

САПР технологических процессов

Кутин Андрей Анатольевич
д.т.н., профессор, зав. кафедрой
«Технология машиностроения»

Литература

- Кондаков А.И. САПР технологических процессов. М., Издательский центр «Академия», 2010, 272 с.
- *С.А. ВОЛКОВ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, Учебное пособие , Рыбинск, 2005*
- *С.Г.Селиванов, М.Б.Гузаиров, А.А.Кутин Инноватика: Учебник для вузов., М., Машиностроение, 2013. -640 с.*
- *Статьи из журнала «САПР и графика» тематическое приложение «Машиностроение»*
-

Лекция 1

Цель и задачи курса.

Основные понятия и определения.

Цель курса – изучение основ построения отечественных и зарубежных САПР ТП и практическое освоение наиболее продвинутых систем автоматизации технологической подготовки производства.

Основные задачи заключаются в :

- Изучении состава и структуры современных САПР ТП;
- Изучении этапов разработки геометрических моделей деталей и сборочных единиц на основе чертежа;
- Изучении подготовки исходной информации для автоматизированного проектирования ТП;
- Изучении пользовательского интерфейса для диалогового проектирования;
- Создании информационных баз и работе с ними при проектировании ТП;
- Проектировании структуры ТП

Основные понятия и определения

Проектирование – процесс составления описания, необходимого для создания в заданных условиях еще не существующего объекта, на основе первичного описания данного объекта и (или) алгоритма его функционирования

Автоматизированное проектирование – проектирование, при котором все преобразования описаний объекта и (или) алгоритма его функционирования осуществляются взаимодействием человека и ЭВМ.

САПР – комплекс средств автоматизации проектирования, взаимосвязанных с необходимыми подразделениями проектной организации или коллективом специалистов, выполняющих автоматизированное проектирование.

Основные понятия и определения

- CAD – Computer Aided Design – компьютерное конструирование
- CAE – Computer Aided Engineering – компьютерное проведение инженерных расчетов
- CAPP – Computer Aided Process Planning – компьютерное проектирование технологических процессов
- CAM – Computer Aided Manufacturing – компьютерное программирование станков с ЧПУ

Основные понятия и определения

- CRM (Customer Relationship Management) - система управления взаимоотношениями с клиентами
- SCM (Supply Chain Management) - система управления цепочкой поставок как внутри предприятия, так и за его пределами
- MES (Manufacturing Execution System) — исполнительная система производства
- IETM — (Interactive Electronic Technical Manual) - ИЭТР — интерактивные электронные технические руководства

Основные понятия и определения

- PDM-система (Product Data Management) — система управления данными об изделии
- PLM - система (Product Lifecycle Management) – система, реализующая технологию управления жизненным циклом изделий
- MRP II (Manufacturing Resource Planning) – управление производственными ресурсами (планирование производства, логистика, управление финансами и др.)
- ERP (Enterprise Resource Planning) – управление ресурсами предприятия

Эволюция машиностроительного производства



«Индустрия 1.0»:
механизация:
замена
мускульной силы
на энергию пара

1784 г.



«Индустрия 2.0»:
электрификация:
внедрение
конвейерного
производства

1870 г.



«Индустрия 3.0»:
автоматизация:
внедрение
роботизированных
систем с ЧПУ

1969 г.



«Индустрия 4.0»:
«умное
производство»

сегодня

Эволюция бизнеса цифрового производства

•Высокий

Уровень цифрового проникновения

•Низкий

•1970

•1980

•1990

•2000

•2010


•2020

- Производство
- Проектирование


2D черчение



Программируемые контроллеры



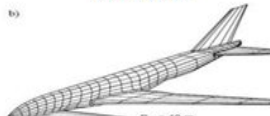
MRP/EDI




- Автоматизация проектирования и производства

- Снабжение
- Производство
- Проектирование


CAD/CAM



ЧПУ, роботы



MRP II/EDI



- Автоматизированное конструирование и производство

- Маркетинг
- Снабжение
- Производство
- Проектирование

3D моделирование



Быстрое прототипирование CAE



ERP, CRM, EDI



- Электронное создание продукта

- Логистика
- Сервисное сопровождение
- Маркетинг
- Снабжение
- Производство
- Проектирование

Полностью цифровое производство



- Цифровые двойники и совместное проектирование

- Продажи
- Логистика
- Сервисное сопровождение
- Маркетинг
- Снабжение
- Производство
- Проектирование

PLM – системы



3D принтеры

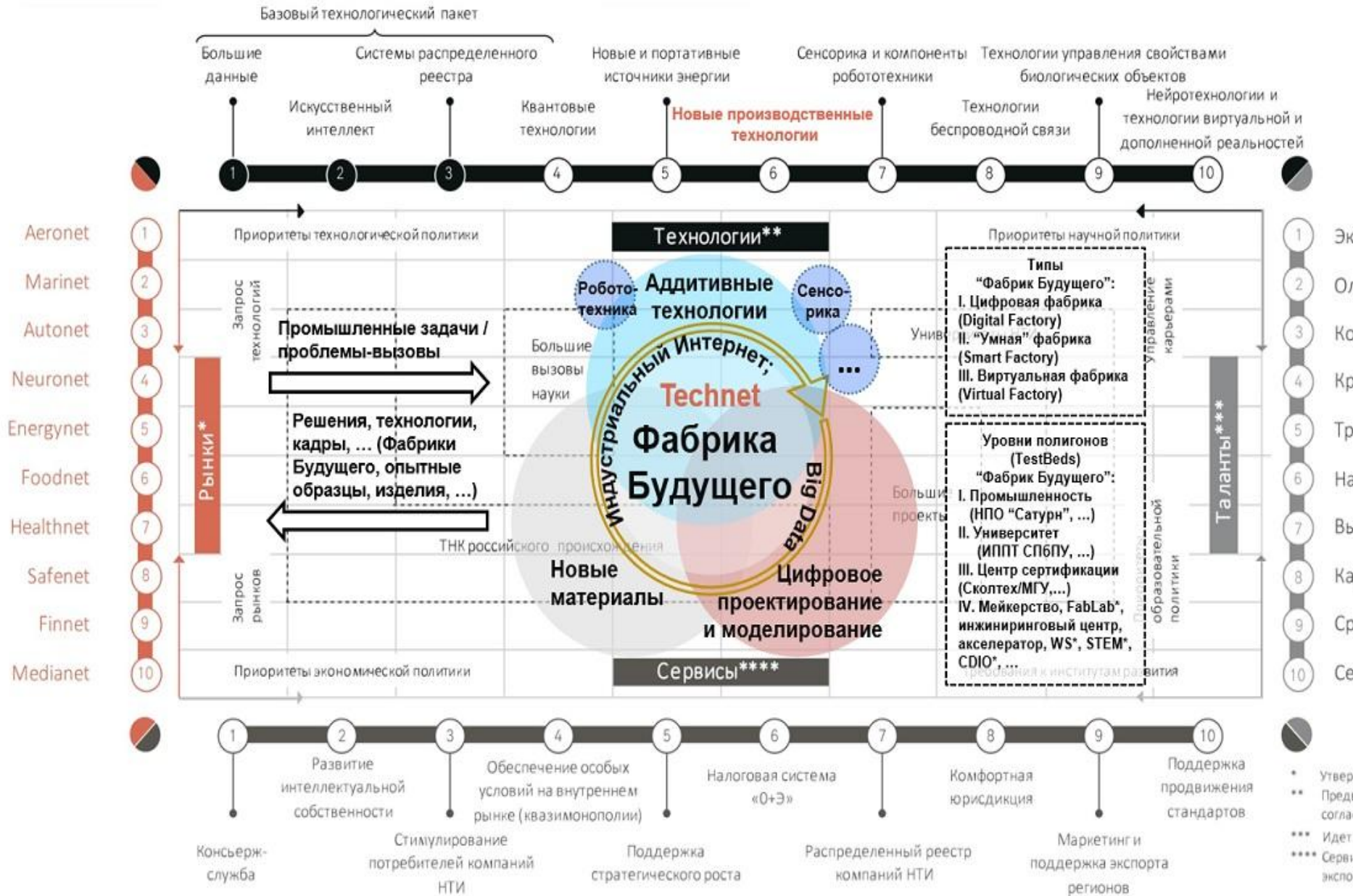


Завод – автомат



- Совместное управление жизненным циклом и цифровой облачный бизнес

Матрица НТИ*

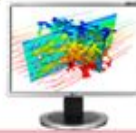


* Утвержден
 ** Предварительные соглашения
 *** Идет процесс
 **** Сервисы экспорта

Составные части Фабрик Будущего*

(ЦИФРОВАЯ) Digital Factory

Проектирование и управление жизненным циклом продукта, включая новую парадигму сертификации



(«УМНАЯ») Smart Factory

Гибкое (быстро перенастраиваемое) производство и массовая кастомизация



(ВИРТУАЛЬНАЯ) Virtual Factory

Создание ценности, глобальное сетевое производство и логистика



Планирование изделия
Product Planning

Проектирование изделия
Product Design

• Планирование производства
• Production Planning

Пусконаладочные работы
Rampup

Серийное производство
Production

Эксплуатация
Use of Product

Сервисное обслуживание
Service

Технологии:

- Цифровое проектирование и моделирование (CAD/CAE/НПС/CAO/CAM/CAAM/PDM/PLM)
- Новые материалы и конструкции, включая сертификацию
- Аддитивные и гибридные технологии
- CNC-технологии
- Big Data (управление расчетными данными)

Эффекты:

- Сокращение числа ошибок при проектировании
- Сокращение переделок и производственных отходов
- Сокращение срока вывода продуктов на рынок

Продукт:

- DMU (цифровой макет)
- Опытный образец и/или мелкая серия

Уровень готовности технологий:

- TRL 1 – TRL 9
- MRL 1 – MRL 10

Технологии:

- Цифровое проектирование и моделирование (CAD/CAE/НПС/CAO/CAM/CAAM/PDM/PLM)
- Новые материалы и конструкции, включая сертификацию
- Аддитивные и гибридные технологии
- CNC-технологии
- Промышленные роботы
- MES- и ICS-системы
- Сенсорика
- Индустриальный Интернет
- Big Data

Эффекты:

- Сокращение отхода- и энергоемкости производства
- Повышение производительности
- Сокращение предпусковых / предостановочных операций

Продукт:

- Серийное изделие

Уровень готовности технологий:

- TRL 4 – TRL 9
- MRL 4 – MRL 10

Технологии:

- Цифровое проектирование и моделирование (CAD/CAE/НПС/CAO/CAM/CAAM/PDM/PLM)
- Новые материалы и конструкции, включая сертификацию
- Аддитивные и гибридные технологии
- CNC-технологии
- Промышленные роботы
- MES- и ICS-системы
- Сенсорика
- Индустриальный Интернет
- Big Data
- Информационные системы управления предприятием (ERP, CRM, SCM...)

Эффекты:

- Повышение добавленной стоимости продуктов
- Увеличение занятости
- Прозрачность цепочек поставок
- Защита интеллектуальной собственности



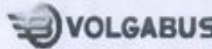







Продукт:

- Цепочка поставщиков
- Опытный образец и/или мелкая серия
- Серийное изделие






Уровень готовности технологий:

- TRL 1 – TRL 9
- MRL 1 – MRL 10

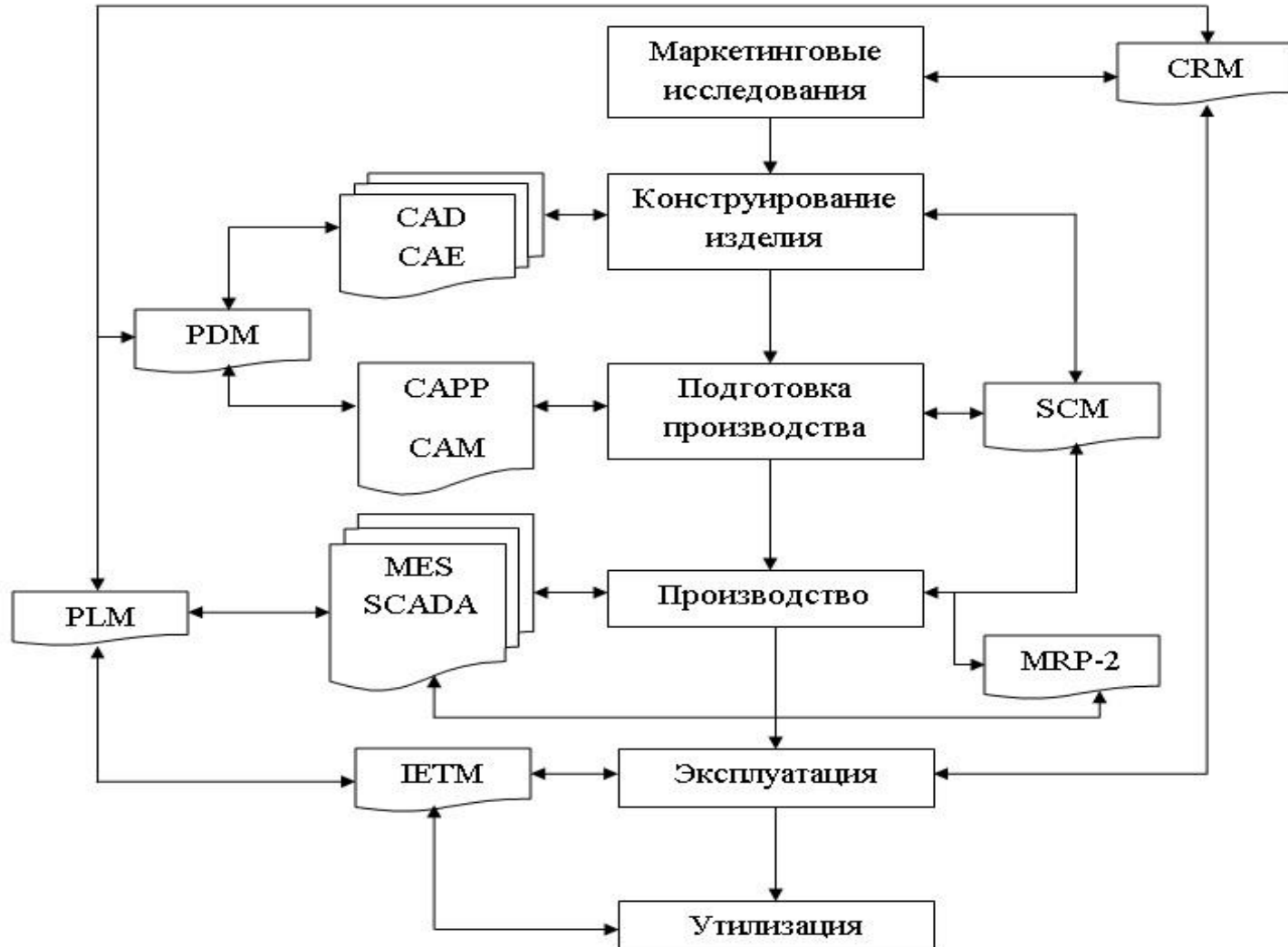
Проекты Фабрик Будущего

<p>Разработка комплекса технологических решений, обеспечивающих интеграцию ППТ в производственную цепочку для занятия лидирующих позиций в отечественном автомобилестроении и создания конкурентоспособной продукции мирового уровня</p>  <p>Automotive-1</p>	<p>Разработка комплекса технологических решений, обеспечивающих интеграцию передовых производственных технологий в производственную цепочку компании для создания внедорожника УАЗ Патриот 2020</p>  <p>Automotive-2</p>	<p>Разработка полномасштабных математических моделей, расчетные исследования и проектирование конструктивных элементов пассажирских автобусов нового поколения, модульной платформы беспилотного пассажирского и грузового транспорта</p>  <p>Automotive-3</p>	<p>МИНПРОМТОРГ РОССИИ</p> <p>Tractor-1</p>  <p>Совместно с ОАО «КИРОВСКИЙ ЗАВОД» (кабина, коробка передач, мосты,...)</p> <p>Automotive-4</p>  <p>Совместно с ПАО «КАМАЗ»</p>	<p>Разработка полномасштабных математических моделей, расчетные исследования и проектирование конструктивных элементов атомных подводных лодок «Ясень» 4-го и 5-го поколений</p>  <p>Shipbuilding-1</p>	<p>Shipbuilding-2</p>  <p>Shipbuilding-3</p>  <p>Shipbuilding-4</p>  <p>Shipbuilding-5</p> 
--	--	--	--	---	---

Достигнутые договоренности о создании Фабрик Будущего

<p>Engine-2</p>  <p>Разработка прикладного программного комплекса для проектирования и анализа деталей из полимерных композиционных материалов с 3D-тканой армирующей внутренней структурой</p>	<p>Engine-3</p>  <p>Решение задач:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) верификации лезвийной обработки с учетом физических процессов, происходящих во время резания; 2) учета технологической наследственности при обработке маложестких деталей; 3) моделирования процесса лазерной обработки поверхностей сложной пространственной формы переменной толщины 	<p>ВЕРТОЛЕТЫ РОССИИ</p> <p>Helicopter-1</p> <p>Разработка полномасштабных математических моделей, расчетные исследования и проектирование конструктивных элементов гражданского скоростного вертолета</p>	<p>Aerospace-1, 2, 3,...</p>  <p>Создание распределенного центра виртуальных испытаний для ракетно-космической отрасли</p> 	<p>Defense-1, 2, 3,...</p>  <p>Разработка полномасштабных математических моделей, расчетные исследования и проектирование конструктивных элементов оружия нового поколения</p>
--	--	---	--	---

Этапы жизненного цикла изделия и их компьютерная поддержка



Задачи САПР ТП

- создание всего технологического процесса или отдельных операций и переходов;
- поиск и выбор режущего и вспомогательного инструмента, оборудования, стандартной и универсальной оснастки из соответствующих библиотек;
- генерацию по электронному маршруту маршрутных карт движения изделий (заготовок, полуфабрикатов, деталей);
- процедуры электронного согласования моделей, чертежей, эскизов, документов и маршрутов;
- процедуры проведения изменений;
- получение сводной информации по используемым материалам для изготовления изделий;
- проектирование чертежей оснастки;
- разработку управляющих программ станков ЧПУ основного и вспомогательного производства.

Назначение САПР ТПП

- В целом задача автоматизации подготовки производства заключается в том, чтобы обеспечить создание цифровых образов изделий, их прототипов, чертежей и документации, формирование программ для станков с ЧПУ, автоматизированных и автоматических технологических линий, раскроя листового металла, подбора заготовок, а также данных для расчёта трудозатрат на изготовление деталей.
- Виртуальный образ детали, созданный с помощью информационных технологий и программных инструментов, должен быть автоматически описан в файлах-спецификациях и воплощаться в чертежи. В свою очередь цифровые чертежи и трёхмерные цифровые описания деталей должны служить исходными данными для программ управления оборудованием и различных экономико-производственных расчётов.

Основные мировые фирмы по САПР ТП

№	Фирма разработчик САПР	Основные продукты	Стоимость, млн. долл. США
1	Dassault Systemes (France/USA)	CATIA ENOVIA (PDM) Solid Works	2614.0
2	Autodesk (USA)	Autodesk Inventor Delcam	2312.2
3	Siemens PLM (Germany/USA)	NX Solid Edge Team center (PDM)	1768.4
4	PTC (USA)	Creo Parametric Creo Simulation	1 257.2

Основные российские фирмы по САПР ТП

№	Фирма разработчик САПР	Основные продукты	Стоимость, млн. рублей
1	Аскон	Лоцман Вертикаль	983.0
2	Топ-системы	T-Flex Технология T-Flex DOCs	700.2
3	Интермех	TechCARD Search	Нет данных
4	Вектор-Альянс	ТехноПро8	Нет данных

Лекция 3

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ УНИФИКАЦИЯ.

РАЗНОВИДНОСТИ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО

ПРОЕКТИРОВАНИЯ

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА САПР ТП

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ УНИФИКАЦИЯ

- Типовые решения являются основой автоматизированного проектирования ТП
- При проектировании ТП используются три уровня технологической унификации:
 - типизация маршрута обработки отдельных (элементарных) поверхностей, таких как наружный цилиндр, конус, сфера, отверстие или плоскость;
 - типизация маршрута обработки сочетаний поверхностей;
 - комплексная типизация ТП обработки заготовок в целом.
- Работа по типизации ТП на любом уровне должна начинаться с классификации деталей, сочетаний поверхностей и элементарных поверхностей. Основной задачей классификации является приведение всего многообразия заготовок, поверхностей, их сочетаний к минимальному числу типов, для которых можно разработать унифицированные ТП.

Разновидности технологического проектирования

- Технологическое проектирование подразделяется на три основные части:
 - изготовления заготовки;
 - обработки заготовки;
 - сборки изделия.
- **Проектирование ТП изготовления заготовки.** Основными факторами, определяющими вид заготовки, являются материал детали, ее конфигурация, габаритные размеры и объем выпуска или тип производства.
- **Проектирование ТП обработки заготовки.** В проектировании ТП обработки различаются следующие стадии: разработка маршрута обработки отдельной поверхности, разработка принципиальной схемы ТП, разработка переходов, разработка операций, разработка технологического маршрута.
- **Проектирование ТП сборки изделий.** Конструктор изделия при составлении сборочных чертежей должен решить вопрос о методе обеспечения заданной точности замыкающих звеньев размерных цепей изделия. При анализе исходной информации технолог проверяет выбранное решение.

Проектирование ТП изготовления заготовки

1. Анализ исходной информации
2. Выбор вида заготовки
3. Выбор метода изготовления
4. Конструирование заготовки
5. Проектирование маршрута, операций,
переходов

Проектирование единичных ТП обработки заготовки

- Анализ исходной информации
- Установление маршрута обработки отдельных поверхностей
- Разработка принципиальной схемы ТП
- Проектирование маршрута обработки
- Проектирование операций
- Проектирование переходов
- Разработка управляющих программ для станков с ЧПУ

Проектирование унифицированных ТП обработки заготовки

- Анализ исходной информации
- Классификация и группирование деталей
- Проектирование маршрута обработки
- Проектирование операций
- Проектирование переходов
- Разработка управляющих программ для станков с ЧПУ

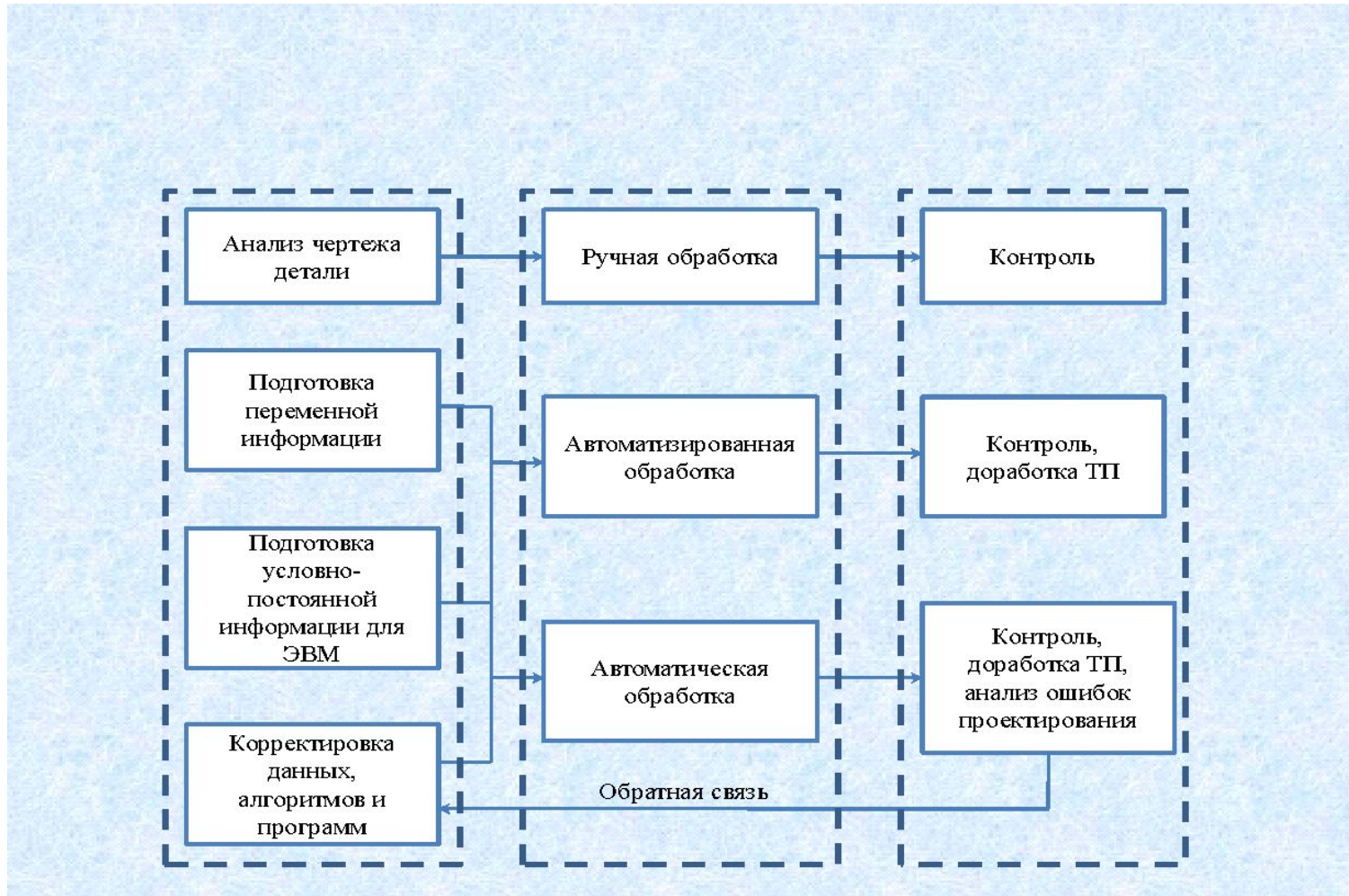
Проектирование ТП сборки изделия

- Анализ исходной информации
- Разработка схемы сборки
- Проектирование маршрута сборки
- Проектирование операций
- Проектирование переходов

Процесс автоматизированного проектирования

- Для организации автоматизированного проектирования ТП с помощью ЭВМ необходимо:
 - разработать метод формализованного описания исходной информации о детали;
 - разработать совокупность типовых решений и алгоритмов их выбора применительно к условиям производства, где система проектирования будет эксплуатироваться;
 - организовать информационно-поисковую службу в ЭВМ;
 - формировать технологические документы.
- Все названные задачи могут быть представлены как задачи обработки информации. С этой точки зрения проектирование ТП можно разделить на три основных блока:
 - подготовка информации;
 - обработка информации при проектировании ТП;
 - формирование, контроль и анализ выходной информации.

Схема проектирования ТП



Варианты обработки информации

- *Первый – ручная обработка информации.* В этом случае все решения технолог принимает сам, без ЭВМ. Выполняется лишь анализ информации о детали без разработки и ввода переменной информации в ЭВМ. Такой метод проектирования называется методом *прямого документирования*, а САПР ТП – *технологическим редактором*.
- *Второй вариант – автоматизированный.* Он предполагает решение некоторых задач без участия человека и ожидает ввода информации о детали или в виде переменной информации, или в ходе проектирования ТП в диалоге. ЭВМ в основном решает расчетные задачи, т.е. определяет параметры ТП: вес заготовки, режимы обработки, нормы времени.
- *Третий вариант проектирования – автоматический*, с обязательным вводом переменной информации. Здесь и расчетные, и нерасчетные задачи ЭВМ решает без участия технолога по введенным ранее алгоритмам. При работе в автоматическом режиме технолог вводит только информацию о детали. В этом случае необходимо наличие и базы данных, и базы знаний. САПР ТП такого уровня сложны в организации, относятся к *экспертным системам* – разновидностям искусственного интеллекта.

ИСХОДНАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ДЕТАЛИ

- Исходная информация для проектирования ТП отражает данные о объекте изготовления, директивную программу выпуска и специальные требования, связанные с изготовлением объекта в производственных условиях.
- Эти сведения представлены в табличной форме с целью удобства дальнейшей обработки при проектировании ТП. Условно будем называть геометрические модели, которые являются результатом проектирования конструкции, конструкторскими, а геометрические модели в табличном виде на входе проектирования ТП – технологическими. Поэтому при подготовке исходной информации для проектирования ТП необходимо выполнить этап преобразования конструкторских моделей в технологические. В ранних системах автоматизированного проектирования указанный этап выполнялся визуально путем распознавания геометрических свойств поверхностей детали. В более поздних системах отдельные этапы распознавания выполняются программно.

Геометрические модели деталей в процессе преобразования конструкторской информации в технологическую.

- Под геометрической моделью $M_{\text{геом}}$, понимают пару множеств:
- $$M_{\text{геом}} = \langle M, R \rangle,$$
- где M - множество исходных элементов;
- R - множество связей между элементами.
- Каждая машиностроительная деталь или сборочная единица допускает большое многообразие геометрических моделей, и существующие в настоящее время модели можно разбить на три большие группы:
 - модели в виде традиционных чертежей;
 - модели, составляющие основу многочисленных графических систем (класса Автокад 10-14, Tflex и др), и нацеленные, прежде всего, на подготовку конструкторской документации;
 - трехмерные модели (3D), используемые в интегрированных системах CAD-CAM-CAE и прежде всего, в автоматизированных системах технологической подготовки производства (системы Creo, Catia и др.).

Признаки современных САПР ТП

- 1. Объектно-ориентированное взаимодействие человека и ЭВМ.** Пользователь манипулирует изображениями заготовок, деталей, чертежей в реальном масштабе времени. Человек видит информационные объекты с помощью средств вывода информации и воздействует на них с помощью средств ввода информации.
- 2. Информационная поддержка на основе интегрированной базы данных.** База данных предусматривает единую форму представления, хранения, поиска, отображения и защиты информации.
- 3. Безбумажный процесс обработки информации.** Все данные хранятся на машинных носителях. На бумаге фиксируется только окончательный вариант документов.
- 4. Интерактивный режим (режим диалога пользователя и ЭВМ).** Информационные технологии требуют высокого профессионального уровня пользователя.

Виды обеспечений САПР

- **техническое** – совокупность технических средств для автоматизированного проектирования (ЭВМ, периферийное оборудование и устройства)
- **математическое** – совокупность математических методов, моделей и алгоритмов проектирования ТП, инструментов и приспособлений
- **программное** – совокупность машинных программ для автоматизированного проектирования (специальное ПО, стандартное ПО)
- **информационное** – база данных под управлением СУБД (банк данных)
- **лингвистическое** – совокупность алгоритмических языков программирования
- **методическое** – совокупность документов, устанавливающих состав, правила отбора и эксплуатации средств автоматизированного проектирования
- **организационное** – совокупность документов, устанавливающих состав проектной организации, ее подразделений, связи между ними, их функции, форму представления результатов

Лекция 4

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТП НА ОСНОВЕ ТИПИЗАЦИИ

Типовые ТП

Идея типизации заключается в классификации деталей по конструктивно–технологическим признакам: форме, размерам, точности и т.д. Цель классификации – установление принадлежности детали к определенному типу, т.е. к совокупности деталей, имеющих в данных производственных условиях **общую структуру операций и переходов**. Детали одного типа в определенной степени могут отличаться набором поверхностей и параметров. Поэтому ТП обработки конкретной детали получается из типового путем исключения лишних операций и переходов обработки отсутствующих поверхностей. Доработка типового ТП включает в себя также:

- уточнение технологического оборудования, приспособлений, инструментов;
- перерасчет межпереходных размеров;
- выбор (расчет) режимов резания;
- выбор и расчет норм времени.

Групповые ТП

Групповой метод обработки представляет собой такой способ унификации технологии, при котором для обработки группы деталей устанавливается одинаковое оборудование и оснащение при выполнении всех или отдельных операций. В основе метода лежит классификация, заканчивающаяся формированием группы (совокупности) деталей, характеризующихся общностью оборудования и оснащения, необходимых для обработки детали в целом или отдельных ее поверхностей.

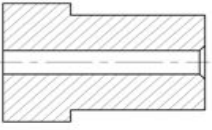
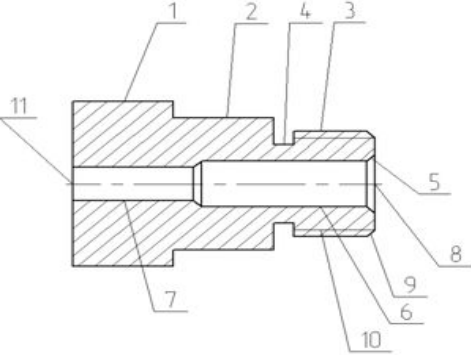
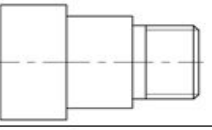
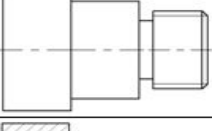
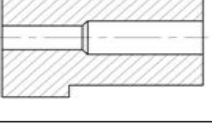
ТП обработки конкретной детали формируется путем уточнения общих поверхностей с комплексной деталью группы и выбора из группового ТП только тех операций и переходов, которые необходимы для обработки поверхностей заданной детали.

Доработка индивидуального ТП аналогична приведенной выше доработке при использовании при проектировании типовых ТП.

Разработка автоматизированной системы на основе типизации

- Разработка автоматизированной системы (АС) на основе типизации выполняется в следующем порядке.
 - Основопологающей частью метода является проблемно- ориентированная система классификации и группирования деталей. Все детали, подлежащие переводу на автоматизированное проектирование ТП, разделяются на группы. Число наименований деталей в группе может колебаться от 50 – 100 для сложных и до 400 – 500 для простых деталей.
 - Для каждой группы деталей создается комплексный представитель (комплексная деталь). При этом за основу принимается чертеж детали, имеющей наибольшее число поверхностей, к которому добавляются поверхности других деталей группы. В табл. показан принцип разработки комплексной детали на примере группы из 4-х деталей.

Формирование комплексной детали

Эскиз детали	Переходы											Комплексная деталь
	Обточить поверхность 1	Обточить поверхность 2	Обточить поверхность 3	Проточить канавку 4	Центровать отверстие 5	Сверлить отверстие 6	Сверлить отверстие 7	Подрезать торец 8	Обточить фаску 9	Нарезать резьбу 10	Отрезать деталь 11	
	X	X			X		X	X			X	
	X	X	X					X	X	X	X	
	X	X	X	X				X	X	X	X	
	X	X	X				X	X			X	

Разработка автоматизированной системы на основе типизации (продолжение)

После разработки чертежа комплексной детали составляется унифицированный ТП для ее обработки. Применительно к конфигурации комплексной детали определяется последовательность операций – унифицированный маршрут. Далее определяется содержание операций – состав и последовательность технологических переходов, выбирается оборудование, технологическая оснастка и разрабатывается наладка станка, определяются режимы обработки и нормы времени.

- Унифицированный ТП является избыточным для текущей детали из группы, т.е. содержит операции и переходы обработки всех поверхностей деталей группы

Типовые решения в САПР ТП

Главные **особенности проектирования ТП**:

1. многовариантность проектных решений
2. слабая формализация многих проектных задач

По этим причинам при решении задач нерасчетного характера (выбор заготовки, разработка маршрута обработки детали, выбор станков, инструментов и др.) решения принимаются в результате выбора из известных **типовых решений**.

Процесс выбора решений состоит в следующем: каким-либо образом описывается весь набор типовых решений, а также условия их применимости. Эти данные вводятся и хранятся в базе данных. При разработке ТП в ЭВМ вводятся исходные данные по детали и проверяется соответствие их условиям применимости **типовых решений**. При выполнении **всех условий** применимости выбирается подходящее типовое решение.

Пример. Выбрать станок на операцию зубошлифования. На предприятии есть зубошлифовальные станки трех моделей, которые образуют множество типовых решений: $MTP = \{5A702Г; 5703В; 5717С\}$

На основе паспортных данных станков сформировано множество их типовых решений с условиями применимости (Таблица).

Таблица Типовые решения зубошлифовальных станков.

Модель станка	Интервалы параметров применимости			
	D_d , мм	L_d , мм	m_d , мм	α_d , град
5A702Г	60 - 320	до 110	1,5 – 6	± 35
5703В	125 – 500	до 80	1,75 – 8	● 17
5717С	300 - 800	до 200	2 - 8	± 35

Комплекс условий применимости (КУП) типовых решений (станков):

1 условие. Размещаемость детали в рабочей зоне станка. Регламентируются габаритные размеры детали (диаметр зубчатого колеса D_d и его ширина L_d), которые должны быть в пределах, допустимых рабочей зоной станка.

2 условие. Диапазоны допустимого изменений модуля колеса m_d и угла наклона зуба колеса α_d .

КУП в данной задаче может быть представлен в виде следующей системы:

$$D_{\min} \leq D_d \leq D_{\max}$$

$$L_{\min} \leq L_d \leq L_{\max}$$

$$m_{\min} \leq m_d \leq m_{\max}$$

$$\alpha_{\min} \leq \alpha_d \leq \alpha_{\max}$$

Важно определиться, входят или нет границы интервалов, указанные в таблице в соответствующие интервалы.

Блок – схема алгоритма выбора модели станка показана на рис.

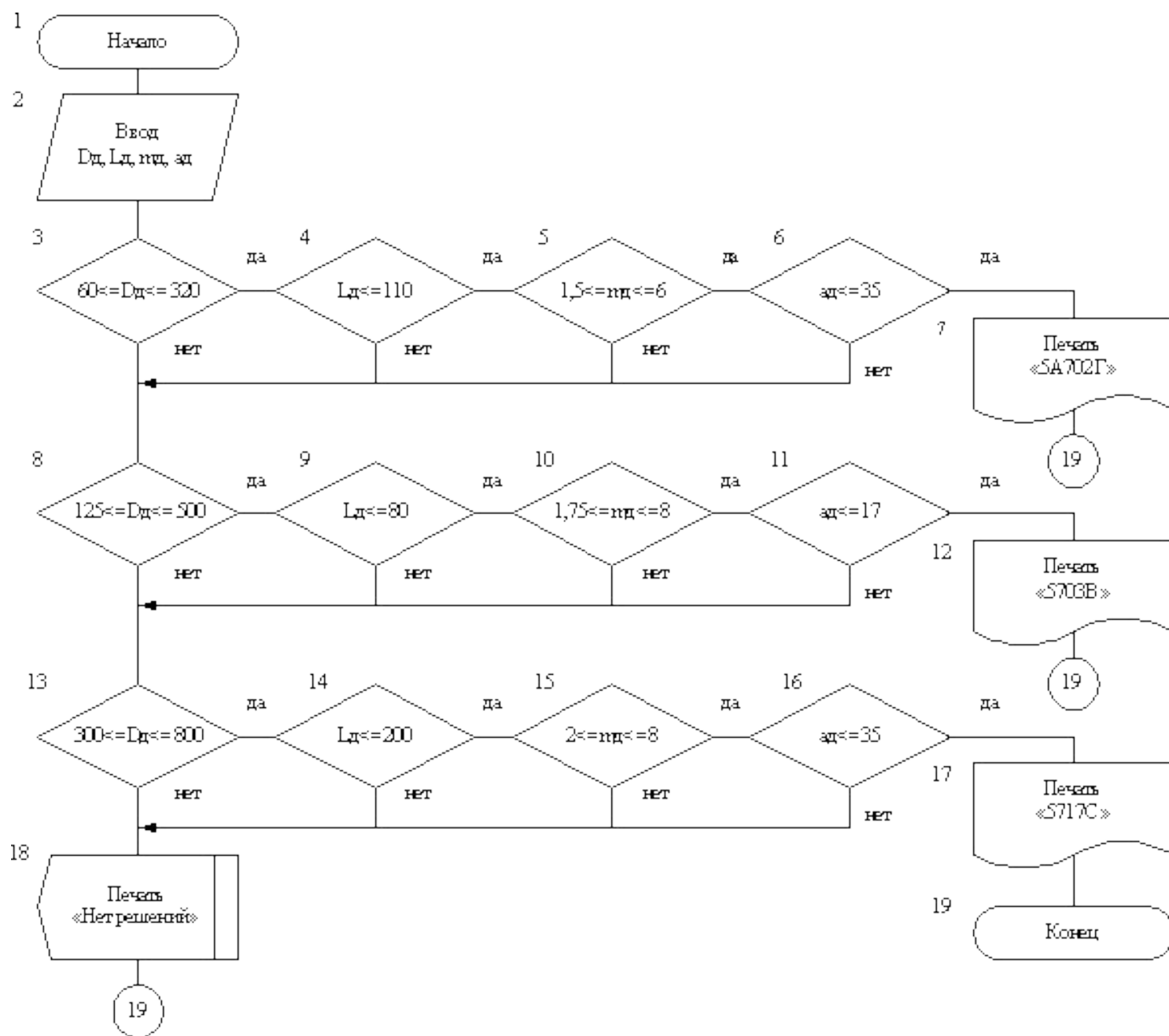


Рис.7.1. Блок - схема алгоритма выбора модели зубошвинговального станка

Например, для $D_d = 60$ мм можно применить станок мод. 5А702Г или для $L_d = 200$ мм - станок мод. 5717С и т.д.

В данном алгоритме заложен принцип предпочтительности применения станков малых размеров. Например, при $D_d = 300$ мм, $L_d = 80$ мм, $m_d = 2,5$ мм, $\alpha_d = 35$ град выбирается малогабаритный станок мод. 5А702Г, хотя подходит и станок мод. 5717С.

Лекция 5

- **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ
АВТОМАТИЗИРОВАННОМ
ПРОЕКТИРОВАНИИ
ТЕХПРОЦЕССОВ**

Матмодель ТП – это система математических объектов (чисел, переменных, множеств, графов, матриц) и отношений между ними, отражающая некоторые свойства ТП.

В САПР ТП применяются **структурно - логические** и **функциональные матмодели**.

Примеры функциональных моделей – модели для расчетов и оптимизации режимов резания.

Структурно – логические модели подразделяются на табличные, сетевые и перестановочные.

Табличные модели

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

Пример. При обработке группы деталей d_1 , d_2 , d_3 последовательность обработки их поверхностей можно задать с помощью табличных моделей. Каждая деталь (рис.6.1) имеет поверхности с определенными свойствами F_1 , F_2, \dots, F_8 :

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

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

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

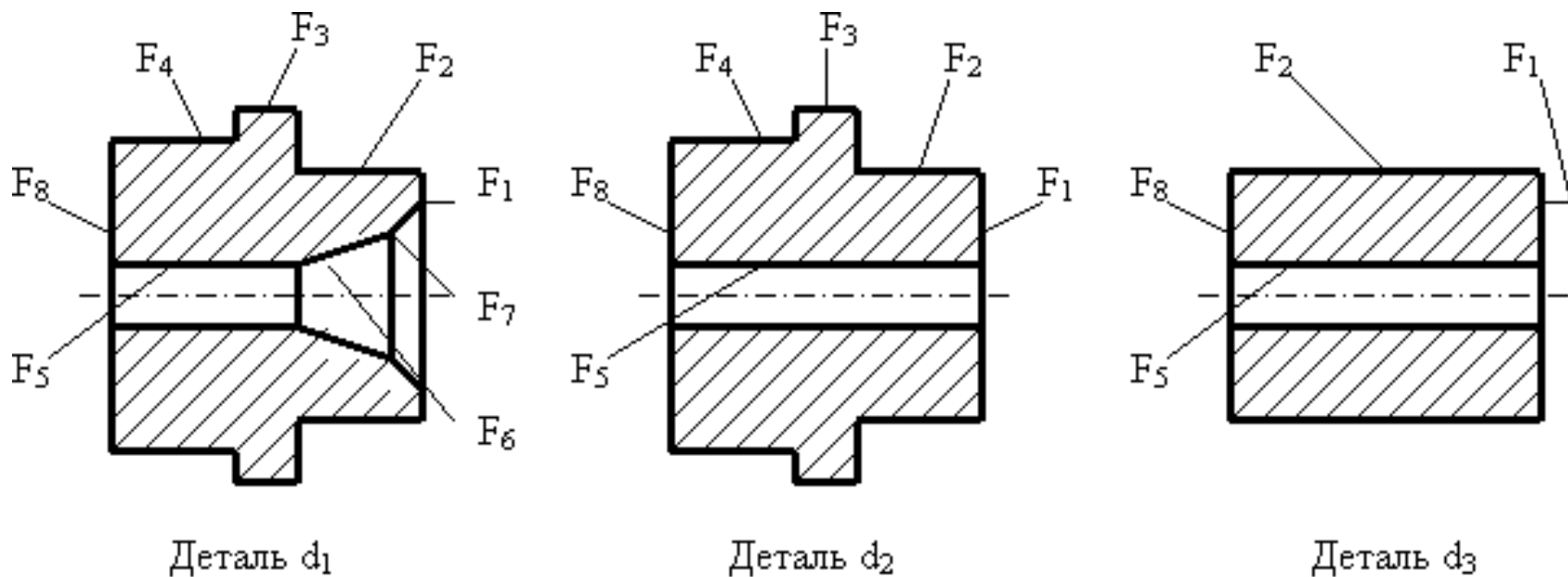


Рис.6.1. Эскизы деталей для обработки на прутковом токарном автомате

На рис.6.2 представлены табличные модели в виде графов взаимосвязей переходов при обработке деталей d_1, d_2, d_3 .

Технологические переходы (операторы):

τ_1 - подрезка торца; τ_2, τ_2, τ_4 – точение наружной поверхности;

τ_5 - сверление; τ_6, τ_7 - зенкерование; τ_8 - отрезка.

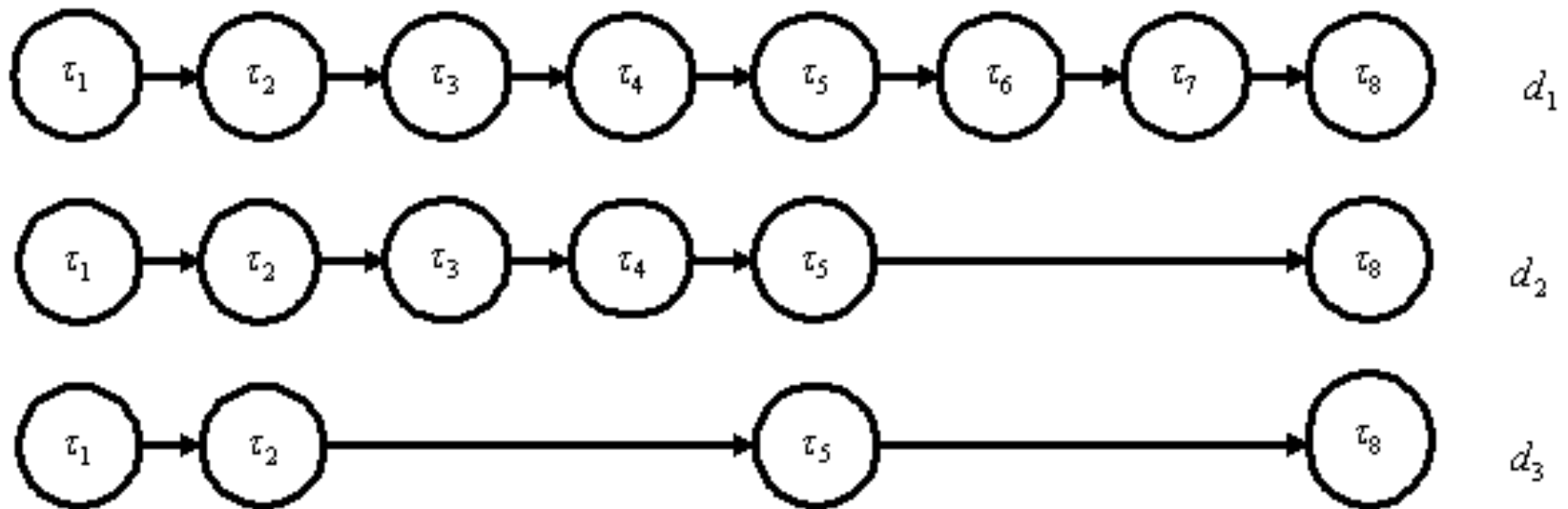


Рис.6.2. Графы взаимосвязей переходов при обработке деталей d_1, d_2, d_3

Для представления данных об обработке деталей на языке, удобном для программирования, информация может быть удобно описана в виде Таблицы 6.1 (массива), где единица обозначает наличие связи, а нуль – отсутствие таковой.

Таблица 6.1. Связи между свойствами поверхностей деталей и технологическими переходами (операторами).

τ_i	$F(d_1)$	$F(d_2)$	$F(d_3)$
τ_1	1	1	1
τ_2	1	1	1
τ_3	1	1	0
τ_4	1	1	0
τ_5	1	1	1
τ_6	1	0	0
τ_7	1	0	0
τ_8	1	1	1

Сетевые модели

Структура элементов **сетевой модели** описывается ориентированным графом, не имеющим циклов. В модели может содержаться несколько вариантов проектируемого техпроцесса, однако во всех вариантах порядок элементов одинаков.

Пример. Сетевая модель проектирования маршрута обработки детали «Зубчатое колесо», эскиз которой представлен на рис.6.3.

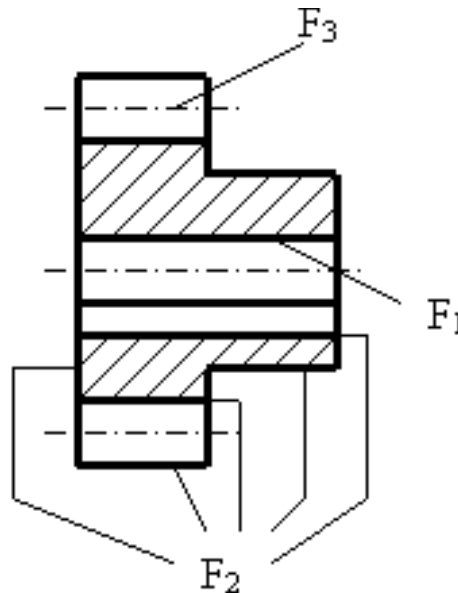
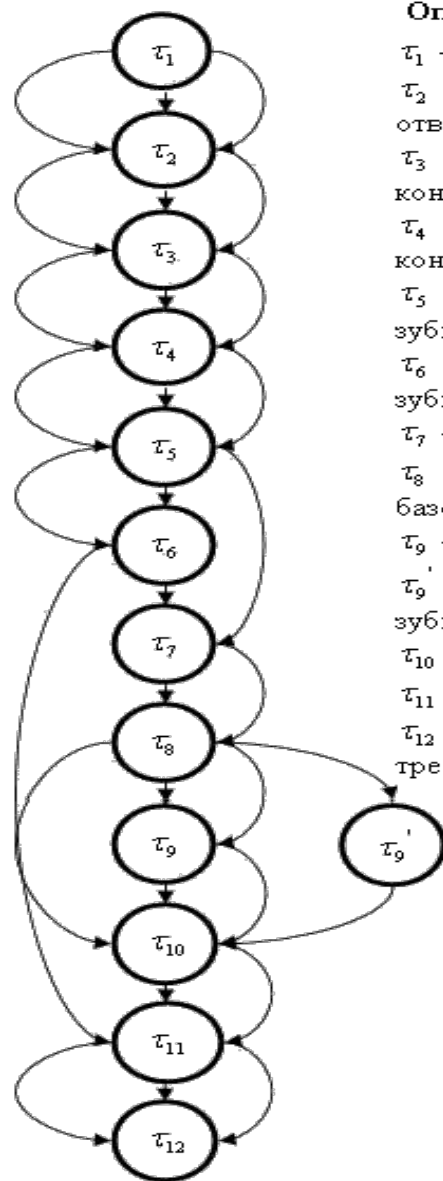


Рис.6.3. Эскиз детали «Зубчатое колесо»

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



Операторы τ_i (технологические операции):

- τ_1 - заготовительная;
- τ_2 - протяжная (протягивание базового отверстия);
- τ_3 - черновая токарная (черновое точение контура зубчатого колеса);
- τ_4 - чистовая токарная (чистовое точение контура зубчатого колеса);
- τ_5 - зубофрезерная черновая (черновая нарезка зубьев);
- τ_6 - зубофрезерная чистовая (чистовая нарезка зубьев);
- τ_7 - термическая (объемная закалка);
- τ_8 - внутришлифовальная (шлифование базового отверстия);
- τ_9 - зубошлифовальная (шлифование зубьев);
- τ_9' - зубошевинговальная (шевингование зубьев);
- τ_{10} - притирочная (притирка зубьев);
- τ_{11} - моечная (мойка детали);
- τ_{12} - контрольная (контроль технических требований детали)

Перестановочные модели

Перестановочная модель описывает множество структур ТП, отличающихся количеством и (или) составом элементов при изменении отношения порядка, которые задаются с помощью графа с циклами.

Пример. Расцеховка при изготовлении изделия (рис.6.5).

P_1, P_2, \dots, P_8 обозначены цеха: P_1 – литейный; P_2 – кузнечный; P_3 – механический; P_4 – термический; P_5 – механосборочный; P_6 – общей сборки; P_7 – испытательный; P_8 – упаковочный.

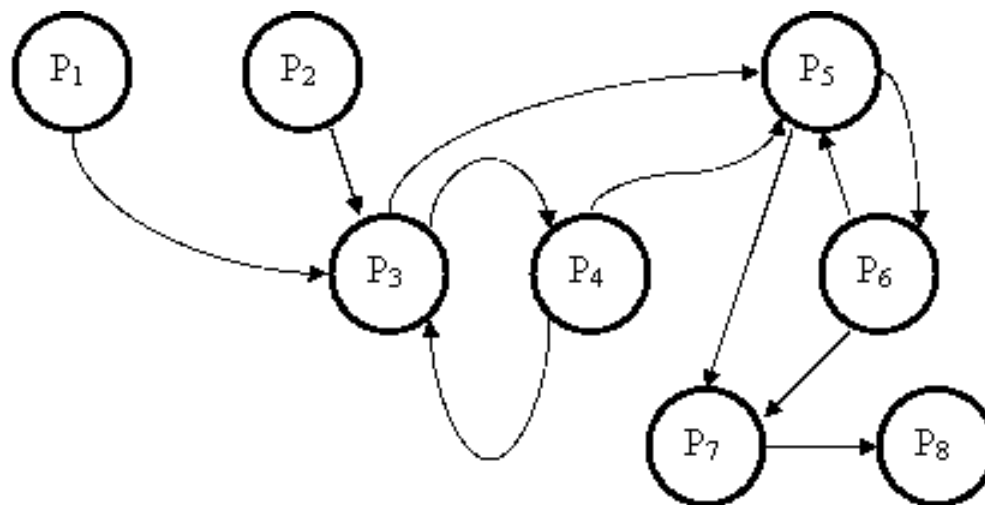


Рис. 6.5. Граф, отображающий расцеховку при изготовлении изделия

Сетевые и перестановочные модели используют для получения различных ТП. Наличие в них вариантов позволяет производить оптимизацию ТП.

Лекция 6

- **Системное проектирование ТП**

Системное проектирование ТП основано на 2-х принципах.

• **Принцип 1.**

• Применение **системного подхода**, который основан на:

- ТП рассматривается в виде структуры (Рис.5.1 и Рис.5.2), как совокупность взаимосвязанных элементов (операций, переходов и т. д.).
- проектирование ТП – это совокупность взаимосвязанных этапов (выбор заготовки, маршрута обработки детали и т.д.)
- рациональное разбиение процесса проектирования на «простые» задачи (выбор типа заготовки, расчет режимов резания и т.д.) и их решение во взаимосвязи.
- принятие оптимальных решений.

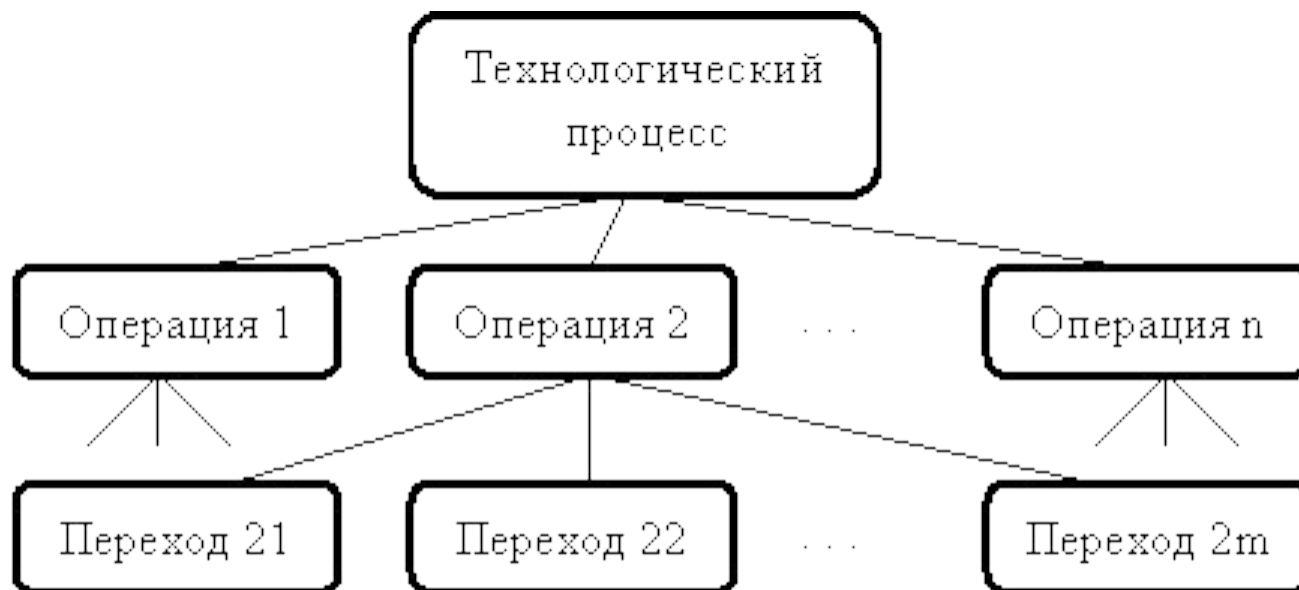


Рис. 5.1. Представление структуры технологического процесса в виде дерева

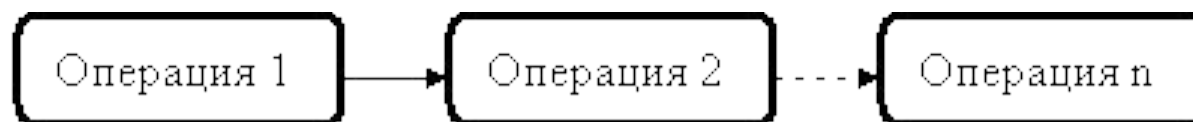
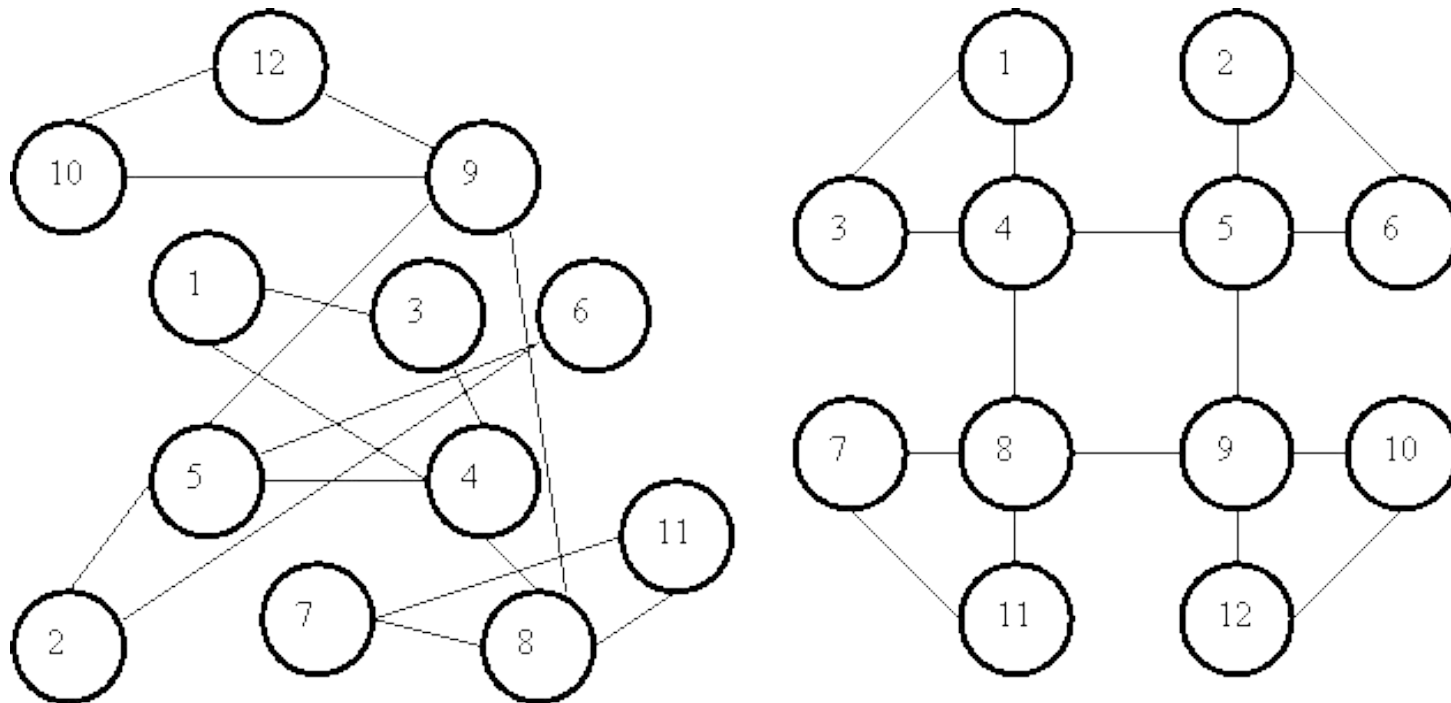


Рис. 5.2. Представление структуры технологического процесса в виде графа

Принцип 2.

Использование при проектировании ТП рационального сочетания «ручных» методов проектирования и теории множеств, теории графов, теории оптимизации и других системных наук.

Применение принципов системного проектирования позволяет систематизировать знания в любой области (Рис.5.3).



а) без использования принципов системного проектирования

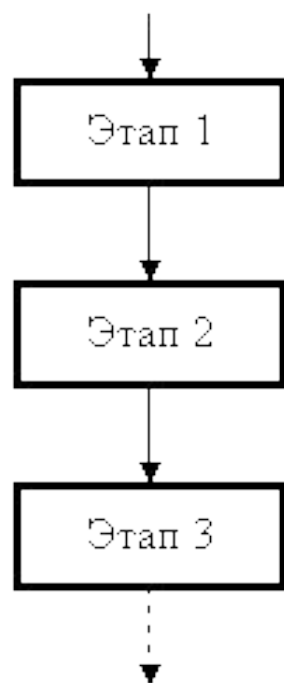
б) с использованием принципов системного проектирования

Рис.5.3. Представление знаний в определенной области

Стратегии проектирования ТП

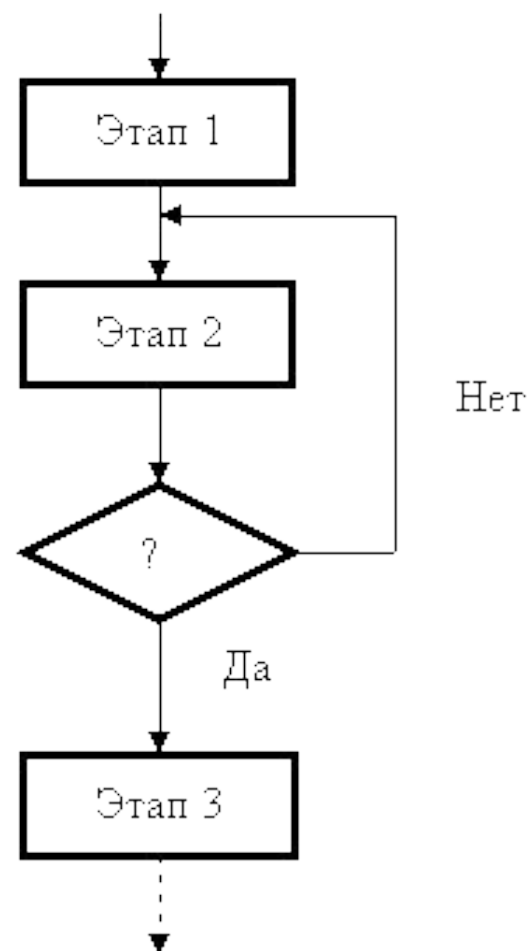
- Правильная **стратегия проектирования ТП** определяет методику его проектирования и эффективность САПР:
- **линейная стратегия** идеальна при использовании ЭВМ. Имеет минимальную трудоемкость и максимальную надежность (Рис.5.4а).
- **циклическая стратегия (схема с петлями)** имеет характер итерационного процесса или последовательного приближения к цели путем улучшения разрабатываемых вариантов (Рис.5.4б).

Техническое задание



а)

Техническое задание



б)

Рис. 5.4. Линейная (а) и циклическая (б) стратегии проектирования

- **разветвленная стратегия** позволяет сократить сроки проектирования за счет параллельных этапов (Рис.5.5)

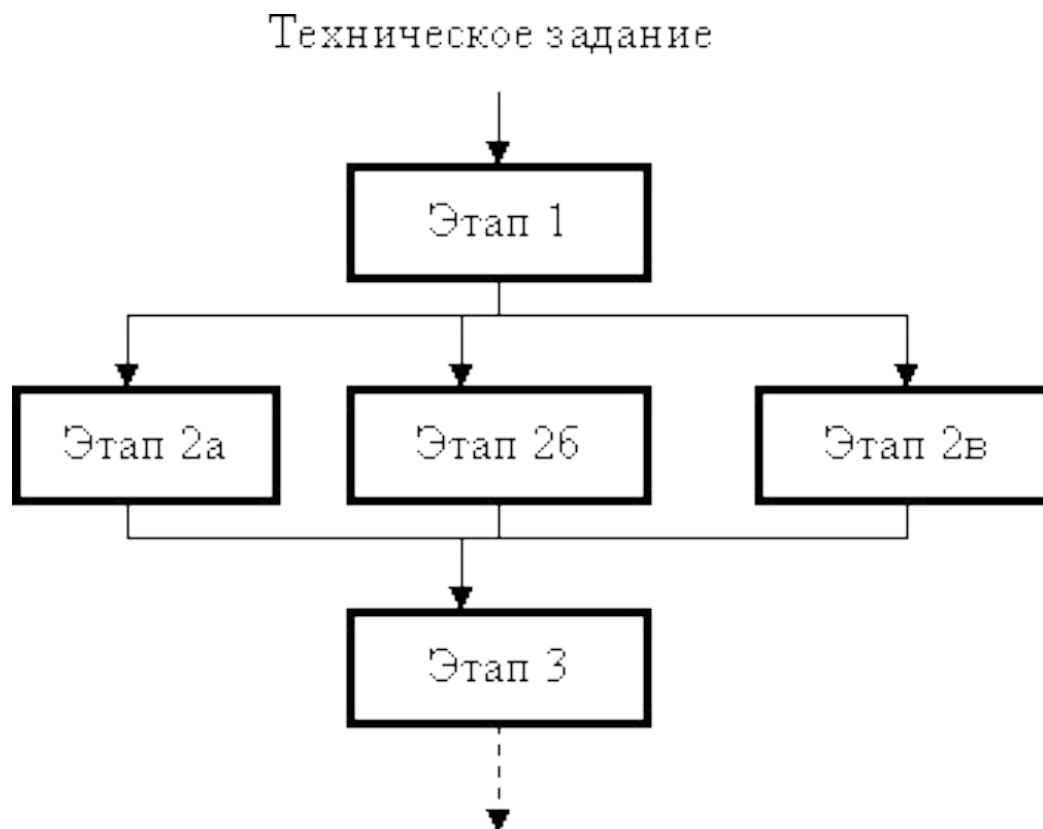


Рис. 5.5. Разветвленная стратегия проектирования

- **В адаптивных стратегиях** проектирования выбор каждого последующего действия зависит от результатов предыдущего (Рис.5.6). Самая разумная стратегия, т.к. схема поиска определяется на основе наиболее полной информации.

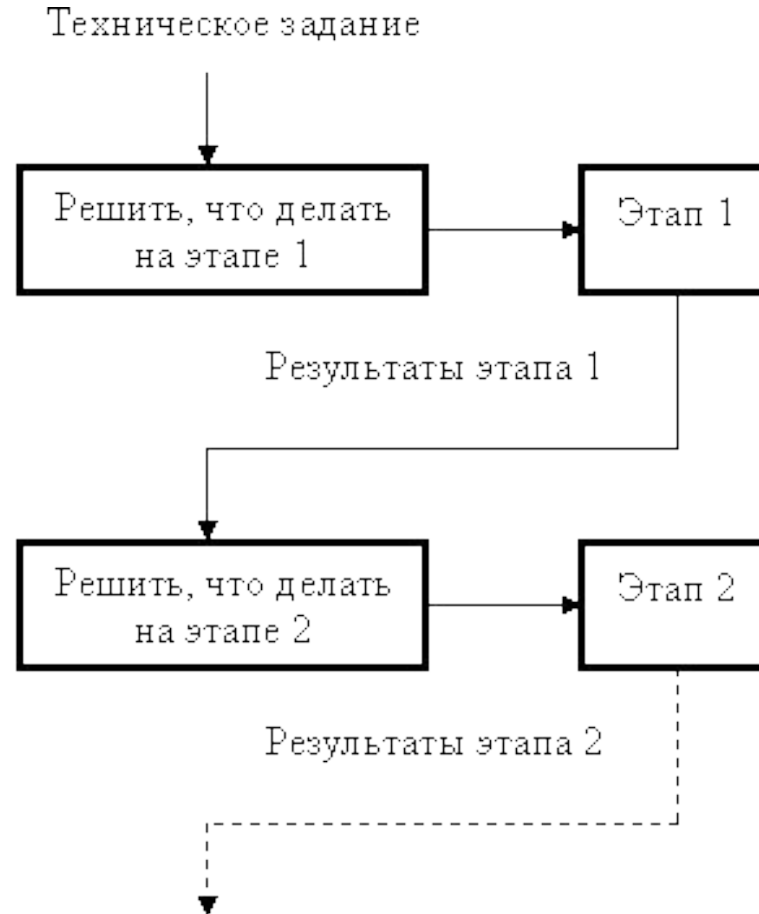


Рис.5.6. Адаптивная стратегия проектирования

Стратегия проектирования может уточняться на последующих уровнях проектирования. На некоторых этапах приходится вводить методы управления стратегией (Рис.5.8).

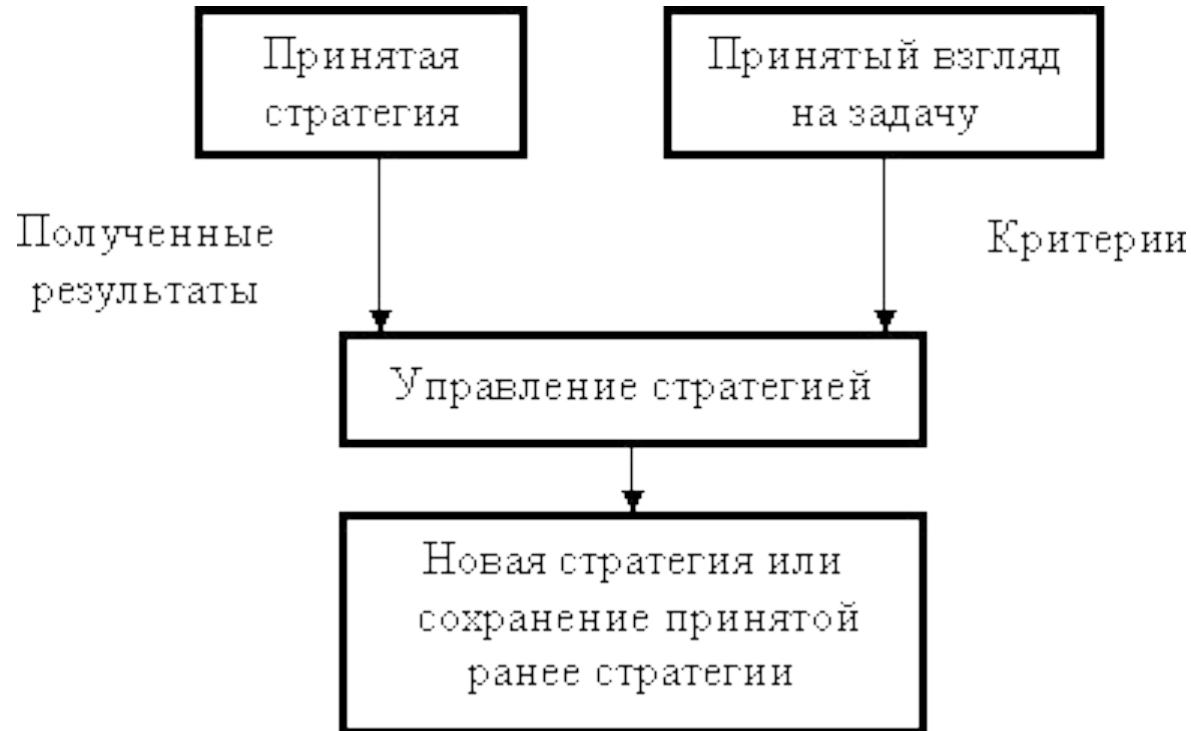
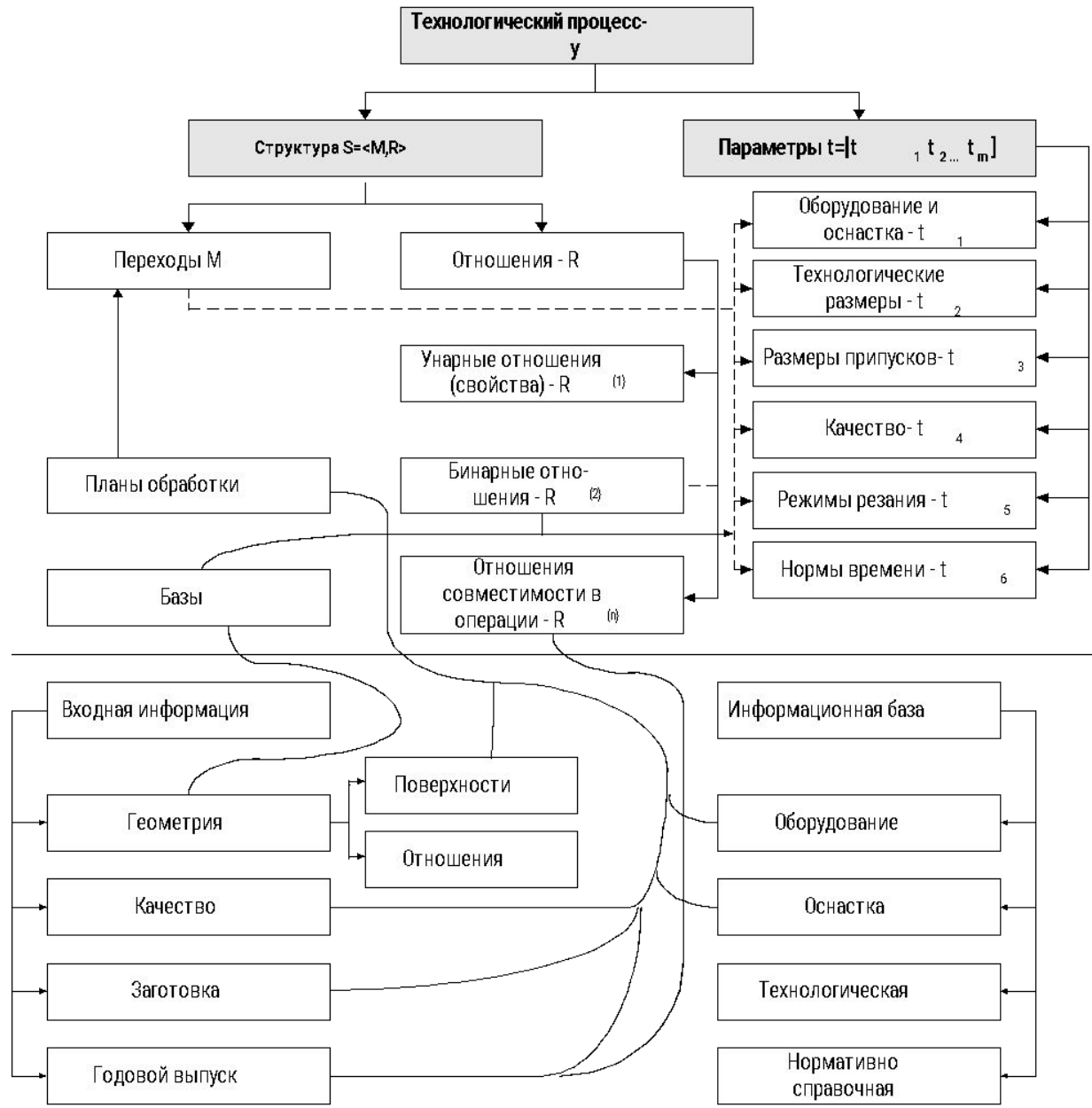


Рис.5.8. Управление стратегией проектирования

Проектирование ТП на основе синтеза структуры



Алгоритм синтеза ТП

Алгоритм синтеза технологического процесса ориентирован на решение задач выбора структуры S и расчета параметров t :

- - выбор исходного множества M технологических переходов, необходимых для обработки данной детали в заданной производственной системе;
- - определение множества связей (отношений) на множестве M технологических переходов, позволяющих упорядочить технологические переходы и объединять их в операции и технологический процесс;
- - расчет параметров t для операций и переходов.

Для формирования множества допустимых технологических переходов рассмотрим модель первого уровня $M_1 = \langle M_1, R_1 \rangle$, где M_1 - исходное множество предметов; R_1 - множество отношений на M_1

- Исходное множество M_1 объединяет подмножества:
- $M_1 = M_{11} \cup M_{12} \cup M_{13} \cup M_{14}$,
- где M_{11} - множество поверхностей, которое включает поверхности детали после окончательной обработки и поверхности заготовки; M_{12} - множество станков; M_{13} - множество инструментов; M_{14} - множество технологических методов воздействия

Определение структуры ТП

- Последовательность выполнения технологических переходов в значительной степени определяет структуру технологического процесса. Установление этой последовательности формально сводится к задаче выделения подмодели технологического процесса (подграфа $G_{ТП}$) из технологической модели изготавливаемой детали (граф G_T) с заданными свойствами.
- *Технологическая модель детали* определяет возможности обработки поверхностей с различных технологических баз в условиях заданного производства. Эта модель является прежде всего *геометрической*, так как бинарные отношения «базовые поверхности – обрабатываемые поверхности» устанавливаются на основе распознавания геометрических свойств поверхностей и учитываются технологические возможности обработки поверхностей.
- *Подмодель технологического процесса* содержит лишь те бинарные отношения, совокупность которых удовлетворяет заданным свойствам

Выбор структуры ТП

- Если в технологической модели детали содержатся различные возможности обработки поверхности с различных технологических баз, то в модели технологического процесса оставляется единственная возможность обработки поверхности с конкретной технологической базы. Таким образом, задача выбора структуры технологического процесса сводится к классической задаче оптимизации на графах.
- Алгоритм решения задачи на графах в зависимости от заданного критерия оптимальности сводится к последовательному удалению дуг, входящих в рассматриваемую вершину. Если в качестве критерия оптимальности задано количество переустановов, необходимых для обработки всех поверхностей, то оставляются максимальное количество дуг, выходящих из одной вершины, т.е. реализуется принцип «единства баз». Если в качестве критерия оптимальности задан показатель точности всех замыкающих звеньев, то реализуется принцип «кратчайшего пути» и в процессе удаления дуг оставляются лишь те из них, которые определяют цепи с минимальным количеством составляющих звеньев.

Лекция 7

Расчет параметров и построение
структур технологического процесса
при автоматизированном
проектировании

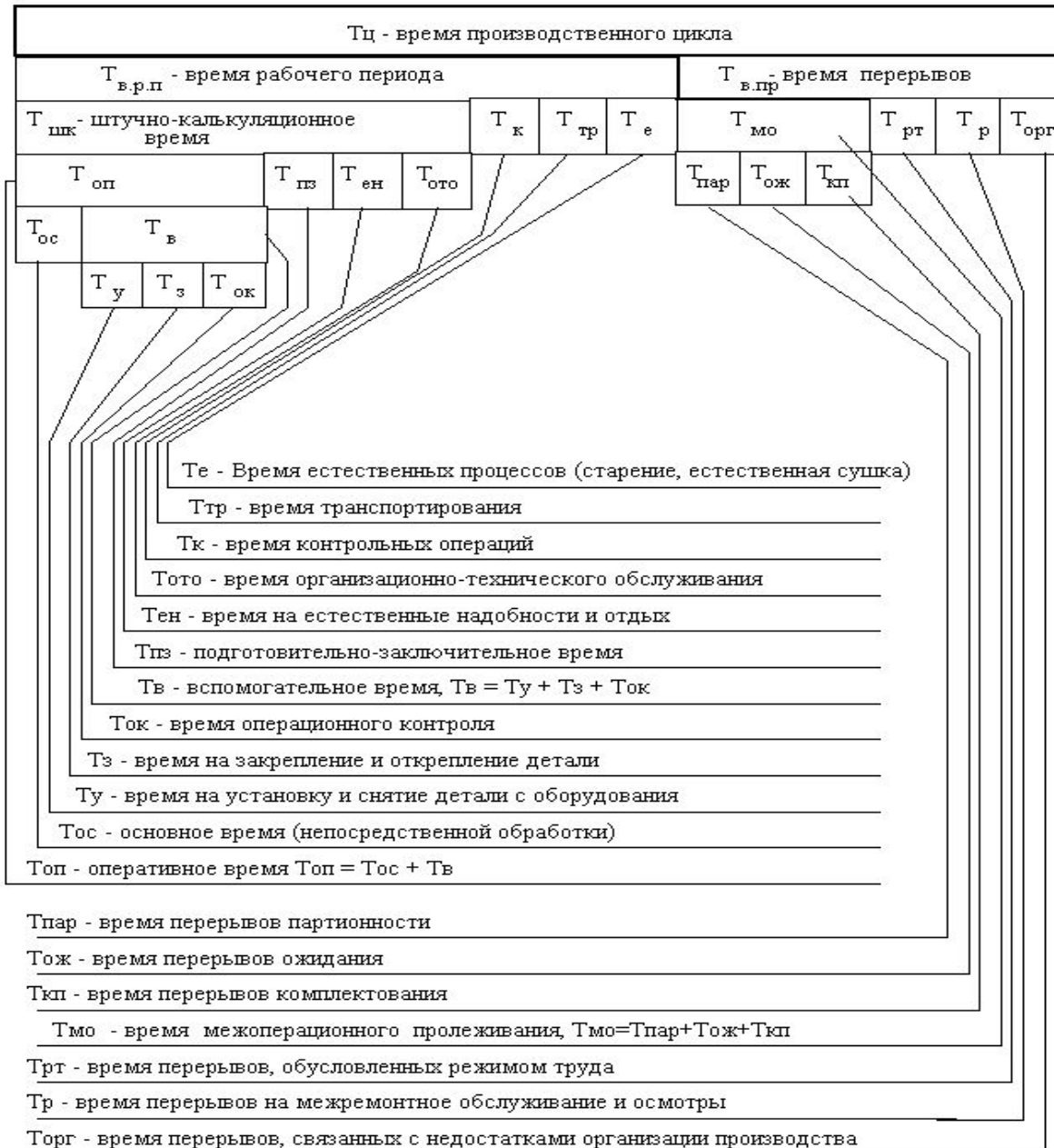
Расчет режимов резания

- *Требуется определить множество переменных x процесса резания так, чтобы при заданных условиях p обеспечить оптимальное значение целевой функции $W = W(x,p)$ при выполнении заданных ограничений .*
- В качестве искоемых переменных X принимают режимы резания и параметры режущего инструмента.
- Режимы резания : скорость резания - V (м/сек); подача минутная S (мм/мин) или на один оборот S (об/мин); глубина резания t (мм).
- Параметры режущего инструмента: передний угол резца γ ; задний угол резца α ; главный угол в плане ϕ ; угол наклона режущей кромки λ ; радиус закругления кромки r ; марка инструментального материала.
- В общем случае выражение для критериев оптимальности имеет вид: $W = W(x,p)$. Это может быть минимум себестоимости или максимум производительности.

Рассматриваемые ограничения

- ограничения, определяющие диапазон изменения режимов резания в соответствии с возможностями оборудования и величиной снимаемого припуска: $V_{\min} < V < V_{\max}$; $S_{\min} < S < S_{\max}$; $t_{\min} < t < t_{\max}$
- при этом возможно ограничение для станков со ступенчатым регулированием (требование заданной дискретности параметров V и S , определяемое целочисленными значениями числа оборотов шпинделя n [об/мин];
- - ограничения дискретности переменных V , S , t при использовании станков со ступенчатым регулированием;
- - ограничения по мощности оборудования при черновой обработке:
- $N(p,x) < N_{\max}$;
- - ограничения по подаче S при чистовой обработке
- $R(p,S,V) < R_a$;
- - ограничения по стойкости инструмента $T_{\text{зад}}$:
- $T(p,x) > T_{\text{зад}}$.

Нормирование ТП



Нормирование

- В общем виде длительность производственного цикла определяется по формуле:
- $T_{ц} = T_{врп} + T_{впр}$,
- где $T_{врп}$ - время рабочего процесса;
- $T_{впр}$ - время перерывов.
- Во время рабочего периода выполняются технологические операции:
- $T_{врп} = T_{шк} + T_{к} + T_{тр} + T_{е}$,
- где $T_{шк}$ - штучно-калькуляционное время;
- $T_{к}$ - время контрольных операций;
- $T_{тр}$ - время транспортирования предметов труда;
- $T_{е}$ - время естественных процессов (старения, релаксации, естественной сушки, отстоя взвесей в жидкостях и т.п.).
- Сумму времен штучного, контрольных операций, транспортирования называют операционным временем ($T_{опер}$):
- $T_{опер} = T_{шк} + T_{к} + T_{тр}$

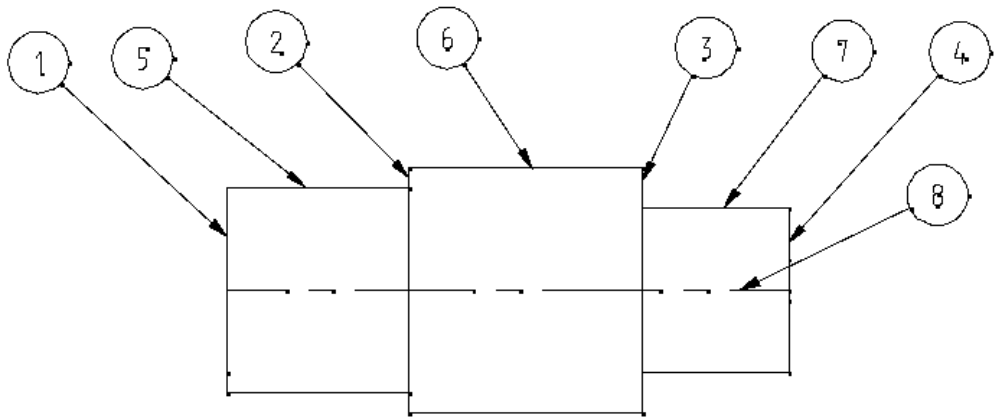
Выбор структуры ТП на основе деталей аналогов

- Выбор структуры $S = \langle M, R \rangle$ при автоматизированном проектировании ТП является основной и до конца нерешенной задачей несмотря на большой опыт разработок и внедрения САПР в практику проектирования. Причина заключается в том, что входные параметры (x, p) и выходные параметры оператора проектирования - y являются в свою очередь структурами $S_{\text{ВХ}}$ и $S_{\text{ВЫХ}}$ и связь F между структурами $S_{\text{ВХ}}$, $S_{\text{ВЫХ}}$ и S не может быть представлена аналитически в силу того, что математическая теория преобразования структур применительно к задаче проектирования ТП в настоящее время еще не разработана.
- При автоматизированном проектировании ТП связь F реализуется в алгоритмической форме, то есть на основе моделирования обработки заготовки в конкретном производстве входные параметры (x, p) преобразуются в выходные. Алгоритмические связи F относятся к разряду поточечных (входная точка - выходная точка) и не позволяют использовать математические методы оптимизации сложных систем. Поэтому в практике автоматизированного проектирования ТП при выборе структуры используется опыт проектирования технологических процессов изготовления деталей – аналогов, типовых и групповых технологических процессов

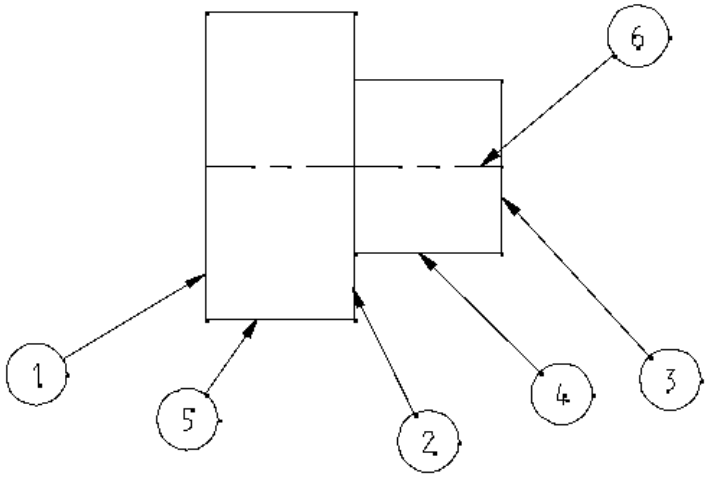
Выбор структуры ТП на основе деталей аналогов

- Таким образом, при проектировании маршрутных и маршрутно-операционных ТП структура ТП передается из унифицированных деталей на рассматриваемую и остается проблема расчета параметров (шифров оборудования и оснастки, припусков, технологических размеров, показателей качества на каждом переходе, режимов резания и норм времени), то есть характеристик переходов, которые отражены в технологических картах. Необходимость расчетов параметров ТП определяется тем, что автоматический перенос параметров из унифицированных ТП на единичную деталь невозможен, так как параметры существенно зависят от размеров детали.

Ó èò èöèđ ààí í àÿ äåòàèü



Åäèí è-í àÿ äåòàèü



Этапы проектирования ТП

- Процесс автоматизированного проектирования ТП на основе унификации с использованием перечисленных вариантов содержит следующие общие этапы:
 - - классификация деталей по конструктивным и технологическим признакам (этап 1);
 - - создание информационной базы по деталям и технологическим процессам их изготовления (этап 2);
 - - разработка конструкции унифицированной детали - представителя каждого класса (этап 3);
 - - разработка унифицированного технологического процесса (этап 4);
 - - организация поиска унифицированной детали для единичной детали (этап 5);
 - - отображение унифицированной детали на экран дисплея для анализа (этап 6);
 - - отображение унифицированного ТП на экран дисплея (этап 7);
 - - редактирование унифицированного ТП с учетом отличий унифицированной детали от единичной (этап 8).

Конструкторско-технологическая параметризация

- **Конструкторская параметризация** – изменение параметров чертежа z детали в автоматическом режиме при изменении параметров конструкции x с использованием функциональной связи $z = f(x)$.
- **Технологическая параметризация** – изменение технологических параметров y в автоматическом режиме при изменении параметров конструкции x с использованием функциональной связи $y = f(x)$.
- Под **конструкторскими** параметрами детали понимаем следующий набор примитивов чертежа и их свойств: наименование и шифр детали, марка конструкционного материала, характеристики полуфабриката, если он указан в штампе чертежа, геометрические параметры поверхностей (например, длина и диаметр цилиндрической поверхности), показатели качества обрабатываемых поверхностей (посадка и квалитет, шероховатость, твердость и др).
- К числу **технологических** параметров ТП МО относятся следующие характеристики технологических переходов и операций, которые отражены в таблице ТП МО и технологической документации: шифр и наименование операции, шифр и наименование оборудования, параметры текстов переходов, показатели качества поверхностей после обработки и др.