

*Ф.В. ГРЕЧНИКОВ, В.И. ДРОВЯННИКОВ,  
А.Г. ШЛЯПУГИН*

**ОСНОВЫ АВТОМАТИЗАЦИИ  
КОНСТРУИРОВАНИЯ  
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ  
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ  
МЕТОДАМИ СТАТИЧЕСКОГО  
ДЕФОРМИРОВАНИЯ**

**2006**



**САМАРА**

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ОБРАЗОВАНИЯ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»

*Ф. В. ГРЕЧНИКОВ, В. И. ДРОВЯННИКОВ, А. Г. ШЛЯПУГИН*

ОСНОВЫ АВТОМАТИЗАЦИИ КОНСТРУИРОВАНИЯ  
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ  
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ  
МЕТОДАМИ СТАТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебного пособия*

Самара  
Издательство СГАУ  
2006

УДК 658.52.011.56(075)

ББК 34.62

Г81



**Инновационная образовательная программа  
«Развитие центра компетенции и подготовка специалистов мирового уровня в области аэрокосмических и геоинформационных технологий»**

Рецензенты: канд. техн. наук, доц. А. А. Игуменов,  
канд. техн. наук, доц. А. И. Хаймович

**Гречников Ф. В.**

Г81

Основы автоматизации конструирования и технологической подготовки при производстве изделий методами статического деформирования : учеб. пособие / Ф. В. Гречников, В. И. Дровяников, А. Г. Шляпугин. — Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. — 90 с. : ил.

ISBN 5-7883-0435-0

Рассмотрены основы построения систем автоматизированного конструирования и проектирования технологии при производстве изделий методами статического деформирования. Приведены современные принципы применения средств автоматизации на основных этапах производственного цикла. Даны рекомендации по выбору комплекса средств автоматизации конструкторской и технологической подготовки производства.

Пособие предназначено для студентов, изучающих применение САПР в производственных подразделениях предприятий, связанных с обработкой металлов давлением, и обучающихся по специальностям 150106 и 150201. Подготовлено на кафедре «Обработка металлов давлением».

УДК 658.52.011.56(075)

ББК 34.62

ISBN 5-7883-0435-0

© Гречников Ф. В., Дровяников В. И.,  
Шляпугин А. Г., 2006

© Самарский государственный  
аэрокосмический университет, 2006

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение . . . . .	5
<b>1. Производство изделий методами статического деформирования как объект автоматизации . . . . .</b>	<b>10</b>
1.1. Структурный анализ производственной системы . . . . .	10
1.2. Применение средств автоматизации на этапах производственного цикла . . . . .	13
1.3. Влияние CALS-технологий на эффективность производства . . . . .	15
Вопросы для самоконтроля . . . . .	20
<b>2. Общие сведения об автоматизированном проектировании процессов и объектов ОМД. . . . .</b>	<b>21</b>
2.1. Основы проектирования процессов и объектов ОМД . . . . .	21
2.2. Основные этапы и задачи проектирования . . . . .	22
2.3. Подходы, используемые при автоматизации конструкторской и технологической подготовки производства . . . . .	25
2.3.1. Принципы построения и структура САПР (CAD) . . . . .	25
2.3.2. Понятие об автоматизированных системах технологической подготовки производства (CAM) . . . . .	27
2.3.3. Понятие о системах инженерных расчетов (CAE) . . . . .	28
2.3.4. Основные принципы системной интеграции в CAD/CAM/CAE-системы . . . . .	29
Вопросы для самоконтроля . . . . .	30
<b>3. Выбор комплекса средств автоматизации . . . . .</b>	<b>31</b>
3.1. Понятие о видах обеспечения САПР . . . . .	31
3.2. Выбор состава технических средств . . . . .	31
3.2.1. Требования к компьютеру, используемому в САПР . . . . .	33
3.2.2. Периферийные устройства, используемые в базовой комплектации . . . . .	35
3.3. Программное обеспечение . . . . .	38
3.4. Информационное обеспечение . . . . .	41
3.5. Организационное обеспечение . . . . .	44
3.6. Математическое обеспечение САПР . . . . .	47
3.6.1. Общие понятия, используемые для математического описания объектов автоматизации . . . . .	47
3.6.2. Общий вид математических моделей, используемых в САПР . . . . .	48
3.6.3. Основные этапы создания модели объектов и процессов при осуществлении автоматизации проектирования . . . . .	50

3.6.4. Формализация объектов и процессов. Адекватность модели . . . . .	51
Вопросы для самоконтроля . . . . .	54
<b>4. Автоматизация технологической подготовки производства (САПР ТП). . . . .</b>	<b>56</b>
4.1. Принципы технологической подготовки производства изделий методами статического деформирования . . . . .	56
4.2. Основные направления автоматизации технологической подготовки . . . . .	59
Вопросы для самоконтроля . . . . .	61
<b>5. Автоматизация конструирования . . . . .</b>	<b>63</b>
5.1. Содержание процесса проектирования геометрии объекта . . . . .	63
5.2. Принципы и методы автоматизированного геометрического моделирования . . . . .	69
5.2.1. Понятие геометрической модели . . . . .	70
5.2.2. Каркасное моделирование . . . . .	71
5.2.3. Поверхностное моделирование . . . . .	73
5.2.4. Твердотельное моделирование . . . . .	76
5.2.5. Понятие гибридного моделирования . . . . .	78
Вопросы для самоконтроля . . . . .	78
<b>6. Особенности современных систем САПР, применяемых в инженерной деятельности . . . . .</b>	<b>80</b>
Вопросы для самоконтроля . . . . .	87
<b>Заключение . . . . .</b>	<b>88</b>
<b>Список использованных источников . . . . .</b>	<b>89</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Экономическая деятельность предприятия в условиях современного рынка связана с жесткими требованиями к услугам и товарам. Конкурентная среда обуславливает применение новых подходов к решению производственных вопросов обеспечения конкурентоспособности продукции. В значительной мере это связано с использованием современных компьютерных технологий или, как их еще называют, «CALS-технологий» (Continuous Acquisition and Life cycle Support). CALS-технологии — развивающееся понятие, которое определяет современную методологию ведения бизнеса, построенную на основе новейших информационных технологий и строгого следования международным стандартам в области совместного использования и обмена информацией [1].

Применение компьютеров для решения производственных задач началось еще в эпоху ранних послевоенных моделей универсальных компьютеров, а первые образцы современного оборудования САПР (CAD) существовали уже в середине 50-х годов. Известно, что аббревиатуру CAD впервые использовал основоположник этого научного направления Айвен Сазерленд в своих лекциях, прочитанных в Массачусетском технологическом институте в начале 60-х годов [2].

Широкое распространение САПР обусловлено активным развитием микропроцессорной техники, предоставившей возможности автоматизировать труд инженера по конструированию изделия, инструмента и проектированию технологической подготовки.

Сейчас под термином САПР понимают процесс проектирования с использованием сложных средств машинной графики, поддерживаемых пакетами программного обеспечения, для решения на компьютерах аналитических, квалификационных, экономических и эргономических проблем, связанных с проектной деятельностью.

В отличие от ранее использованного подхода, когда автоматизация осуществлялась локально в непосредственной привязке к плану производства, применение CALS-технологии требует комплексного охвата производственных процессов на всех стадиях и этапах жизненного цикла продукции, включая научные исследо-

вания, проектирование, логистику, поставку продукции потребителю и послепродажное обслуживание продукции.

На предприятиях, производящих изделия с использованием ОМД, в том числе методами статического деформирования, могут использоваться системы, позволяющие автоматизировать основную научно-техническую и инженерную деятельность сотрудников на этапах проектирования и производства. Каждая система позволяет автоматизировать конкретный участок деятельности, а направленность любой системы определяется набором данных, которые она использует.

На различных этапах проектирования и производства изделия используются различные данные:

- геометрические данные — объемные модели и чертежи с допусками;

- характеристики изделия — тактико-технические характеристики (ТТХ), тактико-технические данные (ТТ) и свойства изделия;

- документация — расчеты, технические условия (ТУ), сертификаты, описания, технические руководства, записки;

- данные о составе и конфигурации изделия — состав, комплексность, применимость и др.;

- информация, необходимая для описания процессов проектирования и производства, — технологические задания, маршрутные карты, планы, заявки, договора и т.д.

С каждым типом данных, как правило, работает свой собственный класс автоматизированных систем, но возможно использование одной системой сразу нескольких групп данных.

Особенностью использования CALS-технологий является использование 3D-модели на всех этапах производства изделия. Используемые на различных этапах проектирования и производства автоматизированные системы можно подразделить в соответствии со сложившейся отечественной классификацией на следующие группы:

САПР — системы автоматизированного проектирования, которые включают в себя создание геометрической модели изделия и инженерный анализ ее будущих свойств (например, построение 3D-модели, валка прокатного стана и расчет его прочностных свойств в программе Unigraphics);

АСТПП — автоматизированная система технологической подготовки производства, которая позволяет обеспечить подготовку различных средств, необходимых для осуществления технологического процесса;

АСУТП — автоматизированная система управления технологическими процессами. Основой этого класса систем является управление конкретной производственной единицей, в качестве которой может выступать как отдельный станок или пресс, так и автоматическая поточная линия. АСУТП — это непосредственное управление оборудованием (например, управление прокатным станом с целью получения тонкой полосы с жестким допуском по толщине);

АСУП — автоматизированные системы управления производством — это средства, позволяющие автоматизировать управление производством на уровне взаимодействия различных служб и отделов.

Приведенная выше отечественная классификация уже устарела и неточно отражает современный уровень компьютерных средств, однако она по-прежнему широко распространена и используется на предприятиях нашей страны.

В соответствии с современной западной системой классификации выделяют следующие классы систем проектирования и производства:

CAD (Computer Aided Design) — системы конструкторского проектирования геометрии изделия (Solid Works, Solid Edge, Power Shape и др.);

CAM (Computer Aided Manufacturing) — системы проектирования технологии обработки (Power Mill, Simatron и др.);

CAE (Computer Aided Engineering) — системы автоматизированного инженерного анализа деталей машин и процессов (Ansys, Nastran и др.) [25];

PDM (Product Data Management) — системы автоматизированного управления базами данных об изделии (IMAN, Optegra, Enivia и др.);

Project Management — автоматизированные системы управления процессом проектирования и системы планирования (WorkFlow, DocFlow);

MRP (Material Requirements Planing) — автоматизированные системы управления производством (SAP R/3, BAAN, Галактика и др.).

В соответствии с данной классификацией каждая система может быть использована на различных этапах жизненного цикла изделия (например, CAE-система Ansys может быть использована как для конструкторских расчетов прочностных свойств деталей обшивки фюзеляжа летательного аппарата, так и для расчета технологических параметров процесса изготовления данной обшивки способами листовой штамповки).

Разные классы систем, вне зависимости от системы классификации, используют вариации одних и тех же наборов информации. Для того чтобы вся система автоматизации действовала как единое целое, необходимо обеспечить устойчивый информационный обмен между ее отдельными частями.

Анализ тенденций развития современного промышленного производства показывает, что проблемы достижения высокого качества и конкурентоспособности продукции ОМД невозможно решить без применения современных информационных технологий на основе широкого использования компьютерной техники, локальных и глобальных сетей, позволяющих организовать надежный, происходящий в режиме реального времени обмен информацией, которая должна обладать высокой степенью достоверности и защищенности от внешнего вмешательства.

Внедрение компьютерных технологий в проектирование и производство на предприятии — сложный процесс, связанный с различными сторонами деятельности. В качестве главного аспекта следует отметить необходимость интегрированного подхода к внедрению CALS-технологий, поскольку локальное внедрение новых технологий на отдельных этапах производства приносит сравнительно меньший эффект, чем в случае полной информатизации конструкторско-производственного процесса.

Для выполнения данного требования современное предприятие должно обладать единой интегрированной автоматизированной системой, которая предусматривает наличие общей информационной базы и сети, связывающей все модули, участвующие в процессе. В состав локальных модулей такой системы могут входить средства интерактивной компьютерной графики, компьютерного проектирования и инженерного анализа процессов и объектов, а также автоматизированного ведения технологической подготовки процессов.

Следует отметить, что переход к использованию информационных технологий возможен при наличии определенных предпосылок, а именно:

- соответствующей нормативно-методической документации разного уровня (федерального, отраслевого, предприятия и т.д.);
- рынков апробированных и сертифицированных решений и услуг в области информационных технологий;
- системы подготовки и переподготовки кадров;
- опыта и результатов научно-исследовательских и проектных работ, направленных на изучение и разработку решений в области информационных технологий;

— доступных информационных источников о существующих решениях и ведущихся работах в области информационных технологий.

Применение современных информационных технологий и интегрированного подхода при автоматизации конструкторской и технологической подготовки производства изделий методами статического деформирования обеспечит высокий уровень качества и конкурентоспособность выпускаемой продукции и прогресс данной отрасли в целом.

# 1. ПРОИЗВОДСТВО ИЗДЕЛИЙ МЕТОДАМИ СТАТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ КАК ОБЪЕКТ АВТОМАТИЗАЦИИ

## 1.1. СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ

Предприятие, цех или другое структурное производственное подразделение, выпускающее изделия методами статического деформирования, представляет собой сложную систему, состоящую из комплекса взаимосвязанных элементов, в связи с чем разработка и эксплуатация автоматизированных систем основывается на двух подходах, дополняющих друг друга.

Первый подход основан на принципах блочно-иерархического проектирования сложных систем. В этом случае объект и процесс проектирования делятся на уровни. Верхний уровень отражает общие черты и особенности проектируемой системы, а содержание последующих уровней отражает иерархию производства (рис. 1) [3].

Проектирование в системе ведется не только в целом, но и по отдельным блокам — подсистемам. Иерархию при анализе произ-

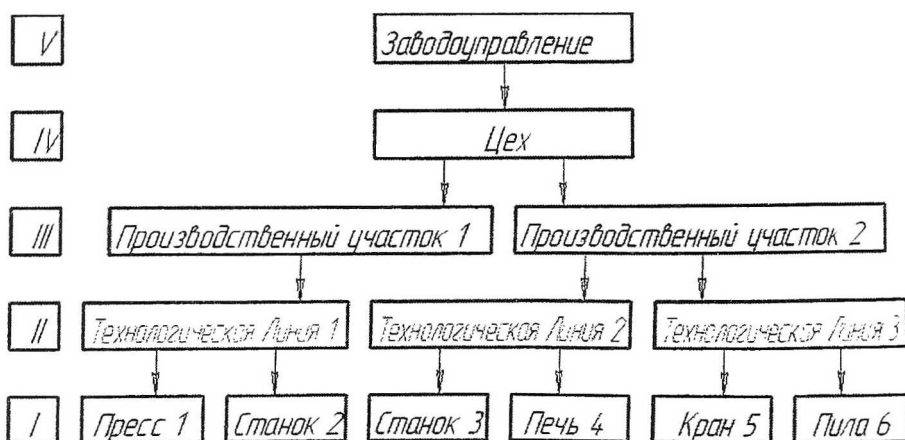


Рис. 1. Структура предприятия ОМД

водственного объекта можно выстроить по нескольким направлениям и признакам. При этом блочно-иерархическая схема технологического процесса изготовления изделия может не совпадать с организационной схемой управления этим процессом.

На рис. 1 приведена пятиуровневая иерархическая структура предприятия ОМД, предложенная автором работы [3].

На первом уровне находятся базовые элементы системы: производственные агрегаты, прессы, нагревательные установки, станки, транспортные устройства, посты управления и контроля и т.п.

На втором уровне рассматриваются технологические линии, транспортные направления, направления сбора, хранения и передачи информации.

На третьем уровне подсистемы второго уровня объединяются в подсистемы, называемые участками. Например, прессовый участок, участки вспомогательного производства, участки складов. Это организационные единицы со своим циклом управленческих, информационных и контрольных функций.

Подсистемами четвертого уровня являются цеха, которые объединяют участки, а также службы и отделы. Это самостоятельные подразделения, обеспечивающие укрупненные функции производства и управления.

На пятом уровне расположена система в целом, то есть предприятие, которое представлено структурными элементами, обеспечивающими общее управление, планирование и организацию производства.

Связи между подсистемами образуют структуру системы. При этом они должны отображать не только иерархическое подчинение, как на рис. 1, но и все многообразие взаимодействий подсистем и элементов в процессе производства изделия, как по вертикали, так и по горизонтали.

Второй подход, используемый разработчиками автоматизированных систем, основан на анализе видов деятельности предприятия и соответствующих им функций, необходимых для проектирования и изготовления изделия. Эти виды деятельности объединяются общим понятием «производственный цикл». Следует отметить то, что понятие «производственный цикл» изделия в дальнейшем мы будем рассматривать как одну из частей «жизненного цикла» изделия, которая непосредственно связана с конструированием и изготовлением изделия.

Схематично этапы производственного цикла выпуска изделий методами статического деформирования представлены на рис. 2.

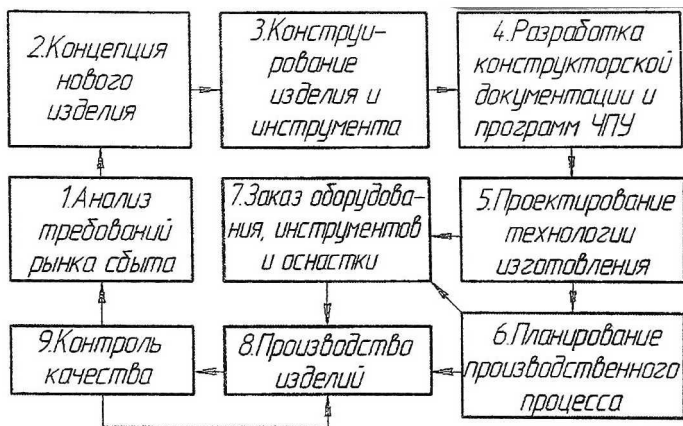


Рис. 2. Этапы производственного цикла

Элементы приведенной схемы имеют следующее содержание.

**Анализ требований рынка сбыта.** Этот элемент определяет требование к содержанию, количеству и качеству продукта и активизирует весь производственный цикл. Включает в себя маркетинговые исследования и маркетинговый мониторинг. Основой для анализа рынка, как правило, являются данные от потребителей рынка.

**Концепция нового изделия.** Требования к изделию могут вырабатываться различными путями. Это, прежде всего, заказ потребителя, который в отдельных случаях сам выполняет функции проектирования. Однако обычно создание нового изделия или усовершенствование имеющегося проводит фирма-производитель, руководствуясь результатами анализа требований потенциальных потребителей и заказчиков.

**Конструирование изделия и инструмента.** Производятся конструкторские разработки самого изделия, а также инструмента и оснастки для его изготовления. Проектируется технологическая схема, определяющая порядок изготовления изделия и используемое оборудование.

**Разработка конструкторской документации и программ ЧПУ.** Этим этапом завершается процесс конструкторской подготовки производства. Результатом является набор документов, позволяющих обеспечить процесс изготовления инструментов для выпуска изделия в соответствии с требованиями заказчика, стандартов и нормативов, и программы для изготовления инструмента на станках с ЧПУ

**Проектирование технологии изготовления.** Представляет собой комплекс работ, связанных с проектированием технологических схем, выбором маршрутов изготовления и оборудования.

**Планирование производственного процесса.** Включает в себя формирование производственных графиков выпуска, планирование материальных потребностей, контроль выполнения заказов и хода производства.

**Заказ материалов, нового оборудования, инструмента и оснастки** осуществляется на основании проектирования технологии и планирования производственного процесса.

**Производство изделий** осуществляется совместно с **контролем качества изделия**, после осуществления которого изделие попадает на рынок к потребителям.

## 1.2. Применение средств автоматизации на этапах производственного цикла

Представление о современном предприятии как о единой производственной системе предполагает соответствующий подход к его автоматизации. Основным базовым модулем при автоматизации выступает бизнес-процесс. Под бизнес-процессом понимается упорядоченное множество технологических и организационных переходов и видов деятельности. Он начинается с одного или нескольких видов деятельности и заканчивается созданием продукции (материальной или интеллектуальной), ориентированной на заказчика или другой бизнес-процесс.

В соответствии с приведенной в разделе 1.1 блочно-иерархической схемой предприятия предполагается, что автоматизация охватывает все его уровни. На нижнем уровне это автоматизированное управление прессами, станками и агрегатами и автоматизированный контроль за ходом производственного процесса и качеством продукции, получаемой на каждом уровне. В роли средств автоматизации на данном уровне выступают автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП), которые представлены SCADA-системами (Supervisory Control and Data Acquisition) и CNC-системами (Computer Numerical Control), управляющими контроллерами оборудования.

Важнейшим элементом современного комплексного подхода является объединение систем проектирования, планирования и управления производством в систему автоматизированного проектирования и автоматизации производственных процессов (САПР/АПП), или интеграция в CAD/CAM/CAE/PDM-системы.

Автоматизированное проектирование — это технология использования вычислительных средств для оказания помощи проектировщику в выработке, модификации, анализе и оптимизации проектных решений. Вычислительная система представляет собой комплекс технических и программных средств.

Автоматизация производственных процессов (АПП) — это применение вычислительных систем для планирования, управления и контроля производственных процессов и операций.

Выделяют два основных направления АПП:

— оперативно-диспетчерское управление, когда ЭВМ непосредственно включается в производственный процесс для осуществления контроля и управления;

— обслуживание производственного процесса, когда ЭВМ производятся необходимые расчеты для обеспечения производственных операций.

В свою очередь, системы оперативно-диспетчерского управления делятся на системы централизованного контроля и системы диспетчерского управления.

Оперативно-диспетчерское управление может предполагать и не прямое взаимодействие ЭВМ и процесса, когда интерфейс между ними реализуется человеком как необходимым звеном управления.

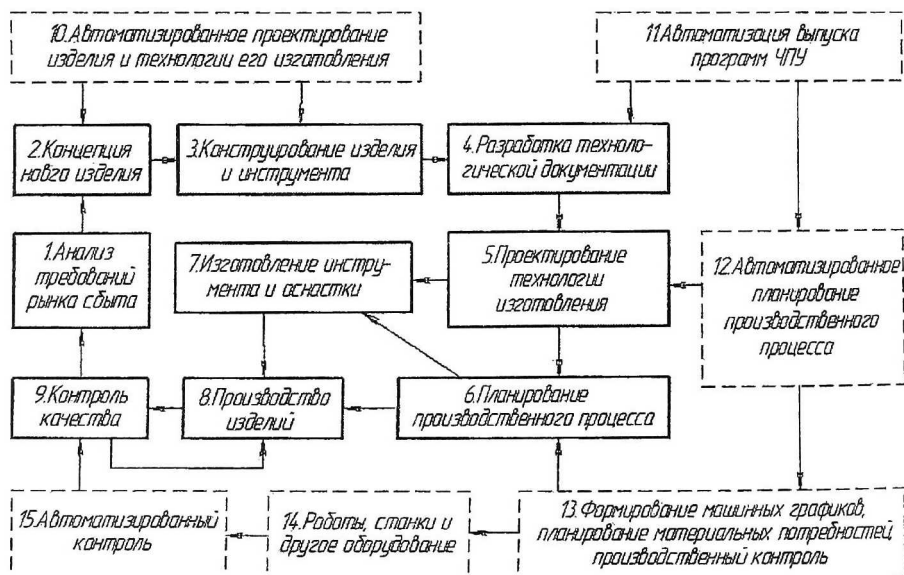


Рис. 3. Производственный цикл при наличии САПР/АПП

САПР/АПП позволяет автоматизировать все этапы производственного цикла и охватывает все виды деятельности по выпуску изделий и функции, связанные с процессами производства.

Производственный цикл при наличии САПР/АПП представлен на рис. 3. Основой для автоматизации служат этапы производственного цикла (показаны непрерывной линией), помимо которых в процессе производства участие принимают средства автоматизации (показаны пунктиром).

Выделяются следующие основные направления автоматизации:

- автоматизированное проектирование изделия, а также инструмента, оснастки и технологии для его изготовления;
- автоматизированное изготовление чертежей, программ для станков с ЧПУ, технологической и другой производственной документации;
- автоматизированное планирование производственного процесса, включающее формирование последовательности технологических операций, разработку нормативов, формирование графиков производства и планирование материальных потребностей;
- автоматизированный контроль за ходом производства и прохождением заказов;
- управление от ЭВМ оборудованием;
- автоматизированный контроль качества.

### **1.3. Влияние CALS-технологий на эффективность производства**

Появление CALS-технологий является важнейшим достижением в области современного производства. Их появление связано с тем, что затраты в сферах конструирования и подготовки производства уже не могли удовлетворять темпам развития экономики и начали сдерживать продвижение новых идей в производство и, следовательно, расширение объема продаж.

Существуют определенные закономерности развития научно-технического прогресса, характеризующиеся следующими количественными показателями развития техники [2]:

- число классов технических систем удваивается в среднем через каждые 10 лет;
- сложность изделий по числу деталей и узлов возрастает в два раза через каждые 10 лет;
- объем научно-технической информации, используемой в конструкторских разработках, удваивается за 8 лет.

Кроме этого в настоящее время в машиностроении определяющими требованиями стало обеспечение высокого качества и опе-

ративного обновления номенклатуры изделий. Внедрение новых технологий позволяет существенно сократить время подготовки к производству, производства и повысить количество изделий.

Для подготовки производства и организации выпуска высококачественной продукции необходимо решить две главные задачи: во-первых, создать и корректно описать геометрию изделия и, во-вторых, обеспечить управление информационными потоками, связывающими различные подразделения на всех этапах производственного цикла с постоянным контролем за осуществлением обмена информацией. Для решения этих задач необходимо устранить много вопросов, связанных с уровнем технической оснащенности, организацией производства и производственной психологией.

Как отмечалось выше, основой взаимодействия на всех этапах производственного цикла является геометрическая модель. Сложность состоит в том, что геометрия изделий постоянно усложняется и чертежи как носители информации уже не удовлетворяют разработчиков и производство, поскольку невозможно с помощью двумерных средств корректно описать трехмерный мир. Изготовление объемных макетов, построенных на основании чертежей, также не дает желаемого результата, потому что первоисточником и носителем геометрической информации по-прежнему является чертеж. Неточности накапливаются при передаче геометрии с этапа на этап производственного цикла и выявляются только в процессе изготовления или сборки изделия, что приводит к полной потере функциональности изделия и необходимости возвращаться к чертежной доске.

Вторая проблема более сложная, поскольку основная информация об изделии рождается на этапе проектирования, когда перед конструктором стоит задача создания качественного графического отображения изделия в предельно сжатые сроки, при этом он должен учитывать большой объем информации об изделии: требования производства, стоимость проектируемого изделия и т.д. Оценка времени, затраченного конструктором на работу, показывает, что основную часть времени проектирования он вынужден тратить на поиски необходимой информации (технологической, экономической и т.п.), которую порой не может получить из-за отсутствия полноценных средств проведения необходимых видов анализа на ранних этапах проектирования или вследствие организационных проблем. Фактически на поиск оптимального варианта конструкции, как правило, не остается времени, что отрицательно сказывается на качестве и стоимости изделия. Из-за отсутствия

возможности своевременного проведения этого анализа ошибка может быть выявлена только во время испытаний. Поэтому важно обеспечить конструктора всей необходимой информацией еще на этапе концептуального проектирования: чем раньше выяснится необходимость внесения изменений, тем дешевле это обойдется производству, что наглядно отражено на рис. 4 [2].

В ходе производства спроектированных ранее объектов описанные проблемы обостряются, и незначительные ошибки могут привести к непоправимым последствиям. Как правило, современные изделия характеризуются наличием большой номенклатуры деталей и объемной оснастки разного назначения, что требует применения десятков технологий. В сфере производства одной из сложных задач является создание программ обработки для станков с ЧПУ (числовым программным управлением), так как рассчитать корректно трехмерную траекторию движения инструмента на основе чертежа детали, имеющей сложные поверхности, без применения компьютера практически невозможно.

Этот комплекс производственных проблем призваны решать технологии, в основе которых заложены CAD/CAM/CAE-системы. Интеграция в CAD/CAM/CAE-системы позволяет объединить три области инженерной деятельности: проектирование (CAD), изготовление (CAM) и инженерный анализ (CAE) на основе компьютерной (математической) модели изделия как единственного точного исходного источника информации об изделии на всех стадиях его создания.

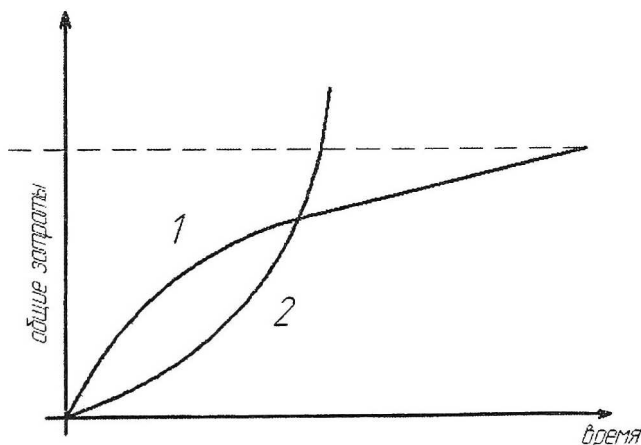


Рис. 4. Потенциальные кривые затрат: 1 — типичная кривая затрат; 2 — влияние на затраты радикального конструкторского изменения

На рис. 5 показаны этапы производственного цикла с использованием CAD/CAM/CAE технологий. Обмен информацией между участниками проектирования идет через математическую модель изделия, поэтому все вносимые изменения будут отражаться в модели, и все участники процесса, как внутри подразделений, так и за их пределами, на разных этапах производственного процесса будут получать всегда только достоверную информацию для выполнения своих задач. В зависимости от сложности изделий компьютерные модели могут по объемам значительно отличаться друг от друга. Например, при проектировании Боинг-777 модель состояла из 3 млн. деталей, общий объем данных составил более 3,5 терабайт [4].

В основу интеграции деятельности большого количества участников проекта могут быть положены различные подходы. Так, компанией EDS — производителем программы Unigraphics — был предложен принцип мастер-модели, который заключается в том, что любая модель детали создается один раз [4]. В дальнейшем для работы различных специалистов используются ассоциативно связанные с мастер-моделью дочерние копии. Так поступают по нескольким причинам, среди которых можно выделить две основные: во-первых, это защита от несанкционированных изменений

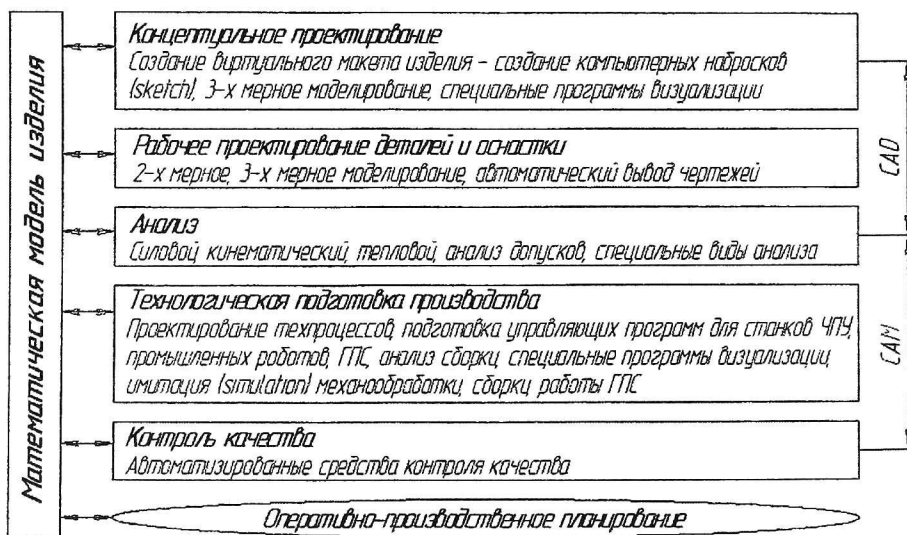


Рис. 5. Этапы производственного цикла с использованием CAD/CAM/CAE-технологий

и, во-вторых, разделение зон ответственности между различными специалистами.

Обеспечение высокого качества продукции достигается за счет использования систем инженерного анализа, которые еще на стадии возникновения идеи о создании объекта производства и принятия предпроектных решений позволяют разработчику произвести целый ряд исследований. CAE-системы позволяют описать условия, в которых создаваемый объект должен функционировать и получить объективную оценку показателей, характеризующих качество и технические возможности будущего изделия при взаимодействии с окружающей средой и от воздействия внешних и внутренних факторов среды и объекта, что очень важно при создании сложных устройств, натурные испытания которых требуют огромных затрат и могут быть осуществлены только после завершения всех стадий проектирования и производства. Ошибки, возникающие при создании таких объектов производства, могут обернуться не только коммерческой неудачей, но и трагическими последствиями. CAE-системы позволяют описывать влияние электромагнитных и температурных полей на изделия и процессы их получения, проводить расчеты прочностных характеристик будущей детали и целого ряда других параметров.

Отдельно можно выделить такие преимущества использования CAD/CAM/CAE-систем, как полнота и безошибочность в решении задач, связанных с созданием сложной оснастки и повышением качества деталей, улучшением качества обработанных поверхностей и точностью изготовления симметричных деталей и деталей с заданными объемами. Создаваемая в процессе CAD проектирования компьютерная трехмерная модель изделия является базой интеграции всех инженерных и производственных подразделений на протяжении всех работ, направленных на создание и поддержание жизненного цикла изделия — от формулирования и анализа требований к изделию до его продажи и поддержки при эксплуатации. Обеспечение более тесной связи между специалистами и подразделениями, ранее работавшими изолированно друг от друга, приводит к пересмотру традиционных методов проектирования и производства, а также к изменению функциональной и организационной структуры предприятия. Глобализация производства, в условиях которого агрегаты изделия могут изготавливаться на разных континентах, требует высокой степени координации всех этапов производственного цикла [4].

## Вопросы для самоконтроля

1. Объясните значение следующих терминов: CALS-технологии, САПР, АСТП, АСУТП, АСУП, CAD, CAM, CAE, PDM, MRP, SCADA, АПП.

2. Когда начали использоваться системы автоматизации конструкторского труда?

3. Какие особенности современной автоматизации вы знаете?

4. Какие данные используются для проектирования изделия?

5. Наличие каких предпосылок необходимо для перехода предприятия к использованию CALS-технологий?

6. Какое влияние на использование информационных технологий оказывает кадровый состав предприятия? Оказывает ли влияние на продвижение информационных технологий возраст сотрудников предприятия?

7. Какое влияние на развитие автоматизации предприятия оказывает мобильность и доступность информационных источников? Каким образом?

8. Какое из средств информации (радио, телевидение, печатные издания, Интернет) вы считаете наиболее информативным? Доступным?

9. Какие подходы, используемые для структурного анализа предприятия, вы знаете? Чем они отличаются друг от друга?

10. Зачем необходимо проводить детальный анализ требований рынка?

11. Какие средства автоматизации используются на этапах разработки концепции изделия и его конструирования? При разработке технологической документации?

12. Что достигается при осуществлении интеграции отдельных систем в CAD/CAM/CAE-системы?

13. Какие средства автоматизации (какие системы) в соответствии с блочно-иерархическим подходом используются на нижнем уровне производственного процесса.

14. Какое влияние CALS-технологии оказывают на эффективность производства?

15. Опишите закономерности развития современной техники.

16. Что является основой взаимодействия средств САПР на всех этапах конструирования и производства?

17. Что дает использование CAD-систем?

18. Какие особенности концептуального проектирования вы знаете?

19. В чем заключается принцип мастер-модели? Какие достоинства использования этого принципа вы знаете?

## **2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПРОЦЕССОВ И ОБЪЕКТОВ ОМД**

### **2.1. ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ И ОБЪЕКТОВ ОМД**

Проектирование процессов и объектов ОМД — это составление комплекса технологической, конструкторской и организационной документации, необходимого для создания системы или объекта на основе принципиальных функциональных и структурных схем.

Проектирование — комплекс работ, включающий в себя три уровня — функциональный, конструкторский и технологический.

Современный подход к проектированию основан на применении ЭВМ на всех этих уровнях.

Как отмечалось ранее, автоматизированное проектирование сложных систем может быть основано на блочно-иерархическом подходе, в соответствии с которым система разбивается на уровни и блоки.

Принцип деления на блоки заключается в том, что разбиение на блоки должно быть таким, чтобы документация на блок любого уровня была обозрима и воспринимаема одним человеком.

Таким образом, более сложные задачи разбиваются на задачи более простые. Производство по выпуску изделий ОМД (завод, цех, служба, участок) также представляет собой иерархию процессов и объектов, которые в дальнейшем рассмотрении будем называть единым термином «объект».

В общем случае объекты делятся на дискретные (технологические схемы обработки изделий, логические схемы) и непрерывные (процессы статического деформирования).

Понятие «объект» включает в себя также изделия и процессы, системы и элементы.

Объект может быть описан с помощью параметров и связей между ними. Структура обобщенного объекта автоматизации представлена на рис. 6.



Рис. 6. Структура объекта автоматизации

Цель проектирования — достигнуть заданного значения показателя эффективности или целевой функции.

Показателями эффективности могут быть производительность, качество, экономичность и т.п. Иногда показатель носит комплексный характер, его правильное формулирование во многом определяет эффективность проектирования сложной системы.

Выходные параметры являются показателями функционирования системы и реагируют на процессы, происходящие в системе и изменения ее структуры.

Внутренние параметры — это параметры элементов, из которых состоит система.

Внешние параметры — это параметры, отражающие воздействие внешней среды на элементы системы.

Если обозначить:

$\bar{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_m)$  — вектор выходных параметров;

$\bar{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  — вектор внешних параметров;

$\bar{Q} = (q_1, q_2, \dots, q_n)$  — вектор внутренних параметров,

то задача проектирования системы сводится к поиску некоторой математической модели проектируемого объекта, которую в общем виде можно представить в виде функциональной зависимости

$$\bar{Y} = F(\bar{X}, \bar{Q})$$

## 2.2. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ И ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Выделяются следующие этапы проектирования:

— научно-исследовательские и проектные работы, в результате которых осуществляется выработка технического предложения на проектирование, определение его концепции и принципиальных схем;

— эскизное проектирование и разработка технического задания, в котором проводится детальная проработка системы объекта, ее функциональной и структурной схем;

— рабочее проектирование, то есть проведение конструкторского и технологического проектирования элементов и системы в целом. Конечным результатом проектирования является технический проект.

По мере выполнения проекта и перехода от этапа к этапу степень детализации растет. Этапы проектирования можно разделить на проектные процедуры. Каждой проектной процедуре соответствует вполне конкретная проектная задача. Например, моделирование процесса или подготовка чертежей. Проектные процедуры можно подразделить на проектные операции, т.е. законченные отдельные действия. Например, в случае моделирования процесса с помощью метода конечных элементов (МКЭ) проектными операциями являются: построение сетки КЭ, приложение граничных условий к сетке КЭ и др. [5, 16].

Процесс проектирования носит итерационный характер, то есть на каждом этапе проектирования возможен возврат к предыдущему этапу.

При этом на каждом из этапов решаются две группы взаимосвязанных задач: анализа и синтеза.

**Анализ систем (объектов)** — это изучение их свойств. В ходе анализа система делится на составные элементы. Анализ может быть одновариантным (исследование поведения объектов в одной точке, например статистический анализ) или многовариантным (исследование объектов в некоторой области).

**Синтез систем (объектов)** — это создание новых вариантов систем из имеющихся элементов. Различают структурный синтез и параметрический синтез.

При поиске наилучшего варианта системы (объекта) ставится задача оптимизации. При этом ведется поиск такого набора параметров  $\bar{X}$  и  $\bar{Q}$ , при котором функция, отражающая поведение системы (объекта), достигает максимума или минимума, то есть стремится к экстремальному значению.

Схема процесса проектирования на любом из иерархических уровней производственной системы представлена на рис. 7.

Вначале происходит синтез варианта структуры модели системы (объекта), затем оценивается эффективность проектного решения и производится его оптимизация на базе созданной структуры модели. Если задачи оптимизации не могут быть достигнуты в рамках принятой структуры модели, то меняется структура модели, если и в этом случае не достигается заданный параметр эффективности, то меняется техническое задание, то есть исходная информация для проектирования.

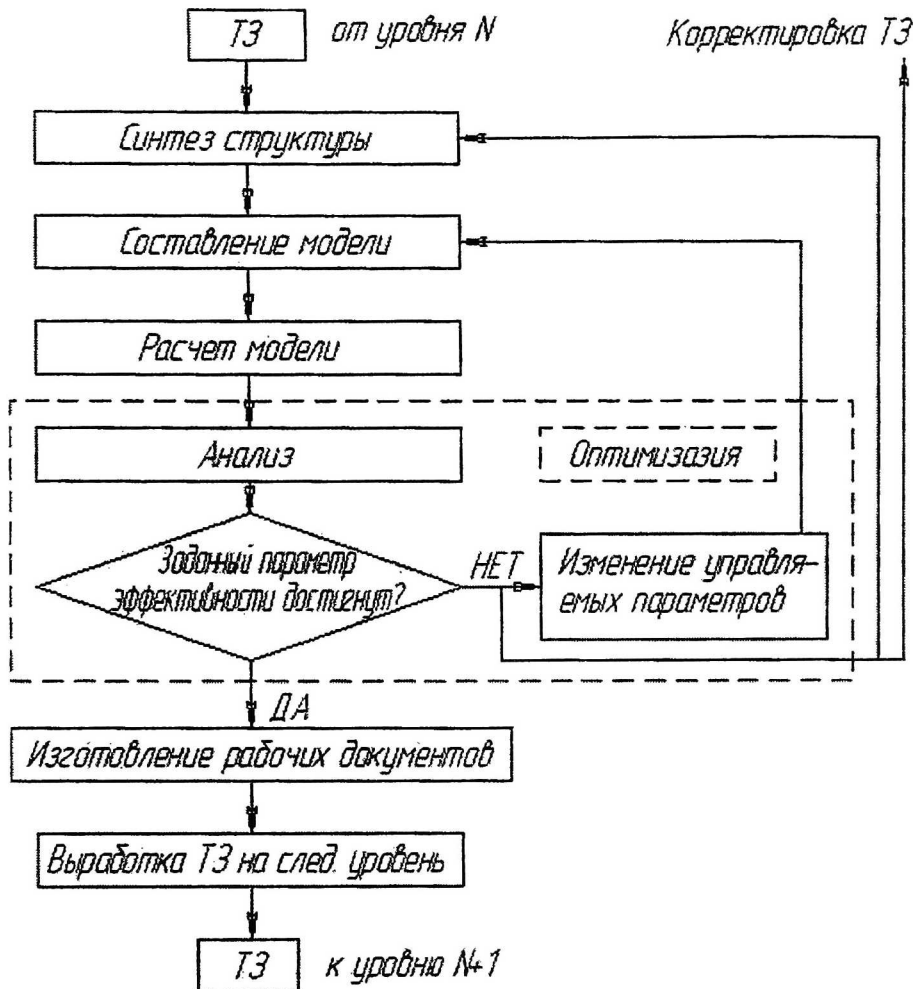


Рис. 7. Схема процесса проектирования элемента производственной системы

В случае успешного достижения заданной эффективности производится проектирование технологической, организационной и конструкторской документации и вырабатывается входная информация — техническое задание (ТЗ) для выполнения проектирования на следующем уровне.

Проектные процедуры по вышеприведенной схеме выполняются многократно.

## 2.3. ПОДХОДЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ КОНСТРУКТОРСКОЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА

### 2.3.1. Принципы построения и структура САПР (САД)

Автоматизация проектирования предполагает использование средств вычислительной техники и компьютерных технологий при рациональном распределении функций между проектировщиком и ЭВМ.

*Система автоматизированного проектирования (САПР)* — комплекс средств автоматизации проектирования, взаимосвязанных и взаимодействующих с пользователями при решении задачи проектирования и функционирования технических систем (объектов).

При создании САПР руководствуются следующими принципами:

- сохранение системного единства;
- обеспечение модульной совместимости;
- типизация принимаемых решений;
- обеспечение возможности дальнейшего развития системы.

Следует учитывать следующие особенности САПР.

САПР — человеко-машинная система, основанная на том, что узловые решения принимает пользователь.

САПР — иерархическая система, которая реализует комплексный подход к автоматизации всех уровней проектирования.

САПР — совокупность информационно согласованных подсистем.

САПР — открытая и развивающаяся система. Функционирование САПР подразумевает ее постоянное совершенствование и расширение.

САПР — специализированная система с максимальным использованием унифицированных модулей.

Структура САПР — это иерархия подсистем и технических средств. Обобщенная структура САПР представлена на рис. 8.

В этой структуре выделяются отдельные функциональные модули. Центральная роль принадлежит модулю преобразования данных об объекте проектирования во внутримашинное представление объекта, т.е. в описание, содержащее элементы математических формулировок.

Применение при производстве изделий методами статического деформирования САПР (САД) обеспечивает ряд преимуществ:

1. *Более быстрое выполнение чертежей.* Конструктор, использующий САПР, может выполнять чертежи в несколько раз быст-

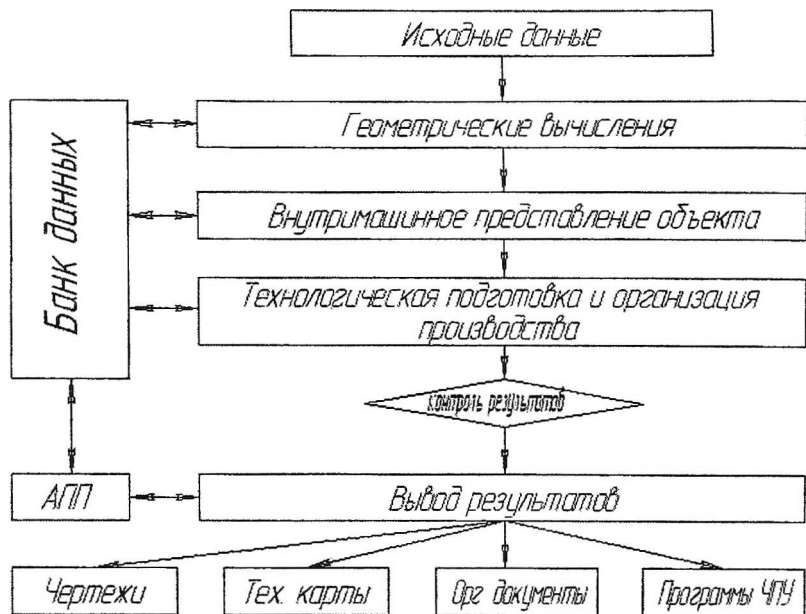


Рис. 8. Обобщенная структура САПР

рее, чем работая за кульманом, что позволяет ускорить процесс проектирования в целом и в более сжатые сроки выпускать продукцию, а также быстрее реагировать на рыночную конъюнктуру.

2. **Повышение точности выполнения чертежей.** Точность чертежа, выполненного вручную, определяется остротой зрения конструктора и толщиной грифеля карандаша. На чертеже, построенном с помощью САПР, место любой точки определено точно, а для более детального просмотра его элементов существуют средства, позволяющие увеличить любую часть данного чертежа. Все чертежи деталей и сборок, выполненные с помощью системы, являются точными [6].

3. **Повышение качества выполнения чертежей.** Качество изображения на обычном чертеже полностью зависит от мастерства конструктора, тогда как плоттер рисует высококачественные линии и тексты независимо от индивидуальных способностей человека, работающего на этой системе.

4. **Возможность многократного использования чертежей.** Все изображения чертежа или его частей можно сохранить для дальнейшей работы, что очень важно, когда в состав чертежа входит ряд компонентов, имеющих одинаковую форму.

5. **Применение эффективных чертежных средств.** Как правило, САПР обладает большим количеством специальных эффективных чертежных средств, которые обычно недоступны при ручном черчении.

6. **Высокий уровень проектирования.** Мощные средства компьютерного моделирования (такие, как метод конечных элементов) освобождают конструктора от использования традиционных неэффективных расчетных методов и позволяют проектировать нестандартные геометрические формы. Эти формы можно быстро модифицировать и оптимизировать, что позволяет снизить общие затраты в такой степени, которая раньше была недостижима, поскольку требовала слишком много времени.

7. **Сокращение затрат на усовершенствование.** Средства имитации и анализа, имеющиеся в системе САПР, позволяют резко сократить затраты времени и денег на тестирование и усовершенствование прототипов объектов, которые являются дорогостоящими этапами процесса проектирования.

8. **Интеграцию проектирования с другими видами деятельности.** Интегрированная вычислительная сеть с высококачественными средствами коммуникации обеспечивает системе САПР более тесное взаимодействие с инженерными подразделениями по сравнению со старой организацией проектирования.

9. **Возможность использования CAE-систем для инженерного анализа.** Это позволяет выполнять энергосиловые, температурные, прочностные расчеты, связанные с изготовлением и эксплуатацией изделия, что резко повышает надежность проектирования.

### **2.3.2. Понятие об автоматизированных системах технологической подготовки производства (САМ)**

Под АСТПП (автоматизированная система технологической подготовки производства), или САМ, понимают процесс проектирования любого автоматизированного производственного процесса. Первые АСТПП появились в конце 40-х—начале 50-х годов, когда начали развиваться средства механической обработки с числовым управлением, которые в конце 50-х—начале 60-х годов получили название ЧПУ (числовое программное управление). Сфера влияния ЧПУ охватывает в настоящее время множество различных автоматизированных производственных процессов, включая фрезерную и токарную обработку, кислородную и лазерную резку, штамповку и контактную сварку.

Таким образом, термин САМ применяется как общее название для всех аналогичных разработок, которые уже существуют и которые только появляются в области программно-управляемой промышленной технологии.

Важными элементами САМ являются:

- средства производственного использования и программирования станков с ЧПУ;
- изготовление и сборка с помощью программно-управляемых роботов;
- гибкие производственные системы;
- средства автоматизированного инспектирования;
- средства автоматизированного тестирования.

В общих чертах эффективность САМ определяется тем, что с ее помощью достигаются следующие результаты:

- увеличивается производительность при меньшем количестве рабочей силы;
- уменьшается вероятность возникновения ошибок и просчетов по вине исполнителя;
- резко расширяется номенклатура выпускаемых изделий;
- снижаются издержки благодаря увеличению эффективности производства;
- становится возможным неоднократно повторять производственные процессы без потери точности;
- повышается качество продукции.

### **2.3.3. Понятие о системах инженерных расчетов (CAE)**

Под системами инженерных расчетов понимают программы, позволяющие исследовать поведение объекта как в процессе изготовления, так и в условиях его будущей работы. Вначале CAE-системы позволяли получить только приближенное описание задачи. В настоящее время использование CAE-систем в большинстве случаев дает возможность получить точный ответ на поставленные задачи при анализе прочностных, температурных, силовых и других характеристик. Так, например, производители программы AutoForm дают 95-ю гарантию на достоверность результатов, полученных в их программе.

К достоинствам CAE-систем можно отнести:

- сокращение сроков доводочных и конструкторских работ;
- возможность получения наиболее оптимального из возможных решений с наименьшими затратами;

- возможность описания таких процессов, которые другими средствами описать невозможно;
- высокое качество полученного решения;
- возможность осуществления проверки принятых решений.

### **2.3.4. Основные принципы системной интеграции в CAD/CAM/CAE-системы**

Системная интеграция в CAD/CAM/CAE-системы является современным перспективным направлением развития автоматизированного проектирования. При такой интеграции, называемой сквозной системой проектирования-изготовления, изделие, спроектированное на компьютере, может быть исследовано инженерными методами и изготовлено на станках с ЧПУ путем передачи данных по компьютерной сети, минуя процесс получения чертежей. Эта технология называется безбумажной.

Интегрированная система CAD/CAM/CAE существенно отличается от систем машинного черчения, поскольку автоматизация чертежных работ является только одной из многих функций производственного процесса. Эти функции охватывают все области деятельности фирмы — от сбыта и учета запросов рынка (через проектирование и производство) до распределения продукции заказчику.

Только обладание системой CAD/CAM/CAE может обеспечить сильную позицию на рынке. Многие пользователи уже осознали, что такая система не только повышает эффективность работы фирмы и улучшает ее продукцию, но и предполагает инновационный подход администрации, которая, по-видимому, будет поощрять и другие нововведения. Кроме того, наличие CAD/CAM/CAE показывает заказчикам, что фирма собирается в будущем стать еще более конкурентоспособной и является надежным партнером на длительную перспективу. Многие фирмы включают в рекламу информацию о своих мощных системах CAD/CAM/CAE, подразумевая при этом, что их продукция лучше благодаря этим системам.

В то же время покупка и внедрение CAD/CAM/CAE-систем в эксплуатацию должны осуществляться поэтапно по следующим причинам:

- эти системы сложны и требуют длительного времени для обучения персонала и промышленного освоения;
- высокая стоимость приводит к замораживанию средств на период обучения и промышленного освоения;

— для эффективного совместного использования САД и САЕ дополнительная работа связанная с предварительной унификацией и заполнением баз данных по используемым материалам и оборудованию;

— для эффективного использования САМ на действующем производстве требуется выполнить ряд мероприятий, например связать станки с компьютером или модернизировать стойки управления старых станков.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Объясните значение следующих терминов: проектирование, объект, выходные параметры, входные параметры, внутренние параметры, целевая функция, задача оптимизации, техническое задание, структура САПР.

2. В чем заключается цель проектирования?

3. Какие основные этапы проектирования вы знаете?

4. В чем принципиальное отличие в представлении объекта на различных этапах проектирования?

5. Что такое задача анализа? Задача синтеза?

6. Почему проектирование носит итерационный характер?

7. Какие принципы построения САД-систем вы знаете?

8. В чем заключается достоинства использования САД-систем?

9. Какие составные элементы включает САМ-системы?

10. Что достигается за счет использования САЕ-систем?

11. Объясните понятие — сквозное проектирование.

12. Почему внедрение информационных технологий на предприятии должно осуществляться поэтапно?

13. Что понимается под системной интеграцией?

14. Что сдерживает внедрение интегральных систем?

## **3. ВЫБОР КОМПЛЕКСА СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ**

### **3.1. ПОНЯТИЕ О ВИДАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ САПР**

Комплекс средств автоматизации — это совокупность компонентов и средств, предназначенных для эффективного выполнения задач автоматизации. Средства и компоненты автоматизации проектирования можно сгруппировать по видам обеспечения САПР. Основные из них следующие [1]:

- техническое обеспечение;
- математическое обеспечение;
- программное обеспечение;
- информационное обеспечение;
- организационное обеспечение.

Состав средств и компонентов САПР весьма разнообразен. Каждая конкретная система автоматизированного проектирования имеет присущий только ей набор программ, аппаратных средств и т.п. Однако имеются общие принципы выбора средств обеспечения, основанные на практическом опыте и научном подходе.

### **3.2. ВЫБОР СОСТАВА ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ**

К техническим (аппаратным) средствам САПР относятся ЭВМ с внешними устройствами, сетевые средства, а также программируемые контроллеры, применяемые для управления технологическими процессами и сбора информации от оборудования.

Производительность САПР определяется ее архитектурой и номенклатурой внешних устройств, взаимодействующих с ЭВМ.

Важнейшими характеристиками ЭВМ являются объем памяти, тактовая частота, а также эксплуатационные характеристики, предоставляемые операционной системой.

При выборе технических средств для САПР учитывают следующие критерии:

- производительность и экономичность первоначальной конфигурации;
- возможность обновления и расширения конфигурации;

— удобство обслуживания.

Существуют также условия выбора аппаратных средств, определяемые технической постановкой задачи. Для решения сложных задач выбирается конфигурация технических средств, состоящая из нескольких ЭВМ, объединенных в сеть, которая в общем случае имеет иерархическую структуру. На нижнем уровне этой структуры находится рабочее место пользователя САПР, а на верхнем — центральный сервер.

Таким образом реализуется локальная вычислительная сеть предприятия, которая позволяет объединять контрольно-измерительные комплексы, устройства управления работой оборудования с автоматизированными рабочими местами конструкторов, технологов и других пользователей. В то же время обеспечивается взаимный оперативный обмен информацией с информационной системой предприятия.

Состав базового элемента технических средств вычислительной системы называется конфигурацией, которая рассматривается как аппаратная и программная. Современные вычислительные комплексы имеют блочно-модульную конструкцию, поэтому аппаратную конфигурацию для реализации конкретной САПР можно собирать из готовых узлов и блоков.

По способу расположения устройств относительно процессора ЭВМ различают внутренние, внешние и периферийные устройства. Внешними устройствами являются, например, устройства ввода-вывода данных [7].

В зависимости от возможностей сетевого доступа к оборудованию, используемому на отдельной ЭВМ, различают локальные и сетевые устройства. Например, на сетевом принтере может осуществляться печать с любого компьютера, соединенного в локальную сеть.

Согласования между отдельными узлами и блоками выполняются с помощью переходных аппаратно-логических устройств, называемых аппаратными интерфейсами. Стандарты на аппаратные интерфейсы называются протоколами.

Определение состава технических средств САПР сводится к выбору базовой аппаратной конфигурации, в которую входит системный блок, монитор и клавиатура, и выбору периферийных устройств.

### 3.2.1. Требования к компьютеру, используемому в САПР

Центральным элементом аппаратных средств является компьютер.

Компьютеры для САПР/АПП классифицируются по различным признакам (рис. 9).

При классификации ЭВМ по назначению выделяют ряд классов.

#### **Большие ЭВМ**

Эти суперкомпьютеры-мэйнфреймы используются для решения сложных задач. На их базе создаются вычислительные центры, куда входят несколько отделов и групп. Например, группы системного программирования, информационного обеспечения, прикладного программирования и т.п.

Эти группы обеспечивают программно-аппаратный интерфейс, пользовательский интерфейс, ведение банка данных. Суперкомпьютер работает, как правило, с несколькими задачами, реализуя принцип разделения.

Суперкомпьютеры очень дороги и используются только в крупных научных центрах.

#### **Мини-ЭВМ**

Эти компьютеры часто используются для управления производственными процессами. Они управляют гибкими производственными линиями и промышленными роботами, собирают информацию о состоянии оборудования и выполнении производственной программы. Мини-ЭВМ являются частью промышленных компьютеров или контроллеров.

#### **Персональные компьютеры (ПК)**

В развитии современных САПР этот тип ЭВМ получил определяющее значение. Начиная с 1999 г. в области ПК начал действовать международный сертификационный стандарт — специфика-

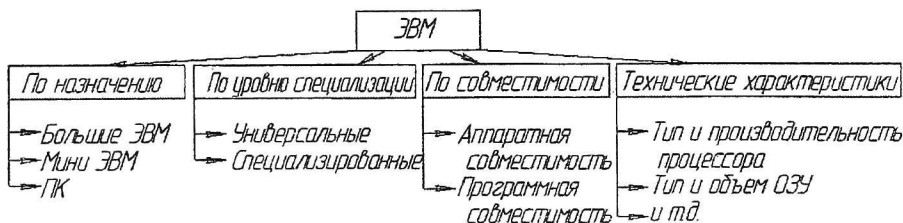


Рис. 9. Классификация ЭВМ по различным признакам

ция РС 99. Он регламентирует принципы классификации ПК и оговаривает минимальные и рекомендуемые требования к каждой из категорий. Большинство ПК, присутствующих на рынке, попадает, согласно данной спецификации, в категорию массовых ПК. Для целевых ПК оговорены минимальные требования к средствам воспроизведения графики. В категории рабочих станций повышены требования к устройствам хранения данных.

Классификация компьютеров ведется также по уровню специализации. Различают универсальные и специализированные ПК. Специализированные ПК, ориентированные на работу с графикой, называют графическими станциями.

Специализированные компьютеры, объединяющие компьютеры предприятия в одну сеть, называют файловыми серверами.

Компьютеры можно классифицировать по совместимости.

Совместимость ПК является важнейшим признаком при выборе аппаратных средств САПР. При этом учитывается:

— аппаратная совместимость или аппаратные платформы (например, IBM PC или Apple Macintosh);

— программная совместимость;

— совместимость на уровне операционной системы (Windows, Linux, Unix);

— совместимость на уровне данных.

Компьютеры можно также классифицировать и по техническим характеристикам, в первую очередь по типу используемого процессора. Тип используемого процессора в значительной мере характеризует технические свойства компьютера.

К основным параметрам процессоров, которые определяют производительность САПР, относится тактовая рабочая частота. Чем выше частота тактов, поступающих на процессор, тем больше команд он может исполнить в единицу времени, тем выше его производительность.

Для простых систем САПР, реализующих двухмерную графику 2D и элементы трехмерной графики 3D, подойдет процессор с частотой более 1 ГГц, для развитых систем САПР рекомендуется процессор Pentium IV с частотой 3 ГГц.

Оперативная память компьютера (RAM — Random Access Memory) является одной из основных характеристик при выборе конфигурации вычислительных средств. Объем памяти определяет возможность размещения тех или иных программных средств и измеряется в мегабайтах.

При выборе базовой конфигурации компьютерной системы для САПР необходимо учитывать ряд рекомендаций:

1. В качестве видеоадаптера (видеокарты) устройства управления экраном предпочтительно применять SVGA, которые обеспечивают воспроизведение до 32 млн. цветов (режим High Color). Так как большинство прикладных программ САПР рассчитаны на работу с разрешением экрана более 1024×768 точек, размер монитора должен быть не менее 17 дюймов. Объем видеопамяти, обеспечивающий работу в полноцветном режиме High Color, должен быть не менее 64 Мбайт. Шаг маски должен быть менее 0,25 мм, а частота регенерации изображения от 70 Гц и более. Класс защиты монитора должен соответствовать стандарту TCO 04.

2. В ряде систем в дополнение к стандартной клавиатуре предусматривается применение специальной клавиатуры, реализующей графические функции.

3. Необходимо наличие дисководов компакт-дисков CD-ROM или многократной записи CD-RW.

4. В зависимости от требований к конкретной САПР, следует обеспечить наличие необходимых интерфейсов.

### **3.2.2. Периферийные устройства, используемые в базовой комплектации**

*Периферийные устройства*, применяемые в САПР, подключаются к интерфейсам. Основные из них следующие:

- устройства ввода данных;
- устройства вывода данных;
- устройства быстрого прототипирования;
- устройства хранения данных;
- устройства обмена данными;
- сетевые средства.

#### ***Устройства ввода данных***

В число устройств ввода данных, применяемых в системах автоматизированного проектирования, входят:

- специальные клавиатуры;
- пэнмаусы — аналог шариковой авторучки с узлом, регистрирующим величину перемещения;
- манипуляторы рычажно-нажимного типа (джойстики);
- сканеры;
- графические планшеты (дигитайзеры);
- цифровые фотокамеры.

Наибольшее применение находят планшетные сканеры, в которых элементы, фиксирующие отраженный от бумаги луч света, располагаются на специальной линейке. Перемещение линейки

ки относительно листа бумаги позволяет зафиксировать и передать в компьютер изображение.

Для применения в САПР разрешающая способность планшетного сканера должна составлять более 1200 точек на дюйм.

Наивысшее разрешение (до 5000 точек на дюйм) обеспечивают барабанные сканеры, но их применение ограничено линейными размерами сканируемого документа.

Ручные сканеры имеют небольшую разрешающую способность (до 300 точек на дюйм) и низкую точность.

Графические планшеты предназначены для ввода художественной графической информации. В основе их работы лежит фиксация перемещения специального пера относительно планшета.

Цифровые фотокамеры воспринимают графические данные с помощью приборов с зарядовой связью, объединенных в прямоугольную матрицу. Разрешение у профессиональных фотокамер выше 1200 точек на дюйм.

### ***Устройства вывода данных***

Эти устройства представляют собой принтеры, плоттеры (графопостроители), устройства быстрого прототипирования.

Принтеры делятся:

- на матричные,
- лазерные,
- светодиодные,
- струйные.

В САПР используются в основном лазерные принтеры, обеспечивающие высокое качество и разрешение печати (свыше 1200 точек на дюйм), и струйные принтеры. Последние нашли широкое применение в цветной печати. Эти принтеры обладают достаточным быстродействием.

Разрешение струйного принтера 600 точек на дюйм, что обеспечивает точную печать черных и цветных линий изображений.

Плоттеры (графопостроители) предназначены для вывода информации, представленной в графической форме.

Плоттеры можно разделить на два класса:

- векторного типа, в которых пишущий узел перемещается по двум или одной координате (в последнем случае по другой координате перемещается носитель информации). Типичные представители — перьевые плоттеры;
- растрового типа, в которых используется принцип создания изображения заполнением поверхности носителя точками красителя. Типичный представитель — струйный плоттер.

Важной проблемой при проектировании САПР является размещение и тип плоттеров, поскольку они определяют легкость, с которой пользователи могут получать один из основных результатов работы САПР — чертеж.

Для получения четких, точных чертежей обычно выбирают перьевые плоттеры. Карандашно-перьевые плоттеры являются развитием перьевых плоттеров. Производительность этих плоттеров такова, что 1 плоттер может обслуживать по сети до 10 рабочих мест конструктора с программой AutoCAD.

По конструктивному исполнению плоттеры бывают двух типов: рулонные и планшетные. На рынке больших плоттеров (формата А0 и А1) доминируют рулонные плоттеры, они более компактны и удобны в работе, а также имеют возможность работать с чертежами очень большой длины. Плоттеры малого формата (А3) обычно планшетные.

### ***Устройства быстрого прототипирования***

Они предназначены для изготовления трехмерных образцов проектируемого изделия. К устройствам быстрого прототипирования относят 3D-плоттеры, лазерные установки для полимеризации силикона, фрезерные станки, работающие по картону или пластмассе.

### ***Устройства хранения данных***

При разработке и эксплуатации САПР обычно возникают ситуации, когда обрабатывается больше данных, чем их можно разместить на жестком диске, также возникает необходимость в целях безопасности обеспечить резервное копирование данных.

Из современных устройств хранения данных используются накопители различных типов, основанные на использовании диодовых носителей с емкостью до 2 Гбайт данных (ZIP, JAZ и др.), а также магнитооптические устройства с большей емкостью. Наиболее перспективной в настоящий момент является технология записи данных на флэш-карты.

### ***Устройства обмена данными***

Современный подход к разработке САПР основан на сетевом принципе, предусматривающем обмен информацией. Устройство, предназначенное для обмена информацией между удаленными компьютерами по каналам связи, называется модемом (МОдулятор + ДЕМОдулятор).

В зависимости от типа канала связи, устройства приема-передачи подразделяют на радиомодемы, кабельные модемы и прочие. Наибольшее распространение нашли модемы, ориентированные на телефонные каналы связи.

Основной параметр модема — его производительность (бит/с).

### **Сетевые средства**

Сетевые средства состоят из аппаратных и программных средств. Аппаратные средства состоят из сетевых плат, соединительного кабеля, конвекторов и репитеров.

В настоящее время существует три основные сетевые программные платформы: NetWare (Novell), NT Server (Microsoft), Warp Server (IBM).

Основным преимуществом NetWare 4.1 является:

- удобная служба каталогов (NetWare Directory Services);
- множество программных продуктов, совместимых с NetWare;
- наличие большого количества документации по NetWare;
- сеть центров обучения фирмы Novell;
- множество специалистов, умеющих работать с Novell NetWare.

Основной недостаток в том, что NetWare не является полноценной операционной системой, такой, как Windows 2000 Server.

## **3.3. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ**

Программное и техническое обеспечение САПР работают в непрерывном взаимодействии. Конечная цель большинства программ — управление аппаратными средствами.

Состав программного обеспечения (ПО) называют программной конфигурацией.

Основным условием надежной работы программной конфигурации системы является обеспечение условия межпрограммного обмена данными.

Выделяются следующие уровни программного обеспечения САПР:

- прикладное,
- служебное,
- системное,
- базовое.

Каждый последующий уровень опирается на ПО предшествующего уровня.

**Базовое программное обеспечение** обеспечивает взаимодействие с аппаратными средствами, которые входят в состав базового оборудования.

**Системное программное обеспечение** позволяет обеспечить взаимодействие с ПО базового уровня и с аппаратными средствами.

От этого уровня зависят эксплуатационные показатели САПР [23].

Например, при подключении нового оборудования необходимо программно обеспечивать взаимодействие драйверных устройств. В ПО системного уровня входят средства обеспечения пользовательского интерфейса. ПО системного уровня является ядром операционной системы.

**Служебный уровень программного обеспечения** содержит специальные программы — утилиты. Они решают задачи автоматизации работ по проверке, наладке и настройке компьютерной системы.

Часть служебного ПО входит в операционную систему, но большая часть подбирается для конкретных целей САПР

К служебным программам относятся:

- диспетчеры файлов,
- средства сжатия данных,
- средства просмотра и воспроизведения,
- средства диагностики,
- средства мониторинга,
- средства коммуникации.

Прикладной уровень программного обеспечения САПР предназначен для выполнения прикладных специальных задач проектирования. Программы этого уровня можно условно разделить на два класса:

а) программы конкретных систем, предназначенные для выполнения программных задач авторского порядка;

б) программы, имеющие высокую степень унификации и предназначенные для выполнения типовых программных задач САПР.

Программы второго класса можно разделить на следующие подклассы:

**Текстовые редакторы.** Обеспечивают ввод и редактирование текстовых данных.

**Текстовые процессоры.** Позволяют формировать текст. При этом возможна работа как с бумажным носителем, так и с электронными документами.

**Графические редакторы** создают и обрабатывают графические изображения. Они, в свою очередь, подразделяются на растровые редакторы (объект представляется в виде комбинации точек, используемых при создании объектов полиграфии) и векторные редакторы. Векторные редакторы используются для чертежно-графических работ. В качестве элементарного объекта используется линия. Каждая линия выражается математической кривой третьего

порядка и представляется математической формулой. Из элементарных объектов создаются примитивы (эллипс, прямоугольник, куб, цилиндр и т.п.), и из них строятся двух- и трехмерные композиции. Наиболее развитые графические редакторы — редакторы трехмерной графики.

**Системы управления базами данных (СУБД).** Программы этого класса выполняют следующие функции:

- создание структуры баз данных (БД),
- заполнение БД,
- обеспечение доступа к данным и их поиску,
- анализ данных и их обработка,
- работа с удаленными и распределенными ресурсами (локальные сети, Internet).

**Электронные таблицы.** Это комплекс хранения и обработки данных. Изменения содержания в одной ячейке меняет содержание данных в других ячейках в соответствии с заданным вычислительным алгоритмом. Удобны для использования в системах бухгалтерского и финансового учета [8, 17].

**Редакторы HTML (Web-редакторы).** Они объединяют возможности текстовых и графических редакторов и предназначены для создания Web-документов.

**Браузеры** — средства просмотра электронных документов разного вида (музыка, речь, видеоматериалы) [23].

**Интегрированные системы делопроизводства** предназначены для автоматизации рабочего места менеджера. Они выполняют следующие функции:

- создание, редактирование и формирование документов;
- электронная почта, телефонная связь;
- мониторинг документооборота;
- диспетчеризация;
- оптимизация деятельности подразделения;
- накопление оперативной и справочной информации.

**Предметно-ориентированные программные средства** (бухгалтерские системы, системы финансового анализа, пакеты прикладной статистики).

**Инструментальные языки и системы программирования.** Из всего многообразия программных продуктов этого класса при проектировании САПР наибольшее применение находят следующие: Паскаль, Си, С++, Java.

Другое вспомогательное программное обеспечение.

### 3.4. ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

*Информационное обеспечение (ИО) САПР* — это совокупность данных, необходимых для выполнения автоматизированного проектирования, представленных в заданной форме [1].

Основной частью ИО является автоматизированный банк данных, который состоит из баз данных и системы управления базами данных.

*База данных (БД)* — это организованная структура, предназначенная для хранения информации. Современные БД хранят не только данные, но и информацию о методах и средствах взаимодействия с пользователем или сетью.

*Система управления базой данных (СУБД)* — это комплекс программных средств, предназначенных для создания структуры БД, ее наполнения, редактирования и визуализации информации.

Основные требования к БД:

— целостность данных, т.е. их непротиворечивость и достоверность;

— универсальность, подразумевающая наличие в БД всех необходимых данных и возможность доступа к ним в процессе решения конкретной задачи;

— открытость БД для внесения в нее новой информации;

— обеспечение дружественного взаимодействия пользователей с БД;

— обеспечение конфиденциальности информации;

— оптимизация организации БД.

Одним из принципов построения САПР является информационная согласованность ее подсистем и программного обеспечения.

Условиями обеспечения такой информационной согласованности является использование программами САПР единой СУБД или программно-согласованных СУБД, а также использование единого внутреннего языка для представления данных.

Условия информационного согласования подсистем САПР достигаются либо созданием единой БД, либо сопряжением нескольких БД с помощью специальных программ, которые перекодируют информацию, приводя ее к требуемому виду.

При выборе СУБД следует учитывать ряд требований:

— программные средства СУБД должны обеспечить создание и ведение БД многими пользователями;

— необходимо получить доступ к интегрированным данным и обеспечить возможность различных представлений о хранимых данных;

- обеспечить работу с БД без знания конкретного способа размещения данных в памяти ЭВМ;
- обеспечить простоту физической реализации БД;
- обеспечить возможность централизованного и децентрализованного управления БД;
- минимизировать избыточность хранимых данных;
- предоставлять пользователю по запросам непротиворечивую информацию;
- обеспечить простоту корректировки, доработки и развития системы;
- обеспечить ведение и совершенствование прикладных программ.

Типовая СУБД реализует два интерфейса:

- между логическими структурами данных в программах и в БД;
- между логической и физической структурами БД.

В САПР необходимо иметь по крайней мере четыре типа баз данных:

- административная БД (АБД),
- технологическая БД (ТБД),
- БД описания объектов проектирования (БДООП),
- рабочая БД (РБД).

АБД — это в общем случае архив, в котором хранятся различные документы, описания чертежей, технологические карты, спецификации. Она заменяет обычный архив и реализует функции накопления, хранения, поиска и репродуцирования документов.

ТБД — содержит данные, относящиеся к описанию технологических процессов, и их поддержание. Например, данные по нормированию ТП, инструкции, стандарты и т.д.

БДООП — содержит все данные, необходимые для полного отражения объекта в памяти ЭВМ. К ним относятся, например, данные о пространственном положении объекта, то есть геометрические и размерные данные.

РБД — содержит временные промежуточные данные, которые вырабатываются в процессе выполнения программных модулей САПР.

Особенностью внедрения банка данных в САПР является управление многоаспектными представлениями технического объекта, реализованными в виде специализированных баз данных.

Централизованный доступ ко всем данным обеспечивает единообразные внутрисистемные потоки информации в САПР.

Большинство СУБД, применяемых в САПР, опираются на единый устоявшийся комплекс основных понятий.

Структура определяет методы занесения данных и хранения их в БД.

Основным объектом БД являются ее таблицы.

Структура БД образуется набором полей и хранящихся в них записей. Записи состоят из данных. Данные имеют различные типы. Основные из них:

- текстовый,
- числовой,
- денежный,
- логический.

К БД предъявляются особые требования с точки зрения безопасности.

Операции изменения структуры БД, создание новых таблиц происходят при сохранении файлов базы данных.

СУБД имеет два режима работы: проектировочный и пользовательский.

Первый режим предназначен для создания или изменения структуры базы и создания ее объектов. Во втором режиме происходит наполнение базы или получение данных из нее.

Кроме таблиц СУБД может содержать другие объекты. Основные из них (на примере СУБД Microsoft Access 2000) [18]:

- запросы, которые служат для извлечения данных из таблиц и предоставления их пользователю в удобном виде;
- формы, предназначенные для ввода данных, а также для их отображения;
- отчеты, которые обеспечивают вывод данных на печатающее устройство;
- страницы, обеспечивающие удаленный доступ через Интернет или корпоративную сеть.

Техническое задание на проектирование базы данных разрабатывает заказчик. И он должен представлять в общих чертах технические возможности основных СУБД.

Затраты на хранение информации и ее передачу в больших САПР могут иметь значительную величину. Поэтому при работе с данными используют специальные приемы и методы их описания перед тем, как размещать их в архивах или передавать по каналам связи.

Существует и обратная задача восстановления данных из предварительно уплотненных архивов. Сжатие данных называется архивацией данных, а программные средства, выполняющие эту операцию, называют архиваторами.

Современные средства архивации называют диспетчерами архивов.

### 3.5. ОРГАНИЗАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

К задачам организационного обеспечения относятся:

- организация процесса разработки и внедрения САПР в соответствии с требованиями нормативов и стандартов;
- организация эффективного функционирования САПР, обеспечение взаимодействия организационных структур.

Разработка, внедрение и последующее функционирование САПР проводятся в соответствии с комплексом взаимосвязанных стандартов и нормативов. Они обеспечивают универсальность используемой автоматизированной системы.

Стандарты в общем виде устанавливают:

- основные содержания работ;
- правила организации работ по созданию, функционированию и развитию системы;
- содержание и правила оформления документации;
- требования и общие положения по разработке компонентов, комплексов средств, типовых методов и решений.

Можно выделить ряд стадий создания и развития САПР.

#### **1. Предпроектные исследования и обоснование создания САПР.**

При этом выполняется обследование (сбор и анализ данных) автоматизируемого объекта, а также разработка и оформление предварительных требований к САПР (технико-экономическое обоснование, тактико-техническое задание, заявка на создание САПР).

#### **2. Составление технического задания.**

Эта стадия включает следующие этапы:

- научно-исследовательские работы;
- разработка технического задания на САПР в целом и на подсистемы;
- составление эскизного проекта.

#### **3. Разработка технического проекта.**

При этом разрабатываются:

- решения по общесистемным вопросам;
- решения по организационному обеспечению, включая разработку плана мероприятий по подготовке и внедрению САПР;
- решения по техническому обеспечению;
- решения по математическому обеспечению;
- решения по информационному обеспечению;
- решения по программному обеспечению.

Выполняется согласование решений по связям, видам обеспечения между собой и разработка общесистемной документации САПР в целом.

Составляется документация на поставляемые компоненты и комплексы средств автоматизации.

#### **4. Разработка рабочей документации.**

Разрабатываются следующие документы:

- рабочая документация по информационному обеспечению;
- рабочая документация по организационному обеспечению;
- программы и программная документация;
- документация на технические средства разового изготовления;
- проектно-сметная документация.

#### **5. Изготовление несерийных компонентов и комплекса средств автоматизации (КСА).**

Выполняются заказы на те компоненты и КСА, которые требуют специального изготовления.

#### **6. Ввод в действие.**

Эта важная стадия разработки САПР содержит следующие основные этапы:

- подготовка организации к вводу САПР, обучение персонала пользователей;
- строительно-монтажные работы;
- комплектация САПР техническими и программными средствами;
- пуско-наладочные работы;
- проведение опытной эксплуатации;
- проведение приемочных испытаний;
- устранение замечаний, выявленных при испытании САПР;
- приемка САПР в промышленную эксплуатацию.

Конкретный состав стадий и этапов работ при создании САПР определен в ТЗ в зависимости от сложности объекта проектирования, уровня и комплексности автоматизации проектирования, а также от степени использования типовых компонентов.

На этапе предпроектного исследования и обоснования создания САПР основной целью является обоснование потребности и технико-экономической целесообразности создания системы и формирование предварительных требований к системе.

Обследование системы — это сбор данных, выявление проблем проектной организации, диагностический анализ системы проектирования, оценка технико-экономической целесообразности создания САПР.

В ходе разработки и оформления предварительных требований к САПР необходимо осуществить:

- выбор цели и критериев создания САПР;

- формирование функциональных требований к САПР;
- определение ограничений на создание САПР (программные, технические, экономические и др.);
- расчет экономических показателей;
- выбор стадий создания САПР;
- установление сроков создания САПР

При разработке технического задания основная цель — выработка концепции и выбор одного из возможных вариантов САПР, а также уточнение, пополнение и детализация требований к САПР.

В ряде случаев перед составлением ТЗ разрабатывают аванс-проект с целью выбора рационального варианта САПР и предварительной проработки структуры создаваемой системы.

Техническое задание на создание САПР содержит следующие основные разделы:

- наименование и область применения;
- основание для создания;
- характеристика объектов проектирования (общее назначение, состав и условия применения);
- цель и назначение (критерии эффективности);
- характеристика процесса проектирования (общие внешние требования к входным и выходным данным);
- требования к САПР в целом и к составу подсистем, а также взаимосвязи с другими системами;
- технико-экономические показатели, затраты и источники экономии;
- стадии и этапы (стадии и этапы работ по стадиям, сроки выполнения и исполнители, объемы работ);
- порядок испытаний и ввода в действие, виды испытаний и требования к ним;
- источники разработки, включая перечень НИР и других документов, используемых при создании САПР.

На этапе технического проекта принимаются окончательные решения, дающие полное представление о создаваемой САПР, в том числе:

- определяют окончательный состав подсистем и схемы взаимодействия между ними и уточняется функциональная схема САПР;
- определяют структуру организационного обеспечения, а также структуру комплекса технических средств;
- разрабатывают алгоритмы проектных процедур;
- определяют структуру информационного обеспечения, разрабатывают банк данных и каталоги данных;

— определяют окончательную структуру программного обеспечения.

При разработке технической документации основной целью является разработка документации, достаточной для изготовления компонентов и комплексов средств САПР.

Комплектность документов должна соответствовать требованиям стандарта.

Спецификацию в общем случае составляют на САПР, подсистему, комплекс и компоненты САПР по видам обеспечения.

Промышленную эксплуатацию специализированной САПР выполняют специальные службы. При общепринятом подходе на предприятиях металлургической отрасли функционируют службы САПР или отделы САПР.

Однако, если исходить из современной концепции комплексной автоматизации предприятия, автоматизация должна сопровождать все элементы инженерной и управленческой деятельности. В данном случае организационные мероприятия сводятся к перестройке работы структурных подразделений предприятия. Например, конструкторского отдела, технологического бюро, планово-диспетчерского отдела и т.п. Единство подхода обеспечивается сетевыми информационными технологиями. В то же время даже при наличии интегрированной системы автоматизации проектирования, планирования и управления на всех уровнях иерархической структуры предприятия имеются специализированные службы САПР, осуществляющие методическое руководство и контроль.

## **3.6. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САПР**

### **3.6.1. Общие понятия, используемые для математического описания объектов автоматизации**

Математическое обеспечение (МО) САПР включает в себя математические модели объектов проектирования, методы и алгоритмы выполнения проектных процедур.

МО САПР можно условно подразделить на две части:

- математические методы и построенные на их основе математические модели, описывающие объекты проектирования;
- формализованное описание технологии автоматизированного проектирования и планирования.

Первая часть МО направлена на формализацию логики, методик и технологии проектирования. МО должно описывать во взаимодействии объект, процесс и средства автоматизации проекти-

рования. При этом на первом этапе необходимо максимально формализовать проектируемый объект.

Под формализацией понимается процесс построения математической модели, в ходе которого осуществляется упрощение реальных характеристик объекта, мало влияющих на цели автоматизации.

Построение математической модели объектов САПР может осуществляться в соответствии с двумя подходами: аналитическим и кибернетическим.

Гносеологический (аналитический) подход позволяет получить математическое описание процесса на основе теоретического анализа физических процессов, происходящих в исследуемом объекте, с учетом особенностей и характеристик обрабатываемого материала. Постановка эксперимента при использовании данного подхода осуществляется только для уточнения и проверки уже построенной модели.

Построенные на основании данного подхода модели являются наиболее полными и используются для решения задач по выяснению механизма явлений, протекающих в объекте. После аппроксимации простыми зависимостями эти модели можно использовать в задачах оптимизации и автоматического управления.

Кибернетический подход базируется на изучении входных и выходных переменных кибернетической системы, которую называют «черным ящиком». «Черный ящик» представляет собой систему связей, недоступную для наблюдения, т.е. неизвестен характер связи входов  $X$  и выходов  $Y$ , участвующих в процессе [24].

Данный подход дает математические модели, которые позволяют получить сведения о поведении объекта, а не описывают его физической сущности. Модели, построенные на основании данного подхода, используются для оптимизации процессов и автоматического управления.

### **3.6.2. Общий вид математических моделей, используемых в САПР**

Математическая модель — это модель, которая в общем случае представляет собой записанный с помощью средств математики алгоритм вычисления вектора выходных параметров при заданных векторах входных и внутренних параметров.

Математические модели, используемые в САПР, предназначены для отображения физических или информационных процессов, протекающих в объектах в ходе технологического процесса или процесса их проектирования. Обычно данные модели пред-

ставляют систему уравнений, описывающих внутренние, входные и выходные параметры.

В самом простом случае структуру математической модели можно представить в виде следующей системы:

$$\begin{cases} \bar{Y} = F(\bar{X}, z) \\ x \leq \bar{X} \end{cases}$$

где  $\bar{Y} = F(\bar{X}, z)$  — целевая функция,  $x \leq \bar{X}$  — ограничения,  $\bar{Y}$  — результат функционирования системы;  $x, z$  — переменные и параметры;  $f$  — функциональная зависимость между параметрами и переменными, определяющая величину  $Y$ .

Данная система содержит одну целевую функцию и одно ограничение. В общем случае математическая модель может содержать несколько целевых функций и ряд ограничений.

**Параметры** — это величины, выбирающиеся произвольно в отличие от переменных, которые принимают только значения, определяемые видом используемой функции, т.е. параметры являются постоянными величинами, не подлежащими изменению. Например, в законе Гука (1)  $E$  является параметром, а  $\sigma$  и  $\varepsilon$  — переменными.

$$\sigma = E \varepsilon \quad , \quad (1)$$

где  $\sigma$  — напряжения,  $E$  — модуль Юнга,  $\varepsilon$  — деформации.

**Переменные** могут быть двух видов — внутренними и внешними. Внешние переменные называют также входными, поскольку они являются результатом воздействия внешних причин. Переменные, возникающие в системе, называются внутренними. Они появляются в результате воздействия внутренних причин и характеризуют состояние или условия, имеющие место в системе. Выходные переменные описывают состояние на выходах системы и характеризуют ее работу [9].

**Функциональные зависимости** описывают связь между переменными и параметрами. Эти соотношения могут быть различными по своей природе и используемому математическому аппарату. По природе исследуемого объекта они могут быть **детерминированными** или **стохастическими**. **Детерминированные соотношения** — это уравнения, устанавливающие зависимость между переменными или параметрами в случае, когда процесс однозначно определен. **Стохастические соотношения** однозначно не определяются с помощью входных параметров и имеют вероятностный характер.

Функциональные зависимости могут быть получены в соответствии с двумя подходами — гносеологическим или информационным. Как правило, стохастические соотношения между входными и выходными переменными характерны для информационного подхода.

При разработке математической модели определяют области ее функционирования и устанавливают ограничения.

**Ограничения** являются математической записью пределов изменения значений переменных. Они могут быть поставлены разработчиком (искусственные ограничения) или определяться природой исследуемых объектов в соответствии с присущими им свойствами (естественные ограничения). Как правило, искусственные ограничения являются техническими требованиями к объекту или процессу.

**Целевая функция**, или **функция критерия**, является отражением целей или задач моделирования. Уравнение целевой функции должно быть как можно более точно увязано с целями разработки. Под критерием понимается конкретная мера оценки, позволяющая давать верное суждение о сути происходящих явлений. Такое определение критерия объясняется двумя причинами. Во-первых, выбор критерия влияет на процесс создания модели и работу с ней. Во-вторых, неправильное определение критерия обычно ведет к неправильным заключениям. Функция критерия (целевая функция) является основой модели. Практически процесс исследования модели и решения задачи оптимизации полностью связан с исследованием целевой функции.

В зависимости от сложности поставленной задачи математическая модель может содержать несколько целевых функций, в этом случае говорят, что задача автоматизации является многокритериальной.

### **3.6.3. Основные этапы создания модели объектов и процессов при осуществлении автоматизации проектирования**

Независимо от того, для решения какой задачи осуществляется формализация, процесс создания математической модели содержит следующие этапы:

- постановка задачи,
- анализ и упрощение данных,
- синтез структуры модели,
- проверка адекватности модели,
- принятие решения о доработке модели или ее использовании.

На *первом этапе* необходимо определить, в чем именно заключается задача САПР и какие результаты необходимо получить за счет изменения каких параметров.

На *втором этапе* исследователю необходимо, на основании анализа элементов, упростить реальный объект или процесс и поставить ограничения. Как правило, при постановке ограничений для установления области исследования пользуются здравым смыслом и практическим инженерным опытом.

На *третьем этапе*, на основании уже формализованных данных, создается сама модель. Этот этап можно разделить на две части. Во-первых, записывается сама модель (система уравнений) без конкретизации числовых значений используемых параметров. Эта часть синтеза структуры математической модели может осуществляться с помощью классического или системного подхода. Во-вторых, осуществляется расчет и уточнение числовых значений ранее записанной модели.

На *четвертом этапе* осуществляется проверка адекватности построенной модели. На этом этапе желательно осуществить постановку эксперимента с целью подтверждения адекватности созданной модели.

На *пятом этапе*, на основании теоретической или экспериментальной проверки, принимается решение о доработке модели или ее использовании. В случае, если для моделирования использовалось несколько различных вариантов моделей, необходимо выбрать наиболее подходящий вариант.

#### **3.6.4. Формализация объектов и процессов. Адекватность модели**

Для того чтобы использовать ЭВМ, необходимо формализовать исходный объект или процесс, т.е. описать его математическими зависимостями. Построение математического описания объекта или процесса называют формализацией процесса. В ходе процесса формализации производится описание исходного объекта с заданной точностью.

Следует заметить то, что даже небольшие объекты реального мира слишком сложны для того, чтобы их можно было полностью описать. Постановка задачи полного, всестороннего описания объекта включает в себя огромное число переменных, параметров, элементов, соотношений, ограничений и т.д. Включение в модель всех этих элементов значительно усложняет процесс поиска решения, пригодного для практического использования.

Следовательно, при создании модели, используемой в САПР, необходимо пренебречь частью реальных характеристик изучаемого объекта и выделить только те из них, которые существенно влияют на объект. При оценке процессов и объектов ОМД следует учитывать правило Паретто, которое справедливо для большинства технических систем. Правило Паретто заключается в том, что на интересующие исследователя характеристики системы оказывает существенное влияние лишь несколько из множества факторов. Как правило, 20 % факторов определяют 80 % интересующих свойств, в то время как оставшиеся 80 % факторов определяют оставшиеся 20 % свойств [9].

В большинстве случаев выбор исследуемых факторов осуществляется на основании уже накопленной информации, опыта и интуиции исследователя. Поэтому процесс создания модели является творческим процессом, который может быть сравнен с искусством.

Любая модель является упрощением представления реального мира. Если это приближение выполнено правильно, то с помощью модели можно получить пригодные для практического использования результаты.

Для того чтобы модель была «похожа» на объект, необходимо, чтобы выполнялись следующие условия. Во-первых, должно существовать однозначное соответствие между элементами модели и элементами представляемого объекта. Во-вторых, должны быть сохранены точные соотношения или взаимодействия между элементами.

При разработке модели систему обычно разбивают на части, т.е. проводят анализ. Анализ необходим для выявления взаимодействия между элементами исследуемого объекта или процесса.

Например, в ходе анализа работы автоматизированного производственного участка листовой штамповки можно выделить отдельные взаимодействующие единицы оборудования (подающее и разматывающее устройство, штамповочный пресс и т.д.) и установить параметры взаимодействия между этими единицами (компенсационный запас материала, частоту включения разматывающего устройства и т.д.) [10]. При необходимости каждую единицу оборудования можно разбить на отдельные механизмы (на штамповочном прессе это может быть механизм подачи, механизм привода ползуна и т.д.) и установить параметры их взаимодействия (например, скорость подачи материала, величину его перемещения и т.д.).

Решая задачу анализа, очень часто приходится сталкиваться с другого рода упрощениями исследуемого объекта. Данное упро-

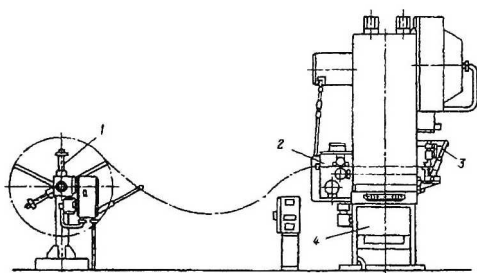


Рис. 10. Автоматизированный участок листовой штамповки:  
 1 — разматывающее устройство; 2 — валковая подача;  
 3 — ножницы для резки отходов; 4 — пресс.

шение, как правило, связано с заменой сложного характера зависимости реального объекта на более простую зависимость, используемую при построении модели.

Еще одна сторона упрощения связана со сравнением порядка различных величин, фигурирующих в модели.

Например, изменение некоторой величины  $y$  с течением времени описывается уравнением вида:

$$y = ax^2 + bx + c ,$$

где  $y$  — исследуемая величина,  $x$  — переменная, определяющая исследуемую величину;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  — параметры уравнения.

В случае, если  $a \ll b$  и  $a \ll c$ , то множителем  $ax^2$ , как правило, можно пренебречь без потери заданной точности.

После того, как отдельные элементы системы были проанализированы и упрощены, необходимо осуществить задачу синтеза модели. Здесь надо учесть, что в ходе синтеза система должна быть собрана корректно, как с точки зрения характера взаимодействия, так и с точки зрения соединения объектов. Другими словами, при передаче информации от одной части системы к другой передача должна осуществляться в одинаковом виде и в правильной последовательности. При этом не должно происходить потерь информации.

Для оценки соответствия модели и исследуемого объекта или процесса существует понятие ее адекватности (достоверности).

Существует несколько аспектов понятия адекватности. Во-первых, сама модель должна быть непротиворечивой и подчиняться законам логики. Во-вторых, достоверность модели во многом зависит от способности правильно описывать исходную ситуацию. Однако ответ на вопрос о том, успешно ли проходит предложенная модель такую проверку, в значительной степени субъективен.

Модель может отражать действительность, при этом она не является действительностью.

При получении достоверного решения нужно помнить о том, что улучшение решения для модели должно быть оправдано прежде всего самой постановкой задачи. В первую очередь это касается точности имеющихся данных. Если исходные данные известны с погрешностью 10 % (большинство задач ОМД), то смысла искать решение с точностью 1 % нет. В этом случае можно утверждать, что «всякое уравнение длиной более двух дюймов, скорее всего, неверно» [9].

При оценке достоверности необходимо помнить также и о затратах времени и ресурсов, связанных с получением более точного решения. Порой менее точное решение, полученное своевременно, может принести больше практической пользы.

Например, для получения быстрого решения при моделировании процесса вытяжки в программе AutoForm (САЕ-система) предусмотрен специальный модуль, который позволяет получить приближенное решение задачи и оценить с технологической точки зрения возможность изготовления изделия. На основании полученного решения у компании, использующей программу AutoForm, есть возможность быстро ответить потенциальному заказчику, сможет ли она изготовить изделие и какова будет его примерная стоимость изготовления.

В заключение еще раз следует подчеркнуть то, что математическая модель представляет собой упрощение реальной системы. При этом, как следует из работы [11], ощутимое упрощение наступает тогда, когда несущественные особенности ситуации отбрасываются и исходная сложная задача сводится к идеализированной задаче, поддающейся математическому анализу.

### Вопросы для самоконтроля

1. Какие виды обеспечения САПР вы знаете?
2. Что включает аппаратное обеспечение САПР?
3. Чем определяется производительность технического обеспечения САПР?
4. Какие характеристики ЭВМ вы знаете?
5. Какие критерии используются для выбора ЭВМ?
6. Что такое конфигурация? Что входит в состав базовой аппаратной конфигурации?
7. Как организуется локальная вычислительная сеть предприятия?

8. Какие признаки классификации ЭВМ вы знаете?
9. Для решения каких задач используются большие ЭВМ, малые ЭВМ, персональные компьютеры?
10. Какие виды совместимости ЭВМ вам известны?
11. Перечислите группы периферийных устройств, используемых в базовой конфигурации.
12. Какие устройства ввода-вывода данных вы знаете?
13. Зачем нужны устройства быстрого прототипирования?
14. Какие уровни программного обеспечения вам известны?
15. Какие виды служебных программ вам известны? Для чего они предназначены?
16. Что включает в себя понятие «информационное обеспечение» (ИО)? Какова структура ИО?
17. Как обеспечить информационную согласованность между программами САПР?
18. Какие требования необходимо учитывать при выборе системы управления базой данных?
19. Какие типы баз данных используются в САПР?
20. Перечислите основные виды данных.
21. Какие задачи решает организационное обеспечение?
22. Перечислите стадии создания и развития САПР.
23. Как изменяется степень деформации задач САПР при переходе от этапа к этапу?
24. Какие условия необходимо учитывать при выработке предварительных требований к САПР?
25. Какие разделы содержат технические задачи?
26. Как осуществляется промышленная эксплуатация САПР? Какие особенности эксплуатации САПР называют CALS-технологиями?
27. Что включает в себя понятие «математическое обеспечение»? Структура математического обеспечения.
28. В соответствии с какими подходами может осуществляться формализация объекта? В чём особенность этих подходов?
29. Приведите пример структуры математической модели. Какие элементы включает математическая модель?
30. В чём отличие между переменными и параметрами? Целевой функцией и функциональной зависимостью? Искусственными и естественными ограничениями?
31. Какие этапы необходимо осуществить для создания модели объекта автоматизации? Что включает каждый из этапов?
32. В чём заключается формализация объекта автоматизации? Как формализация влияет на адекватность модели?

## **4. АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА (САПР ТП)**

### **4.1. ПРИНЦИПЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ МЕТОДАМИ СТАТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ**

Технологическая подготовка производства (ТПП) — это комплекс работ по проектированию новых и совершенствованию действующих технологических процессов, технологической оснастки, расчету материальных и трудовых нормативов и технологическому сопровождению изготавливаемых изделий.

ТПП изделий методами статического деформирования включает в себя следующие основные этапы:

- разработка чертежа изделия и технических условий поставки;
- проектирование технологии изделия;
- расчет параметров обработки;
- техническое нормирование;
- проектирование технологического инструмента и оснастки;
- проектирование процесса изготовления инструмента и оснастки;
- проектирование управляющих программ для станков ЧПУ для изготовления инструмента и оснастки;
- отработка технологии изготовления изделия;
- расчет производственных мощностей;
- планирование стоимости;
- планирование потока материалов;
- расчет технологических нормативов на основные и вспомогательные материалы;
- подготовка программ для программно-управляемого технологического оборудования;
- обеспечение требуемого качества изделий на этапах производственного цикла.

ТПП должна обеспечить выпуск изделий, удовлетворяющих техническим требованиям и требованиям к качеству при условии достижения максимальной прибыли.

Технические требования и требования к качеству изделий определяются ГОСТами или техническими условиями (ТУ) на поставку.

На профили, фасонные трубы, трубы переменного сечения, штамповки и поковки разрабатывается чертеж. В него, кроме геометрических параметров и допусков, входят марки материалов, особые требования, ссылка на стандарт или ТУ.

В ряде случаев на изделия даются специальные технические условия. Например, на современных прессах с системами автоматизированного управления возможно получать продукцию, свойства которой выше ГОСТа.

Разработка ТУ на изделия из новых сплавов или с новыми техническими требованиями ведется на основе специальных исследований с последующей статистической обработкой.

Уже на стадии разработки чертежей новых изделий целесообразно автоматизировать процесс проектирования. Это позволит не только ускорить проектирование, но и, с учетом возможных вариантов технологии, сконструировать изделие более технологичным и экономичным.

Проектирование технологии начинается с назначения маршрута обработки, выбора оборудования, назначения режимов обработки.

Например, по заданному чертежу профиля из сплава Д16 и ТУ выбран следующий перечень технологических операций получения прессованного профиля:

- нагрев слитка,
- прессование,
- обрезка концов профиля,
- закалка,
- правка растяжением,
- резка в меру и отбор образцов,
- контроль качества,
- упаковка и сдача на склад.

При разработке пооперационной технологии технологу приходится делать выбор среди ряда прессов и контейнеров, определять метод прессования (прямой, обратный и т.п.), количество каналов прессования. Необходимо также учесть ограничения по энергосиловым и другим параметрам.

После освоения нового изделия на основе маршрута режимов обработки составляются нормы выработки на всех операциях технологического процесса. Нормы используют для расчета зарплаты, загрузки оборудования и при планировании производства.

В ТПП процессов статического деформирования ОМД часто определяющее значение имеет проектирование инструмента и оснастки.

Традиционное проектирование основано на опыте и интуиции конструктора. При этом много времени и средств тратится на доводку инструмента.

С появлением САПР стали создаваться методики проектирования, в основу которых положены математические, имитационные и экспериментальные модели процессов ОМД.

Процесс изготовления инструмента и оснастки сопровождают технологи инструментальных цехов. Но при изготовлении инструмента на станках с ЧПУ, наряду с подсистемой расчета геометрических параметров инструмента, вводится подсистема подготовки программ для станка с ЧПУ.

Обработка технологии изготовления изделия связана с запуском небольшого количества изделий.

При этом уточняются температурно-скоростные и силовые параметры, а также режимы термообработки. На основе контроля формы изделия производится доводка размеров рабочего инструмента.

Хорошо отлаженная САПР технологического инструмента обеспечивает получение инструмента, практически не требующего доводки.

Поскольку номенклатура изделий в одном цехе достигает нескольких тысяч, то определение возможности выполнения заданной производственной программы является сложной задачей. Для ее решения необходимо иметь библиотеку технологических и нормативных данных обо всех изделиях. Она позволяет оперативно рассчитать производственные мощности и загрузку оборудования и выбрать программу выпуска изделий, обеспечивающую максимальную прибыль.

Расчет нормативов на основные материалы (плановых выходов годного) ведется на основе достигнутого уровня технологии. При этом необходим анализ выполнения выходов годного, который при наличии в портфеле заказов нескольких тысяч изделий наиболее эффективен на базе САПР. САПР необходим и при расчете нормативов на вспомогательные материалы.

Технологическое проектирование ведется последовательно по этапам технологии, из которых формируется процесс изготовления изделий методами статического деформирования: переход, операция, технологический маршрут.

*Технологический переход* — базовый элемент технологической подготовки. Это законченный технологический процесс придания изделию определенной формы. Переход выполняется одними и теми же средствами технологического оснащения при постоянных режимах обработки. Полная характеристика перехода складывается из данных геометрических размеров изделия и инструмента, а также режимов обработки.

*Технологическая операция* — законченная часть технологического процесса, выполняемая на одном оборудовании. Она может объединять несколько переходов.

*Технологический маршрут* — последовательность операций, необходимых для изготовления изделия. Задача проектирования технологического маршрута — установление последовательности операций и переходов и определение их характеристик.

Как правило, для каждого производства ОМД существует определенный набор стандартных переходов и операций. Он создается в процессе работы технолога и называется базой проектных решений. В этом случае при проектировании нового техпроцесса нет необходимости в деталях проектировать каждую операцию. Необходимо лишь определить последовательность операций и выбрать их из типового набора, изменив некоторые параметры в соответствии с конкретным заданием.

Более того, для изделий одного типа может быть составлена общая маршрутная карта и единая технологическая документация.

## 4.2. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ

При разработке систем САПР ТП необходимо, прежде всего, определить круг задач, которые будут решаться с помощью автоматизированной системы. При решении задачи проектирования можно выделить следующие подходы:

- проектирование с использованием стандартных проектных решений;
- проектирование оригинальных технологических процессов с разработкой соответствующих подсистем;
- создание специализированной системы обработки технологической документации.

По методам проектирования САПР ТП делятся на два класса:

- системы, использующие метод заимствования;
- системы, использующие методы синтеза.

Системы первого класса основаны на унификации технологической документации и могут применяться при производстве групповых и типовых ТП ОМД. Эти системы, в свою очередь, делятся на ряд типов.

В системах управления организовано хранение информации по технологическим маршрутам в соответствии с принятой системой классификации. Выбор технологического процесса начинается с поиска прототипа. Если прототипа нет, то разрабатывается новый техпроцесс и помещается в базу данных.

Системы вариантного планирования опираются на предварительную классификацию деталей. Для каждого класса выделяется

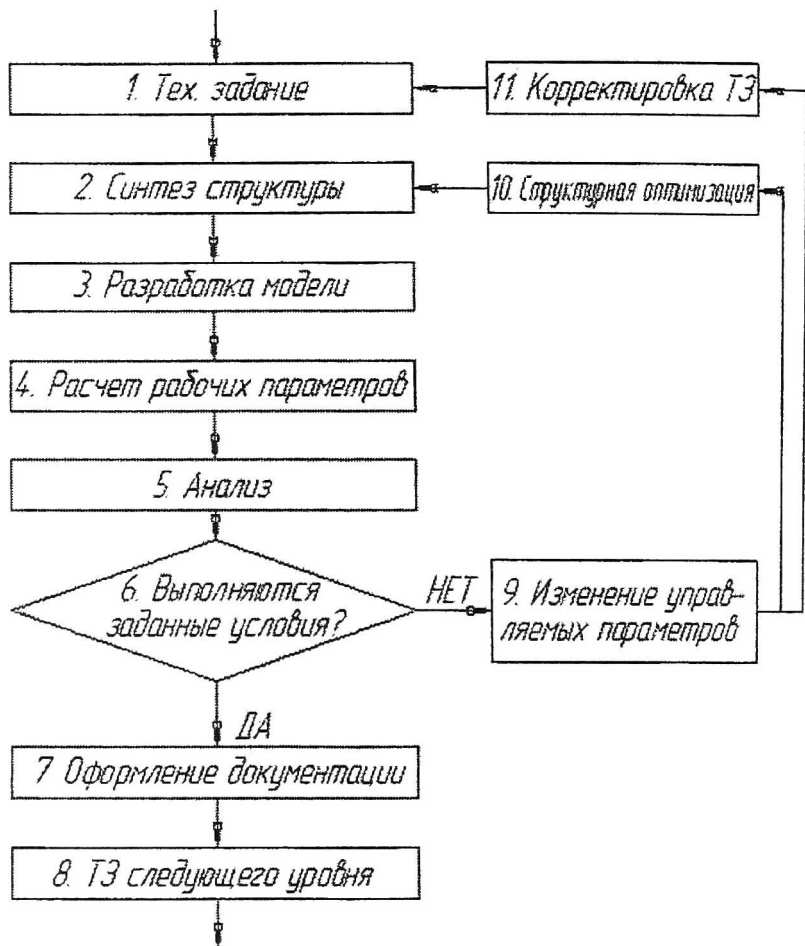


Рис. 11. Алгоритм процесса проектирования технологического процесса ОМД

деталь-представитель, и для нее разрабатывается стандартный технологический процесс. Для конкретных изделий маршрут уточняется. Эти системы эффективны для процессов с ограниченной номенклатурой.

Системы адаптивного планирования более гибкие. Основа этих систем — библиотека технологических процессов. По ходу проектирования детали ведется поиск оптимальных маршрутов обработки. Адаптация технологии идет путем добавления, удаления, изменения технических операций и переходов.

Системы второго класса основаны на разработке техмаршрута для всех типов изделий (новых и стандартных) в соответствии с общими и специфическими данными и правилами технологического проектирования. На основе анализа требований к изделию выбираются возможные пути решения технологических задач, и в соответствии с заданными критериями выбирается метод решения.

В основе автоматизации технологической подготовки лежит формализация деятельности технолога, которая предполагает составление алгоритма процесса проектирования. Причем от формализации задач низшего уровня переходят к формализации задач более высокого уровня. При этом каждую из задач нужно исследовать по следующим признакам:

- возможность формализации,
- возможность эвристических решений,
- наличие внутренних логических связей,
- наличие необходимых входных данных.

Обобщенный алгоритм процесса проектирования ТП статического деформирования ОМД представлен на рис. 11.

Процесс проектирования технологии ведется по уровням: процессы, переходы, операции. На каждом уровне задаются определенные параметры, которых необходимо достигнуть.

Проектирование — итерационный процесс. Если изменениям управляющих параметров не удастся найти оптимального варианта, меняется структура проектируемой системы, а в случае необходимости меняется техническое задание.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Объясните понятие «технологическая подготовка производства».
2. Какие этапы включает ГПП производства, использующего метод статического деформирования?

3. Что определяет технические требования и требования к качеству изделия производимого методами статического деформирования?

4. Как осуществляется проектирование технологического изготовления объекта с помощью методов статического деформирования?

5. В чём отличие использования современных технологий проектирования от технологий проектирования, используемых ранее?

6. Объясните следующие понятия технологического проектирования: технологический переход, технологическая операция, технологический маршрут.

7. Назовите основные направления автоматизации технологической подготовки.

8. Какие методы проектирования САПР ТП вы знаете? В чём их отличие?

9. Что является основой для формализации длительности технологий?

10. Как вы считаете, можно ли полностью заменить труд технолога? Какие сложности возникают при автоматизации труда технолога?

## 5. АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНСТРУИРОВАНИЯ

### 5.1. СОДЕРЖАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГЕОМЕТРИИ ОБЪЕКТА

Проектирование изделий машиностроения — это сложный творческий инженерный процесс создания нового изделия от замысла до воплощения идеи в виде чертежей, макетов (электронных и натуральных), математических моделей.

К геометрической информации об изделии предъявляются самые высокие требования по качеству и точности отображения реального объекта. Качество геометрической информации закладывается конструктором на всех стадиях проектирования, начиная от стадии разработки идеи в эскизах до получения готовых к производству чертежей. В процессе обработки геометрическая информация проходит ряд стадий с целью увязки всех форм и размеров сопрягаемых элементов конструкции, выработки необходимых требований к точности самих деталей и их взаимного расположения, обеспечения технологичности деталей и узлов.

Традиционные методы проектирования связаны с огромным объемом работы по созданию чертежей вручную на кульмане. Это всегда требовало много времени в производственном процессе создания изделий.

С появлением персональных компьютеров основные стадии разработки геометрической информации об изделии сохранились. Но автоматизация существенно сократила время проектирования и повысила точность разработки. С точки зрения контроля за правильностью геометрической информации и ее качеством при использовании САПР придерживаются традиционного порядка проектирования изделий.

Работа инженеров-конструкторов по созданию новых машин опирается на ряд основополагающих принципов и понятий. К основным понятиям, связанным с этапом разработки конструкторской геометрической информации, относят следующие:

— математическая модель поверхности (ММ) — совокупность алгоритмов и числовых данных, необходимых и достаточных для

однозначного определения геометрических параметров любой произвольной точки поверхности;

— теоретический электронный макет (ТЭМ) — объемный (трехмерный) источник геометрической информации, выполненный с применением САД-систем, содержащий геометрические параметры теоретической поверхности изделия, агрегата, части агрегата или отдельного комплектующего изделия. ТЭМ создается на базе ММ, теоретических чертежей, конструктивно-силовых схем, а также другой конструкторской документации, определяющей положение базовых элементов конструкции;

— конструктивный электронный макет (ЭМ) — объемный (трехмерный) источник геометрической информации, выполненный с применением САД-систем и определяющий:

а) геометрические параметры отдельных деталей и подборок;

б) взаиморасположение между собой отдельных деталей и подборок в контексте сборки агрегата в привязке к базовым осям и плоскостям агрегата основного изделия;

в) внешний облик деталей, узлов, агрегатов основного изделия;

— конструктивный компьютерный плаз (КПК) — плоский (двухмерный) источник геометрической и технологической информации, разработанный с применением САД-систем на базе сечений ТЭМ или ЭМ агрегата по действующей на изделие конструкторской документации;

— технологический электронный макет (ТхЭМ) — объемный источник геометрической информации, выполненный технологическими службами с применением систем САД/САМ на базе созданных ТЭМ и ЭМ или по конструкторской документации на изделие;

— электронный макет оснастки (ЭМ оснастки) — объемный источник геометрической информации оснастки и приспособлений, выполненный в САД-системах на базе созданных ТЭМ, ЭМ, ТхЭМ или по конструкторской документации деталей и узлов изделия на основании директивных технологических материалов.

Графическая компьютерная информация о геометрии деталей, узлов и агрегатов изделия создается с применением САД-систем на основе используемых на предприятии баз конструкторской документации. Действующая конструкторская документация (в виде эскизов, чертежей, инструкций, научно-технической документации и т.д.) является основным и первичным носителем информации по изделию. Графическая (теоретическая и конструкторская) компьютерная информация, созданная на основе пер-

вичной (конструкторская документация отдела главного конструктора), является производной от первичной и выполняет роль носителя геометрических параметров и размеров для использования в службах технологической подготовки производства.

Перечень и состав геометрической информации конкретных деталей, узлов и агрегата в целом при запуске изделия, агрегата или отдельных его деталей, основные требования к схеме запуска изделия, агрегата или группы отдельных, сложных и особо ответственных деталей, технические условия и схемы увязки оснастки, изготавливаемой с применением САД технологии, определяются директивными технологическими материалами (ДТМ).

Исходная теоретическая информация по изделию разрабатывается расчетно-конструкторским бюро отдела главного конструктора на основании теоретических чертежей, запущенных отделом главного конструктора в производство, или на основании ММ поверхности, полученной из опытно-конструкторского бюро.

Создание ТЭМ ведется поэтапно. В частности, в авиационной промышленности ТЭМ поверхности содержит в себе как теоретические, так и практические поверхности люков, облицовок, створок, обтекателей и т.д., которые заданы конструктивными чертежами, связанными и не связанными с теоретическими поверхностями основного изделия.

ТЭМ конструктивно-силовой схемы самолета, кроме рабочих поверхностей, содержит плоскость строительной горизонтали и базовые оси, плоскости узлов и агрегатов, плоскости продольных и поперечных элементов, задающие плоскости стрингетов и поверхности неплоских осей конструктивных элементов. Параллельно осуществляется нанесение обреза обшивок, люков, створок и т.д. на теоретическую поверхность после конструкторской проработки документации.

Утвержденный ТЭМ помещается в базу данных и является первичным источником теоретической информации для подразделений-пользователей при разработке ЭМ деталей, узлов и агрегатов, при проектировании обводообразующих элементов агрегатно-сборочной оснастки, макетной и рабочей оснастки на обшивки и при подготовке программ для станков с ЧПУ. ТЭМ отдельных агрегатов с единой системой координат представляют собой ТЭМ изделия в целом.

На базе конструктивно-силовой схемы и после проработки конструкторской документации разрабатываются схемы сечений КПК узлов и агрегатов, в которых задаются положения и обозначения необходимых КПК. Схема сечений после помещения в базу

данных является источником справочной информации для подразделений — пользователей КПК.

При необходимости проверки кинематики служба главного конструктора разрабатывает, согласно кинематическим схемам или в соответствии с действующей конструкторской документацией, кинематический ЭМ в виде теоретического электронного макета кинематики (ТЭМк) или в виде сборки деталей или фрагментов деталей, входящих в кинематическую цепь (ЭМк). В зависимости от цели создания, ЭМ содержит в себе информацию, определяющую:

- размеры взаиморасположенных базовых точек и осей звеньев кинематических пар согласно кинематическим схемам;
- размеры и расположение поверхностей, образованных деталями при сложном кинематическом движении;
- зазоры между подвижными и неподвижными элементами конструкции.

Целью разработки объемной графической компьютерной информации является объемная увязка конструкции агрегатов. Твёрдотельные параметризованные мастер-модели деталей и сборок используются для отработки конструкции на технологичность и генерации программ обработки на станках с ЧПУ, получения ассоциативной конструкторской документации и проектирования оснастки для изготовления и сборки деталей и агрегатов изделия.

Объемная графическая информация на детали, узлы и агрегаты основного изделия разрабатывается в следующих видах:

- электронный макет деталей, узлов и агрегатов (ЭМ);
- электронный макет покупного комплектуемого изделия (ЭМпки);
- электронный макет стандартных деталей и сборок (ЭМсдс);
- технологический электронный макет (ТхЭМ).

ЭМ деталей, узлов и агрегатов основного изделия создается конструкторскими бюро на базе ТЭМ по конструкторской документации, запущенной в производство и служит для проведения объемной увязки, уточнения конструкторской документации по ее результатам, является базой для проектирования оснастки, отработки конструкции изделия на технологичность и разработки управляющих программ для станков с ЧПУ.

После разработки конструкторской документации подразделения службы подготовки производства должны передать отделу главного конструктора свои замечания и предложения на изменение конструкции по результатам технологической проработки деталей и узлов. Компьютерная технологическая проработка изделий может проводиться разными CAD/CAM-системами. Одним из

инструментов обработки сборочных единиц на технологичность может быть метод индивидуального соответствия изделия и сборочного оборудования. Метод основан на решении задачи о геометрической совместимости двух трехмерных геометрических объектов (один — это модель-конструкция, другой — модель технологического оборудования) и автоматической ориентации ММ оборудования относительно ММ изделия в зоне соединения. При этом максимально автоматизируется процесс определения возможности доступа технологического оборудования в зону выполнения механических соединений. Характерной особенностью метода является то, что за счет индивидуального моделирования взаимодействующих объектов и исключения группирования их по классификационным группам повышается вероятность выбора технологического оборудования, пригодного для осуществления технологического процесса. Вопрос о доступе технологического оборудования в зону соединения может быть решен без визуализации конструкции изделия или оборудования, что даст возможность исключить влияние на конструктора решения технологических задач при проектировании изделия. Оперативная технологическая проработка изделия требует использования и ЭМпки.

ЭМпки создается по габаритным размерам покупных изделий в виде отдельных блоков или сборок деталей или их фрагментов, в зависимости от задания. ЭМпки содержит в себе информацию, определяющую внешний облик покупного изделия, габаритные и присоединительные размеры. ЭМпки служит для увязки конструкции основного и покупного изделий по местам установки и определения (или отработки) требуемых зазоров между покупным изделием и каркасом. ЭМсдс создается и запускается в производство отделом стандартизации по обезличенным чертежам, действующим ГОСТам, ОСТАм и другим стандартам.

ЭМсдс разрабатывается в виде базы данных (БД) стандартных деталей с собственной системой поиска, позволяющей производить выборку по определенным параметрам деталей при включении в сборку узла и агрегата.

ТхЭМ выполняется подразделениями службы подготовки производства и является носителем геометрических параметров заготовок литых деталей и деталей, полученных методами статического деформирования. ТхЭМ разрабатывается на основании ТЭМ и ЭМ по конструкторской документации основного изделия и по чертежам заготовок с учетом припусков на обработку, штамповочных уклонов, усадки материала, других технологических требований. ТхЭМ детали или узла может быть присвоен статус ЭМ,

если ТхЭМ выполнен в полном объеме по правилам и требованиям к созданию ЭМ и соответствует конструкторской документации детали или узла.

Двухмерная геометрическая информация разрабатывается по конструкторской документации основного изделия на базе ТЭМ и ЭМ в виде:

— компьютерных конструктивных плазов (КПК);

— компьютерных чертежей, ассоциативно связанных с ЭМ деталей и узлов изделия;

— эскизов деталей и узлов.

Необходимость разработки КПК определяется потребностью подразделений-пользователей в плоской геометрической информации для изготовления и контроля деталей и оснастки с использованием шаблонов и эталонов или экономической целесообразностью создания ЭМ для определенных конструкций. К ним относятся плоские узлы, типа стенок шпангоутов, панелей, перегородок, диафрагм и т.д., а также детали оборудования. Данные типы плоских конструкций могут выполняться как:

— листовые клепанные, соединенные болтами или сваркой;

— собранные из механически обработанных деталей;

— смешанного типа.

Кроме того, двухмерная геометрическая информация разрабатывается на механообрабатываемые в развертке панели агрегатов, например для крыла, оперения и фюзеляжа самолетов.

КПК разрабатываются по ТЭМ, ЭМ и действующей конструкторской документации отделом главного конструктора в соответствии со схемой сечений КПК в объеме требований директивных технологических материалов. Начало выполнения работ по созданию плоских геометрических источников совпадает с этапом объемной привязки и созданием ЭМ каркаса агрегата, состоящего из основных силовых элементов. Исходной информацией для разработки КПК являются расчетные сечения ТЭМ с осями конструктивных элементов, значениями углов подхода продольных элементов к плоскости расчерчиваемого узла и конструктивные сечения ЭМ.

Результатами расчетов, выполняемых по ТЭМ, является теоретический файл расчетного сечения и файл ГБД расчетного сечения. После контроля и утверждения КПК помещается в БД и является источником для рабочих и схемных шаблонов и эталонов. Окончательно рассчитанные и проконтролированные геометрические данные, предназначенные для передачи в БД, должны соответствовать требованиям, изложенным в нормативных документах подразделений-разработчиков.

После получения сопроводительных документов администратор БД должен:

- поместить информацию в БД и защитить её от несанкционированного изменения, установив права «только для чтения»;
- выполнить страховую архивацию данных в течение трех дней;
- после выполнения архивации удалить исходные данные из каталога ответственного исполнителя-разработчика.

Право на редактирование ТЗМ имеют только конструкторы расчетно-конструкторского бюро отдела главного конструктора, ЭМ — конструктора конструкторского бюро объемного моделирования отдела главного конструктора.

Редактирование ТЭМ и ЭМ без изменения конструкторской документации производится:

- при внесении дополнительной информации и в других случаях, требующих изменения КД по обоснованному требованию пользователей;

- при обнаружении ошибок. При этом изменения выполняются в ТЭМ по оформленному решению отдела главного конструктора и в ЭМ по документу отдела главного конструктора, оформляемому дополнительно в каждом конкретном случае, в установленном отделом главного конструктора порядке.

После оформления сопроводительных документов (паспортов) и помещения данных в БД допускается их использование в производстве.

При необходимости привлечения данных в качестве источника для решения каких-либо производственных вопросов пользователь имеет возможность:

- просмотреть данные и провести необходимые изменения;
- вывести на печатающее устройство любой вид, проекцию, сечение;
- применять данные для создания компьютерного чертежа;
- создать копию данных под своим именем для дальнейшей работы.

## **5.2. ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Для решения любой задачи статического деформирования ОМД на компьютере необходимо прежде всего создать геометрическую модель, описывающую пространственные характеристики моделируемого объекта.

### 5.2.1. Понятие геометрической модели

*Геометрическая модель* — математическое представление геометрической формы, хранимое в памяти компьютера. Различают двухмерные (2D-модели или чертежи) и трехмерные (3D-модели) модели. Аналогично подразделяются и системы, обеспечивающие плоское и объемное проектирование. Как правило, современные 3D-системы проектирования имеют встроенные 2D-системы, необходимые для изготовления плоских чертежей [13, 14].

Элементы, из которых состоит трехмерная модель, образуют в ней вершины, ребра, грани (рис. 12).

*Вершина* — точка, являющаяся окончанием (началом) ребра.

*Ребро* — прямая или кривая, разделяющая две смежные грани модели.

*Грань* — гладкая часть поверхности модели. Гладкая поверхность модели может состоять из нескольких граней.

Методы трехмерного моделирования, предоставляемые системами САПР, делятся на три категории: каркасное, поверхностное (полигональное) и твердотельное (сплошное) моделирование [2].

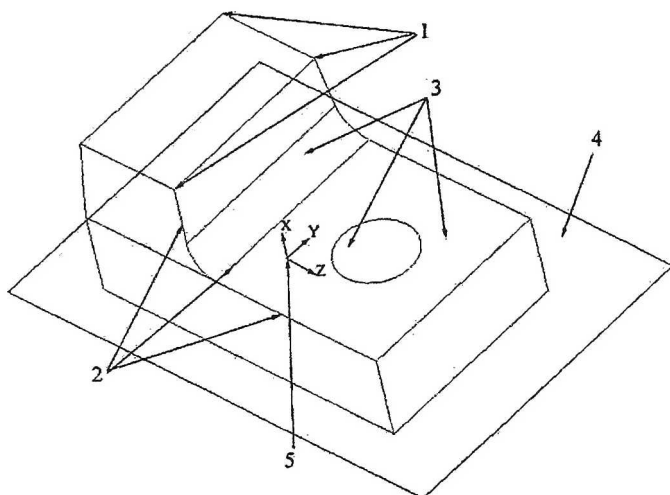


Рис. 12. Элементы трехмерной модели: 1 — вершины; 2 — грани; 3 — поверхности; 4 — базовая плоскость; 5 — начало координат

### 5.2.2. Каркасное моделирование

Процесс каркасного моделирования является моделированием самого низкого уровня. Каркасная модель полностью описывается с помощью линий и точек, поэтому требует гораздо меньше компьютерной памяти, чем остальные модели, и пригодна для решения наиболее простых задач. Каркасное моделирование широко используется для имитации траектории движения инструмента, выполняющего несложные операции обработки детали.

Каркасные модели имеют большое количество ограничений. Рассмотрим их более подробно [2, 12—14].

Перечислим недостатки каркасных моделей, накладывающих на них ограничения.

**Неоднозначность.** Серьезным недостатком рассматриваемых моделей является сложность зрительного восприятия видимого изображения на экране монитора. Например, на рис. 13 трехмерное изображение (рис. 13, а) можно интерпретировать и как вид сверху (рис. 13, б), и как вид снизу (рис. 13, в), что сильно усложняет работу конструктора. В отличие от твердотельной модели, в каркасной модели нельзя отличить «видимые» грани геометрической формы от «скрытых» (невидимых).

**Сложность распознавания криволинейных поверхностей.** Боковые поверхности цилиндрических тел не имеют ребер, хотя на изображении имеются силуэты мнимых ребер, которые ограничивают поверхности. Расположение этих «ребер» в пространстве меняется в зависимости от направления вида (точки зрения), поэтому такие силуэты не являются элементами каркасной модели.

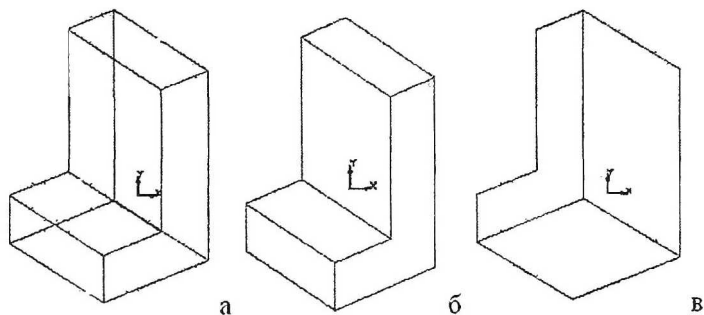


Рис. 13. Неоднозначность каркасной модели



### 5.2.3. Поверхностное моделирование

Поверхностная модель определяется с помощью точек, линий и поверхностей, поэтому ее можно рассматривать как модель более высокого уровня.

Поверхностное моделирование дает следующие преимущества по сравнению с каркасным [2]:

- способность распознавать и изображать сложные криволинейные поверхности;
- способность распознавать грани и, таким образом, обеспечивать средство получения тоновых трехмерных изображений;
- способность распознавать особые построения на поверхностях, например отверстия;
- возможность получения более качественного, чем при каркасном моделировании, изображения.

Поскольку в ходе поверхностного моделирования мы имеем дело в основном с поверхностями, рассмотрим основные виды поверхностей и способы их получения.

Применительно к поверхностному моделированию можно выделить следующие типы поверхностей [2]:

*Кинематические поверхности.* Это поверхности, которые можно получить движением отрезка прямой в указанном направлении на заданную величину (рис. 15, а) или по другому отрезку. Полученную в первом случае поверхность называют поверхностью выдавливания, а во втором — кинематической поверхностью. Заме-

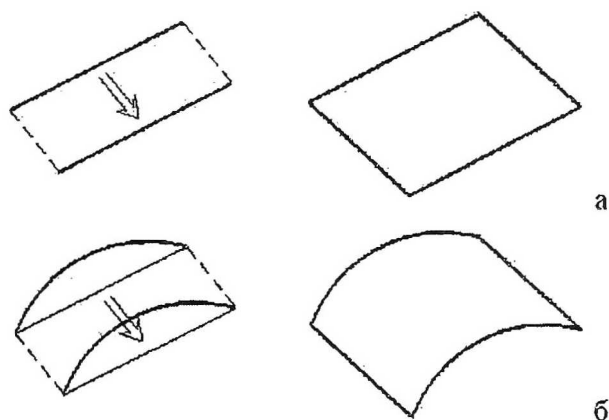


Рис. 15. Построение базовых геометрических поверхностей:  
а — поверхность выдавливания; б — кинематическая поверхность

нив отрезок прямой на дугу, можно получить цилиндрическую поверхность (рис. 15, б).

Особенностью систем поверхностного моделирования является то, что они не распознают такие построения, как твердые объемные тела. Они представляют такие объекты, как поверхности, соединенные друг с другом в пространстве и ограничивающие «пустой» объем.

На рис. 16 показана кинематическая поверхностная модель, которая на экране представлена виде объемного тела, в то время как в компьютерном представлении модель состоит из пяти поверхностей.

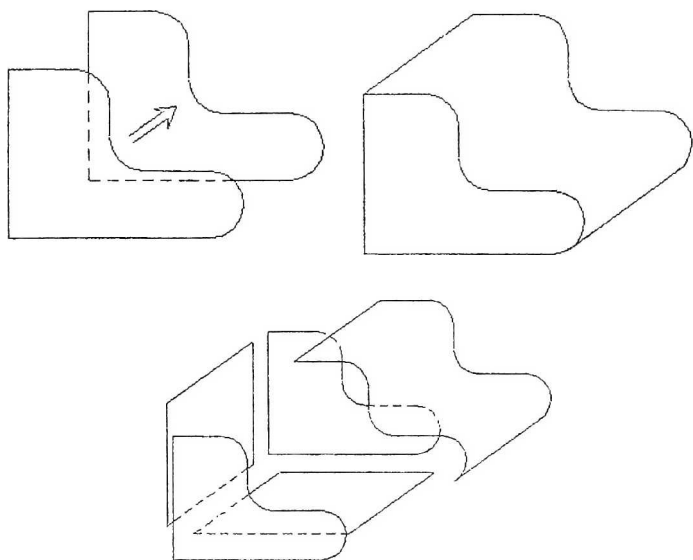


Рис. 16. Визуальное и компьютерное представление поверхностной модели

**Поверхности вращения** могут быть получены по команде, создающей поверхность вращением плоского контура вокруг определенной оси. При этом необходимо помнить, что создается не объемное тело, а генерируется только поверхность (рис. 17).

**Поверхности сопряжений и пересечений.** Такие поверхности получаются при создании плавных переходов в местах соединения двух различных по форме элементов. Возможность построения плавного сопряжения одной поверхности с другой является наиболее

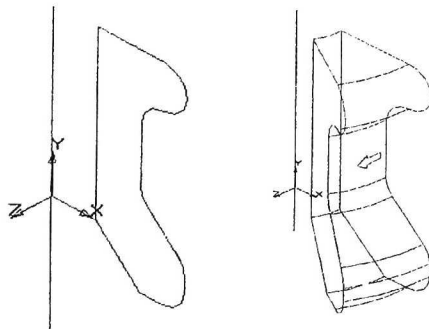


Рис. 17. Создание поверхности вращения

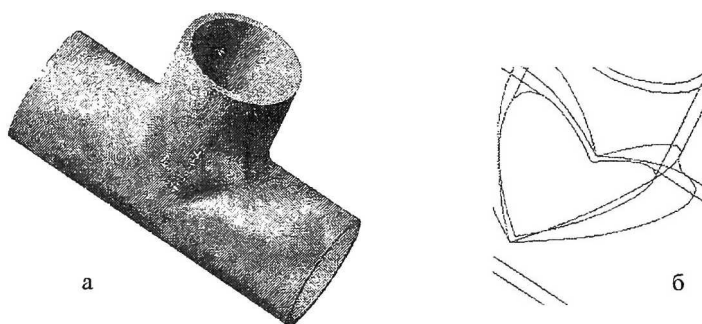


Рис. 18. Поверхности сопряжения:  
а — изготавливаемая деталь; б — поверхность сопряжения

мощным, часто используемым на практике средством поверхностного моделирования.

На рис. 18 показаны поверхности сопряжения (внешняя и внутренняя), построенные на пересечении двух элементов детали (поверхность сопряжения — радиусный участок детали в переходе от основного участка трубы к ответвлению).

**Аналитические поверхности.** Каждая такая поверхность определяется одним математическим уравнением с неизвестными  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  (эти неизвестные обозначают искомые координаты поверхности в координатном пространстве). Для изображения аналитической поверхности необходимо знать математическое уравнение, которым оно описывается.

**Скульптурные поверхности** (поверхности «свободных форм» или «произвольные» поверхности) нельзя описать одним математиче-

ским уравнением. В большинстве случаев образы этих поверхностей создаются путем построения криволинейных продольных образующих, связывающих заданные точки трехмерного пространства (рис. 19).

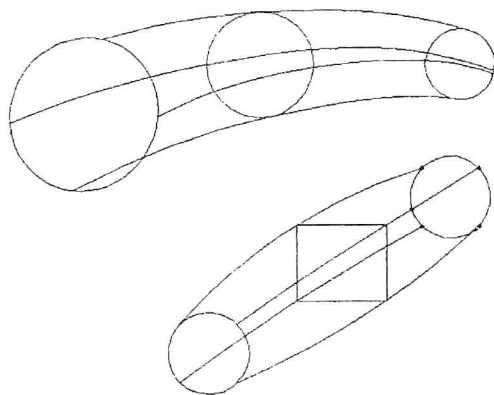


Рис. 19. Скульптурные поверхности

Несмотря на то, что методы поверхностного моделирования обладают многими достоинствами, существует ряд ограничений на их использование. К подобным ограничениям можно отнести:

- неоднозначность при попытке моделирования реального твердого тела;
- недостаточная точность представления некоторых поверхностных моделей для обеспечения надежных данных о трехмерных объемных телах;
- сложность процедур удаления скрытых линий и отображения внутренних областей.

#### 5.2.4. Твердотельное моделирование

Твердотельная модель описывается в терминах того трехмерного объема, который занимает определяемое ею тело. Твердотельное моделирование дает полное однозначное описание трехмерной геометрической формы.

Достоинством твердотельных моделей являются [12—14]:

- полное определение объемной формы с возможностью разграничения внешней и внутренней областей объекта, что позволяет обнаружить нежелательные взаимовлияния компонентов;

- обеспечение автоматического удаления скрытых линий;
- автоматическое построение трехмерных разрезов компонентов, что особенно важно при анализе сложных деталей и сборочных изделий;
- получение точных весовых характеристик детали.

Как правило, в основе трехмерных моделей лежит математический аппарат алгебраической теории множеств, использующий в своей основе булевы операции. Рассмотрим в качестве примера три булевы операции: объединение, разность и пересечение (рис. 20).

**Операция объединения.** Результатом операции является одно тело, объединяющее исходные тела. Объединение двух произвольных фигур показано на рис. 20, б (заштрихованная область).

**Операция разности.** Результатом выполнения операции является фигура, находящаяся внутри границ ограниченных поверхностью, оставшейся от одной формы, и внешней границей общей области двух форм. На рис. 20, в (заштрихованная область) показан результат действия операции булевой разности.

**Операция пересечения.** Результатом является фигура, находящаяся внутри границ общей области объектов. Пересечение фигур представлено на рис. 20, г (заштрихованная область).

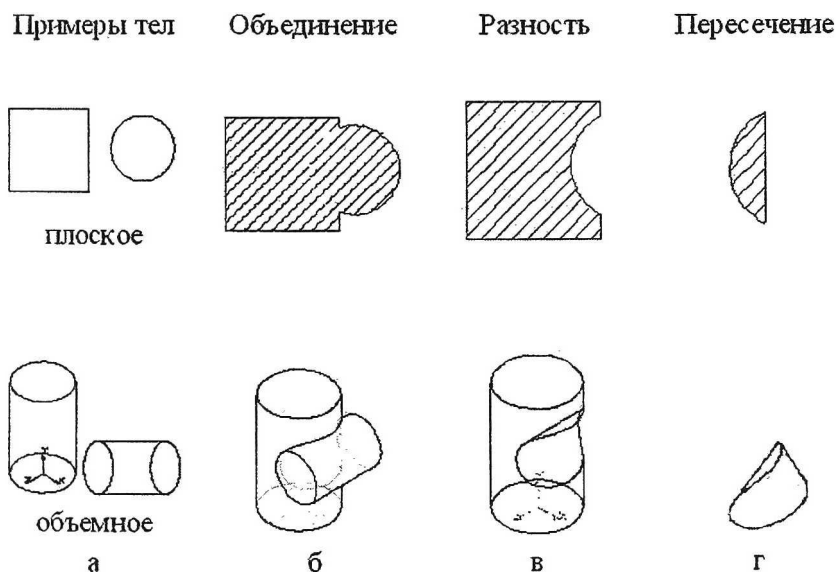


Рис. 20. Результат выполнения булевых операций

Как при поверхностном моделировании, твердотельные объекты могут быть созданы с помощью тех же способов, что и поверхности. Однако в данном случае образуется так называемый «твердый объем», а не пустое пространство, ограниченное несколькими поверхностями.

В процессе построения детали при сплошном моделировании в начале осуществляется построение основания, а затем, с помощью булевых операций, выполняется построение дополнительных элементов.

### **5.2.5. Понятие гибридного моделирования**

Возможность свободного создания и изменения различных объектов вне зависимости от того, каким образом в математическом представлении описывается объект (с помощью каркасного, поверхностного или сплошного моделирования), является сильной стороной любой системы моделирования. Подобное сочетание возможностей различных методов появляется с использованием технологии гибридного моделирования [4]. При построении в подобных системах право выбора эффективной стратегии (т.е. вид представления модели) каждого элемента одного и того же объекта принадлежит пользователю.

Обычно построение модели с помощью систем гибридного моделирования осуществляется на основе твердотельных объектов, а затем добавления элементов, построенных с помощью поверхностного моделирования (например, таким объектом могут быть скульптурные поверхности). На следующем этапе данные поверхностные элементы превращаются (часто автоматически) в твердые тела, и далее к ним могут быть применены все операции, характерные для работы с твердыми телами.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Какая информация является основой для использования CALS-технологий?
2. Отличие современных методов представления информации от используемых ранее.
3. Объясните содержание следующих понятий: математическая модель, ТЭМ, ЭМ, КПК, ТхЭМ, ЭМ оснастки, ДТМ, ЭМпки, ТЭМк, ЭМсдс.
4. В чём отличие между этими понятиями?

5. Какие системы автоматизации используются для построения геометрии?

6. Последовательность создания ТЭМ.

7. В чём отличие использования 2D и 3D представления объектов, статического деформирования ОМД? Достоинства использования 3D представления.

8. Почему необходимо использование КПК? На основе чего разрабатывается КПК?

9. Какие мероприятия организуются администратором при получении геометрических данных перед сохранением их в БД? Зачем нужны данные мероприятия?

10. Дайте определение геометрической модели. Из каких элементов состоит ГМ?

11. Какие методы геометрического моделирования вам известны? В чём их отличие?

12. Перечислите недостатки каркасного моделирования. Где можно применять каркасное моделирование?

13. Назовите преимущества поверочного моделирования по отношению к каркасному?

14. Какие типы поверхностей вам известны?

15. Какие операции твердотельного моделирования вы знаете?

16. Перечислите достоинства и недостатки твердотельного моделирования.

17. В чём заключается гибридное моделирование?

## 6. ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ САПР, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ИНЖЕНЕРНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

В современные системы САПР, используемые для конструирования и технологического проектирования, заложен ряд принципов, обеспечивающих простоту в использовании и удобство в работе.

**Унифицированность.** Лидирующее положение операционной системы Windows в мире привело к тому, что практически все САПР-программы могут быть установлены на данную платформу. Поскольку пользователь пакета обязательно знаком с работой Windows и, как правило, MS Office, то очевидно, что наличие знакомых операций и значков (например, копировать, вставить, вырезать) по ранее известной системе облегчают его работу. Данная тенденция выражается в том, что все САПР-программы становятся все более похожими по своему «внешнему» виду друг на друга.

**Сохранение собственного стиля оформления.** Вместе с подражанием Windows разработчики САПР помнят и о своих пользователях, которые по более ранним версиям уже знакомы с работой в том или ином прикладном пакете. Поэтому, несмотря на общую тенденцию к унификации «внешнего» вида различных пакетов, сохраняется и присущая им индивидуальность.

**Простота и доступность расположения информации.** В ходе работы пользователь оперирует большим объемом самой разнообразной информации. Правильная организация доступа к этой информации позволяет облегчить работу. С одной стороны, на экране должен содержаться как можно больший объем информации, с другой — это не должно приводить к «захлавлению» и уменьшению полезной области экрана.

Для этого применяется принцип изображения только той информации, которая необходима для работы пользователя в данный момент, т.е. после указания пользователем объекта интерфейс должен измениться таким образом, чтобы на экране осталась только необходимая для работы с выделенным объектом информация. Как правило, данный принцип реализуется с помощью вложенных

меню, которые используются по мере выполнения той или иной проектной процедуры. С другой стороны, наличие большого количества вложенного друг в друга меню или окон усложняет работу, поскольку в этом случае из-за необходимости открытия большого количества окон возрастает время выполнения проектной процедуры.

Практически во всех САПР-программах есть возможность настроить пользовательский интерфейс для более удобной работы.

**Правильная организация справочной информации.** Другим немаловажным фактором, влияющим на работу в САПР-программе, является правильная организация справочной информации. Всю справочную информацию, которая предоставляется пользователю, можно разделить на две основные группы:

Интерактивные подсказки, появляющиеся в ходе работы непосредственно с объектом. К этой группе относятся всплывающие под курсором подсказки (например, при наведении на объект появляется подсказка о том, какой объект будет выделен) или появление указаний в интерактивной строке о том, какую операцию необходимо совершить дальше.

**Интуитивность.** Несомненно, важным моментом при работе с любой САПР является «понятность» того, что требуется выполнить на данном этапе проектирования, для того чтобы получить нужный результат. Поэтому разработчики САПР-программ всегда стремятся к тому, чтобы интерфейс содержал интуитивно понятные символы на кнопках, а задаваемые параметры были визуализированы, например указывая стрелками направление выполнения операции.

**Активное использование устройств ввода-вывода информации.** Следует заметить, что для быстрого доступа к командам в современных САПР-программах широко используются клавиши мыши. Так, например, в Компасе с помощью колесика мыши при вращении можно увеличить или уменьшить масштаб изображения, а при нажатии на колесико и одновременном движении мыши можно вращать изображение модели на экране. В AutoForm, помимо перечисленных операций, есть возможность с помощью одновременного нажатия на правую кнопку и колесика мыши при ее одновременном движении перемещать изображение модели по экрану.

**Возможность возвращения на любой шаг построения для внесения возможных изменений.**

В ходе выполнения работы зачастую появляется необходимость вернуться на несколько шагов назад, например, если была допущена ошибка или с тем чтобы проанализировать проделанную

работу. Вся полнота информации о совершенных построениях содержится «Дерево построений» (Навигатор). Используя «Дерево построения», появляется возможность вернуться на несколько шагов назад и при необходимости отредактировать тот или иной элемент. В случае, если полученный результат не устраивает пользователя, то у него должна быть возможность вернуться к ранее построенной модели.

***Широкий набор средств визуализации полученного изображения и отображения вспомогательных объектов.***

В первую очередь — это возможность отображения объекта с помощью режима «проволочного каркаса» и сплошного объема.

При работе с «проволочным каркасом» для удобства выделения (выбора) элементов объекта могут быть выбраны несколько режимов отображения:

— без отображения невидимых граней — в данном режиме работы невидимые грани не отображаются и нет возможности их выбрать для редактирования;

— отображение невидимых граней с пониженной яркостью по отношению к видимым линиям модели — в ряде программ данный режим отсутствует, в других программах при работе в таком режиме невидимые грани не выделяются;

— отображение всех граней — данный режим позволяет осуществить выбор любой грани, однако восприятие объекта в данном случае неоднозначно.

При работе со сплошным отображением появляется возможность использовать полутоновые и разноцветные изображения, позволяющие создать видимость объема детали и выделить деталь на сборочном чертеже.

К средствам визуализации также можно отнести возможность скрывать вспомогательные элементы и элементы, отображать которые на данном этапе проектирования нет необходимости. В случае, если элемент «скрывается», то он по-прежнему остается в «Дереве построения» и при необходимости может быть показан на экране (в отличие от операции удаления, при выполнении которой элемент удаляется из «Дерева построения»).

При работе с небольшими элементами приходится увеличивать изображение, при этом зачастую необходимо переключаться между элементами, расположенными на разных участках модели. В этом случае для перехода к новому фрагменту модели предусмотрена команда «Показать все», для того чтобы сориентировать проектировщика на модели, и затем для увеличения изображения — команда «Увеличить масштаб рамкой».

Иногда возникает необходимость обратиться к «стандартному» виду (вид сверху, справа, снизу, и т.д.), для того чтобы рассмотреть модель в нужной проекции. Для выполнения подобной операции существуют специальные команды (в Компасе — «Ориентация изображения»), позволяющие выбрать необходимую проекцию детали.

***Широкий набор параметров, устанавливаемых по умолчанию или устанавливаемых автоматически.***

Разработчики современных САПР-программ стремятся построить свои системы таким образом, чтобы пользователь предоставлял минимум информации, необходимой для корректной работы программы. Достигается это благодаря специальным аналитическим алгоритмам, способным проанализировать модель и выдать результаты своей работы пользователю в виде инструкций или указаний.

В качестве примера можно привести анализ геометрической модели на наличие конструкционных элементов, расположенных под углом больше  $90^\circ$  к направлению движения инструмента, при проектировании вытяжных операций в AutoForm, сшивку (исправление ошибок, возникающих при передаче модели между программами, работающими в разных форматах — в AutoForm, PowerMILL и др.), автоматическое наложение ограничений на параметры объекта в Unigraphics.

При моделировании процесса горячей штамповки на молотах в CAE системе Deform вместо того, чтобы задавать механические свойства материала (коэффициент трения, коэффициент линейного расширения и т.д.), можно указать марку обрабатываемого материала и массу падающих частей молота, и этих данных будет достаточно для расчета.

***Модульная структура.*** Практически все САПР-программы состоят из отдельных модулей, как правило, специализирующихся на выполнении работы на разных этапах производственного цикла. Каждый модуль может быть как отдельной программой, так и встраиваемым элементом одной большой системы. Примером первых может быть пакет Power Solution компании DELCAM, состоящий из Power Shape — CAD-системы, Power Mill — CAM-системы, Art Cam — системы автоматизированного проектирования художественных барельефов, Power Inspect — системы автоматизированного контроля, Copy CAD — системы обратного проектирования. Также построен пакет Solid Edge, состоящий из модулей, обеспечивающих проектирование изделий из листового материала (листовая деталь), создание трехмерной модели (деталь), создание чертежной документации (чертеж) и др.

Такой подход объясняется тем, что потребитель (предприятие, завод) в случае подобной структуры, состоящей из независимых модулей, может приобрести только те модули, которые ему необходимы (например, для механического цеха можно приобрести программу Power Mill и Power Inspect из пакета Power Solution).

В качестве примера другого подхода можно привести Unigraphics, все модули которого (более пятидесяти) запускаются из основного модуля Gateway (ворота). Следует заметить, что производителем как Unigraphics, так и Solid Edge является компания EDS.

В настоящее время все чаще стали применяться САПР-программы, устанавливаемые поверх САД-систем и позволяющие проводить инженерные расчеты. В результате использования таких программ появляется возможность, не выходя из САД-системы, выполнить расчеты (например, на жесткость конструкции) и сразу внести корректировки в геометрическую модель (добавить ребро жесткости, изменить толщину стенки модели). Скорость выполнения расчетов в таких программах, как правило, высокая, но точность расчетов низкая, поэтому после построения модели в САД-системе следует выполнить проверочный расчет в САЕ-системе.

Одним из вариантов модульной структуры является разделение САПР на *препроцессор*, *процессор* и *постпроцессор*. Как правило, такое деление осуществляется в САПР-программах на базе САЕ-систем.

В препроцессоре происходит подготовка к процессу вычисления заданных параметров (напряжений, деформаций и т.д.), которая включает в себя:

- построение или «втягивание» геометрической модели;
- исправление, при необходимости, полученной геометрии;
- указание граничных условий (плоскостей симметрии, контактных поверхностей и т.д.);
- представление данных к расчету.

В процессоре осуществляется расчет полученных из препроцессора данных, а в постпроцессоре — визуализация полученного из процессора результата.

***Возможность передачи и получения данных через интерфейсы в другие программы.***

Поскольку при производстве изделия может использоваться программное обеспечение от различных производителей, то необходимо обеспечить качественный обмен информацией между данными системами. Например, в рамках одного завода для создания геометрической модели конструктором может использоваться продукт компании EDS — Solid Edge (на основе ядра Parasolid), а для

создания управляющей программы станка с ЧПУ технологом — программа фирмы DELCAM — PowerMILL (на основе ядра ACIS).

Для передачи данных между пакетами могут использоваться следующие стандарты: STL, VDA, IGES.

***Широкий набор баз данных по типовым элементам, оборудованию, инструменту и материалам.***

В ходе выполнения работы пользователям часто приходится использовать информацию об оборудовании, инструменте или материале. Например, при проектировании штамповой оснастки для вырубки в Компасе можно с помощью менеджера библиотек «Компас Штамп» к уже начерченной матрице и пуансону добавить ряд элементов штамповой оснастки (нижнюю, верхнюю плиты, упоры, толкатели и т.д.), выполненных по ГОСТу или ОСТу. Практически все системы инженерных расчетов (CAE-системы) содержат библиотеки со свойствами материалов, которые могут быть использованы при моделировании любого процесса.

Как правило, общим недостатком иностранных САПР-систем является отсутствие в библиотеках данных об отечественных материалах. Для компенсации этого недостатка в системах предусматривается возможность пополнения библиотек непосредственно материалами, которые используются пользователями.

***Широкий набор различных операций.***

Поскольку при создании модели пользователь не знает о возможных изменениях модели, которые могут возникнуть на последующих этапах проектирования (например, при анализе жесткости конструкции было решено добавить дополнительно ребра жесткости), то у него должен быть широкий набор возможностей (инструментов) для внесения подобных изменений. Ограничение подобных возможностей может привести к необходимости перестроить модель заново.

Для увеличения возможностей проектирования широко используется гибридное моделирование, позволяющее совместить различные методы представления трехмерных моделей. Гибридное моделирование используется практически во всех САД-системах.

Наличие у модели свойств ассоциативности и параметризации.

***Ассоциативностью*** называют способность системы запоминать логические связи между операциями построения и геометрическими объектами, которые использовались в этих операциях. В процессе построения модели создается связь, обеспечивающая зависимость одних объектов (дочерних) от первоначальных объектов (родительских). Ассоциативность позволяет быстро исправлять до-

черный объект путем редактирования его родительских объектов. Сколько бы ни было уровней между родительскими и дочерними объектами, редактирование «родителя» повлечет изменение всех дочерних объектов на всех уровнях. При этом любые изменения родительских элементов приводят к автоматическому обновлению операции построения.

**Параметризация** — это возможность строить модель с помощью компонентов, определяемых набором параметров-размеров. Модель строится из элементарных базовых объектов (параллелепипед, цилиндр, конус, сфера) и дополнительных объектов (отверстие, бобышка, проточка и т.п.). Кроме того, при построении может быть использован эскиз (Sketch), который является полностью параметризованным объектом. Для точной привязки эскиза или дополнительных компонентов к модели используются специальные объекты — ассоциативно связанные с этой моделью оси и плоскости. Модифицировать такую модель можно путем изменения значений параметров.

Построенная модель ассоциативно зависит от всех элементов, на основе которых она была создана. Это означает, что при редактировании любого элемента будут изменяться результаты всех последующих построений вплоть до окончательной модели. Во всех универсальных САПР для машиностроения есть, безусловно, много общего. Однако есть и отличия, причем принципиальные.

Но, как правило, все они в той или иной мере используют параметризацию. При этом одна из важных целей — создание типоразмерного ряда изделий изменением нескольких параметров, в оптимуме — одного. Это общий подход при создании САПР.

Отличие систем заключается в различной идеологии параметризации. Например, в некоторых системах (ProEngineer) применяется сквозная глобальная параметризация, при которой само моделирование идет за параметрической моделью, то есть, прежде чем начать что-либо строить, требуется разработать хорошо продуманную систему параметров, которыми будет описана модель, и обеспечить их связи. Потом изменить эти связи довольно трудно. Системы такого типа хорошо работают при конструировании простых деталей и сборок. Но в силу экспоненциально возрастающей сложности связей между параметрами сложных узлов и изделий (автомобиль, самолет и т. д.), где изменение одного параметра влечет за собой колоссальный поток изменений, эти системы не всегда справляются с проектированием. В таких случаях представить себе, в каком месте тот или иной параметр выйдет за пределы области допустимых значений, часто невозможно. Поэтому все системы де-

ляются на ряд уровней по степени сложности решаемых с помощью этих систем задач.

### Вопросы для самоконтроля

1. Перечислите основные особенности системы САПР, применяемых при проектировании процессов статического деформирования ОМД.

2. За счёт чего достигается простота в использовании современных САПР-систем?

3. За счёт чего достигается «понятность» представления кнопок доступа к командам, используемых при работе?

4. Что такое «Дерево построения» (Навигатор)? Зачем оно необходимо?

5. Какие средства визуализации графических объектов вы знаете?

6. Какие достоинства и недостатки модульной структуры САПР-систем вы знаете?

7. В чём заключена особенность деления на модули у САЕ-систем?

8. Для чего предназначены препроцессор, процессор и постпроцессор?

9. Зачем в программах предусматриваются интерфейсы?

10. Какие стандарты геометрических данных вы знаете?

11. Зачем нужны библиотеки текстовых элементов, оборудования и материалов в САПР-системах?

12. Почему в современных программах предусматривается широкий набор различных средств построения геометрии?

13. Объясните понятия «ассоциативность» и «параметризация».

14. Как вы считаете, какие изменения будет претерпевать программное обеспечение САПР-систем?

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При производстве изделий методами статического деформирования автоматизация проектных работ на всех этапах производственного цикла является современным направлением развития производства. Только использование ЭВМ при конструировании и технологической подготовке позволяет сократить время запуска изделия в производство, внести необходимые корректировки в ход производства и, таким образом, обеспечивает эффективность и конкурентоспособность предприятия.

Сегодня под словом САПР понимается нечто большее, чем просто «программно-аппаратный комплекс для выполнения проектных работ с использованием компьютеров», и зачастую этот термин используется прежде всего как удобная аббревиатура для обозначения большого класса систем автоматизации. Это связано с тем, что за последние 10—15 лет такие системы прошли большой путь развития от «электронных кульманов» первого поколения, предназначенных в основном для машинной подготовки документации, до современных систем, автоматизирующих практически все процессы, связанные с проектированием и изготовлением новых изделий, будь то деталь, узел машины или автомобиль, самолет, здание.

Разумеется, чем сложнее проектируемое изделие, тем более сложной и многофункциональной должна быть система САПР. Автоматизированные системы обеспечивают поддержку изделия на всем протяжении «жизненного (производственного) цикла». Наилучшим образом этому отвечают интегрированные CAD/CAM/CAE-системы.

Несмотря на постоянное развитие и обновление таких систем, принципы их проектирования и работы, а также особенности применения этих систем в конструкторской и технологической подготовке производства в своей основе остаются неизменными. Знание этих основополагающих подходов поможет инженерам ориентироваться на рынке программного продукта и создавать на основе правильно выбранных средств автоматизации эффективные производственные автоматизированные системы.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Норенков, И. П.* Основы автоматизированного проектирования / И. П. Норенков. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. — 335 с.
2. *Компьютерные технологии в науке, технике и образовании* : учеб. пособие / Б. Б. Пономарев [и др.] — Иркут. гос. техн. ун-т. — Иркутск, 2000. — 395 с.
3. *Прудковский, Б. А.* Зачем металлургу математические модели? — М. : Наука, 1989. — 192 с.
4. *Unigraphics* для профессионалов / М. Крамов, Ю. Чигинив. — М. : Лори, 2004. — 319 с. : ил.
5. *Харламов, А. Deform* — программный комплекс для моделирования процессов обработки металлов давлением / А. Харламов, А. Уваров // САПР и графика. — 2003. — № 6.
6. *Полищук, В. В., Полищук, А. В.* AutoCAD 2004 : практ. рук. — М. : ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. — 512 с.
7. *Информатика* : учеб. для вузов / В. А. Острейковский. — М. : Высш. шк., 2000.
8. *Кинкоф, Ш.* Microsoft Excel 2000. — М. : АСТ, 2004. — 401 с.
9. *Шеннон.* Имитационное моделирование систем — искусство и наука / пер. с англ. ; под ред. Е.К. Масловского. — М. : Мир, 1978. — 423 с.
10. *Михеев, В. А.* Автоматические линии и комплексы кузнечно-штамповочного производства : учеб. пособие / В. А. Михеев [и др.] ; Самар. гос. аэрокосм. ун-т. — Самара, 2004. — 168 с.
11. *Математическое моделирование* / под ред. Дж. Эндрюса, Р. Мак-Лоуна ; пер. с англ. Ю. П. Гупало. — М. : Мир, 1979. — 279 с.
12. *Кудрявцев, Е. М.* КОМПАС-3D V7 : наиболее полн. рук. — М. : ДМК Пресс, 2005. — 664 с. : ил.
13. *Компас-График 5.X.* : практ. рук. : ч. 1. — М. : АСКОН, 2000. — 498 с.
14. *Компас 3D* : практ. рук. — М. : АСКОН, 2001. — 256 с.
15. *Каргин, В. Р., Зайцев, В. М.* Основы инженерного эксперимента : учеб. пособие / под общ. ред. Ф. В. Гречникова ; Самар. гос. аэрокосм. ун-т. — Самара, 2001. — 86 с.
16. *Deform 2D* : лаб. работы / Scientific Forming Technologies Corporation. — W., 2004.
17. *Додж, М., Стинсон, К.* Эффективная работа с Microsoft Excel 2000. — СПб. : Питер, 2003. — 1056 с.
18. *Хабракен, Д. М.* MS Access 2000. — М. : Астрель, 2004. — 349 с.
19. *Ангуз в руках инженера* : практ. рук. / А. Б. Каплун, Е. М. Морозов, М. А. Олферьева. — М. : Едиториал УРСС, 2003. — 272 с.

20. *Ansys* для инженеров: справ. пособие / А. В. Чигарёв, А. С. Кравчук, А. Ф. Смалюк. — М. : Машиностроение, 2004. — 512 с. : ил.
21. *Crawford, J.* Evaluating mesh density / John Crawford // *Ansys solutions*. — <http://www.cardfem.ru>.
22. *Рычков, С. П.* MSC. Visua Nastnan для Windows. — М. : ИТ Пресс, 2004. — 552 с. : ил.
23. *Microsoft Windows XP.* Шаг за шагом : практ. пособие : [пер. с англ.] — М. : ЭКОМ, 2004. — 352 с. : ил.
24. *Беленький, А. А.* Математическое моделирование и оптимизация процессов литья и прокатки цветных металлов / под ред. В. П. Молокова. — М. : Металлургия, 1983. — 160 с.
25. *Гречников, Ф. В.* Использование программы DeForm 2D для описания процессов листовой штамповки / Ф. В. Гречников, А. Г. Шляпугин, К. А. Николенко; Самар. гос. аэрокосм. ун-т. — Самара, 2006. — 6 с. — Деп. во ВИНТИ «Депонированные научные работы», № 804-В2006 от 15.06.2006.

*Учебное издание*

**Гречников Федор Васильевич, Дровяников Виктор Иванович,  
Шляпугин Алексей Геннадиевич**

**ОСНОВЫ АВТОМАТИЗАЦИИ КОНСТРУИРОВАНИЯ  
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ  
МЕТОДАМИ СТАТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ**

Учебное пособие

Технический редактор В. К. Моисеев  
Редакторская обработка А. А. Нечитайло  
Корректорская обработка И. И. Проломова  
Доверстка В. С. Телепова, Е. А. Ларионова

Подписано в печать 13.11.06. Формат 60×84 1/16  
Бумага офсетная. Печать офсетная  
Усл. печ. л. 5,34. Усл. кр.-отт. 5,46. Печ. л. 5,75  
Тираж 50 экз. Заказ 126.ИП-45/2006

Самарский государственный аэрокосмический университет  
443086, Самара, Московское шоссе, 34

Изд-во Самарского государственного аэрокосмического университета  
443086, Самара, Московское шоссе, 34