выбранных видов заготовок;
- 6) определение стоимости отходов металла  $C_{\text{отх}}$  для выбранных видов заготовок;
- 7) выбор оптимального метода изготовления заготовки для конкретных условий производства.

При формализации условий выбора вида заготовки и методов ее изготовления, а также для построения алгоритмов решения рассматриваемой задачи на первом этапе проводится классификация всех признаков, определяющих выбор заготовок. Для упрощения алгоритмов выбора заготовки и методов ее изготовления все признаки кодируются.

Рассмотрим один из возможных вариантов кодирования.

1. Вид материала (ВМ). Предварительный анализ этого признака показал целесообразность классификации всех материалов с использованием трехуровневого кодирования. Структура кода имеет вид, представленный на рис. 4.3.





**Рис. 4.3 Код структуры вида материала**

Все материалы можно разделить на семь групп и соответственно закодировать: стали углеродистые (литейные) – 1; чугуны – 2; литейные сплавы – 3; высоколегированные стали и сплавы – 4; низколегированные стали – 5; легированные стали – 6; автоматные стали – 7. Код группы используется для определения возможных видов и методов изготовления заготовок.

Второй уровень классификации, описываемый кодами подгрупп, объединяет материалы, имеющие одинаковые или близкие технологические свойства. Коды подгрупп материалов учитываются при определении затрат на черновую механическую обработку.

На последнем уровне классификации кодируют конкретные материалы, и эта информация используется для уточненного определения цен за тонну заготовок и стоимости отходов металла.

*Таблица 4.2*

**Виды конструктивных форм деталей**

Вид КФ	Тип деталей
1...4	Детали цилиндрической формы с различными перепадами ступеней
5	Втулки и диски со сложной наружной и внешней поверхностями
6	Валы сложной пространственной формы
7	Рычаги, шатуны и др.
8	Корпусные детали призматической формы и сочетания призматической, цилиндрической и других форм
9	Корпусные детали фланцевого типа
10	Корпусные детали коробчатой формы сложной конфигурации
11	Корпусные детали простой конфигурации

2. Конструктивная форма (КФ) деталей. Классификация КФ может быть представлена 11 видами деталей (табл. 4.2), а каждый вид – пятью группами сложности. Выбор соответствующего кода производится на основе сравнения конкретной детали с описанием типовой детали-представителя в специальной таблице.

3. Серийность производства (СП) зависит от массы детали и годовой

программы выпуска. Вид СП можно закодировать следующим образом: единичное – 1, серийное – 2, крупносерийное – 3, массовое – 4.

4. Масса детали (МД). Для выбора вида заготовки важное значение имеет ее масса, которая в условиях рассматриваемой задачи определяется в зависимости от массы детали. Кодирование МД из отливок целесообразно провести по шести диапазонам: 1-й – до 50 кг, 2-й – от 50 до 100 кг, 3-й – от 100 до 250 кг, 4-й – от 250 до 3000 кг, 5-й – от 3000 до 5000 кг и 6-й – свыше 5000 кг. Кодирование массы детали из поковок, штамповок и проката – по двум диапазонам: 1-й – до 50 кг, 2-й – свыше 50 кг. Кодирование массы детали можно производить также на основе весовых коэффициентов [17].

Размер заготовки оказывает влияние только на выбор заготовок из проката: при диаметре заготовки больше 250 мм (код В) прокат обычно не используется; если диаметр меньше 250 мм (код А), то возможно его использование.

5. Виды заготовок и методы их изготовления можно также закодировать: литье в песчаные формы – 1; центробежное литье – 2; литье под давлением – 3; литье в кокиль – 4; литье в оболочковые формы – 5; литье по выплавляемым моделям – 6; прокат – 7; штамповка – 8; поковка – 9; сварная заготовка – 10.

Исходя из рассмотренных вариантов кодирования, алгоритм выбора возможных видов заготовок и методов их изготовления можно представить в виде таблицы выбора решений (табл. 4.3). Согласно табл. 4.2, руководствуясь конкретными значениями рассмотренных признаков детали, выбирают один или несколько возможных методов получения заготовки.

Алгоритм выбора заготовки и метода ее получения представлен на рис. 4.4.

После определения стоимости рассмотренных вариантов вида заготовки принимается решение о выборе оптимального метода ее изготовления

Таблица 4.3

**Таблица выбора решений для определения возможных видов и методов изготовления заготовки**

Наименование признака	Код признака																								
Материал	1, 2, 3																								
Серийность	2, 3, 4																								
Констр. форма	1						2						3						4						
Масса детали	-	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
Вид заготовки	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
		3	3	4	4	4		2	2	2	4	4		3	4	4	4	4		2	2	2	4	4	
		4	4					3	3	4				4	4					3	3	4			
		6	6					4	4					6	6					4	4				
								6	6											6	6				
Материал	1, 2, 3																								
Серийность	2, 3, 4																								
Констр. форма	5						6						7						8						
Масса детали	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	
Вид заготовки	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	3	3	4	4	4		4	4	4	4	4		3	3	4	4	4		3	3	5				
	4	4	5				5	5	5				4	4	5				5	5					
	5	5					6	6					5	5	6				6	6					
	6	6											6	6											
Материал	1, 2, 3																								
Серийность	2, 3, 4																								
Констр. форма	9						10						11												
Масса детали	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6							
Вид заготовки	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1							
	3	3	4	4	4		3	3	4	4	4		3	3	4	4	4								
	4	4	5				4	4	5	5	5		4	4	5										
	5	5					5	5					5	5											
	6	6					6	6					6	6											
Материал	4, 5, 7																								
Серийность	1																								
Констр. форма	1		2		3		4		5	6	7	8		9	10	11									
Масса детали	1	2	1	2	1	2	1	2	-	-	-	1	2	-	-	1	2								
Диаметр загот.	A	B	-	A	B	-	A	B	-	-	-	A	B	-	-	A	B								
Вид заготовки	7	9	9	7	9	9	7	9	9	7	9	9	9	9	9	7	9	9							
	9			9			9			9			9			9	10	10							
																	10	10							
																	10	10							
																	10	10							
Материал	4, 5, 7																								
Серийность	2, 3, 4																								
Констр. форма	1		2		3		4		5	6	7	8		9	10	11									
Масса детали	1	2	1	2	1	2	1	2	-	-	-	1	2	-	-	1	2								
Диаметр загот.	A	B	-	A	B	-	A	B	-	-	-	A	B	-	-	A	B								
Вид заготовки	7	8	8	7	8	8	7	8	8	7	8	8	8	8	8	7	8	8							
	8	9	9	8	9	9	8	9	9	8	9	9	9	9	9	8	9	9							
																	10	10							
																	10	10							
																	10	10							
																	10	10							

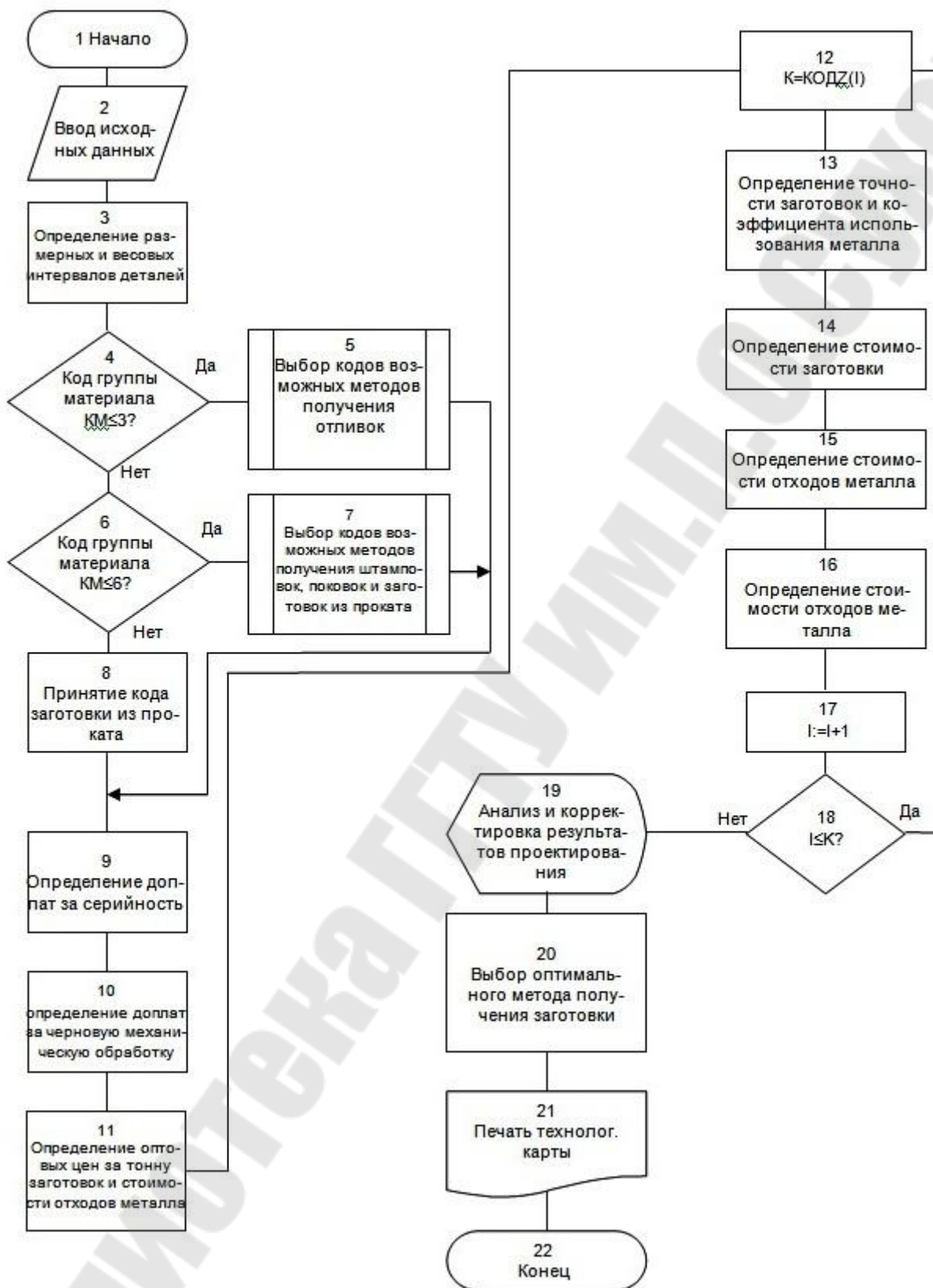


Рис. 4.4 Схема алгоритма выбора метода получения заготовки

### 4.3.3 Оптимизация выбора технологических операций

Одним из важнейших этапов структурной оптимизации ТП является выбор технологических операций механической обработки. Вид операции и применяемое оборудование существенно влияют на трудоемкость обработки и связанную с ней технологическую себестоимость, которая обычно используется в качестве критерия для выбора вариантов ТП изготовления изделия.

На стадии эскизного проектирования при выборе операции механической обработки технологическая себестоимость определяется приближенным методом по следующей формуле:

$$C_{oni} = C_{xi} T_{ум.-ki} \quad (4.14)$$

где  $C_{xi}$  – производственные затраты, приходящихся на 1 час работы оборудования, занятого при выполнении  $i$ -ой операции;  $T_{ум.-ki}$  – норма штучно-калькуляционного времени на выполнение  $i$ -ой операции.

Из анализа зависимости (4.14) следует, что минимизировать  $C_{oni}$  за счет одновременного уменьшения удельных производственных затрат на оборудование и штучно-калькуляционного времени обработки является технически неосуществимым (использование более высокопроизводительного оборудования приводит к уменьшению  $T_{ум.-ki}$  при одновременном росте удельных расходов на его содержание и эксплуатацию). Очевидно, из ряда сравниваемых вариантов обработки оптимальным является тот, при осуществлении которого рост производительности превысит рост удельных расходов на его содержание и эксплуатацию. Следовательно, абсолютная величина сомножителей (а значит и их произведение – себестоимость) напрямую связана с рациональным выбором оборудования для обработки.

Таким образом, задача определения технологической себестоимости обработки сводится к решению двух взаимосвязанных подзадач:

а) определению возможных для заданных условий вариантов обработки поверхностей детали с выбором соответствующих моделей станков и величины удельных затрат  $C_{xi}$  на 1 час работы;

б) определение трудоемкости обработки этих поверхностей  $T_{ум.-ki}$  применительно к выбранным видам технологических операций.

Выбор возможных операций обработки поверхностей детали, удовлетворяющих заданным условиям, производят на основе анализа конструктивно-технологических признаков детали и серийности производства, к которым относятся:

- 1) годовая программа выпуска деталей;
- 2) тип поверхностей детали, подлежащей обработке;
- 3) стадии обработки (черновая, чистовая, тонкая, отделочная);

- 4) габаритные размеры детали;
- 5) точность и шероховатость поверхностей для рассматриваемой стадии обработки;
- 6) твердость поверхностей, обрабатываемых на рассматриваемой стадии;
- 7) конструктивная сложность поверхностей, обрабатываемых на соответствующей стадии.

По общности методов, используемых при обработке, все поверхности, образующие конфигурацию деталей машин, разбиты на группы. Как правило, на начальных этапах проектирования технологических процессов решаются вопросы выбора рациональных способов обработки групп однородных поверхностей: наружных поверхностей вращения, внутренних, плоских, зубчатых, резьбовых, шлицевых и т.д. Такое группирование позволяет использовать единую методическую основу для укрупненной оценки эффективности различных методов обработки уже на ранних этапах проектирования, когда у технолога еще отсутствует вся необходимая информация для точной оценки трудоемкости обработки.

Рассмотрим выбор конструктивно-технологических признаков для определения возможных вариантов обработки на примере наружных и торцовых поверхностей вращения деталей типа «вал» с  $L > 2D$ . Конфигурация этого класса деталей определяется сочетанием различного числа элементарных наружных поверхностей вращения. В зависимости от требований чертежа каждая поверхность должна пройти ряд *стадий обработки*, под которыми понимаются укрупненные группы операций, включающие однородную по характеру, точности и качеству обработку элементарных поверхностей. Выбор стадий обработки может производиться на основе алгоритма, представленного в виде таблицы (табл. 4.4).

Таблица 4.4

Выбор стадий обработки поверхностей в зависимости от требований по точности и шероховатости

Стадия обработки	Код стадии	Достижимые точность (квалитет) и шероховатость Ra (Rz), мкм			
		12/(80)	10/(20)	7/0.63	6/0.16 и менее
Черновая	1	1	1	1	1
Чистовая	2		2	2	2
Тонкая	3			3	3
Отделочная	4				4

Габаритные размеры детали, точность и шероховатость поверхностей, а также твердость определяются на основе анализа чертежа и вводятся в качестве исходных данных. Значительно большую трудность представляет определение конструктивной сложности обрабатываемых поверхностей.

*Конструктивная сложность* детали – это сложность ее как геометрического объекта. Количественная оценка конструктивных сложностей может быть представлена в виде суммы  $Q$  конструктивных сложностей всех обрабатываемых на 1-й стадии поверхностей. При оценке конструктивной сложности на каждой стадии следует различать основные поверхности  $P$ , образующие основной контур детали, торцовые  $MT$  и дополнительные  $M$  поверхности (фаски, галтели, пазы, канавки). Например, для определения конструктивной сложности деталей типа «вал» с учетом трудоемкости обработки основных и дополнительных поверхностей на 1-й стадии можно использовать следующую зависимость:

$$Q_1 = P_1 + Q,5MT_1 + 0,1M_1. \quad (4.15)$$

Одним из важнейших признаков, от которого зависит правильный выбор вида технологической операции, ее структуры и соответствующего оборудования, является *серийность*, или *тип производства*. Тип производства определяется по коэффициенту закрепления операций  $K_{з.о.}$ , который представляет собой отношение количества всех технологических операций, выполняемых на данном производстве в течение месяца, к числу рабочих мест. В свою очередь  $K_{з.о.}$  зависит главным образом от заданной программы выпуска деталей  $N$  и трудоемкости их изготовления  $T_{шт.-к}$ .

Вычисление на ранних стадиях технологического проектирования значения  $T_{шт.-к}$  представляет определенную трудность. Учитывая, что на этой стадии не может быть получен операционный ТП, содержащий необходимые сведения для расчета норм времени, следует использовать методы укрупненного нормирования. Поэтому выявляют функциональные зависимости между штучно-калькуляционным временем и наиболее общими параметрами детали, учитывающие ее конструктивную сложность и размерные характеристики. Для определенных типов деталей размерные характеристики имеют корреляционную связь с массой детали  $M_d$ . На основе статистического анализа процессов обработки различных типов деталей установлена функциональная зависимость вида

$$T_{шт.-к} = K_I \cdot M_d^\alpha \cdot Q^\beta \quad (4.16)$$

Используя известные зависимости для определения числа операций, закрепляемых за одним рабочим местом с учетом коэффициента загрузки и коэффициента выполнения норм времени ( $K_6$ ), для двухсменной работы применительно к обработке наружных поверхностей вращения деталей класса «валы» получают

$$K_{3.0} = 46,2 \cdot 10^3 / (N \cdot M_0^{0,36} \cdot Q^{0,51}).$$

Затем на основе рассчитанных значений  $K_{3.0}$  определяют тип производства по табл. 4.5.

Таблица 4.5

Таблица выбора кодов типа производства в зависимости от коэффициента закрепления операции

Коэффициент закрепления операции	$K_{3.0} > 20$	$10 < K_{3.0} \leq 20$	$1 < K_{3.0} \leq 10$	$K_{3.0} \leq 1$
Тип производства	единичное и мелкосерийное	среднесерийное	крупносерийное	массовое
Код	1	2	3	4

Структура технологических операций обработки также задается в табличной форме. В табл. 4.6 выделены структуры технологических операций обработки наружных и торцовых поверхностей деталей класса «валы» и приведены их коды. Все операции разделены на две группы. Первая содержит коды операций от 001 до 099, что соответствует операциям с использованием современного лезвийного инструмента, обеспечивающего обработку незакаленных материалов. В операциях с кодами более 100 обработка осуществляется абразивным, алмазным (в том числе лезвийным из синтетических сверхтвердых материалов) инструментом, что позволяет обрабатывать как незакаленные, так и закаленные материалы. Черновая и чистовая обработки производятся на станках нормальной (или повышенной) точности, а тонкая и отделочная – на станках высокой точности.

Выбор оптимальной технологической операции производится с использованием разработанных таблиц выбора кодов технологических операций. Пример такой таблицы для варианта обработки наружных поверхностей вращения – табл. 4.7. В ней использованы коды возможных технологических операций для черновой, чистовой, тонкой и отделочной стадий обработки (табл. 4.8).



Таблица 4.6

**Коды структур технологических операций при обработке наружных  
поверхностей вращения**

Характеристика структуры операций	Код структуры
Последовательная обработка методом пробных проходов и промеров, ручное управление станком, ручное закрепление заготовки, однопозиционная (универсальные станки)	1
Последовательная обработка по настройке, автоматизированное управление станком, механизированное закрепление заготовки, однопозиционная (станки с ЧПУ)	2
Последовательно-параллельная обработка по настройке, автоматизированное управление станком, механизированное закрепление заготовки, однопозиционная (гидрокопировальные станки)	3
Параллельная обработка по настройке, автоматизированное управление станком, механизированное закрепление заготовки, однопозиционная (многорезцовые полуавтоматы)	4
Параллельная обработка по настройке, автоматизированное управление станком, механизированное закрепление заготовки, многопозиционная (многошпиндельные полуавтоматы непрерывного действия)	5
Параллельно-последовательная обработка врезанием по настройке, автоматизированное управление станком, механизированное закрепление заготовки, однопозиционная (торцекруглошлифовальные врезные полуавтоматы)	6
Последовательная обработка врезанием, по настройке, автоматизированное управление станком, механизированное закрепление заготовки, однопозиционная (многокаменные шлифовальные врезные полуавтоматы)	7
Последовательная обработка по настройке, автоматизированное управление станком, автоматизированное закрепление заготовки, непрерывная (бесцентрошлифовальные станки)	8
Последовательная обработка по настройке, ручное управление станком, автоматизированное закрепление заготовки, однопозиционная (суперфинишные, полировальные станки)	9
Последовательная обработка врезанием, автоматизированное управление станком, механизированное закрепление заготовки, однопозиционная (круглошлифовальные врезные полуавтоматы)	10

Таблица 4.7

Таблица выбора кодов технологических операций при обработке наружных поверхностей вращения

Код стадии обработки	1				2				3				4			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Код операций	009	010	012	012	009	010	012	012	021	021	103	104	102	102	103	109
	010	013	013	013	010	013	013	013	011	011	105	105	103	103	109	127
	014	014	022	022	014	014	022	022	101	101	106	106	018	123	127	129
					101	101			103	103	107	019	019	129	128	
					103	103										

Как видно из табл. 4.7 и 4.8, для определенных стадий обработки и типа производства имеется возможность выбрать и проанализировать три-четыре вида операций, отличающихся главным образом структурой. Структура технологической операции может быть одно- и многоинструментальной, одно- и многопозиционной. Структура существенно влияет на трудоемкость обработки и соответственно на ее производительность и себестоимость.

Образование структур технологических операций ведется в двух направлениях:

а) за счет совмещения элементов основного времени  $T_o$  (последовательная, параллельно-последовательная и параллельная обработки);

б) за счет совмещения элементов вспомогательного времени  $T_b$  затрачиваемого на измерение и ручную подналадку оборудования методом пробных проходов ( $T_{из}$ ), на съем и установку деталей ( $T_{cy}$ ), на выполнение холостых ходов ( $T_x$ ).

$$T = T_{из} + T_{cy} + T_x$$

После определения группы возможных операций необходимо решить задачу выбора соответствующих моделей станков. Эта процедура выполняется на основе анализа массива станков  $MST$  с учетом вида операций и габаритных размеров обрабатываемой детали. В качестве примера приведена табл. 4.9 выбора кодов моделей станков для токарно-винторезной операции (табл. 4.10). По коду станка из массива  $MST$  определяют размеры зоны обработки и приведенные часовые затраты  $C_{чи}$  (табл. 4.10); данные по затратам носят условный характер в связи с нестабильностью стоимости входящих в них составляющих.

Таблица 4.8

Таблица кодов технологических операций при обработке наружных поверхностей вращения

Код опер	Наименование операции	Код структуры
009	Токарно-винторезная	1
010	Токарная с ЧПУ центровая	2
011	Токарно-винторезная высокой точности	1
012	Токарная полуавтоматная многорезцовая одношпиндельная	4
013	Токарно-копировальная	3
014	Токарная с ЧПУ патронно-центровая	2
018	Токарная обкатная	1
019	Токарная выглаживательная	1
021	Токарная с ЧПУ высокой точности	2
022	Токарная полуавтоматная многошпиндельная многорезцовая непрерывного действия	5
101	Круглошлифовальная продольная	1
101	Круглошлифовальная продольная	1
102	Круглошлифовальная продольная высокой точности	1
103	Круглошлифовальная с ЧПУ	2
104	Круглошлифовальная врезная полуавтоматная многокаменная	7
105	Круглошлифовальная врезная полуавтоматная	10
106	Торцекруглошлифовальная врезная полуавтоматная	6
107	Бесцентровошлифовальная	8
109	Бесцентроводоводочная	8
123	Доводочно-притирочная	1
127	Суперфинишная	9
128	Алмазно-выглаживательная	1
129	Полировальная лепестковым кругом	9

Выбор оптимальной технологической операции, как уже отмечалось, предшествует проектированию операции по переходам с определением режимов резания, поэтому на данном этапе не могут быть использованы точные методы поэлементного нормирования. Однако можно использовать методы более укрупненного нормирования по сравнению с формулой (4.16).

Таблица 4.9

Фрагмент таблицы выбора кодов моделей станков для токарно-винторезной операции в зависимости от диаметра и длины детали

Диаметр $D$ , мм, не более	Длина $L$ , мм, не более			
	$\leq 250$	$\leq 500$	$\leq 700$	$\leq 1400$
$\leq 40$	001	001	002	002
$\leq 100$	001	011	002	002
$\leq 160$	001	001	002	002
$\leq 300$	003	003	003	003

Степень укрупнения нормативов определяет универсальность и относительную точность модели, поэтому в каждом конкретном случае необходимо строить модель оптимальной сложности. Рассмотрим в качестве критерия оптимальности штучное время обработки.

Таблица 4.10

## Фрагмент массива станков

Код станка	Модель станка	Наименование станка	Размеры зоны обработки, мм		Приведенные часовые затраты, $C_{чi}$
			$D_{\max}$	$L_{\max}$	
001	ТВ-7	Токарно-винторезный	100	330	100*
002	16ВТ20П	Токарно-винторезный	250	1000	250*
003	ГС526У-02	Токарно-винторезный	275	2000	330*

\* Условные значения.

Трудоемкость выполнения операций по обработке детали может быть представлена в виде суммы элементов норм времени:

$$T_{шт-к} = (T_{o.p} + T_{o.m}) + T_v + T_{c.y} + T_{обс} + T_{n.-з}/N, \quad (4.17)$$

где  $(T_{o.p} + T_{o.m})$  – основное время обработки соответственно основных и вспомогательных поверхностей;  $T_v$  – вспомогательное время на выполнение операции;  $T_{c.y}$  – время снятия и установки заготовки;  $T_{обс}$  – время обслуживания станка и время перерывов для отдыха рабочего;  $T_{n.-з}$  – подготовительно-заключительное время;  $N$  – число заготовок в партии.

В условиях укрупненного нормирования основное время обработки  $T_o$  отдельных цилиндрических поверхностей можно определять по эмпирическим зависимостям вида

$$T_o = k_p \cdot k_m \cdot D \cdot L, \quad (4.18)$$

где  $D$ ,  $L$  – соответственно диаметр и длина обрабатываемой поверхности;  $k_p$  – коэффициент, отражающий среднестатистический уровень режимов различных методов и стадий обработки поверхностей

детали из стали 45 стандартными инструментами (табл. 4.11);  $k_m$  – коэффициент материала, учитывающий отличие обрабатываемости данного материала от обрабатываемости стали 45 (табл. 4.11).

Таблица 4.11

Значения коэффициентов режимов резания  $k_p$

Стадия обработки	Метод обработки	$k_p \times 10^{-3}$
Черновая	Точение	0,1
Чистовая	Точение	0,175
Чистовая	Шлифование	0,12
Тонкая	Точение	0,2
	Шлифование	0,18
Отделочная	Шлифование	0,3
	Доводка	0,8
	Суперфиниширование	0,35
	Обкатывание	0,1
	Выглаживание	0,45
	Полирование	0,3

В зависимости от вида обработки различают коэффициент  $k_{m.l}$  для лезвийного и  $k_{m.a}$  для абразивного инструмента.

На основе статистического анализа норм времени для различных технологических операций изготовления валов зависимость (4.18) может быть представлена в виде

$$T_o = k_p k_m k_3 k_{mp1} D_{np} \sum_{i=1}^{i=p} L_i \quad (4.19)$$

где  $k_3$  – коэффициент, учитывающий дополнительное время, которые необходимо затратить, чтобы придать принятой заготовки форму и размеры унифицированной заготовки (в качестве этой заготовки для ступенчатых валов принята штамповка нормальной точности). Этот коэффициент вводится в расчет только на черновой стадии обработки и определяется в зависимости от соотношения массы заготовки  $M_{заг}$  и детали  $M_d$ ;  $k_3 = 0,787 M_{заг} / M_d^{0,6}$ ;  $k_{mp1}$  – коэффициент трудоемкости по основному времени обработки основных поверхностей, учитывающий вид структуры выполняемой операции (табл. 4.12);  $D_{np}$  – приведенный диаметр основных поверхностей Р, определяемый по формуле:

$$D_{np} = \frac{\sum_{i=1}^{i=p} D_i L_i}{\sum_{i=1}^{i=p} L_i}$$

Аналогично были получены зависимости для остальных элементов нормы времени

$$T_{om} = K_m \cdot K_{mp2} \cdot D_{np} \cdot M_d \cdot 10^3;$$

$$T_{cy} = k_{mp3} \cdot (0,44 + 0,04 \cdot M_d);$$

$$T_g = 0,066 \cdot K_{mp4} \cdot D_{np}^{0.277} \cdot L_0 \cdot Q^{0.854};$$

$$T_{обс} = k_{mp5} \cdot (t_{op} + t_{ом} + t_{cy} + t_g);$$

$$T_{н.з} = 22 \cdot k_{mp6}$$

где  $k_{mp2}$ ,  $k_{mp3}$ ,  $k_{mp4}$ ,  $k_{mp5}$ ,  $k_{mp6}$  – коэффициенты трудоемкости соответственно: по основному времени обработки дополнительных поверхностей, времени на снятие и установку заготовки, вспомогательного времени на выполнение операций, времени на обслуживание станка и отдых и подготовительно-заключительного времени в зависимости от структуры операции. Все эти коэффициенты определяются по таблице 4.12.

Таблица 4.12

Значения коэффициентов трудоемкости  $k_{mp}$  для различных операций

Код структуры операции	$k_{mp1}$	$k_{mp2}$	$k_{mp3}$	$k_{mp4}$	$k_{mp5}$	$k_{mp6}$
1	1,0	1,2	1,0	1,0	0,04	1,0
2	0,8	0,8	0,8	0,1	0,04	0,5
3	0,8	0	0,8	0,1	0,07	0,68 + 0,1M
4	$1,3L_{imax}/5\Sigma L_i$	0	0,8	0,1	0,08	$0,45 + 0,22P + 0,1M$
5	$1,3L_{imax}/5\Sigma L_i$	0	0	0,1	0,10	$0,45 + 1,1P + 0,1M$
6	$30P_i/\Sigma L_i$	0	0,8	0,1	0,125	1,0
7	$10P_i/\Sigma L_i$	0,3	0,8	0,1	0,125	5,0
8	$36/D_{np}$	0	0,1	0	0,155	1,0
9	1,0	0	0,8	0,1	0,10	1,0
10	$30P_i/\Sigma L_i$	0,8	0,8	0,1	0,125	1,0

Для определения  $t_{шт-к}$  по формуле (4.17) для условий серийного производства необходимо дополнительно определить величину партии запуска заготовок. Количество заготовок в партии зависит от габаритных размеров детали и ее конструктивной сложности, определяемой в этом случае числом обрабатываемых поверхностей. Для построения алгоритмов определения партии запуска для деталей типа «вал» вводится классификация по габаритам (табл. 4.13) и конструктивной сложности деталей (табл. 4.14).

Таблица 4.13

Классификация деталей по габаритам

Наименование	Габариты		Код
	$D_{max}$	$L_{max}$	
Мелкие	$\leq 40$	$\leq 250$	1
Небольшие	$\leq 100$	$\leq 500$	2
Средние	$\leq 300$	$\leq 700$	3
Крупные	$> 300$	$> 700$	4

Таблица 4.17

Классификация деталей по конструктивной сложности  $Q'$ 

Наименование	Количество обрабатываемых поверхностей	Код
Простейшие	$\leq 3$	1
Простые	$\leq 20$	2
Средней сложности	$\leq 40$	3
Сложные	$> 40$	4

Число заготовок  $n$  в партии запуска определяется в долях программы  $N$  годового выпуска деталей:

$$n = \gamma_i \cdot N,$$

где  $\gamma_i$  – коэффициент пропорциональности, являющийся функцией габаритов и конструктивной сложности детали, определяемый на основе регрессивного анализа и представленный в табл. 4.15.

Таблица 4.15

Определение коэффициента пропорциональности  $\gamma_i$ 

Коды деталей по габаритам	Коды деталей по конструктивной сложности	Коэффициент $\gamma_i$
1	1	0,10
	2	0,09
	3	0,08
	4	0,07
2	1	0,08
	2	0,07
	3	0,06
	4	0,05
3	1	0,06
	2	0,05
	3	0,04
	4	0,03
4	1	0,035
	2	0,03
	3	0,025
	4	0,02

Алгоритм выбора оптимальных технологических операций (рис. 4.5) представляет собой последовательное выполнение следующих процедур: ввод исходных данных, определение требуемого числа стадий обработки, выбор групп операций для каждой стадии обработки, выбор моделей станков, определение структуры операций, расчет штучного времени, определение себестоимости выполнения всех выбранных операций и выбор оптимальной технологической операции. Вывод результатов проектирования осуществляется в виде технологических карт.

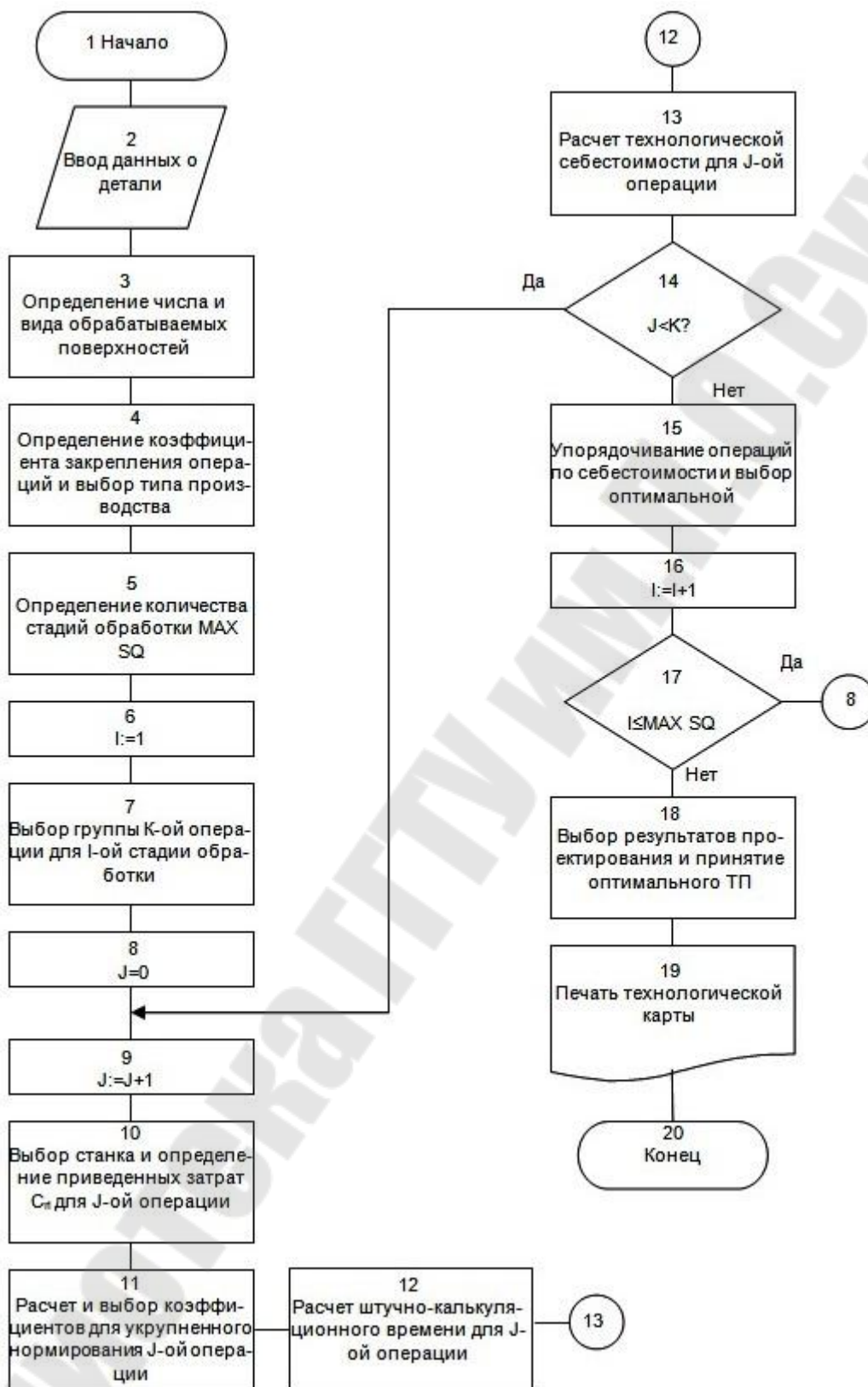


Рис. 4.5. Схема алгоритма выбора оптимальной технологической операции



Программа автоматизации выбора оптимальных технологических операций для различных стадий может быть выполнена в диалоговом режиме, что позволяет наряду с автоматизированным решением задачи провести пользователем окончательную оценку результатов проектирования.

#### **4.3.4 Выбор рациональной системы станочных приспособлений**

Эффективность разрабатываемых технологических процессов зависит от правильного, технически и экономически обоснованного выбора различных видов оснастки. В настоящее время выбор режущих, вспомогательных и мерительных инструментов, станочных приспособлений в САПР ТП обычно выполняется на основе анализа таблиц выбора решений для конкретных видов технологической оснастки. Несмотря на то, что при составлении таблиц выбора решений разработчики САПР ТП стремятся заложить в них наиболее рациональные варианты, использование указанных таблиц для конкретных условий не всегда дает оптимальное решение.

Станочные приспособления предназначены для решения трех основных задач:

- 1) обеспечения заданной точности обработки;
- 2) повышения производительности;
- 3) облегчения труда рабочих.

Для выполнения операции ТП могут быть использованы приспособления, равноценные по точности, но различные по сложности, себестоимости и производительности. Выбор систем оснащения для нового изделия зависит также от возможности использования имеющихся на предприятии приспособлений, от перспективной программы выпуска осваиваемых машин.

Далее рассматривается один из методов структурной оптимизации ТП – *выбор системы станочных приспособлений*. От решения этой задачи в значительной степени зависят трудоемкость и себестоимость ТП механической обработки.

В машиностроении используется шесть основных систем станочных приспособлений (ССП):

- универсально-сборные приспособления (УСП);
- универсально-безналадочные приспособления (УБП);
- сборно-разборные приспособления (СПП);
- универсально-наладочные приспособления (УНП);
- специализированные наладочные приспособления (СНП);

– неразборные специальные приспособления (НСП).

*Универсально-сборные приспособления* эффективно применяются в условиях единичного и мелкосерийного производства. Их собирают из готовых деталей и сборочных единиц высокой прочности и точности без последующей доработки. УСП нецелесообразно использовать в условиях серийного и крупносерийного производства, так как при больших нагрузках происходит нарушение стыковых соединений деталей УСП и стабильности точностных параметров. Кроме того, основные элементы УСП подвержены коррозии и не могут долго эксплуатироваться.

*Универсальные безналадочные приспособления* представляют собой законченные механизмы многократного использования. Они применяются в условиях единичного и мелкосерийного производства для оснащения операций с малым подготовительным временем. Для подготовки УБП к работе требуются меньшие затраты времени по сравнению с другими видами оснастки, кроме специальной. Однако эти приспособления не имеют комплекта стандартных установочных, направляющих и других элементов. Это ограничивает универсальность приспособлений, их технологические возможности, получаемую точность обработки.

*Сборочно-разборные приспособления* отличаются более высокой, чем УСП, жесткостью и надежностью. Они используются в мелкосерийном и серийном производстве. СРП имеют высокие оперативность сборки, уровень механизации, точность, производительность, эффективно применяются на станках с ЧПУ. Однако из-за отсутствия унификации с другими видами переналаживаемой оснастки для УСП необходимо проектировать специальные детали и переходные элементы, что увеличивает время подготовки приспособлений к работе.

*Универсально-наладочные приспособления* состоят из базовой единицы и наладочной части. Они применяются в мелкосерийном, серийном и крупносерийном производстве для групповой обработки деталей.

*Специализированные наладочные приспособления* состоят из специализированной, чаще всего механизированной, базовой сборочной единицы и специальных сменных наладок для установки близких по схемам базирования и закрепления обрабатываемых деталей. Они применяются как в мелкосерийном, так и в крупносерийном производстве.

К недостаткам УНП и СНП относится необходимость проектирования и изготовления специальных сменных наладок или наладочных регулируемых элементов.

*Неразборные специальные приспособления* — необратимые конструкции, не предназначенные для разборки с целью повторного использования. Их применяют в основном в условиях крупносерийного и массового производств при редкой смене номенклатуры изделий.

В настоящее время разработана методика выбора рациональных систем станочных приспособлений на основе оценки эффективности их использования в зависимости от загрузки, т.е. от коэффициента  $k_3$ , и периода производства изделий  $T_{п}$ .

Следующим важным ограничением использования конкретной системы (УСП, СНП, УНП, СРП) является продолжительность выпуска  $T_в$  оснащаемых деталей в сравнении с минимальным устанавливаемым сроком выпуска  $T_{min}$ , для которого целесообразно создание специализированного оснащения. Кроме того, ограничением является стоимость оснащения  $C_с$  приспособлениями той или иной системы, рассчитываемая на основе данных справочного массива.

Выбор типа ССП осуществляют на основе планово-организационных, технологических и конструктивных данных об обрабатываемой детали. Эти данные сравниваются с имеющимися в массивах информации сведениями о возможностях и конструктивных особенностях различных ССП. После анализа всех условий выбираются системы, которые по своим параметрам могут обеспечить при обработке деталей выполнение заданных требований. Если САПР предложила более одного возможного варианта, то технолог принимает решение о выборе конкретной ССП на основе производственного опыта. При наличии уточняющих сведений применительно к рассматриваемому производственному предприятию этот этап проектирования может быть полностью автоматизирован (рис. 4.6).

После ввода данных в диалоговом режиме в блоке 3 выполняется расчет коэффициента загрузки приспособления по известным в технологии машиностроения зависимостям. В блоке 4 выбирается ССП, станочные приспособления которой могут обеспечить требуемую точность обработки деталей.

В блоке 5 определяется возможность эффективного применения ССП на различных по степени универсальности станках: 1 — универсальных, 2 — автоматах и полуавтоматах, 3 — специализированных, 4 — специальных. В блоке 6 выполняется сравнение габаритных размеров обрабатываемой детали с предельно возможными их значениями для различных ССП на данной операции.

При машинной реализации блоков 4, 5 и 6 могут использоваться матричные формы представления массивов информации,

соответствующие элементы которых заполняются «0», если данная ССП не удовлетворяет условиям, и «1», если удовлетворяет.



Рис. 4.6 Схема алгоритма выбора рациональной системы станочного приспособления

В блоке 7 выполняется окончательный выбор ССП, удовлетворяющий всем, заданным нам в ходе в программу, условиям. Здесь же происходит расшифровка выбранных ССП. В блоке 8 в зависимости от периода изготовления детали и коэффициента загрузки по матрице затрат определяются величина относительных затрат и цикл оснащения.

Для оценки рациональности выбранной ССП вводится безразмерный показатель эффективности:

$$E = \alpha_1 V_1 + \alpha_2 V_2,$$

где  $V_1$  – относительные затраты при оснащении операций;  $V_2$  – относительный цикл оснащения;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – весовые коэффициенты.

Значения  $V_1$  и  $V_2$  рассчитываются в отношении к затратам и времени оснащения НПС. Чем меньше величина  $E$ , тем более рациональным является применение данной ССП. Список допустимых ССП выводится на печать в порядке рациональности применения с указанием их технико-экономических показателей.

#### **4.4 Параметрическая оптимизация технологических процессов механической обработки**

##### **4.4.1 Основные технологические параметры оптимизации**

Параметрическая оптимизация технологических процессов обычно выполняется после выбора структуры перехода и выражается главным образом в определении оптимальных режимов резания (скорости  $v$ , подачи  $s$  и глубины резания  $t$ ) с позиций некоторого критерия.

К параметрической оптимизации могут быть также отнесены расчеты:

- по выбору оптимальной геометрии режущего инструмента (резцов, сверл, фрез и т.д.);
- по выбору точностных, силовых и прочностных параметров станочных приспособлений;
- по выбору физико-механических свойств режущих инструментов;
- по определению оптимальных значений припусков и допусков на выполняемые размеры.

##### **4.4.2 Постановка задачи расчета оптимальных режимов обработки материалов резанием**

Задача определения оптимальных режимов резания является одной из наиболее массовых и встречается при разработке различных видов ТП механической обработки заготовок. Из-за разных конкретных условий

обработки, целей и задач оптимизации процесса резания возникают разные варианты постановки этой задачи.

При описании процесса обработки выделяют входные и выходные параметры, связанные между собой сложными функциональными зависимостями. Совокупность этих зависимостей принято рассматривать как математическую модель процесса обработки. В общем случае процесс обработки носит вероятностный характер. Однако из-за сложности построения зависимостей, учитывающих случайный характер изменения целого ряда параметров, в настоящее время преимущественно используются детерминированные модели, построенные на основе усредненных характеристик процесса.

В задачах расчета режимов резания входные параметры разделяют на искомые (управляемые) и заданные (неуправляемые). Задача расчета оптимальных режимов заключается в определении таких значений, которые являются наилучшими (по некоторым показателям) по совокупности выходных параметров при заданных значениях неуправляемых параметров. Искомыми параметрами при расчете оптимальных режимов обычно являются скорость резания и подача, иногда – глубина резания. В разряд искомых параметров целесообразно включать также стойкость и геометрические параметры режущего инструмента, которыми можно управлять непосредственно в процессе обработки.

Степень влияния отдельных управляемых параметров на основные показатели оптимизируемого процесса различна, поэтому при выборе и построении критериев оптимальности необходимо учитывать наиболее существенные параметры обработки. В частности, из теории резания известно, что при наружном точении большее влияние на повышение производительности обработки при постоянной площади срезаемого слоя ( $ts = \text{const}$ ) оказывает увеличение глубины резания, чем подачи. В то же время при одинаковом периоде стойкости инструмента на повышение производительности сильнее влияет увеличение подачи, чем увеличение скорости резания. Подобный предварительный анализ позволяет в отдельных случаях упростить построение алгоритмов выбора оптимальных режимов обработки.

В общем случае постановка задачи оптимизации режимов обработки включает:

- выбор искомых параметров;
- определение множества их возможных значений;
- выбор анализируемого набора выходных параметров процесса;

- установление функциональных зависимостей между искомыми и выходными параметрами при фиксированных значениях неуправляемых параметров;
- выделение целевой функции;
- назначение диапазонов возможных значений выходных параметров.

Набор искомых параметров может быть представлен в виде некоторого множества

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}.$$

Тогда задача расчета оптимальных режимов резания сводится к следующей задаче математического программирования:

$$\left. \begin{array}{l} F(x) \rightarrow \min(\max) \\ R_i(x) \leq R_i, i = 1, 2, \dots, m, \\ x \in \{X\} \end{array} \right\} \quad (4.20)$$

где  $F(x)$  – зависимость для принятого критерия оптимальности;  $R_i(x)$  – значение  $i$ -й характеристики процесса резания в зависимости от значений искомых параметров  $x$  из некоторого заданного множества  $X$ ;  $R_i$  – заданное предельное значение  $i$ -й характеристики процесса резания.

В зависимости от вида и сложности представления функций  $F(x)$  и  $R_i(x)$  используют различные математические модели расчета режимов резания. Эти модели могут быть классифицированы по следующим признакам:

- составу набора  $x$  оптимизируемых переменных;
- составу учитываемых показателей процесса;
- принятому критерию оптимальности;
- виду функций  $F(x)$  и  $R_i(x)$ , аппроксимирующих основные закономерности процесса.

Использование различных математических моделей приводит к необходимости разработки разнообразных методов и алгоритмов решения рассматриваемой задачи. Ниже описан подход к решению ряда наиболее важных задач определения оптимальных режимов резания.

#### 4.4.3 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 перебора,

симплекс-метод и др.), а также графический метод, наглядно представляющий математическую модель процесса резания.

Следует отметить, что качество математической модели процесса резания металлов, и в первую очередь ее достоверность, зависит от выбора технических ограничений, которые в наибольшей степени определяют описываемый процесс. Важнейшими ограничениями являются: режущие возможности инструмента; мощность электродвигателя привода главного движения станка; 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.* 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  $v$  для различных видов обработки

$$v = \frac{C_v D^{Z_v} k_v}{T^m t^{x_v} s^{y_v} z^{u_v} B_\phi^{r_v}} \quad (4.21)$$

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.

С другой стороны, скорость резания определяется кинематикой станка согласно зависимости

$$v = \pi D n \cdot 10^{-3} \quad (4.22)$$

Приравняв правые части формул (4.21) и (4.22) и сделав преобразования, получим выражение первого технического ограничения:



$$ns^{y_v} \leq \frac{318C_v k_v D^{z_v-1}}{T^m t^{x_v} z^{u_v} B_\phi^{r_v}} \quad (4.23)$$

Формула (4.23) достаточно просто приводится к виду, описывающему конкретный вид обработки. Так, для продольного наружного точения при  $z_v = 0$ ,  $u_v = 0$  и  $r_v = 0$  получим неравенство

$$ns^{y_v} \leq \frac{318C_v k_v}{T^m D t^{x_v}} \quad (4.24)$$

**Ограничение 2 – мощность электродвигателя привода главного движения станка.** Это ограничение устанавливает взаимосвязь между эффективной мощностью, затрачиваемой на процесс резания, и мощностью электропривода главного движения станка. Эффективная мощность  $N_{\text{эф}}$ , затрачиваемая на процесс резания при различных видах обработки:

$$N_{\text{эф}} = \frac{C_z t^{x_z} D^{z_z} n^{n_z} s^{y_z} \pi^{n_z} B_\phi^{r_z} z^{u_z} k_z}{k_{c_z}} \quad (4.25)$$

где  $C_z$  – постоянный коэффициент, характеризующий условия обработки;  $k_z$  – общий поправочный коэффициент на мощность, учитывающий изменение условий обработки против нормативных;  $k_{c_z}$  – поправочный коэффициент, учитывающий отдельный вид обработки;  $x_z, z_z, n_z, y_z, u_z, r_z$  – показатели степени при  $t, D, n, s, z$  и  $B_\phi$ .

Учитывая необходимое условие протекания процесса резания, можно получить следующее неравенство:

$$N_{\text{эф}} \leq N_n \eta, \quad (4.26)$$

где  $N_n$  – мощность электродвигателя главного привода станка, кВт;  $\eta$  – КПД механизма передачи от электродвигателя к инструменту.

Приравнявая правые части выражений (4.25) и (4.26), получаем второе техническое ограничение в виде неравенства

$$n^{n_z} s^{y_z} \leq \frac{N_n \eta k_{c_z}}{C_z t^{x_z} D^{z_z} \pi^{n_z} B_\phi^{r_z} k_z} \quad (4.27)$$

**Ограничение 3. Заданная производительность станка.** Этим ограничением устанавливается связь расчетных скорости резания и подачи с заданной производительностью станка. Исходя из соотношения продолжительности цикла работы станка  $T_{ц}$ , основного технологического  $t_o$  и вспомогательного непрерывного  $t_{в.н}$  времени, можно получить выражение для третьего технического ограничения

$$ns \geq \frac{LR}{60K_3 r_R - t_{в.н} R}, \quad (4.28)$$

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:

$$n \geq n_{cm \min}; \quad (4.29)$$

$$n \leq n_{cm \max}. \quad (4.30)$$

**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

$$s \geq s_{cm \min} \quad (4.31)$$

и максимуму

$$s \leq s_{cm \max} \quad (4.32)$$

**Ограничение 8. Прочность режущего инструмента.** Это ограничение устанавливает взаимосвязь между расчетными значениями скорости резания и подачи 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

$$\sigma_u \geq M_{изг} k_{з.п} / W$$

где  $M_{изг} = P_z l_{в.п}$  – изгибающий момент в месте закрепления державки резца на расстоянии  $l_{в.п}$  вылета резца от точки приложения окружной силы, кг/мм<sup>2</sup>;  $k_{з.п}$  – коэффициент запаса прочности;  $W$  – момент сопротивления сечения державки резца, мм<sup>2</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 равен  $W = \frac{BH^2}{E}$ , где  $E$  – модуль упругости для конструкционной стали  $E=2,0...2,1 \times 10^5$  МПа)

$$n^{n_z} s^{y_z} \leq \frac{4BH^2 \cdot (10^3)^{n_z}}{C_z t^{x_z} D^{n_z} \pi^{n_z} l_{в.р} k_{з.п} k_z} \quad (4.33)$$

**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;  $I$  – 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 получистового 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  $H$  он 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

$$n^{n_z} s^{y_z} \leq \frac{(10^3)^{n_z+1} BH^3}{2C_z t^{x_z} D^{n_z} \pi^{n_z} l_{в.р}^3 k_z} \quad (4.34)$$

**Ограничение 10. Жесткость заготовки.** Это ограничение устанавливает взаимосвязь расчетных значений скорости резания и подачи с допустимыми их значениями по жесткости заготовки. Из-за многообразия форм заготовок невозможно получить общие зависимости для описания рассматриваемого вида технического ограничения. Поэтому остановимся на его построении для точения цилиндрической гладкой заготовки и закрепления 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 т.е.  $y_c \leq y_{доп}$ .

Из рис. 4.7 видно, что допустимый прогиб должен быть меньше величины допуска на размер:  $y_{доп} \leq 0,5\delta$ , где  $\delta$  – допуск на размер, мм. Величина прогиба заготовки

$$y_c = P_y x_p^2 (L_3 - x_p)^2 / 3EIL_3$$

где  $L_3$  – длина заготовки, мм;  $x_p$  – расстояние от правого торца до места приложения силы (до резца), мм;  $I = \pi D_{np}^4 / 64$  – момент инерции сечения

заготовки в месте искомого прогиба, мм<sup>4</sup>;  $D_{np}$  – приведенный диаметр ступенчатого вала, мм.

После преобразования рассмотренных формул и подстановки в них значения

$$P_y = \frac{C_y t^{x_y} t^{x_y} s^{y_y} D^{n_y} n^{n_y} / \pi^{n_y} k_z}{(10^3)^{n_y}}$$

получим техническое ограничение по жесткости заготовки

$$n^{n_y} s^{y_y} \leq \frac{1,5 E \pi^{1-n_y} D_{np}^4 (10^3)^{n_y} L_3}{64 C_y t^{x_y} k_y D^{n_y} x_p^2 (L_3 - x_p)^2} \quad (4.35)$$

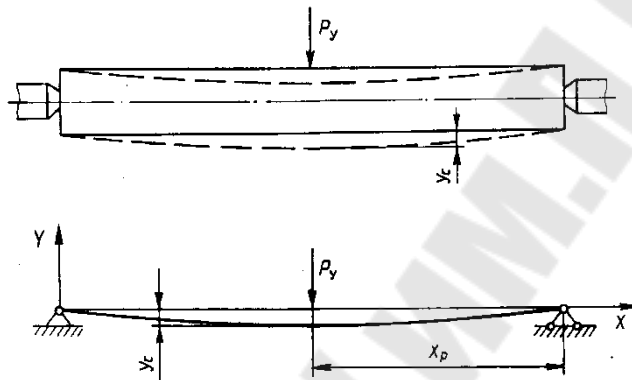


Рис. 4.7 Схема деформации заготовки при точении под действием радиальной составляющей силы резания

**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

$$P_s = C_s t^{x_s} s^{y_s} n^{n_s} D^{n_s+z_s} \pi^{n_s} z^{u_s} B^r k_s (10^{-3})^{n_s}$$

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

$$n^{n_s} s^{y_s} \leq \frac{(10^3)^{n_s} P_{s \text{ доп}}}{C_s t^{x_s} D^{n_s+z_s} \pi^{n_s} z^{u_s} B^r k_s} \quad (4.36)$$

**Ограничение 12. Требуемая шероховатость поверхности.** Это ограничение устанавливает взаимосвязь расчетных скорости резания и подачи с допустимыми по требуемой высоте или форме шероховатости.

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  $R$  ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$ ), шага микронеровности  $S_m$ , величины опорной поверхности  $tp$ , которые представляются в виде следующих выражений мультипликативного типа:

$$R = k_1 n^{k_2} s^{k_3} t^{k_4} \varphi_1^{k_5} \varphi_6^{k_6} r^{k_7},$$

где  $\varphi_1$ ,  $\varphi$ ,  $r$  – параметры геометрии режущей части инструмента;  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ , ...,  $k_7$  – экспериментально установленные коэффициенты.

После преобразования с учетом обеспечения требуемого значения шероховатости получают техническое ограничение также в виде неравенства

$$n^{k_2} s^{k_3} \leq \frac{R}{k_1 t^{k_4} \varphi_1^{k_5} \varphi_6^{k_6} r^{k_7}} \quad (4.37)$$

Знак неравенства (10.16) определяется видом характеристики шероховатости. В тех случаях, когда требуется одновременно обеспечить несколько характеристик шероховатости, рассматриваемое техническое ограничение представляется в виде нескольких неравенств. Так, 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:

$$R_a = 0,16 \frac{s^{0,59} (\pi/2 + \gamma)^{0,66}}{r^{0,29} v^{0,19}};$$

$$S_m = 0,81 \frac{s^{1,34} (\pi/2 + \gamma)^{0,1}}{r^{-0,19}}$$

где  $\gamma$  – передний угол резца.

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 (4.21) методом логарифмирования:

$$\ln n + y_v \ln s \leq \ln \left( \frac{318 C_v D^{z_{v-1}} k_v}{T^m t^{x_v} z^{u_v} B^{r_v}} \right) \quad (4.38)$$

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 (4.38), получим

$$x_1 + y_v x_2 \leq b_1 \quad (4.39)$$

Из этого выражения видно, что значение оценочной функции является наименьшим, когда значение произведения  $ns$  – максимальное. В этом случае при приведении оценочной функции к линейному виду можно получить

$$f_0 = (x_1 + x_2) \rightarrow \max. \quad (4.40)$$

Приведение технических ограничений к линейному виду и представление их в виде системы неравенств

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 + y_v x_2 \leq b_1 \\ n_z x_1 + y_z x_2 \leq b_2 \\ x_1 + x_2 \geq b_3 \\ x_1 \geq b_4 \\ x_1 \leq b_5 \\ x_2 \geq b_6 \\ x_2 \leq b_7 \\ n_z x_1 + y_z x_2 \leq b_8 \\ n_z x_1 + y_z x_2 \leq b_9 \\ n_y x_1 + y_y x_2 \leq b_{10} \\ n_s x_1 + y_s x_2 \leq b_{11} \\ k_2 x_1 + k_3 x_2 \leq b_{12} \end{array} \right. \quad (4.41)$$

в совокупности с оценочной функцией (4.40) дает математическую модель процесса резания металлов.

Применительно к математической модели – выражения (3.40) и (3.41) – задача определения оптимального режима резания сводится к отысканию среди всевозможных неотрицательных значений  $x_1$  и  $x_2$  системы таких значений  $x_{1opt}$  и  $x_{2opt}$ , при которых линейная функция принимает максимальное значение  $f_{0max}$ .

Математическую модель процесса резания можно изобразить в графическом виде (рис. 4.8). В этом случае каждое техническое ограничение представляется граничной прямой, которая определяет полуплоскость, где возможно существование решений системы неравенств. Граничные прямые, пересекаясь, образуют многоугольник  $ABCDEF$ , внутри которого любая точка удовлетворяет всем без исключения 12 неравенствам системы (4.41), поэтому этот многоугольник называют *многоугольником решений*.

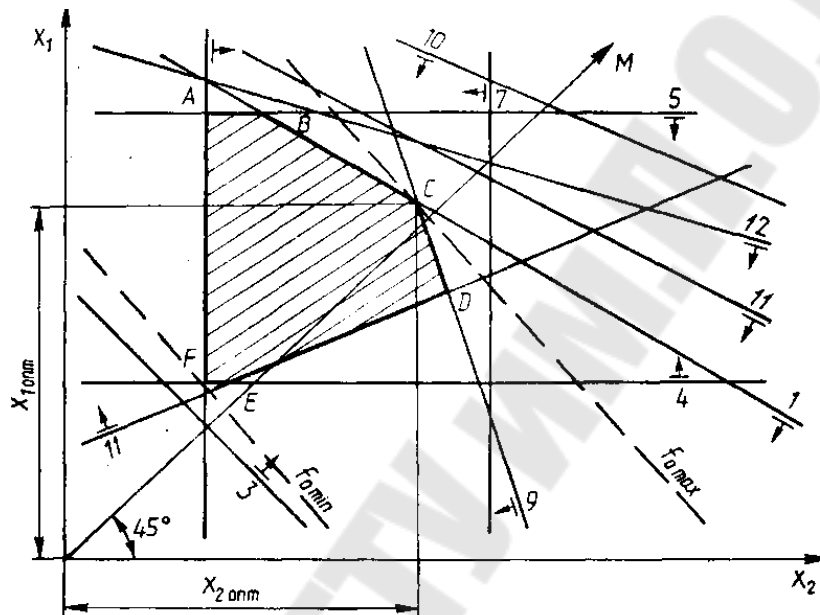


Рис. 4.8 Графическое изображение математической модели процесса резания:

1-12 – граничные прямые;  $M$  — вектор максимизации

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  $x_{1onm}$  и  $x_{2onm}$  сводится к последовательному вычислению координат всех возможных точек пересечения граничных прямых и затем определению для них наибольшей суммы

$$f_0 = (x_1 + x_2)_{\max}.$$

После определения координат  $x_{1onm}$  и  $x_{2onm}$  вычисляют оптимальные значения элементов режима резания по формулам:

$$n_{onm} = \exp(x_{1onm});$$

$$s_{onm} = \exp(x_{2onm}) / 100.$$

Для автоматизации решения задачи, заданной системой линейных уравнений и неравенств, обычно используется метод полного перебора точек, образующих выпуклый многоугольник возможных решений: определяют попарно точки пересечения прямых и подставляют координаты этих точек в неравенства системы. Точка, координаты которой удовлетворяют всем без исключения прямым (проверка на совместимость системы уравнений) и сумма координат которой  $(x_1+x_2)$  наибольшая, 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  $A$ . 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  $A$ , 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 совместна и найдена точка, сумма координат которой  $x_1+x_2$  является наибольшей, то оптимальная частота вращения  $n = e^{x_1}$  и оптимальная подача  $s = e^{x_2}/100$

Эта же задача может решаться графически. Оценочная функция  $f_0 = x_1+x_2$  изображается прямой, перпендикулярной к вектору максимизации  $M$  (рис. 4.8). 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  $f_{0min}$ , а в последней точке  $C$  – максимальное значение  $f_{0max}$ . Следовательно, вершина



многоугольника решений  $S$  является точкой оптимума, а ее координаты  $X_{1c}$  и  $X_{2c}$  – оптимальным решением системы.

#### 4.4.4 Оптимизация режимов механической обработки для дискретных значений параметров $v$ и $s$

Особенностью оптимизации режимов резания для большинства видов обработки на металлорежущих станках является необходимость определения дискретных значений параметров  $v$  и  $s$ , которые могут принимать конкретные значения из диапазона, определяемого кинематикой станка. Для построения математической модели процесса резания в этом случае используют ранее установленные зависимости для технических ограничений – формулы (4.24), (4.27), (4.33), (4.35) и (4.36). Однако учитывая, что оценочные функции для частных критериев: максимальной производительности из формулы (3.9), минимальной себестоимости из выражения (3.13) – включают элементы режимов обработки  $v$  и  $s$ , то все технические ограничения и компромиссный критерий  $F$  должны выражаться через значения скорости резания  $v$  и подачи  $s$ , т.е.  $F = F(v, s)$ :

$$F = \frac{A}{v s} + B v^{1/m-1} s^{y/m-1},$$

где  $A = \chi_1 \frac{k_1 \lambda}{t_{um.сп.}} + \chi_2 \frac{k_1 R \lambda}{C_{он.сп.}}$ ;  $B = \chi_1 \frac{k_1 k_2}{t_{um.сп.}} + \chi_2 \frac{k_1 k_2}{C_{он.сп.}}$ ;  $\chi_1, \chi_2$  – весовые

коэффициенты, устанавливаемые на основе экспертных оценок;  $k_1 = \frac{\pi D L h}{1000 t}$ ;

$k_2 = T_{cm} t^{x_v/m} C^{-1/m}$ ; представляются в виде выражения  $F = F(v, s)$ , все технические ограничения должны выражаться также через значения скорости резания  $v$  и подачу  $s$ .

Исключив технические ограничения по кинематике станка, можно получить следующие выражения ограничений:

1) по стойкости режущего инструмента

$$v s^{y_v} \leq \frac{C_v k_v D^{z_v}}{T^m t^{x_v} z_v^{u_v} B^{r_v}};$$

2) по мощности электродвигателя главного движения станка

$$v^{n_z} s^{y_z} \leq \frac{N_n \eta k_{C_z} D^{n_z - z_z}}{1000^{n_z} C_z t^{x_z} D^{z_z} B^{r_z} k_z};$$

3) по заданной производительности станка

$$v_s \geq \frac{\pi D l R}{1000(60 K_3 r_R - t_{в.н} R)};$$

4) по прочности режущего инструмента

$$v^{n_z} s^{y_z} \leq \frac{4 B H^2}{C_z t^{x_z} l_{в.п} k_{з.н} k_z};$$

5) по жесткости режущего инструмента

$$v^{n_z} s^{y_z} \leq \frac{500 B H^3}{C_z t^{x_z} D^{n_z} l_{в.п}^3 k_z};$$

6) по жесткости заготовки

$$v^{n_y} s^{y_y} \leq \frac{3 \pi E D_{np} \delta L}{64 C_y t^{x_y} x_p^2 (L - x_p)^2};$$

7) по прочности механизма станка

$$v^{n_s} s^{y_s} \leq \frac{R \pi P_{s \partial \partial o}}{C_s t^{x_s} D^{z_s} z^{u_s} B^r k_s};$$

8) по требуемой шероховатости поверхности

$$v^{k_2} s^{k_3} \leq \frac{R a \pi^{k_2} D^{k_2}}{1000^{k_7} k_1 t^{k_3} \varphi_1^{k_5} \varphi^{k_4} r^{k_6}}.$$

Обозначим правые части неравенства соответственно  $b_1', b_2', \dots, b_8'$ .

В качестве компромиссной целевой функции принимаем

$$F = \chi \left( \frac{t_{um.p}}{t_{cp}} \right) + (1 - \chi) \left( \frac{C_{on.p}}{C_{on.cp}} \right) \quad (4.42)$$

где  $\chi$  – весовой коэффициент, определяющий долю влияния в функции  $F$  критерия оптимальности  $t_{um.p}$  и изменяющийся от 0 до 1;

$$t_{um.p} = \frac{\pi D L h}{1000 t} \left( \frac{\lambda}{v s} + C_1 v^\alpha s^\beta \right); \quad C_1 = T_{cm} \left( \frac{t^{x_v}}{C_v} \right)^{1/m};$$

$$C_{on.p} = \frac{\pi D L h}{1000 t} \left( \frac{\lambda R}{v s} + C_2 v^\alpha s^\beta \right); \quad C_2 = (R T_{cm} + M) \left( \frac{t^{x_v}}{C_v} \right)^{1/m};$$

$t_{cp}, C_{on.cp}$  – средние арифметические значения  $t_{um}, C_{on}$  на множестве значений пар  $(v_i, s_j)$ .

Нетрудно заметить, что компромиссная целевая функция (4.42) в зависимости от коэффициента  $\chi$  может быть приведена к частному

критерию оптимальности. Так, при значении  $\chi=0$  она преобразуется в критерий «минимальная себестоимость», а при  $\chi=1$  – критерий «максимальная производительность».

Из приведенного выше анализа поведения компромиссной целевой функции  $F$  в области технических ограничений видно, что алгоритм определения оптимальных значений  $v$  и  $s$  (рис. 3.9) должен обеспечить нахождение точки касания целевой функции с одним из ограничений или точкой пересечения ограничения. Это достигается перебором значений  $v_i$  и  $s_j$ .

Перебор производится для значений  $v_1, v_2, \dots, v_I$ . Для каждого  $v_i$  перебором дискретных значений  $s_j$ , начиная с наибольшего  $s_l$  (что сокращает число точек перебора, так как оптимальные значения  $s$  лежат, как правило, в правой области технических ограничений), ищется максимальное  $s_{ji}$ , удовлетворяющее ограничению

$$s_{ji} \leq M,$$

где

$$M = \min \left\{ \left( \frac{b_1'}{v} \right)^{1/y_v}, \left( \frac{b_2'}{v^{n_z}} \right)^{1/y_z}, \left( \frac{b_3'}{v} \right), \left( \frac{b_4'}{v^{n_z}} \right)^{1/y_z}, \left( \frac{b_5'}{v^{n_z}} \right)^{1/y_z}, \left( \frac{b_6'}{v^{n_y}} \right)^{1/y_y}, \left( \frac{b_7'}{v^{n_s}} \right)^{1/y_s}, \left( \frac{b_8'}{v^{k_z}} \right)^{1/k_3} \right\}$$

В полученной точке дискретных значений скорости (числа оборотов) и подачи вычисляется оценочная функция  $F(v_i, s_{ji})$ . Далее выбирается минимум из значений  $F(v_i, s_{ji})$ , для  $1 \leq i \leq I$ . Вышеописанный алгоритм представлен на рис. 4.9.

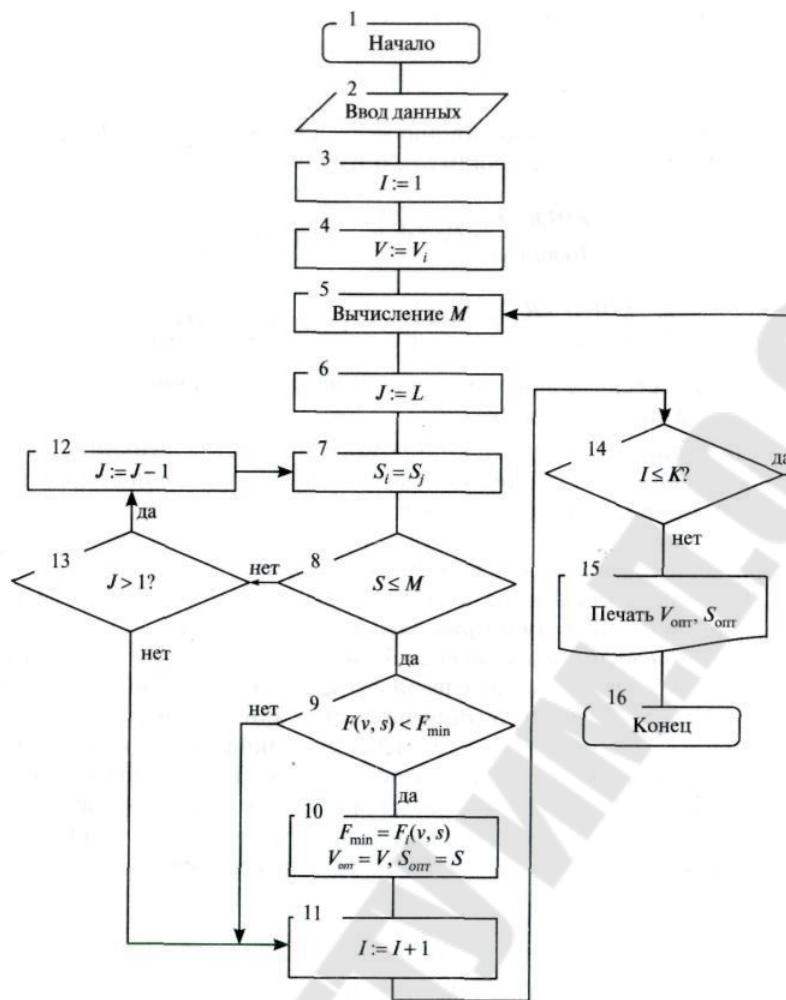


Рис. 4.9 Схема алгоритма оптимизации режимов механической обработки для дискретных значений параметров  $v$  и  $s$

### Контрольные вопросы

- 1 Что понимается под термином «оптимальное решение»?
- 2 Каким процессом в машиностроении является проектирование ТП?
- 3 Чем обусловлена многовариантность проектирования ТП в машиностроении?
- 4 Какие этапы включается в себя алгоритм, лежащий в основе общего подхода при создании систем автоматизации проектирования технических объектов?
- 5 Что называется этапом синтеза при проектировании технических объектов?
- 6 Что называется этапом анализа при проектировании технических объектов?
- 7 Что называется этапом принятия решения при проектировании технических объектов?

8 Каким требованиям должны удовлетворять критерии оптимальности при проектировании технологических процессов?

9 На какие виды можно подразделить основные критерии оптимальности, используемые в зависимости от вида и уровня задач оптимизации?

10 Чем характеризуются экономические критерии при оптимизации в процессе технологического проектирования?

11 Чем характеризуются технико-экономические критерии при оптимизации в процессе технологического проектирования?

12 Чем характеризуются технологические критерии при оптимизации в процессе технологического проектирования?

13 Чем характеризуются эксплуатационные критерии при оптимизации в процессе технологического проектирования?

14 Что называется производительностью рабочей машины?

15 Что называется штучной производительностью?

16 Какие группы методов оптимизации выделяют с точки зрения стратегии поиска оптимума?

17 Для решения каких задач применяют аналитические методы поиска оптимума?

18 Для решения каких задач применяют рекурсивные методы поиска оптимума?

19 Для решения каких задач применяют итерационные методы поиска оптимума?

20 Для решения каких задач применяют стохастические методы поиска оптимума?

21 Чем объясняется то обстоятельство, что наиболее распространенными в области оптимизации ТП являются исследования, посвященные оптимизации параметров отдельных элементов?

22 К чему приводит недостаточное внимание к структурной оптимизации ТП?

23 Эффективность какой оптимизации, как правило, оказывается выше структурной или параметрической?

24 Что нужно сделать для того, чтобы в наиболее общем виде сформулировать задачу структурной оптимизации?

25 По каким данным выбирается способ получения заготовки?

26 По какому критерию выбирается оптимальный способ получения заготовки?

27 Чем определяется себестоимость получения заготовки?

28 Какую структуру имеет код материала при решении задачи выбора метода получения заготовки?

29 Как диаметр заготовки влияет на выбор метода ее получения?

30 Что наиболее существенно влияет на трудоемкость механической обработки?

31 Какой показатель обычно используется в качестве критерия для выбора вариантов ТП изготовления изделия?

32 На чем базируется способ определения технологической себестоимости в задаче оптимизации выбора технологических операций?

33 Каким способом (методом) выполняется расчет каждого элемента технологической себестоимости операции при оптимизации ее выбора?

34 Как определяется технологическая себестоимость на стадии эскизного проектирования при выборе операции механической обработки?

35 Почему технологическую себестоимость операции нельзя минимизировать за счет одновременного уменьшения удельных производственных затрат на оборудование  $C_{xi}$  и штучно-калькуляционного времени обработки  $T_{шт.-ки}$ ?

36 С выбором чего напрямую связана величина технологической себестоимости?

37 Какие подзадачи решаются при оптимизации выбора технологических операций?

38 На основании анализа каких конструктивно-технологических признаков производится выбор отдельных операций обработки поверхностей детали?

39 Что при оптимизации выбора технологических операций понимается под стадиями обработки?

40 Какие виды технологической оснастки используются при обработке металла резанием?

41 В чем заключается сложность решения задачи параметрической оптимизации при проектировании технологических процессов?

42 Какие расчеты могут быть отнесены к параметрической оптимизации?

43 Чем объясняются различные варианты постановки задачи расчета оптимальных режимов обработки материалов резанием?

44 Какие параметры выделяют при описании процесса обработки материалов резанием?

45 Какие модели в настоящее время преимущественно используются при решении задачи расчета оптимальных режимов обработки материалов резанием?

46 На какие группы разделяются входные параметры в задачах расчета режимов резания?

47 В чем заключается задача расчета оптимальных режимов обработки материалов резанием?

48 Какие параметры обычно принимают в качестве искомым при расчете оптимальных режимов резания?

49 По каким признакам могут быть классифицированы различные математические модели расчета режимов резания?

50 Что лежит в основе оптимизации режимов резания методом линейного программирования?

51 Какие численные методы могут быть использованы для решения задачи оптимизации режимов резания?

52 Какие ограничения входят в математическую модель процесса резания?

53 Какую связь устанавливает ограничение по режущим возможностям инструмента?

54 Какую взаимосвязь устанавливает ограничение по мощности электродвигателя главного движения станка?

55 Какую связь устанавливает ограничение по заданной производительности станка?

56 Какую связь устанавливает ограничение по наименьшей и наибольшей допустимым скоростям резания?

57 Какую связь устанавливает ограничение по прочности режущего инструмента?

58 Какую связь устанавливает ограничение по жесткости режущего инструмента?

59 Какую связь устанавливает ограничение по жесткости заготовки?.

60 Что является особенностью оптимизации режимов резания для большинства видов обработки на металлорежущих станках?

## Список использованной литературы

- 1 *Авербах, АЗ.* О единой системе кодирования информации при автоматизации подготовки производства в машиностроении /А.З. Авербах // Вычислительная техника в машиностроении. 1965. Вып. 1. С. 211-237.
- 2 *Аверченков, В.И.* Автоматизация проектирования технологических процессов: учеб. пособие для вузов / В.И. Аверченков, Ю.М. Казаков. Брянск: БГТУ, 2004.
- 3 Автоматизация проектирования технологических процессов и средств оснащения / под ред. А.Г. Раковича. Минск : Ин-т техн. кибернетики НАН Беларуси, 1997.
- 4 Автоматизация производственных процессов в машиностроении : учеб. для вузов / Н.М. Капустин [и др.]; под ред. Н.М. Капустина. М. : Высшая школа, 2004.
- 5 *Банди, Б.* Основы линейного программирования / Б. Банди. М.: Радио и связь. 1989.
- 6 *Беляков, Н.В.* Формализация проектирования технологических процессов механической обработки корпусных деталей машин /Н.В. Беляков, Е.И. Махаринский, Ю.Е. Махаринский. Витебск: УО «ВГТУ», 2006.
- 7 *Быков, А.В.* ADEM CAD/CAM/TDM Черчение, моделирование, механообработка/А.В. Быков, В.В. Силин. СПб: ВМV-Петербург, 2003.
- 8 *Гафуров, Х.Л.* САПР: учеб. пособие для средних спец. учеб. заведений /Х.Л. Гафуров, В.П. Смирнов. СПб. : Судостроение, 2000.
- 9 *Горанский, Г.К.* Технологическое проектирование в комплексных автоматизированных системах подготовки производства / Г. К. Горанский, Э.И. Бендерова. М. : Машиностроение, 1981.
- 10 *Грувер, М.* САПР и автоматизация производства / М. Грувер, Э. Зиммерс; пер. с англ. М.: Мир, 1987.
- 11 *Жолобов, А.А.* Технология автоматизированного производства: учеб. для вузов / А.А. Жолобов. Минск : ДизайнПРО, 2000.
- 12 *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, АФ. Присевок. Минск : БГПА, 2000.
- 13 *Красильникова, ГА.* Автоматизация инженерно-графических работ / ГА. Красильникова, В.В. Самсонов, СМ. Тарелкин. СПб.: Питер, 2000.
- 14 *Курейчик, В.М.* Математическое обеспечение конструкторского и технологического проектирования с применением САПР: учеб. для вузов / В. М. Курейчик. М. : Радио и связь, 1990.



15 *Майника, Э.* Алгоритмы оптимизации на сетях и графах / Э. Майника. М. : Наука, 1981.

16 *Мауэргаус, Ю.Е.* Геометрическое моделирование чертежей деталей в системе технической подготовки производства / Ю.Е. Мауэргаус // Вестник машиностроения. 1991. № 2. С. 55.

17 *Махаринский, Е.И.* Основы технологии машиностроения / Е.И. Махаринский, В.А. Горохов. Минск : Вышэйшая школа, 1997.

18 *Махаринский, Е.И.* Рационализация описания продукта производства / Е. И. Махаринский, Б. Н. Сухиненко // Сб. науч. тр. ВГТУ. Витебск: ВГТУ, 1995. С. 15-17.

19 Методика. Правила формализованного представления конструкторской и технологической информации. М. : Изд-во стандартов, 1976.

20 *Митрофанов, С.П.* Групповая технология машиностроительного производства: в 2 т. / С.П. Митрофанов. Л. : Машиностроение, 1983.

21 *Мрочек, Ж.А.* Основы технологии автоматизированного производства в машиностроении : учеб. пособие / Ж.А. Мрочек, АА. Жолобов, Л.М. Акулович. Минск : Техноперспектива, 2008.

22 *Норенков, И.П.* Основы автоматизированного проектирования / И.П. Норенков. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009.

23 Основы автоматизации машиностроительного производства / Е.Р. Ковальчук [и др.]; под. ред. Ю.М. Соломенцева. М. : Высшая школа, 1999.

24 Основы САПР САД/САМ/САЕ / Ли К.[и др.]; пер. с англ. СПб. : Питер, 2004. 559 с.

25 Основы теории проектирования технических систем: учеб. пособие для вузов / Е.И. Махаринский и [др.]. Витебск : УО «ВГТУ», 2009.

26 Размерный анализ технологических процессов: сборник практических работ / сост. Г.Я. Беляев [и др.]. Минск : БНТУ, 2010.

27 *Саратов, А.А.* Математическое моделирование процесса выбора баз при машинном проектировании технологических процессов / А.А. Саратов // Автоматизация технической подготовки производства. 1975. Вып. 19. С. 54-64.

28 Системы автоматизированного проектирования изделий и технологических процессов в машиностроении / Р.А. Аллик [и др.]; под общ. ред. Р.А. Аллика. Л. : Машиностроение, 1986.

29 Системы автоматизированного проектирования технологических процессов, приспособлений и режущих инструментов / С.Н. Корчак [и др.]; под общ. ред. С. Н. Корчака. М. : Машиностроение, 1988.

30 Соколовский, А.П. Научные основы технологии машиностроения / А.П. Соколовский. М.; Л., 1955.

31 Старостин, В.Г. Формализация проектирования процессов обработки резанием / В.Г. Старостин, В.Е. Лелюхин. М.: Машиностроение, 1986.

32 Тимковский, В.Г. Дискретная математика в мире станков и деталей. М.: Наука, 1992.

33 Ткаченко, Л.С. Основы автоматизации проектирования технологических процессов обработки резанием / Л.С. Ткаченко, А.В. Соусь, Э.Ф. Яковицкий. Минск : Наука и техника, 1978.

34 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.

35 Холод, Н.И. Пособие к решению задач по линейной алгебре и линейному программированию / Н.И. Холод. Минск : Изд-во БГУ, 1971.

36 Челищев, Б.Е. Автоматизированные системы технологической подготовки производства/ Б.Е. Челищев, И.В. Боброва. М.: Энергия, 1975.

37 Шпур, Г. Автоматизированное проектирование в машиностроении / Г. Шпур, Ф.-Л. Краузе; пер. с нем. Г.Д. Волковой [и др.]; под ред. Ю.М. Соломенцева, В.П. Диденко. М.: Машиностроение, 1988.

38 АСКОН [Электронный ресурс] : Программные продукты в машиностроении / Сайт производителя. Электрон, текстовые дан. Режим доступа: <http://machinery.ascon.ru/software/tasks/?prcid=8#e8>. Дата доступа: 12.08.2009.

39 САПР и ГРАФИКА [Электронный ресурс] : Журн. САПР и ГРАФИКА/ Сайт производителя. Электрон, текстовые дан. Режим доступа: <http://sapr.ru>. Дата доступа: 10.07.2009.

40 ТехноПро [Электронный ресурс] : САПР ТП ТехноПро / Сайт производителя. Электрон, текстовые дан. Режим доступа: <http://www.tehnopro.com/default.aspx?page=7>. Дата доступа: 20.07.2009.

41 ADEM CAD/CAM/CAPP [Электронный ресурс]: Продукт / Сайт производителя. Электрон, текстовые дан. Режим доступа: <http://www.adem.ru/home.php?id=2764077>. Дата доступа: 15.08.2009.

42 ASOJA [Электронный ресурс]: Система автоматического проектирования технологических процессов «Автомат» / Сайт производителя. Электрон, текстовые дан. Режим доступа: <http://www.sapr-tp.com/index.htm>. Дата доступа: 14.07.2009.

43 CAD CAM CAE Observer [Электронный ресурс] : CAD CAM CAE Observer – международный информационно-аналитический журн. / Сайт

производителя. Электрон, текстовые дан. Режим доступа: <http://www.cadcamcae.lv>. Дата доступа: 10.07.2009.

44 Machinery and production engineering [Электронный ресурс] : Machinery and production engineer / Сайт производителя. Электрон, текстовые дан. Режим доступа: <http://www.techxtra.ac.uk>. Дата доступа: 14.07.2009.

## Приложение 1 – Виды ассоциативных поверхностей (элементов)

			
0101 Торцевая правая	0102 Торцевая левая	0201 Уступ правый	0202 Уступ левый
			
0301 Цилиндрическая правая	0302 Цилиндрическая левая	0309 Цилиндрическая заготовка	
			
04 Цилиндрическая параллельная	05 Цилиндрическая перпендикулярная	0601 Резьбовая правая	0602 Резьбовая левая
			
07 Многогранная	0801 Фаска правая	0802 Фаска левая	
			
20 Фланец фасонный	21 Кулачковая	22 Выступ	
			
2301 Канавка правая	2302 Канавка левая	24 Радиусная	

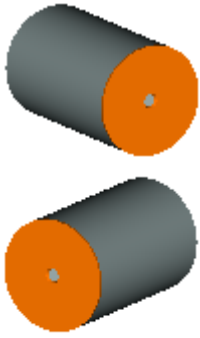
**Приложение 2 – Состав общих параметров, характеризующих детали машин класса «тела вращения»**

Обозначение параметра	Наименование параметра
D	Диаметр
L	Длина
B	Ширина
H	Высота
G	Глубина
S	Толщина
R	Радиус
F	Угол
P	Размер
K	Количество
A	Вид, сечение на чертеже
V	Выдерживаемый размер
X	Выдерживаемый размер
Y	Выдерживаемый размер
Z	Выдерживаемый размер
GB	Габаритный размер
GX	Габаритный размер
GY	Габаритный размер
GZ	Габаритный размер
TP	Толщина твердого покрытия
TX	Текст
ZM	Модуль зубьев m
BIN	Биение в заданном направлении
CIL	Цилиндричность
FPR	Форма профиля
FPV	Форма поверхности
KON	Конусность
KRU	Круглость
NAK	Наклон
NPL	Наклон и плоскостность
PLS	Плоскостность
POZ	Позиционный допуск
PPL	Параллельность и плоскостность
PPR	Перпендикулярность и плоскостность
PRB	Полное радиальное биение
PRF	Профиль продольного сечения
PRL	Параллельность
PRM	Прямолинейность

Продолжение приложения 2

Обозначение параметра	Наименование параметра
PRO	Пересечение осей
PRP	Перпендикулярность
PTB	Полное торцевое биение
RAB	Радиальное биение
SIM	Симметричность
SMO	Смещение осей
SOS	Соосность
TOB	Торцевое биение
RM	Тип резьбы "метрическая"
RD	Тип резьбы "дюймовая"
RT	Тип резьбы "трубная"
RS	Шаг резьбы
RN	Направление резьбы
RK	Количество заходов резьбы
ZD	Диаметр делительной окружности зубьев $D_d$
ZP	Длина общей нормали предварительная $W_p$
ZW	Длина общей нормали $W$
ZT	Степень точности зубьев
ZB	Биение зубьев
E	Позиция на операционном эскизе

**Приложение 3 – Закрепление за видами наружных элементарных поверхностей класса «тела вращения» характеризующих их параметров**

Вид элементарной поверхности	Код и название элементарной поверхности	Обозначение параметра	Наименование параметра
	0101 Торцевая правая 0102 Торцевая левая	D	Диаметр поверхности, на которой торец
		Gb	Габаритный размер детали
	0201 Уступ правый 0202 Уступ левый	D	Максимальный диаметр уступа
		DD	Минимальный диаметр уступа
		v	Линейный (относительный) размер на уступ
	0301 Цилиндрическая правая 0302 Цилиндрическая левая	D	Диаметр цилиндра
		K	Количество проходов
		L	Длина цилиндра для нормирования
		v	Длина цилиндра выходит в текст перехода
	04 Цилиндрическая параллельная	D	Диаметр цилиндра
		L	Длина цилиндра
		NO	Несоосность

Вид элементарной поверхности	Код и название элементарной поверхности	Обозначение параметра	Наименование параметра
	05 Цилиндрическая перпендикулярная	D	диаметр цилиндра
		K	Количество поверхностей данного вида
		K	Число граней
		P	Размер многогранника
		V	Выдерживаемый размер
		D	Диаметр на котором фаска
		F	Угол фаски
		K	Количество фасок
		L	Длина фаски



**Приложение 4 – Фрагмент информационного массива, используемого для выбора ключевого слова технологического перехода и группы операций**

Название и вид ЭП	Параметры ЭП	Код и наим-ие ПП	Условный код и ключевое слово	Условный код и наименование группы операций
0101 Торцевая правая 	D – диаметр поверхности, на которой расположен торец  Gb – габаритный размер с допуском  Sh – шероховатость  HB – твердость	030 Торец	05. Довести	06 Отделочная
			17. Подрезать	01 Автоматно-линейная, 02 Агрегатная, 05 Комбинированная, 10 Расточная, 14 Токарная
			18. Полировать	01 Автоматно-линейная, 02 Агрегатная, 05 Комбинированная, 06 Отделочная, 12 Сверлильная, 14 Токарная
			19. Притирать	06 Отделочная
			33 . Шлифовать	01 Автоматно-линейная, 02 Агрегатная, 16 Шлифовальная
			36. Фрезеровать	01 Автоматно-линейная, 02 Агрегатная, 05 Комбинированная, 08 Программная, 11 Резьбонарезная, 15 Фрезерная