

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
**«ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

**Т.Г. Костюченко**

# **САПР В ПРИБОРОСТРОЕНИИ**

Учебное пособие

Издательство  
Томского политехнического университета  
2009

УДК 681.2:658.512.2.011.56(075.8)

ББК 34.9:30.2-5-05я73

К72

**Костюченко Т.Г.**

К72 САПР в приборостроении: учебное пособие / Т.Г. Костюченко; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 207 с.

Учебное пособие в концентрированном виде содержит информацию о системах автоматизированного проектирования (понятие, структура, организация, разработка); технологиях проектирования, основанных на использовании САД-систем, САЛS-технологиях; параметризации в различных системах, методах расчета параметров приборов; обзор систем САПР.

Разработано в рамках реализации Инновационной образовательной программы ТПУ по направлению «Неразрушающий контроль» и предназначено для магистров, обучающихся по программе «Системы автоматизированного проектирования в приборостроении».

УДК 681.2:658.512.2.011.56(075.8)

ББК 34.9:30.2-5-05я73

*Рецензенты*

Доктор физико-математических наук, профессор,  
заведующий кафедрой механики деформируемого  
твёрдого тела ТГУ

*В.А. Скрипняк*

Доктор технических наук, профессор  
заместитель главного конструктора НПЦ «Полюс»

*Ю.М. Казанцев*

© ГОУ ВПО «Томский политехнический университет», 2009

© Костюченко Т.Г., 2009

© Оформление. Издательство Томского политехнического университета, 2009

## ВВЕДЕНИЕ

Бурное развитие компьютерной техники, ее вычислительных возможностей, численных методов и методов математического моделирования привело к радикальному изменению технологии проектирования, в частности, технологии проектирования приборов.

Сегодня проектирование трудно представить без использования систем автоматизированного проектирования (САПР) на всех этапах жизненного цикла изделия.

В современных условиях рынка и постоянно меняющегося производства акцент подготовки специалистов в ВУЗе переносится на формирование профессиональных компетенций, то есть способности и готовности выпускника применять знания, умения и личностные качества в будущей профессиональной деятельности.

Учебное пособие «САПР в приборостроении» способствует формированию компетенций у выпускников ВУЗа посредством системного изучения различных видов деятельности при автоматизированном проектировании приборов на базе предметных знаний и предназначено в первую очередь для магистров, обучающихся по программам «Системы автоматизированного проектирования в приборостроении» и «Приборы и методы контроля качества и диагностики».

Учебное пособие в концентрированном виде содержит информацию о системах автоматизированного проектирования (понятие, структура, организация); технологиях проектирования, основанных на использовании САД-систем; параметризации в различных системах, методах расчета параметров приборов; обзор систем САПР.

Учебное пособие «САПР в приборостроении» в полной мере соответствует частям рабочих программ дисциплин «Автоматизация конструкторского и технологического проектирования», «Разработка САПР», «CALS-технологии».

На настоящий момент времени не существует учебных пособий, где бы были собраны воедино сведения о САПР, используемых в приборостроении, когда речь идет об электромеханических, измерительных, высокоточных прецизионных приборах различного назначения – от бытовых до приборов космического назначения.

Устранение этого пробела и является целью настоящего пособия.

Глава 1 посвящена описанию процесса проектирования приборов, видам проектных работ, проектным процедурам и задачам.

В главе 2 речь идет об автоматизации проектирования – определение, назначение, состав и структура САПР, классификация САПР,

разработка САПР, описываются подходы к автоматизированному проектированию.

Глава 3 посвящена современным технологиям проектирования – CALS-технологиям, средствам автоматизации проектирования, технологиям конструкторской подготовки производства.

В главе 4 описываются некоторые методы расчета и анализа – параметризация и метод конечных элементов – как наиболее эффективные методы усовершенствования конструкции приборов.

В главе 5 речь идет о проблеме выбора CAD-системы и проблеме подготовки кадров для САПР.

В главе 6 рассматривается опыт использования современных технологий проектирования. Сначала описывается комплексная автоматизация на базе программного продукта T-Flex, затем приводится пример – моделирование двигателя внутреннего сгорания с использованием этой CAD-системы.

# 1. ПРОЦЕСС ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРИБОРОВ

## 1.1. Проектирование – творческий процесс

Проектирование в переводе с латинского (*projectus*) означает «брошенный вперед», то есть проект – это описание того, чего еще нет. Проектирование предшествует производству и делает возможным изготовление требуемого количества приборов с заданными характеристиками. Проектирование обеспечивает составление описания, получение технической документации, которая полностью и однозначно описывает все сведения, необходимые и достаточные для изготовления приборов.

Техническая документация включает в себя схемы, чертежи, спецификации, технические описания, программы и методики испытаний, технологические карты изготовления и сборки и другое.

Проектирование представляет собой первый этап в процессе создания нового изделия и находится полностью в компетенции проектировщика, конструктора. За ним следует разработка технологического процесса. Проектирование, по-видимому, наиболее ответственный этап, поскольку здесь определяются физическая форма и технические характеристики изделия, и проверяется осуществимость самой идеи. Для успеха работы на данном этапе необходимо поручать квалифицированным инженерам-конструкторам, которые должны знать и понимать (а на мелких предприятиях и выполнять) обязанности проектировщика и художника-конструктора, исследователя технических решений, чертежника, изготовителя макетов, инженера-испытателя, экономиста, специалиста по материалам и инженера-технолога. Инженер-конструктор должен поддерживать тесные деловые взаимоотношения с производственным персоналом, службами контроля качества, сбыта, перевозок, персоналом, осуществляющим техническое обслуживание изделия и т.п. От каждого из них зависит, будет ли разработка изделия успешной или нет. Для проверки и подтверждения осуществимости идеи необходимо провести анализ. Следует отличать интуитивные суждения (которые часто приводят к большим затратам, так как на разработку изделия методом проб и ошибок требуется много времени) от формализованной оценки, основанной на расчетах оптимального использования материалов и рабочей силы и позволяющей определить соответствие изделия прогнозируемым характеристикам. Испытания представляют наиболее дорогостоящий этап, поскольку для их проведения требуется специально оборудованное место и аппаратура. Поэтому необходимо их тщательное планирование. Испытания позволяют подтвердить прогнозируемые технические характеристики, обнаружить недостатки изделия при нор-

мальных условиях эксплуатации и проверить требуемую долговечность изделия.

Вторая стадия создания изделия – разработка технологического процесса – состоит из трех этапов: изготовление изделия, движение материалов и управление предприятием. Инженер-технолог, консультируясь с конструктором, разрабатывает технологию изготовления изделия и контроля его качества, а также выбирает станки, оборудование и аппаратуру, необходимые для того, чтобы изделие удовлетворяло техническим условиям и требованиям рынка. Движение материалов включает такие операции, как закупка, получение и обработка всех материалов, идущих на изготовление изделия, а также хранение и перевозка готовой продукции. Одним из наиболее трудно поддающихся прогнозированию видов деятельности является управление предприятием, поскольку оно связано с отбором, профессиональной подготовкой и распределением кадров, контролем за рабочей силой, материалами и оборудованием [10].

Таким образом, проектирование представляет собой сложный и творческий процесс деятельности специалиста (проектировщика, конструктора), инвариантный к различным типам и сложности приборов. Проектирование требует от проектировщика кроме специальных, предметных знаний, также знаний методологии, средств и правил выполнения проектных процедур.

Творчество можно определить как успешный полет мысли за пределы известного. Оно дополняет знания, способствуя созданию вещей, которые не были известны ранее. Творчески сконструированные технические устройства часто бывают построены из известных элементов и основаны на известных принципах, сочетаемых каким-либо новым, оригинальным способом. Инженерное творчество ближе к изобретательству, чем к научному исследованию! Творческой личности присущи огромная любознательность и стремление создать что-то необычное, уделяя при этом внимание не традиционным, а оригинальным решениям. Человек с творческой жилкой непрерывно изучает потребности общества в новой промышленной продукции и убежден, что стоящая перед ним задача всегда имеет оригинальное решение.

Наилучшей почвой для рождения творческих идей является личный опыт. Личный опыт ценен потому, что он всегда с вами и при необходимости им легко воспользоваться. Подготовку, полученную на основе личного опыта, можно назвать активной. Пассивную подготовку дает косвенный опыт, например, чтение, слушание лекций или размышление.

Творчество требует внутренней дисциплины. Если человек берется за решение завладевшей им трудной проблемы, и не оставляет ее до тех пор, пока не будет получено решение, то он обладает качествами, необходимыми для творческой деятельности. Творческие открытия чаще всего делают люди, способные давать волю своему воображению, но умеющие своевременно вернуть его на землю. Творческие идеи чаще появляются у людей, обладающих большой любознательностью, которая свойственна всем детям, однако угасает в людях зрелого возраста. Творчество начинается с внимания к деталям, которые обычно игнорируются. Многие убеждены, что только последовательный упорядоченный процесс обеспечивает творческое решение проблемы, создание нового устройства или появление новой идеи. Следует, однако, иметь в виду, что не существует какой-либо формулы творчества. То, что подходит в одном случае, может не подойти в другом.

Таким образом, творческий подход к инженерной деятельности – залог успеха при проектировании. Кроме того, как следствие современной научно-технической революции, массового применения компьютеров при проектировании, в последние годы ярко выявляются принципиальные изменения в характере деятельности конструктора, его роли при создании новой техники, требований к его профессиональным знаниям, навыкам, общей эрудиции. В круг конструкторских дисциплин вошли системотехника, методы исследования операций, теория решений, сетевое планирование, эргономика, техническая эстетика, системы автоматизированного проектирования и многие другие новейшие отрасли науки и техники. Рассредоточенность разнообразных знаний, необходимых для успешной работы, усложнила подготовку конструкторов и дальнейшее повышение их квалификации.

Резко возросла потребность в учебных пособиях для конструкторов, обобщающих в лаконичной форме, логически увязывающих между собой практически полезные данные этих отраслей знаний и наглядно иллюстрирующих их применение при решении типичных современных конструкторских задач. Проблема подготовки инженерных кадров в современных условиях может быть решена только нестандартными путями [11]. Необходима система непрерывного ротационного обучения конструкторов, связанная с практической проектной работой.

Это необходимо для дальнейшего повышения качества проектных и конструкторских разработок, а, следовательно, и качества выпускаемой продукции.

Таким образом, проектирование – это сложный специфический вид созидательной деятельности человека, основанный на глубоких научных знаниях и творческом поиске, использовании накопленного опы-

та и навыков в определенной сфере, не лишенный при этом необходимости выполнения трудоемких рутинных работ.

## **1.2. Организация процесса проектирования**

### ***1.2.1. Виды проектных работ***

Проект содержит техническое описание прибора, необходимое и достаточное для его производства, то есть совокупность схем, чертежей, описаний технических процессов и т.д. Любое производство соответствующего профиля и уровня, точно следуя проекту, должно быть в состоянии изготовить прибор или серию приборов, которые будут обладать именно теми значениями характеристик, которые были указаны в техническом задании [1].

Проект описывает устройство прибора, определяя, из каких частей он состоит, как взаимодействуют между собой эти части, как они изготавливаются и собираются, как прибор настраивается и проверяется.

Основными видами проектных работ по созданию приборов являются научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИР и ОКР). НИР выполняются с целью решения проблемных вопросов, поиска принципиальных возможностей построения структуры прибора, исследования новых принципов его функционирования и получения исходного материала для ОКР. Основным объемом НИР составляет функциональное проектирование. Конструирование обычно выполняется упрощенно.

Результатом такого проектирования является макет прибора. Он позволяет провести экспериментальные испытания. Объем технологического проектирования в процессе НИР существенно сокращен. Важными этапами НИР являются исследование и испытание макетов отдельных узлов и макета в целом (экспериментирование). Это позволяет получить заключение о возможности создания прибора и сформулировать техническое задание на ОКР.

НИР завершается составлением отчета, с изложением всех сведений, полученных при ее проведении.

ОКР выполняется с целью разработки конструкторской документации, изготовления и испытания опытного образца. По результатам испытания опытного образца дается заключение о возможности изготовления установочной серии приборов с последующим переходом к серийному или массовому производству в зависимости от потребностей.

Порядок выполнения проектных работ регламентируется целым рядом стандартов. На территории России проектирование приборов ве-



дется в соответствии с Единой системой конструкторской документации (ЕСКД), которая представляет собой комплекс государственных стандартов, устанавливающих единый порядок разработки, оформления и обращения конструкторской документации. В соответствии с ЕСКД (ГОСТ 2.103-68) проектирование приборов может быть представлено в виде последовательности следующих этапов:

- техническое задание;
- техническое предложение;
- эскизный проект;
- технический проект;
- рабочая документация.

Исходные данные для начала процесса проектирования формулируются в специальном документе – техническом задании. Техническое задание (ТЗ) устанавливает, какими свойствами или характеристиками должен обладать прибор. При этом различают следующие характеристики:

- функциональные;
- конструктивные;
- технологические;
- экономические;
- эксплуатационные;
- эргономические;
- эстетические.

Функциональные характеристики определяют принципиальные возможности выполнения прибором его главной задачи. Например, для многих измерительных приборов типичными функциональными характеристиками являются разрешающая способность или точность измерения, диапазон измерений и т. п.

Конструктивные характеристики определяют такие свойства конструкции прибора, как габариты, масса, число деталей, сложность их формы, степень стандартизации и унификации, материалоемкость и т. д. Под конструктивными характеристиками понимают не описание конструкции, что является задачей проекта, а лишь описание свойств конструкции, важных для прибора.

Технологические характеристики определяют качество процесса изготовления, сборки и испытания прибора для заданного типа производства.

Технологичность прибора характеризуется удельной трудоемкостью, числом и типом средств изготовления, простотой подготовки производства, рациональностью выбора заготовок и др.

Экономические характеристики определяют экономическую целесообразность производства и эксплуатации прибора.

Эксплуатационные характеристики определяют простоту и удобство эксплуатации, возможность перенастройки, устойчивость к влиянию окружающей среды, ремонтпригодность.

Эргономические характеристики определяют удобство и безопасность взаимодействия человека с прибором.

Эстетические характеристики определяют качество восприятия человеком (пользователем) внешнего вида прибора, включая такие оценки прибора как привлекательность, современность, гармоничность сочетания элементов, совершенство конструкции и формы, цвет, преемственность стилей и другие.

Требуемые значения или приемлемые интервалы значений всех необходимых характеристик прибора составляют содержание и сущность технического задания. **Техническое задание** оформляется в соответствии с общими правилами оформления технической документации. Типовое ТЗ на приборы включает следующие разделы:

1. Общие сведения (состояние вопроса, цели и основания разработки).
2. Определение, назначение и область применения прибора.
3. Технические (функциональные) характеристики (в зависимости от типа прибора).
4. Структура и взаимосвязь основных функциональных узлов.
5. Желательные габаритные размеры и масса.
6. Условия эксплуатации, ремонтпригодность, устойчивость к воздействию окружающей среды, помехам и другие.
7. Требования к стандартизации, унификации.
8. Экологические требования, требования безопасности и эргономики.
9. Условия транспортировки и хранения.
10. Требования патентной чистоты, конкурентоспособности и другие.

**Техническое предложение** выполняется в соответствии с ГОСТ 2.118-73 на основании анализа ТЗ и различных вариантов возможных решений прибора с целью технико-экономического обоснования целесообразности разработки прибора, а также выявления дополнительных или уточненных требований, не отраженных в ТЗ. Типичными видами работ в рамках технического предложения являются:

1. Сбор и изучение материалов по проекту.

2. Установление главных отличительных признаков прибора, улучшающих его свойства.

3. Функциональное проектирование на высших и средних уровнях, определение технических решений, обеспечивающих достижение заданных значений функциональных характеристик прибора.

4. Упрощенное конструирование на высших уровнях (упрощенные чертежи общего вида) с оценкой возможностей разработки конструкции прибора.

5. Технико-экономическое обоснование и сравнение различных возможных вариантов.

6. Формулировка окончательного ТЗ.

Пояснительная записка на этапе технического предложения, должна соответствовать ГОСТ 2.106-96 и иметь следующие разделы, общие для всех этапов проектирования:

- введение;
- назначение и область применения проектируемого прибора;
- технические характеристики;
- описание и обоснование конструкции;
- необходимые расчеты;
- ожидаемые технико-экономические показатели и др.

К записке прикладывается конструкторская документация (обобщенные схемы, чертежи общего вида, габаритный чертеж прибора и другие.).

**Эскизное проектирование** в соответствии с ГОСТ 2.119-73 предназначено для нахождения принципиальных (функциональных, схемных, конструкторских, технологических) решений прибора, дающих общее представление о принципе работы и устройстве прибора. На этом этапе выполняется функциональное проектирование всех функциональных устройств и элементов, электрических и кинематических схем. Типичными расчетами для электромеханического прибора являются прочностные расчеты и расчет эксплуатационных характеристик, для оптического – энергетические и точностные расчеты, габаритные и абберрационные расчеты оптики.

Схемы должны давать полную информацию о принципе работы и структуре прибора, типе его элементов, их характеристик и взаимосвязей. Одновременно начинается конструирование устройств и блоков. В результате выпускаются чертежи общего вида и отдельных устройств с максимальными упрощениями. При эскизном проектировании рассматривают возможную стандартизацию и унификацию, вопросы техноло-

гичности, осуществляют проверку на патентную чистоту и конкурентоспособность.

**Техническое проектирование** осуществляют после утверждения эскизного проекта. В соответствии с ГОСТ 2.120-73 на этом этапе выполняется тщательная проработка всех схемных, конструктивных и технологических решений, дающих полное представление о приборе. Выполняемые здесь расчеты позволяют установить окончательные требования к узлам и элементам прибора, в частности, уточнить значения погрешностей на основе принятых конструктивных решений.

В процессе технологического проектирования производится анализ конструкции прибора, его узлов и наиболее ответственных деталей на технологичность, определение технологического оборудования и специальной оснастки для их изготовления и испытания. В результате выполнения технического проекта выпускаются сборочные чертежи прибора и его узлов, чертежи всех схем, пояснительная записка и различные приложения. После утверждения заказчиком технического проекта приступают к выполнению рабочего проекта.

**Рабочий проект** является обязательным этапом проектирования, на котором разрабатывается рабочая документация, предназначенная для изготовления и испытаний опытного образца. Основным объемом этого этапа составляет технологическое проектирование, в ходе которого выполняются детальная разработка конструктивных решений прибора и его узлов с указанием технологических требований к сборке и настройке; выпуск рабочих чертежей всех деталей; доработка всех схем до рабочего состояния; выпуск рабочих чертежей оснастки и приспособлений; составление спецификаций и ведомостей покупных и стандартных изделий; составление технического описания, технических условий.

Рабочие чертежи деталей и сборочные чертежи являются основной документацией, необходимой и достаточной для изготовления опытного образца. После внесения необходимых изменений, а также проверки на соответствие ГОСТ 14.206-73 «Технологический контроль конструкторской документации», рабочий проект утверждается и передается в опытное производство.

Изготовленные **опытные образцы** приборов подвергаются всесторонним испытаниям (предварительным, государственным), которые проводятся в соответствии с нормативными документами. По окончании испытаний составляется акт, в котором дается заключение о возможности запуска прибора в производство. В нем же указываются вы-

явленные недостатки, которые должны быть устранены в процессе подготовки документации к производству.

Заключительным этапом проектирования является доработка документации и подготовка ее для запуска прибора в условиях серийного или массового производства. Основным объемом этого этапа составляет технологическое проектирование, называемое обычно технологической подготовкой производства.

### ***1.2.2. Системно-иерархический подход к проектированию***

Проектирование приборов различного функционального назначения характеризуется неоднозначностью решений, необходимостью выбора варианта из большого количества возможных решений, отсутствием определенного алгоритма решения. Как уже говорилось, проектирование является творческим, эвристическим процессом.

Сложность конструкций приборов, наличие в них физически разнородных частей и устройств (электронных блоков, механических устройств, оптических систем и т. п.), большого количества разнообразных деталей и элементов, находящихся во взаимосвязи, с разнообразными характеристиками, связанными как прямой, так и обратной зависимостями, создают в проектировании приборов дополнительные проблемы. Даже очень талантливый конструктор не в состоянии охватить проект в целом, удерживая при проектировании в своем внимании всю конструкцию прибора, все его системы и детали одновременно.

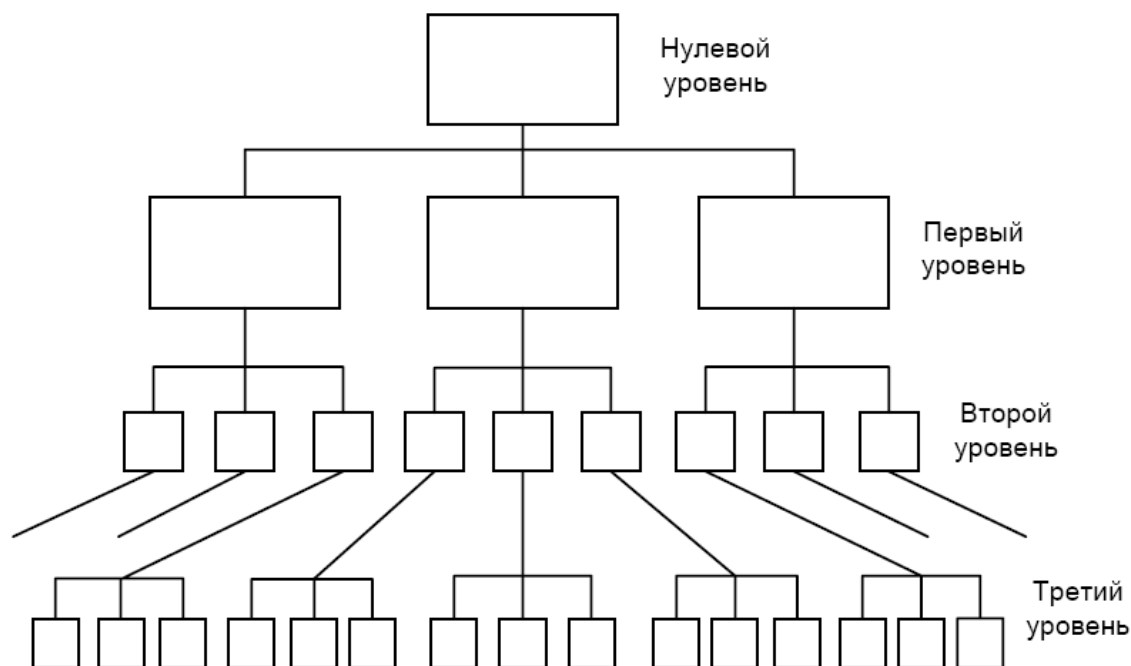
Борьба со сложностью ведется следующим образом. Во-первых, задача разделяется на подзадачи, которые могут быть решены отдельно. Во-вторых, работу над проектом ведет коллектив разработчиков, состоящий из различных специалистов.

Одним из подходов при решении проблем проектирования является системно-иерархический подход [1, 9]. При таком подходе прибор рассматривается как сложная система связанных и взаимодействующих между собой частей, которая представляется в виде блочно-иерархической структуры, состоящей из уровней и ветвей. Эта структура имеет вид перевернутого дерева (рис. 1.1).

На каждом иерархическом уровне и на каждой ветви рассматривается сравнительно небольшое количество связанных между собой элементов. При этом каждый элемент какой-либо ветви и какого-либо уровня представляется как система элементов, расположенных на той же ветви, но на последующем, более низшем уровне. Важно, что подобную систему, то есть систему, состоящую из ограниченного числа элементов, проектировщик еще в состоянии удержать в поле своего внима-

ния полностью. Как показывает опыт, оптимальное число таких элементов равно трем-пяти.

При системно-иерархическом подходе проектирование представляется в виде движения по рассматриваемому дереву. В процессе этого движения на каждом уровне и на каждой ветви выполняются элементарные проектные операции, тем самым структура проектирования становится блочно-иерархической.



*Рис. 1.1. Блочно-иерархическая структура*

При этом проектировщик имеет дело каждый раз с небольшим количеством элементов. Благодаря такому подходу весь процесс проектирования, сплетающийся в виде блочно-иерархической структуры таких элементарных процессов, намного упрощается, его становится возможным реализовать при нормальных ресурсах (время, трудозатраты, финансы).

Легко заметить, что такая структура позволяет осуществлять общий процесс проектирования, используя различные направления движения по блочно-иерархическому дереву. В зависимости от направления движения различают проектирование нисходящее, восходящее и смешанное. Нисходящее проектирование, как следует из его названия, начинается с верхнего уровня, на котором прибор рассматривается как целое, а затем выполняются этапы первого уровня, второго и так далее.

На каждом уровне проектировщик устанавливает структуру и взаимосвязь элементов, определяет численные значения их характеристик. При этом найденные значения характеристик, очевидно, должны рассматриваться как техническое задание для проектирования на следующем, более низком уровне. Нисходящее проектирование, как видно из схемы его движения, всегда гарантирует выполнение требований технического задания на каждом уровне и поэтому должно бы считаться наиболее правильным. Но также очевидно, что оно не гарантирует реализуемость требований технического задания. Это означает, что на каком-то уровне процесс может остановиться из-за того, что при существующих физических, технических, технологических, экономических других ограничениях решение обратной задачи и соблюдение технического задания данного уровня становится невозможным. В этом случае приходится делать возврат на предыдущий уровень или даже выше, искать там другое решение соответствующей обратной задачи, а затем опять попробовать вернуться на тот уровень, на котором процесс остановился, но с уже другим техническим заданием. Таким образом, блочно-иерархическая структура, позволяя в принципе реализовать процесс проектирования, делает неизбежным его итерационный характер. Он заключается в возврате к повторению процесса на предыдущих уровнях с измененными условиями.

Восходящее проектирование выполняется в обратном порядке, от низших уровней к высшим. При этом происходит сборка отдельных частей прибора из деталей и элементов, затем узлов и устройств из частей и, наконец, сборка прибора в целом. Восходящее проектирование всегда гарантирует реализуемость проекта на любом уровне, но совсем не гарантирует соблюдения всех требований технического задания.

Поэтому процесс может остановиться на каком-либо уровне из-за несоблюдения требований технического задания высшего уровня. При этом потребуются возврат на предыдущие, низшие уровни с попыткой «собрать» структуру данного уровня из других элементов. Таким образом, и восходящее проектирование также неизбежно имеет итерационный характер.

Как показывает опыт, предпочтительным является нисходящее проектирование. Но на практике, особенно для сложных приборов, процесс проектирования носит обычно смешанный характер с преобладанием нисходящих потоков, а восходящее проектирование применяется к тем частям приборов, которые собираются из стандартных, хорошо отработанных деталей, элементов и узлов. Итерационный характер такого проектирования также очевиден.

Электромеханические и измерительные приборы представляют собой, как правило, комплексы, состоящие из большого числа взаимосвязанных элементов с различными принципами действия. На первый взгляд структура проектирования довольно сложна, имеет множество ветвей и уровней. Но при внимательном изучении конкретных ситуаций нетрудно обнаружить, что построенные блочно-иерархические структуры позволяют понять внутреннюю логику сложного и творческого процесса проектирования, найти свое место каждому из его этапов.

### 1.3. Ветви проектирования

#### 1.3.1. Функциональное проектирование

Функциональное, или схемное, проектирование как ветвь проектирования в целом имеет достаточно сложную иерархическую структуру. Оно может быть представлено в виде нескольких уровней. Выделяют следующие уровни функционального проектирования (рис. 1.2) [9]:

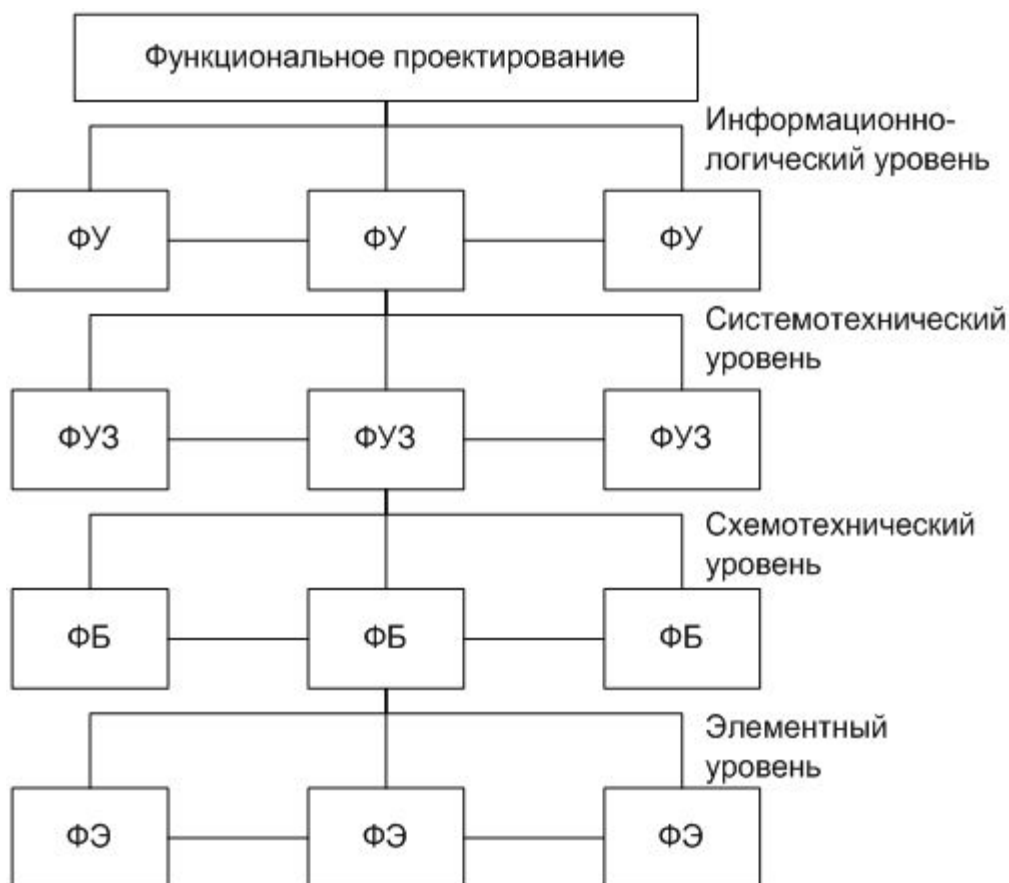


Рис. 1.2. Иерархическая структура функционального проектирования



Высшим уровнем функционального проектирования является информационно-логический. На этом уровне прибор рассматривается и проектируется как совокупность функциональных устройств (ФУ), между которыми происходит обмен информацией в виде различного рода данных и команд.

На информационно-логическом уровне проектирования определяется конкретная структура прибора, которая может и отличаться от приведенного на рис. 1.2, устанавливаются связи функциональных устройств между собой, формулируются требования к ним, а также к сигналам и командам, вырабатываемым тем или иным устройством, исходя из требований технического задания на прибор в целом. Эти требования составляют технические задания на проектирование отдельных функциональных устройств. Таким образом, проектирование на этом уровне состоит сначала из построения структуры проектируемого объекта, а затем в определении оптимальных значений параметров этой структуры.

На системотехническом уровне функционального проектирования производится собственно проектирование отдельных функциональных устройств, состоящих из функциональных узлов (ФУЗ). При этом процесс разбивается на ветви, каждая из которых соответствует определенному устройству. Последнее рассматривается как структура, состоящая из взаимосвязанных функциональных блоков (ФБ). Для каждого функционального устройства определяется оптимальный состав блоков и их параметры. Как правило, на этом уровне рассматривается преобразование сигналов отдельными блоками устройств.

На системотехническом уровне проектирования отдельные блоки безотносительно к их внутреннему устройству рассматриваются как преобразователи сигналов.

На схемотехническом уровне производится проектирование отдельных блоков, входящих в состав функциональных устройств, в соответствии с техническими заданиями, сформулированными на предыдущем уровне. При этом каждому блоку соответствует своя ветвь. Принципиально важно, что, начиная с этого уровня, ветви имеют различную специализацию. Она зависит от физической природы блоков, игнорируемой на предыдущем уровне.

Схемотехнический уровень функционального проектирования требует, как правило, наибольшего объема работы. Именно на этом уровне определяются основные параметры различных схем прибора, обеспечивающие в конечном счете его правильную работу и соответствие техническому заданию.

На элементном функциональном уровне проектирования проектировщики имеют дело с внутренним устройством тех функциональных

элементов (ФЭ), которые реализуют схемы, рассмотренные на схемотехническом уровне.

Рассмотренные уровни функционального проектирования являются типичными для прибора средней сложности. Иногда некоторые уровни, например, информационно-логический или системотехнический, могут исключаться. Часто практически отсутствует элементный уровень проектирования. При проектировании более сложных приборов отдельные уровни могут привести к нескольким подуровням.

### ***1.3.2. Конструкторское проектирование***

Конструкторское проектирование, или конструирование, проводится обычно параллельно функциональному, иногда с некоторым отставанием от него.

При конструировании определяются материал, форма, размеры отдельных деталей, сборочных единиц и всего прибора в целом.

Важность этой ветви проектирования трудно переоценить.

Иногда термин «конструирование» переносится и на функциональное проектирование. Однако следует различать эти две ветви проектирования, тем более, что в большинстве проектных организаций они выполняются разными людьми и даже разными подразделениями.

Различие между функциональным проектированием и конструированием может быть наглядно выражено фразой: проектирование отвечает на вопрос, как устроен прибор, а конструирование – как прибор построен. Другими словами, проектирование отвечает на вопрос, в чем состоят принципы работы прибора, а конструирование – на вопросы, из каких частей он состоит, из каких материалов сделаны детали, как они скреплены между собой.

Конструирование, как и функциональное проектирование, разделяется на уровни. На верхнем уровне определяется общая компоновка всего прибора, взаимное расположение его отдельных узлов, это – компоновочный уровень.

Далее идет уровень, на котором разрабатываются конструкции отдельных частей прибора. В зависимости от сложности прибора, таких уровней может быть несколько. Это – уровни узлов (сборочных единиц). И, наконец, последним идет уровень, на котором разрабатываются и выпускаются рабочие чертежи отдельных деталей. Он называется соответственно уровнем деталей.

Структура изделия может быть и более сложной (рис. 1.3.).



Рис. 1.3. Структура изделия

Сразу за компоновочным уровнем процесс конструирования может разделяться на ветви, соответствующие различным узлам, (например, механическим, электронным или электромеханическим и т.п.). Однако это разделение выражено не так явно, как при функциональном проектировании. Поскольку методы и приемы конструирования этих узлов имеют много общего, то конструирование всего прибора в принципе может выполнять один конструктор или (в случае достаточно сложного прибора) одно подразделение.

### ***1.3.3. Технологическое проектирование***

На ветви технологического проектирования производится разработка технологических процессов изготовления прибора. Качество изготовления приборов существенно зависит как от качества разработки технологических процессов, так и от технического уровня применяемого оборудования, включая специальное, а также от квалификации рабочих.

На низших уровнях технологического проектирования разрабатываются технологические процессы изготовления отдельных деталей. На верхних уровнях этой ветви выделяют испытания, настройку, сборку. На ветви испытаний разрабатываются методики испытаний прибора на

соответствие каждому из разделов технического задания. Далее идет уровень настройки. На нем разрабатываются методики настройки прибора. Затем следует уровень сборки всего прибора. Далее процесс разветвляется по отдельным узлам (сборочным единицам). На этих уровнях разрабатываются техпроцессы сборки, настройки, контроля различных сборочных единиц прибора.

Результатами работы на ветви технологического проектирования являются технологические карты, методики настройки и контроля, данные для станков с числовым программным управлением (ЧПУ) и гибких автоматизированных производств (ГАП).

## **1.4. Проектные процедуры и задачи**

### ***1.4.1. Проектные процедуры и операции***

Множество действий, которые выполняются при проектировании, группируют в блоки, называемые, по степени их укрупненности, проектными операциями, процедурами и задачами. Проектная операция – блок элементарных действий, объединенных всего лишь одним результатом, используемый в дальнейшем. Примерами проектных операций являются вычисление какого-либо параметра, вычерчивание контура детали, ввод исходных данных в компьютер и т.п. Проектная процедура – это совокупность операций, выполняемых проектировщиком или компьютером непрерывно и последовательно [1].

Процедуры и операции отличаются друг от друга не только содержанием, но и такими свойствами, как детерминированность, эвристичность, трудоемкость, объектная ориентированность, объектная инвариантность.

Полностью детерминированной называется такая процедура или операция, которая сводится к выполнению определенного алгоритма, то есть совокупности правил, предписаний, программ. К числу подобных процедур относятся, например, построение проекции какого-либо тела на плоскость, поиск в архиве объекта с заданными характеристиками и т. д. Детерминированные процедуры и операции характерны тем, что при аккуратном и точном следовании предписанному алгоритму результат их выполнения будет всегда одинаковым, независимо от опыта, знаний, способности и квалификации исполнителя.

Последние определяют только скорость выполнения процедуры. Идеальным исполнителем таких процедур является компьютер: он не делает ошибок и строго следует заложенной в него программе.

В противоположность детерминированным, для полностью эвристических процедур или операций невозможно или чрезвычайно сложно составить сколько-нибудь однозначный алгоритм выполнения. Поэтому такие процедуры выполняются только человеком, ибо только он способен действовать в отсутствие четкого алгоритма и полной исходной информации. Результат выполнения эвристических процедур определяется знаниями, опытом, способностями и квалификацией исполнителя. Для эвристических процедур характерно повышение эффективности их выполнения по мере обучения исполнителя. Примерами эвристических процедур могут служить оценка результатов синтеза, оптимизации и принятие решений о дальнейшем ходе проектирования, составление задания на оптимизацию.

Трудоемкость выполнения процедур и операций определяется требуемыми затратами ресурсов. Для компьютера – это количество вычислений и объем памяти.

Объектная ориентированность какой-либо процедуры или операции определяется степенью зависимости применяемых методов, математического аппарата, алгоритмов от специфики проектируемого объекта. Например, аппарат расчета хода лучей, применяемый при проектировании оптических систем, совершенно не подходит для расчетов электронных или кинематических схем, конструирования оправ линз, но он одинаков для всех оптических систем. Говорят, что процедура анализа оптических систем путем расчета хода лучей отличается средней степенью объектной ориентированности.

Достаточно универсальными являются методы поиска прототипа в базе данных, математический аппарат оптимизации. Их содержание и алгоритмы не зависят от того, какой объект оптимизируется или ищется в архиве: оптическая система или электронный блок, зубчатое зацепление или кулачок. О таких универсальных процедурах говорят, что они полностью объектно инвариантны.

Определение степени эвристичности и детерминированности, объектной ориентированности и объектной инвариантности, а также трудоемкости отдельных процедур и операций, позволяет в казалось бы непрерывном и неупорядоченном процессе проектирования безошибочно отделить выполняемые действия друг от друга, наиболее рационально использовать компьютерные средства. В частности, необходимо четко отделить все эвристические процедуры и обеспечить их выполнение человеком-проектировщиком. На компьютер же необходимо возложить выполнение всех детерминированных процедур и, в первую очередь, наиболее трудоемких. Для выполнения эвристических процедур проектировщику должна быть предоставлена из компьютера вся необходимая

информация, причем в наиболее наглядной и доступной форме, как правило, в графической. Что касается объектной ориентированности, то в первую очередь необходимо вычленять максимально объектно-инвариантные процедуры и их части – операции. Такие процедуры и операции используют универсальные алгоритмы и методы, хорошо развитые и тщательно отработанные в настоящее время множеством авторов для самых различных применений. Пакеты компьютерных программ, реализующие универсальные, объектно-инвариантные операции и процедуры проектирования, являются наиболее массовыми, широко известными и сравнительно недорогими.

#### **1.4.2 Математическая модель прибора при проектировании**

Каким бы сложным ни был прибор, конструкция и технология изготовления любого прибора могут быть описаны конечным числом значений зависимых параметров, численным образом представляющих конструкцию и материалы отдельных частей прибора, их взаимное расположение, особенности технологии, допуски на изготовление и др.

Поэтому с математической точки зрения прибор есть совокупность значений упорядоченных параметров. Обозначим эти параметры  $x_i, i = 1, \dots, n$ , причем число этих параметров  $n$  может быть очень велико. Удобно объединить их в один  $n$ -мерный вектор, или столбец параметров  $X$ :

$$X^T = (x_1, x_2, \dots, x_n),$$

где  $T$  – индекс операции транспонирования. Понятно, что изменение вектора  $X$  приводит к изменению конструкции прибора.

Аналогично можно выразить все характеристики прибора совокупностью чисел  $f_i, i = 1, \dots, m$ , и объединить их в  $m$ -мерный вектор характеристик:

$$F = (f_1, f_2, \dots, f_m).$$

Очевидно, последний и составляет содержание технического задания.

Процесс проектирования в таком случае решает задачу перехода от известных заданных значений элементов вектора  $F$  к неизвестным (определяемым в процессе проектирования) значениям элементов вектора  $X$ .

Предположим, что в результате проектирования найден вектор  $X$  и что изготовлен прибор, соответствующий этому вектору. Этот прибор обладает определенными характеристиками, то есть соответствует кон-

кретному вектору  $F$ . Если изменить вектор  $X$  и изготовить прибор, соответствующий этому новому вектору, то это будет другой прибор, с другими значениями характеристик. Это означает, что вектор характеристик  $F$  является функцией вектора параметров  $X$ . Так как процесс изготовления прибора по известному вектору  $X$  предполагается однозначным (в пределах допусков), то и функциональная зависимость  $F$  от  $X$  является вполне определенной и однозначной. Следовательно, можно записать:

$$F = F(X).$$

Эту зависимость физически реализует процесс изготовления, испытания и эксплуатации прибора. В этом смысле он является прямым процессом. Если построена достаточно хорошая математическая модель прибора, то для определения вектора  $F$  воспроизводить прибор по известному вектору  $X$  совсем не обязательно: процесс производства и испытания прибора логично заменить математическим моделированием. По отношению к производству, испытанию и эксплуатации оно решает прямую задачу.

Задача же проектирования, то есть задача нахождения значений параметров, обеспечивающих заданные характеристики прибора, является обратной. Для обратных задач вообще и для проектирования, в частности, характерны неоднозначность решения, отсутствие простых методов решения, а зачастую и вообще проблематичность существования самого решения. Прямая задача разрешима всегда, то есть по любому проекту можно изготовить прибор, и он будет иметь определенные значения характеристик (хотя, вполне вероятно, не устраивающие проектировщика). Но далеко не по любому техническому заданию, то есть по любому набору значений характеристик, можно спроектировать прибор, удовлетворяющий этому заданию. Даже если прибор можно спроектировать, то вполне вероятно, что возможен не единственный вариант.

Задача проектирования состоит в решении обратной задачи, когда по полному вектору заданных в ТЗ характеристик  $F$  определяется окончательный вектор параметров  $X$ . Это решение практически никогда не может быть получено по прямому пути.

Таким образом, проектирование как обратная задача характеризуется неоднозначностью решений, необходимостью выбора варианта из большого количества возможных решений, отсутствием определенного алгоритма решения. Другими словами, проектирование является творческим, эвристическим процессом.

Все процедуры, выполняемые на любом уровне и любой ветви проектирования, по цели выполнения объединяются в три группы: **синтеза, анализа и оптимизации**. Задача синтеза состоит в первоначальном создании по техническому заданию объекта проектирования. Задачи анализа сводятся к моделированию работы этого объекта и определения его характеристик. Задачи оптимизации заключаются в целенаправленном изменении параметров объекта, чтобы его характеристики стали оптимальными, то есть наилучшим образом удовлетворяли ТЗ. Окончательное решение получается путем сложного итерационного процесса, включающего синтез, анализ, оптимизацию и повтор этих процедур.

### 1.4.3. Синтез

Задача синтеза заключается в создании первоначального описания объекта проектирования по техническому заданию (на данном уровне данной ветви) [1].

Формально она сводится к определению неизвестного вектора параметров  $X$  по заданному вектору характеристик  $F$ :



Рис. 1.4. Синтез

Под  $X_s$  понимается начальное решение, представляющее набор значений параметров, который является приближенным и наверняка не удовлетворяет большинству требований технического задания. Существенное отличие задачи синтеза – гарантированная реализуемость решения. Это решение называют стартовой точкой. Вектор характеристик  $F$  при синтезе не является полным и не полностью соответствует исходному техническому заданию: он может включать лишь основные требования, у которых допустимые интервалы могут быть расширены. Можно сказать, что сущность задачи синтеза состоит в получении наиболее простыми средствами начального приближения, принимаемого за исходную, стартовую точку для последующей оптимизации.

Задача синтеза отличается крайней эвристичностью. Особенно это относится к структурному синтезу. Задача синтеза обладает также явно выраженной объектной ориентированностью, поскольку понятно, что методы синтеза механических, электромеханических систем, оптических или электронных схем, совершенно различны. Из-за высокой степени эвристичности синтез (особенно структурный) в значительной



своей части выполняется непосредственно проектировщиком. Тем более, что для опытного проектировщика синтез путем правильного выбора из типовых структур с возможной их модификацией является сравнительно нетрудоемкой, хотя и эвристической задачей. Синтез принципиально новой, ранее неизвестной структуры является весьма редким и относится к числу трудных изобретательских задач, выполняемых лишь опытными, талантливыми проектировщиками.

Различают два этапа синтеза – структурный и параметрический. На первом этапе определяется структура проектируемого объекта, то есть количество и типы элементов, последовательность расположения и связи между ними; на втором определяются численные значения параметров этой структуры.

При структурном синтезе механизмов определяются типы проектируемых механизмов и их элементов, виды связей между ними. При синтезе электронных схем – типы элементов, входящих в схему, (резисторов, конденсаторов, транзисторов) и их соединения.

После структурного синтеза следует параметрический, в процессе которого определяются численные значения параметров синтезированной структуры.

Так, для электронных схем при параметрическом синтезе определяются значения сопротивлений резисторов и емкостей конденсаторов, параметры транзисторов, для кулачкового механизма – коэффициенты уравнения профиля кулачка, для четырехзвенного механизма – длины его звеньев и т. д.

Параметрический синтез, как правило, производится с использованием приближенных формул, своих для каждой типовой структуры. Такие приближенные формулы обычно имеются в справочной литературе и могут быть легко запрограммированы для компьютера.

Весьма распространенным методом синтеза является синтез путем поиска прототипа в базе данных готовых решений и предыдущих проектов. Этот метод характеризуется высокой детерминированностью и универсальностью. В базе данных хранятся описания уже готовых объектов, взятые из различных источников, в том числе патентной литературы. Проектировщик составляет задание на поиск, содержащее набор характеристик, которым должен удовлетворять искомый объект. А система управления базой данных осуществляет поиск объекта, удовлетворяющего этому запросу. Возможны два варианта поисковых предписаний и методов поиска. Первый – это интервальное предписание, при котором для каждой характеристики задается интервал приемлемых значений. В этом случае одному поисковому предписанию может соответствовать несколько объектов, из которых проектировщик впоследствии

выбирает один, либо сужая интервалы в поисковом предписании, либо делая эвристический выбор. При этом может не найтись и ни одного объекта. Тогда проектировщик должен расширить допустимые интервалы поискового предписания. Второй вариант – это критериальное предписание, при котором характеристики ближайшего объекта должны быть по какому-либо критерию ближе всего к поисковому предписанию. Например, в соответствии со среднеквадратическим критерием, ищется объект, у которого минимальна сумма квадратов разностей соответствующих характеристик объекта и поискового предписания, деленных на заданные масштабы. При использовании критериального предписания всегда будет найден один и только один объект, удовлетворяющий заданным условиям поиска. Использование СУБД (системы управления базами данных) является наиболее простым и удобным методом синтеза, вполне детерминированным и совершенно универсальным.

При этом СУБД одновременно решает задачу как структурного, так и параметрического синтеза. Единственным, но весьма существенным недостатком этого метода является то, что он принципиально не может дать нового решения, а только использует уже существующие. Для частичного устранения этого недостатка применяют модификацию найденного в архиве решения. Модификация может заключаться в добавлении новых элементов, масштабировании всего объекта или частей, замене некоторых элементов и т.п. Разумеется, модификация отличается высокой степенью эвристичности и выполняется достаточно опытным проектировщиком.

Структурная схема синтеза выглядит следующим образом (рис. 1.5.).

Процедура «Задание на синтез», является эвристической и выполняется проектировщиком. Процедура «Синтез» является детерминированной и выполняется компьютером (или проектировщиком, но по четким алгоритмам и формулам). Конкретное содержание этих процедур зависит от проектируемого объекта и от выбранного метода синтеза. При поиске прототипов в архиве процедура «Задание на синтез» состоит в составлении поискового предписания, а процедура «Синтез» – в поиске объекта в соответствии с этим предписанием. При выборе одного из типовых решений параметрического синтеза по приближенным эмпирическим соотношениям в эвристическую процедуру «Задание на синтез» входят собственно структурный синтез и определение значений исходных данных, выполняемых проектировщиком «в уме». В этом случае детерминированная процедура «Синтез» сводится к производству вычислений по формулам параметрического синтеза.

Процедура «Оценка результатов», так же, как и первая процедура, является эвристической и выполняется проектировщиком.



Рис. 1.5. Структурная схема синтеза

В случае явно неудачного результата производится возврат на этап формулировки нового задания на синтез. Такой возврат также имеет место в случае, когда после поиска прототипа требуется его модификация, для которой необходим следующий цикл синтеза.

Если на этом этапе результат синтеза признается удачным, то осуществляется переход к анализу.

#### 1.4.4. Анализ

Анализ по своей сути представляет моделирование работы проектируемого на данном уровне объекта с целью определения его характеристик. В большинстве случаев анализ реализуется в настоящее время как математическое, компьютерное моделирование. В некоторых случаях применяется макетирование (изготовление проектируемого объекта).



*Рис. 1.6. Анализ*

Характерной особенностью анализа является наличие нескольких (иногда довольно большого числа) уровней, отличающихся глубиной и полнотой анализа и его трудоемкостью. На начальных уровнях определяется сравнительно небольшое количество основных характеристик. Это требует минимального количества вычислений. Поэтому эти уровни характеризуются малой трудоемкостью. На следующих, более глубоких уровнях, анализируется намного большее число характеристик. Это требует возрастающего объема вычислений, причем трудоемкость различных уровней анализа может отличаться в десятки и даже сотни раз.

Разделение анализа на уровни очень важно для экономии ресурсов компьютера, времени проектировщика и исключения ненужных затрат. В самом деле, если проектное решение не удовлетворяет техническому заданию по основным характеристикам, определяемым на начальных уровнях анализа, то не стоит тратить ресурсы компьютера и проектировщика для проведения трудоемких вычислений на последующих уровнях.

На каждом уровне проектирования можно выделить следующие виды анализа: одновариантный (точечный), поливариантный, технологический.

Одновариантным называется анализ, при котором характеристики проектируемого объекта определяются только для одного набора значений параметров. Он применяется в случае, когда требуются значения характеристик конкретного проектного решения. На практике он распространен наиболее широко. Математическим языком об одновариантном анализе можно сказать, что при его реализации вычисления производятся в одной точке пространства параметров. Поэтому такой вид анализа называют также точечным.

Поливариантным называется анализ, при котором характеристики проектируемого объекта определяются для нескольких вариантов. Последние имеют по отношению друг к другу небольшие отличия: возмущения или приращения в значениях некоторых параметров. Тем самым как бы определяется чувствительность характеристик объекта к изменениям параметров. Поэтому поливариантный анализ называют иногда анализом влияния параметров или анализом чувствительности. При

полном анализе чувствительности определяется влияние всех параметров на все характеристики. При этом вычисляется полная матрица производных всех характеристик по всем параметрам:

$$A = \left[ \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \right], \quad i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n,$$

где  $m$  – количество характеристик,  $n$  – количество параметров.

При выборочном анализе влияния параметров исследуется влияние только некоторых параметров на некоторые характеристики.

Для анализа чувствительности обычно применяют конечно-разностные методы, при которых каждый из параметров поочередно возмущается на заданное приращение. В полученных точках производятся вычисления искомых характеристик. При этом могут использоваться как односторонние, так и двусторонние методы. В последнем случае возмущение параметра производится поочередно в обе стороны от исходной точки. Понятно, что при использовании конечно-разностных методов трудоемкость анализа по сравнению с точечным возрастает соответственно в  $n$  или в  $2n$  раз. Для уменьшения трудоемкости этого вида анализа применяют методы аналитического дифференцирования, но только в случаях сравнительно простых математических моделей проектируемых объектов.

Анализ влияния параметров позволяет оценить степень чувствительности проектного решения к изменению тех или иных параметров, другими словами, степень его устойчивости. Для эвристической оценки устойчивости обычно достаточно выборочного анализа влияния. Полный анализ влияния отличается высокой трудоемкостью, содержит большое количество трудно обозримой информации и используется весьма редко. Он необходим для технологического анализа или в процессе оптимизации.

Технологический анализ заключается в назначении и моделировании технологических допусков, то есть допустимых отклонений параметров проектируемого объекта от номинальных значений. Технологическому анализу всегда предшествует полный анализ влияния параметров, дающий для него необходимую информацию. Технологический анализ состоит из двух этапов: распределения допусков по отдельным параметрам и статистического моделирования назначенных допусков с их возможной последующей коррекцией.

Алгоритм анализа выглядит следующим образом (рис. 1.7):

Процедура «Задание на анализ» является эвристической. В процессе ее выполнения выбирается уровень, вид и метод анализа, задаются режимы анализа, форма отображения результатов и т. д.



Рис. 1.7. Алгоритм анализа

Ответственным моментом является здесь выбор уровня анализа, обеспечивающего минимальную общую трудоемкость проектирования. «Анализ» – это совершенно детерминированная операция, выполняемая компьютером в соответствии с полученным заданием.

Процедура «Оценка результатов анализа» является, конечно, эвристической. В результате ее выполнения могут быть приняты следующие решения:

1. При оценке результатов данного уровня как приемлемых осуществляется переход на следующий уровень или вид анализа, то есть возврат к процедуре «Задание на анализ» с изменением уровня или режимов анализа.

2. При оценке результатов всех необходимых уровней как приемлемых проектирование на данном узле считается выполненным успешно и осуществляется переход на следующий уровень всего процесса.

3. При оценке результатов данного уровня как неприемлемых делается переход к попытке оптимизации.

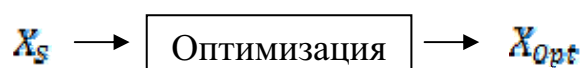
Характерной особенностью анализа является большое количество циклов возврата с углублением уровня и изменением вида анализа или изменением его режимов. Анализ относится к умеренно объектно-ориентированным процедурам. Его аппарат зависит от физической сущности проектируемого объекта и, естественно, различен для оптических, электронных, кинематических схем. Но он практически не зависит от конкретного типа объекта, то есть, например, для любых кинематических схем применяется один и тот же аппарат.

Такие методы анализа, как анализ влияния параметров конечно-разностным методом, технологический анализ являются универсальными и в принципе пригодными для анализа любых объектов. Как показывает опыт, эвристические процедуры «Задание на анализ» и «Оценка результатов» достаточно просты и не имеют большого объема работы в противоположность синтезу, где роль объема эвристической части является определяющей. Основной же объем работы здесь приходится на выполнение детерминированной процедуры «Анализ». При анализе очень велика роль процедуры «Оценка результатов». Именно здесь в наибольшей мере проявляются опыт и квалификация проектировщика: он должен разбираться в многочисленных промежуточных результатах, правильно оценивать их часто в отсутствии четких критериев, безошибочно принимать решения о дальнейших действиях.

#### **1.4.5. Оптимизация**

Последней и, вероятно, наиболее важной задачей проектирования является оптимизация. Она представляет собой плавное, постепенное изменение параметров проекта с целью улучшения его качества, достижения оптимальных, наиболее благоприятных, наилучших значений заданных характеристик.

Оптимизация не может начинаться «от нуля», от пустого места, для нее необходимо начальное приближение, стартовая точка.



*Рис. 1.8. Оптимизация*

Эта точка соответствует предварительно синтезированной структуре, полученной с некоторыми приближенными, начальными значениями параметров. По завершении оптимизации определяют окончательные значения параметров, обеспечивающие лучшие, оптимальные значения характеристик.

Существенно, что при оптимизации структура проектируемого объекта остается неизменной, меняются лишь значения параметров этой структуры. В количественном выражении эти изменения часто столь малы, что оптимизированная конструкция или схема внешне практически не отличаются от исходных, хотя улучшение характеристик может быть разительным.

Проблема оптимизации состоит в том, чтобы найти правильную закономерность одновременного изменения большого количества параметров, или, другими словами, найти нужную «траекторию движения» в пространстве параметров. Для решения этой проблемы привлекается довольно сложный математический аппарат. Благодаря достижениям математиков и программистов оптимизация превратилась в мощнейший инструмент проектирования, без которого разработка современных приборов была бы невозможной. Именно оптимизация позволяет из весьма приближенного начального проектного решения получать за весьма сжатое время проект, удовлетворяющий самым жестким и трудно сочетаемым требованиям. С помощью современных методов оптимизации даже начинающий проектировщик может достаточно быстро получить решение, которое ранее было доступно только проектировщикам с огромным опытом и интуицией.

Для выполнения оптимизации необходимо прежде всего построить так называемую оптимизационную модель объекта. Эта модель включает в себя параметры оптимизации, оптимизируемые функции, критерий оптимизации, а также ограничения на характеристики объекта.

Параметры оптимизации – это те параметры, изменением которых пытаются добиться улучшения характеристик. Обычно не все параметры структуры объекта (конструктивные параметры) включаются в оптимизацию. Так как трудоемкость оптимизации пропорциональна числу параметров, то начинать оптимизацию надо с небольшого количества тщательно отобранных параметров, а затем их количество постепенно увеличивать. По этой же причине при оптимизации часто изменяют не непосредственно конструктивные параметры, а другие величины, связанные с ними определенным образом.

Математические величины, связанные с характеристиками, которые в процессе оптимизации необходимо улучшить, называются *оптимизируемыми функциями*.



**Критерий оптимизации**, или оценочная функция, – это число, дающее общую оценку оптимизации по всем функциям. Обычно в качестве критерия выбирают сумму квадратов оптимизируемых функций.

Правильный выбор оптимизируемых функций является одним из ключевых моментов оптимизации. Этот выбор должен удовлетворять трем противоречивым требованиям: адекватность, простота и низкая трудоемкость.

Требование адекватности означает, что минимизация суммы квадратов оптимизируемых функций должна соответствовать действительному улучшению качества проектируемого объекта. Сложность обеспечения адекватности заключается в том, что, во-первых, истинное качество проекта часто описывается достаточно большим набором характеристик, иногда сформулированных недостаточно четко, и поэтому часто не позволяющим количественно описать это качество суммой квадратов функций. Во-вторых, в тех случаях, когда это можно сделать, оптимизируемые функции получаются сложными и не удовлетворяют требованиям простоты и низкой трудоемкости.

Требование простоты оптимизации математически выражается линейным характером зависимости оптимизируемых функций от параметров. Чем ближе указанные зависимости к линейным, тем успешнее идет оптимизация. При строгой линейности современные методы дают решение за один шаг. Напротив, чем более нелинейны эти функции, тем больше шагов требует процесс оптимизации, тем медленнее он сходится.

Трудоемкость оптимизации определяется тем количеством вычислений, которые необходимы для реализации процесса нахождения значений функций по текущим значениям параметров. Этот процесс (часто называемый «пробой») при оптимизации повторяется гигантское количество раз. Поэтому затраты на оптимизацию прямо пропорциональны трудоемкости «пробы» и, если она оказывается большой, то процесс оптимизации может стать долгим, а получение результатов за обозримое время проблематичным.

Нетрудно убедиться, что указанные условия противоречивы.

Действительно, ведь достижение высокой адекватности приводит к усложнению зависимостей функций от параметров и увеличению трудоемкости их вычислений.

В оптимизационную модель входят также функции-ограничения. Они не позволяют изменяться параметрам оптимизации совершенно свободно.

Различают ограничения-равенства, выражающие необходимость сохранения при оптимизации заданных значений каких-либо характери-

стик, и ограничения-неравенства, описывающие различного рода требования физической реализуемости, габаритов, технологичности и другие.

Принципы оптимизации одинаковы для любых объектов: электронных схем, оптических систем, кинематических схем, технологических процессов и другие. В этом смысле оптимизация является полностью объектно-инвариантной процедурой.

Процесс оптимизации всегда строится как последовательность «пробных точек», расположенных в пространстве параметров. В них производятся «пробы»: сначала в исходной точке, соответствующей начальной конструкции, затем в промежуточных, пока не будет найдена точка минимума оценочной функции (при соблюдении ограничений). Процесс оптимизации состоит из повторяющихся шагов, причем начальное состояние каждого из шагов совпадает с конечным состоянием предыдущего. На каждом шаге производится анализ свойств оптимизируемой системы в окрестности исходной точки данного шага. Количество «проб», которое на это обычно тратится, пропорционально количеству параметров. Затем определяется вектор движения в пространстве параметров в наилучшем направлении, обеспечивающем скорейшее уменьшение оценочной функции, и, наконец, производится движение по этому «вектору спуска» до наилучшей на данном шаге точки. На спуске вдоль выбранного направления тратится обычно от одной до десяти «проб». Затем найденная точка принимается за начальную точку следующего шага, и процесс повторяется. С приближением к минимуму процесс замедляется. При этом очередной шаг не приводит к заметному уменьшению величины оценочной функции. Количество шагов, требуемых для достижения минимума, и обеспечивающих сходимость процесса, зависит от линейности оптимизируемых функций (и ограничений) по отношению к параметрам.

Трудоемкость каждого шага определяется, очевидно, трудоемкостью «пробы» и количеством параметров оптимизации. Существует большое количество самых разнообразных методов оптимизации, работающих по описанной схеме. Эти методы отличаются друг от друга правилами анализа свойств системы в окрестности исходной точки, принципами построения направления спуска, алгоритмами движения по этому направлению, способами контроля ограничений.

Оптимизация, также как синтез и анализ, реализуется в виде набора процедур (рис. 1.9).

Первой в ней идет эвристическая процедура – «Задание на оптимизацию». Ее содержание состоит в построении оптимизационной модели проектируемого объекта, то есть выборе параметров оптимизации, оптимизируемых функций, ограничений (типа равенств и неравенств).

На этом этапе производится также выбор метода и режимов оптимизации. Роль этой процедуры чрезвычайно велика.

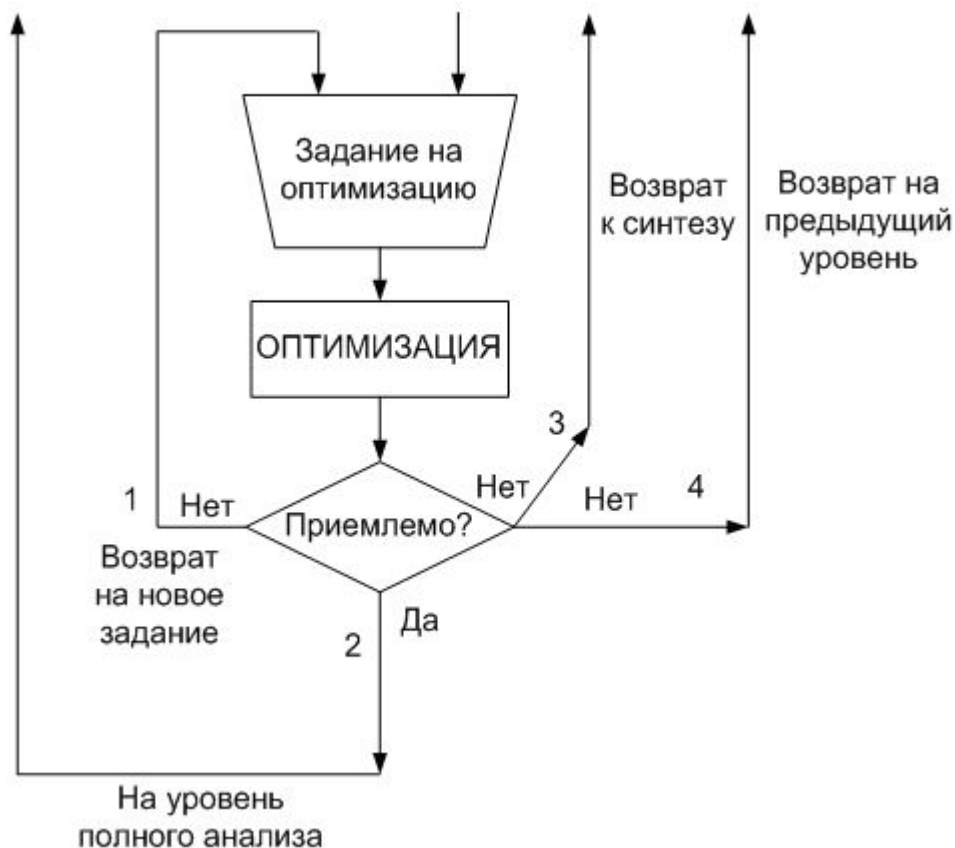


Рис. 1.9. Алгоритм оптимизации

Как уже говорилось, выбор оптимизационной модели, метода и режимов оптимизации решающим образом влияет на скорость оптимизации и ее результат. Неудачный выбор оптимизируемых функций (в смысле их нелинейности) или неподходящего метода приводит к крайне низкой сходимости, то есть к большому количеству шагов оптимизации при медленном уменьшении оценочной функции. Плохая адекватность оптимизационной модели приводит к тому, что достигнутый минимум оценочной функции не соответствует улучшению по другим, более сложным характеристикам качества, и конструктор вынужден отвергнуть полученный результат. Выбор слишком трудоемкой «пробы» или неудачного для данной ситуации метода приводят к резкому возрастанию времени, затрачиваемого на каждый шаг оптимизации. В результате конструктор может не выполнить оптимизацию в отведенный ресурс времени. Эвристичность процедуры «Задание на оптимизацию» определяется тем, что не существует строгих правил выбора оптимизаци-

ционной модели и метода оптимизации для всех возможных ситуаций. Правильный выбор достигается благодаря только опыту и квалификации проектировщика, приобретенным в результате длительного обучения и практики.

Детерминированная процедура «Оптимизация» выполняется компьютером по заданию на оптимизацию, составленному конструктором. При этом компьютер по заложенной в него программе реализует выбранный метод и алгоритм оптимизации. Как отмечалось выше, процесс оптимизации является итерационным и состоит из повторяющихся шагов. Проектировщик может следить за ходом оптимизации, то есть за изменениями в параметрах оптимизации, оптимизируемых функциях, критерия оптимизации. При неоправданно медленном продвижении процесса проектировщик может остановить его. После завершения оптимизации или ее принудительной остановки проектировщик производит эвристическую оценку результатов и принимает решение о дальнейших действиях.

Решение «1» означает возврат на оптимизацию с изменением или модификацией оптимизационной модели, например, путем добавления параметров функций, изменением метода оптимизации. Решение «2» принимается, когда после эвристической оценки результат оптимизации выглядит удачным и необходим переход к его полному анализу. Решение «3» принимается в случае неудачного результата оптимизации, когда проектировщик считает, что причиной неудачи является стартовая точка, и поэтому производится возвращение к синтезу другого начального приближения. Решение «4» принимается после многократных неудачных попыток оптимизировать проектную задачу на данном уровне и состоит в возврате на предыдущий уровень.

Оценивая задачу оптимизации в целом, можно сказать, что во-первых, ее эвристическая часть по объему не очень велика, но крайне важна и требует высокой квалификации и опыта проектировщика. Во-вторых, детерминированная часть отличается крайне высокой трудоемкостью, часто наибольшей по сравнению с трудоемкостью решения других задач проектирования (синтеза и анализа). В-третьих, оптимизация относится к объектно-инвариантным процедурам, поскольку ее принципы, методы и алгоритмы совершенно универсальны.

#### ***1.4.6. Типовой алгоритм проектирования***

Как показано выше, алгоритм проектирования складывается из последовательного решения задач синтеза, анализа и оптимизации (рис. 1.10).

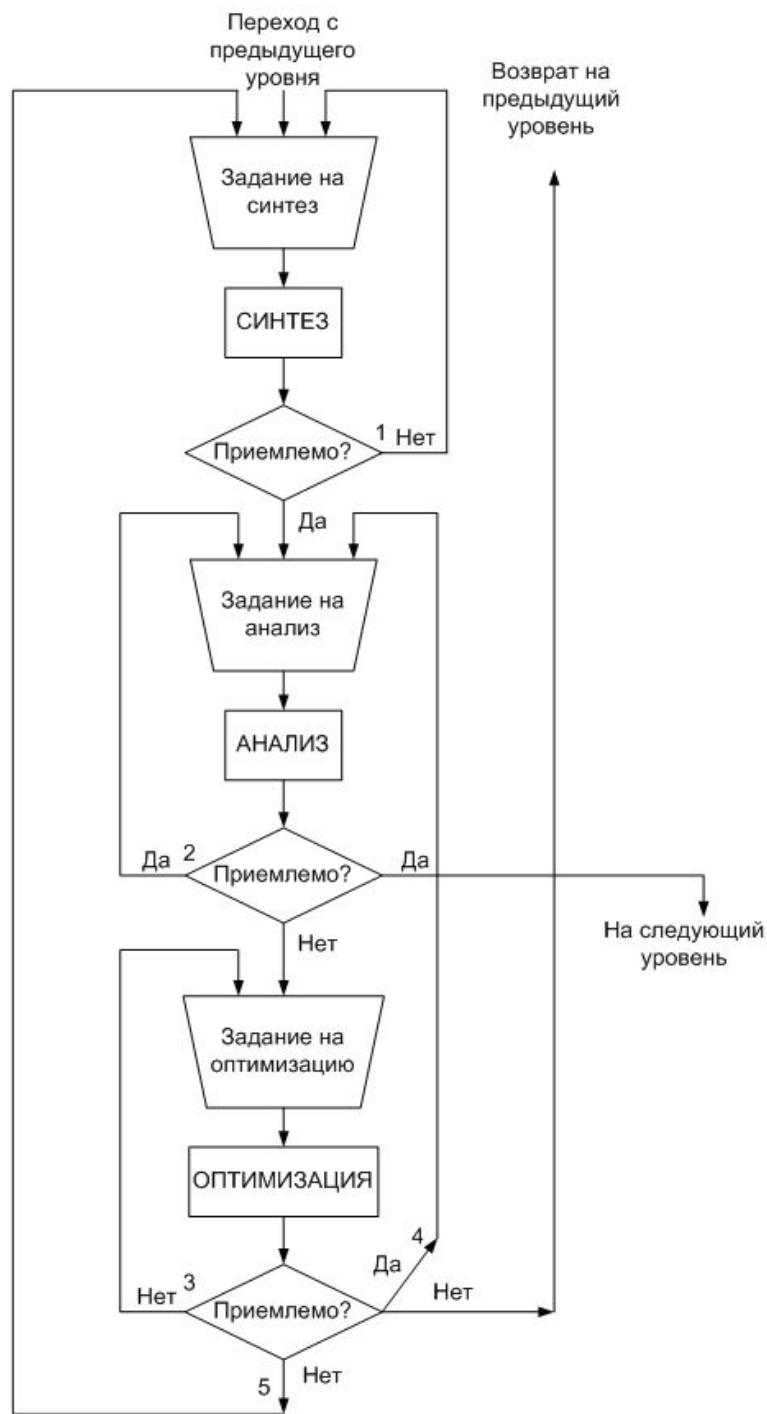


Рис. 1.10. Типовой алгоритм проектирования

Характерным для алгоритма проектирования является чередование эвристических и детерминированных процедур. Первые выполняются проектировщиком на основе его опыта, знаний и квалификации, вторые выполняются компьютером.

Из такого чередования следуют естественная неизбежность интерактивного, диалогового режима работы проектировщика с компьютером и невозможность полной автоматизации проектирования. Даже при максимальном использовании компьютерной техники проектирование всегда будет именно *автоматизированным*, а не *автоматическим*. Важнейшим при этом оказывается оптимальное разделение функций между человеком и компьютером.

Из схемы на рис. 1.10 наглядно виден итерационный характер проектирования. Это обусловлено наличием многократных возвратов на повторение отдельных процедур с измененными заданиями. Практика показывает, что циклы повторений вложены друг в друга, то есть бывают ситуации, называемые «циклом в цикле». Например, при проектировании приходится выполнять несколько итераций в области синтеза по пути, обозначенному номером «1», до нескольких десятков итераций в области анализа по пути «2», до десятка и более итераций в области оптимизации по пути «3», столько же возвратов от оптимизации к анализу по пути «4», несколько возвратов от оптимизации к синтезу по пути «5» и так далее. Если учесть, что на рис. 1.10 показан алгоритм проектирования только на одной ветви и на одном уровне общего дерева, то еще возможны возвраты на верхние уровни. Линейный, то есть без возвратов, процесс проектирования осуществим практически разве что в самых примитивных случаях.

Итерационный характер проектирования связан с наличием эвристических процедур, а они (именно в силу своей неоднозначности) привести к оптимальному результату сразу не могут и требуют неоднократных последующих корректировок, изменений и пересмотров стартовых точек.

## 2. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

### 2.1. САПР – определение, назначение, области применения

Как было подробно рассказано в главе 1, проектирование – процесс составления описания, необходимого для создания в заданных условиях еще не существующего объекта на основе первичного описания этого объекта и (или) алгоритма его функционирования. Проектирование включает в себя комплекс работ по изысканию, исследованию, расчетам и конструированию, имеющих целью получение описания предмета проектирования, необходимого и достаточного для создания нового изделия.

Требования, предъявляемые к качеству проектов, срокам их выполнения, оказываются все более жесткими по мере увеличения сложности проектируемых объектов и повышения важности выполняемых ими функций. Удовлетворить эти требования с помощью простого увеличения численности проектировщиков нельзя, т.к. возможность параллельного проведения проектных работ ограничена. Классические неавтоматизированные методы проектирования зачастую оказываются неэффективными. Появляется необходимость радикального изменения всей технологии проектирования на основе научно обоснованных принципов применения вычислительной техники и автоматизации. Решить проблему можно только на основе автоматизации проектирования – широкого применения вычислительной техники.

Концепция автоматизированного проектирования становится важнейшим фактором ускорения научно-технического прогресса. Только с использованием методов автоматизированного проектирования возможно получить требуемое качество разрабатываемого прибора на базе большого количества проектных решений.

Без соответствующего уровня технологии проектирования даже использование последних достижений физики, химии, металлургии, электроники не даст максимального эффекта. В настоящее время идет процесс коренного изменения технологии проектно-конструкторских работ на основе научно обоснованных принципов применения вычислительной техники.

Под автоматизацией проектирования понимается такой способ выполнения процесса разработки проекта, когда проектные процедуры и операции осуществляются проектировщиком при тесном взаимодействии с компьютером. Автоматизация проектирования предполагает систематическое использование средств вычислительной техники при

рациональном распределении функций между проектировщиком и компьютером и обоснованном выборе методов машинного решения задач.

Рациональное распределение функций между человеком и компьютером подразумевает, что человек должен в основном решать задачи творческого характера, а компьютер – задачи, допускающие формализованное описание в виде алгоритма, что позволяет достичь большей эффективности по сравнению с традиционными ручными способами.

Цель автоматизации проектирования – повышение качества, снижение материальных затрат, сокращение сроков проектирования и числа проектировщиков, повышение производительности их труда.

Система автоматизированного проектирования (САПР) – это организационно-техническая система, состоящая из комплекса средств автоматизации проектирования и обеспечивающая автоматизированное проектирование на всех этапах разработки прибора – от предпроектных исследований, проектирования до подготовки производства.

Наилучшая форма организации процесса проектирования достигается при применении САПР – комплекса средств автоматизации проектирования, взаимосвязанных с необходимыми подразделениями проектной организации и выполняющего автоматизированное проектирование.

Системы автоматизированного проектирования предназначены для выполнения проектных процедур в автоматизированном режиме [20]. САПР создаются в проектных, конструкторских, технологических и других организациях и на предприятиях с целью:

- повышения качества и технико-экономического уровня проектируемой и выпускаемой продукции;
- повышения эффективности объектов проектирования;
- уменьшения затрат на их создание и эксплуатацию;
- сокращения сроков, уменьшения трудоемкости проектирования и повышения качества проектной документации.

Достижение этих целей возможно при условиях:

- систематизации и совершенствования процессов проектирования на основе применения математических методов и средств вычислительной техники;
- комплексной автоматизации проектных работ в проектной организации с необходимой перестройкой ее структуры и кадрового состава;
- повышения качества управления проектированием;
- применения эффективных математических моделей проектируемых объектов, комплектующих изделий и материалов;
- использования методов многовариантного проектирования и оптимизации;



- автоматизации трудоемких и рутинных проектных работ;
- замены натуральных испытаний и макетирования математическим моделированием;
- создания единых банков данных, содержащих систематизированные сведения справочного характера, необходимые для автоматизированного проектирования объектов;
- унификации и стандартизации методов проектирования.

Часто САПР понимают ограниченно. Под САПР понимают только чертежно-конструкторские графические редакторы с ограниченными наборами функций проектирования и автоматизированного проектирования технологических процессов общемашиностроительного назначения. Еще САПРом называют расчет или моделирование с помощью компьютера какого-то одного параметра или группы параметров либо синтез структуры разрабатываемого устройства (в лучшем случае какую-то одну проектную процедуру). Автоматизированное проектирование отождествляется с проектированием с применением компьютера для решения отдельных инженерных задач. При этом не учитывается, что для САПР объектом автоматизации является весь жизненный цикл изделия – от предпроектных исследований, выпуска конструкторской документации до утилизации.

Современная система САПР должна быть способна обеспечить автоматизированную поддержку работ проектировщиков на всех стадиях цикла проектирования и изготовления новой продукции (рис. 2.1).

Разумеется, чем сложнее разрабатываемое изделие, тем более сложной и многофункциональной должна быть САПР.

Существует общепринятое международное обозначение систем автоматизированного проектирования. Системы проектирования принято определять как **CAD/CAM/CAE/PDM-системы**. Функции автоматизированного проектирования распределяются в них следующим образом: модули CAD (Computer Aided Design) – для геометрического моделирования и машинной графики, модули CAM (Computer Aided Manufacturing) – для технологической подготовки предприятия, а модули CAE (Computer Aided Engineering) – для инженерных расчетов и анализа с целью проверки проектных решений, PDM-система (Product Data Management) – система документооборота и управления им.

В современном мире системы автоматизированного проектирования занимают исключительное положение среди компьютерных приложений. На рынке предлагается множество систем САПР как российского, так и зарубежного производства.

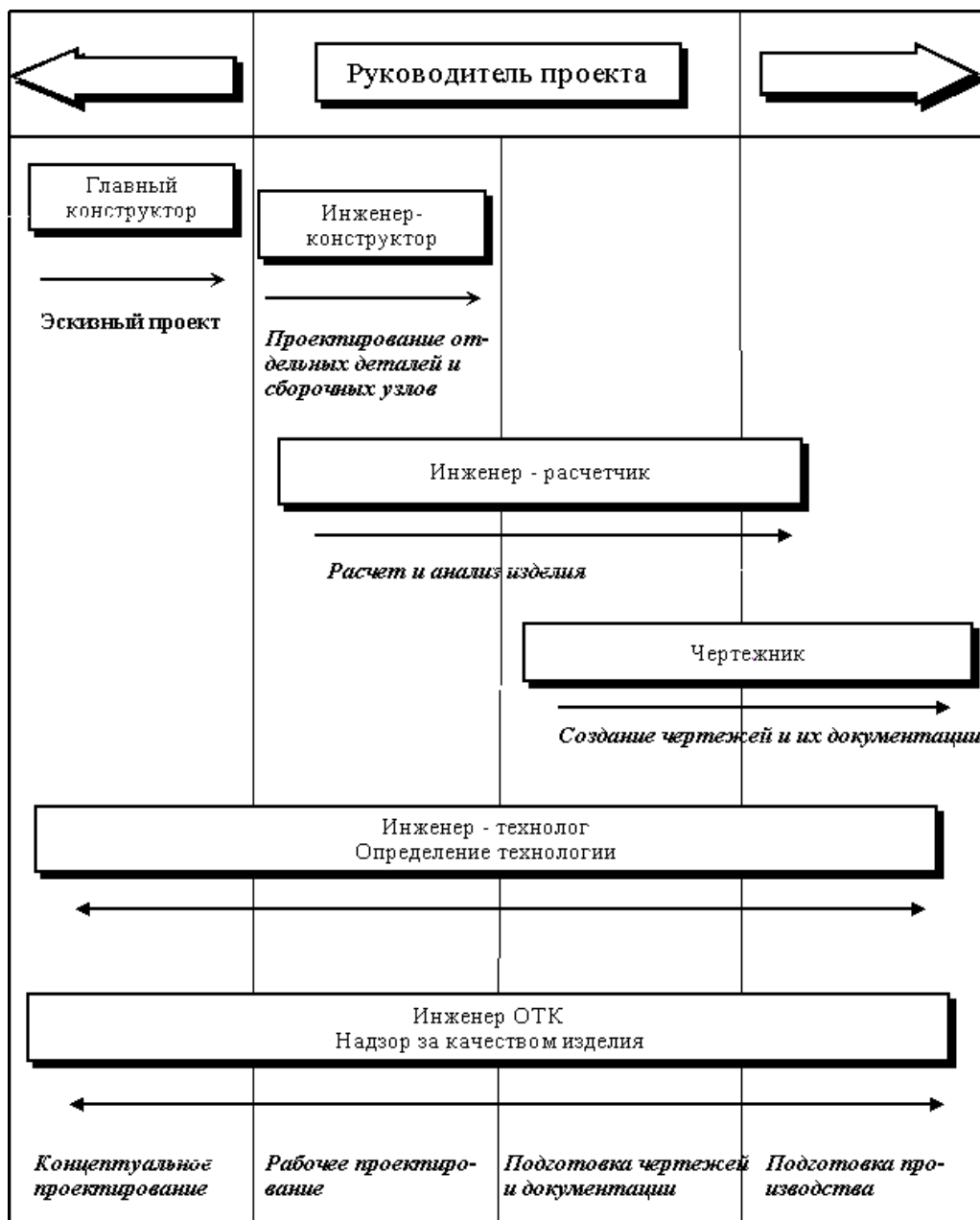


Рис. 2.1. Стадии цикла проектирования

Ряд программных продуктов САПР представляет из себя некоторый конгломерат из разрозненных модулей, решающих частные задачи. Такого рода разобщенность приводит пользователя к решению ряда проблем, связанных с САПР, первая из которых – проблема интеграции разрозненных пакетов САПР.

Вторая проблема САПР связана с уровнем «квалификации» САПР. Стремительное распространение персональных компьютеров сопровождалось не менее стремительным потоком зарубежных САПР. Некоторые из этих систем имеют крайне низкий уровень их «интеллек-

туального» развития. Они не способны самостоятельно принять ни одного технического решения и в руках инженера, принимающего решения, являются не более чем усовершенствованным электронным кульманом. Все богатство инженерных знаний остается в книгах, фирменный инженерный опыт – в умах людей.

Необходимость решения проблемы «интеллектуализации» САПР связано с тем, что человечество вступило в фазу информатизации общества, где наибольшую ценность приобретают знания. Совокупность данных и знаний формируют информационные ресурсы, объем и качество которых будет определять конкурентоспособность предприятий.

Третья основная проблема САПР связана с главным рыночным показателем – отношением «эффективность/цена». Возможности программных средств должны соответствовать потребностям данного рабочего места (профессиональным, функциональным и т. д.). Каждое рабочее место должно быть оснащено арсеналом средств, необходимых и достаточных для эффективного выполнения своих функций. В тоже время опыт показывает, что это трудновыполнимо. Например, при проектировании оснастки для листовой штамповки нет необходимости в твердотельном моделировании. Нужны справочные и расчетные данные, вариантность при выборе решения и т. д., а для оформления результата – обычная двумерная графика, чего не скажешь при проектировании пресс-форм.

Совершенно ясно, что все три основные проблемы САПР взаимосвязаны и требуют комплексного решения на основе новых подходов и современных технологий. **Сегодня необходимы принципиально новые по своим потребительским качествам проблемно-ориентированные программные средства, разработанные по единой технологии и для конкретных условий применения.**

В настоящее время выделяют основные области применения САПР:

- Базовые системы САПР (CAD/CAM/CAE);
- Машиностроение и приборостроение;
- КИПиА и электрика;
- Проектирование промышленных объектов;
- Архитектура, строительство, генплан, транспорт;
- Геоинформационные системы;
- 3D-дизайн, анимация и видеографика;
- Реклама;
- Нормативные базы;
- Сканирование, гибридное редактирование, векторизация;
- Электронные архивы и документооборот;
- Персональные решения.

## **2.2. Состав и структура САПР**

Теоретические основы САПР сформировались в конце 60-х – начале 70-х годов прошлого столетия и нашли свое отражение как в литературе, так и в Государственных стандартах [13,14,16,18,20,21].

### **2.2.1. Подсистемы САПР**

Составными структурными частями САПР, жестко связанными с организационной структурой предприятия, являются подсистемы, в которых при помощи специализированных комплексных средств решается функционально законченная последовательность задач САПР [14].

По назначению подсистемы разделяют на проектирующие и обслуживающие.

Проектирующие подсистемы имеют объектную ориентацию и реализуют определенный этап (стадию) проектирования или группу непосредственно связанных проектных задач. Примерами проектирующих подсистем могут быть подсистемы, реализующие эскизное проектирование изделий, проектирование корпусных деталей, проектирование технологических процессов механической обработки.

Обслуживающие подсистемы имеют общесистемное применение и обеспечивают поддержку функционирования проектирующих подсистем, а также оформление, передачу и вывод полученных в них результатов. Примерами обслуживающих подсистем являются автоматизированный банк данных, подсистема документирования, подсистема графического ввода-вывода.

### **2.2.2. Компоненты видов обеспечения САПР**

Средства автоматизации проектирования группируют по видам обеспечения автоматизированного проектирования.

**Математическое обеспечение САПР.** Основу математического обеспечения САПР составляют алгоритмы, по которым разрабатывается программное обеспечение САПР. Элементы математического обеспечения САПР чрезвычайно разнообразны. Среди них имеются инвариантные элементы принципы построения функциональных моделей, методы численного решения алгебраических и дифференциальных уравнений, постановки экстремальных задач, поиски экстремума. Разработка математического обеспечения является самым сложным этапом создания САПР, от которого в наибольшей степени зависят производительность и эффективность функционирования САПР в целом.

По назначению и способам реализации математическое обеспечение САПР делится на две части: 1) математические методы и построенные на их основе математические модели, описывающие объекты проектирования; 2) формализованное описание технологии автоматизированного проектирования.

Способы и средства реализации первой части математического обеспечения наиболее специфичны в различных САПР и зависят от особенностей объектов проектирования. Что касается второй части математического обеспечения, то формализация процессов автоматизированного проектирования в комплексе оказалась более сложной задачей, чем алгоритмизация и программирование отдельных проектных задач. При решении этой задачи должна быть формализована вся логика технологии проектирования, в том числе логика взаимодействия проектировщиков друг с другом на основе использования средств автоматизации. Методы и положения общей теории систем, которая более всего подходит для решения такого рода задач, пока не нашли применения в рассматриваемой области. Работы по автоматизации проектирования во многих случаях выявили несовершенство методологии самого проектирования и привели к необходимости одновременного решения задач по совершенствованию процессов проектирования. Взгляды различных авторов на концепции совершенствования и развития методологии проектирования в одном полностью сходны: в основе проектирования должен лежать системный подход. Математическое обеспечение САПР должно описывать во взаимосвязи объект, процесс и средства автоматизации проектирования. Так как в настоящее время установившейся теоретической базы для решения этой задачи не существует, то практически происходит процесс интеграции в единый комплекс средств моделирования сложных систем и различных математических методов.

В развитии этого процесса можно выделить два перспективных направления:

- развитие методов получения оптимальных проектных решений, в том числе ориентированных на автоматизированное проектирование;
- совершенствование и типизация самих процессов автоматизированного проектирования, инвариантных к видам проектируемых объектов.

Важным результатом совершенствования и типизации технологии процессов автоматизированного проектирования явилась разработка методических указаний Госстандарта «САПР. Типовые функциональные схемы проектирования изделий в условиях функционирования систем». В них подчеркивается, что процесс автоматизированного проектирования по составу и последовательности процедур, содержанию и формам проектной документации качественно отличается от традици-

онного процесса проектирования. Вместе с тем в процессе автоматизированного проектирования можно выделить определенное число процедур, инвариантных к объектам проектирования. Перспективной в совершенствовании и типизации технологии процессов автоматизированного проектирования является разработка математического аппарата моделирования типового процесса проектирования и выпуск базовых программно-методических комплексов, реализующих такие модели.

**Программное обеспечение САПР.** Программное обеспечение САПР представляет собой совокупность всех программ и эксплуатационной документации к ним, необходимых для выполнения автоматизированного проектирования. Программное обеспечение делится на общесистемное и специальное (прикладное).

*Общесистемное* программное обеспечение предназначено для организации функционирования технических средств, т.е. для планирования и управления вычислительным процессом, распределения имеющихся ресурсов, и представлено операционными системами ЭВМ и вычислительных комплексов (ВК). Общесистемное ПО обычно создается для многих приложений и специфику САПР не отражает.

В *специальном* (прикладном) программном обеспечении реализуется математическое обеспечение для непосредственного выполнения проектных процедур. Прикладное программное обеспечение обычно имеет форму пакетов прикладных программ, каждый из которых обслуживает определенный этап процесса проектирования или группу однотипных задач внутри различных этапов.

Возможности, предоставляемые пользователям современными вычислительными средствами, в большей степени определяются их операционными системами, чем техническими устройствами. Операционная система организует одновременное решение различных задач, динамическое распределение каналов передачи данных и внешних устройств между задачами, планирование потоков задач и последовательность их решения с учетом установленных критериев, динамическое распределение памяти вычислительного комплекса. Однако операционная система требует для своей работы определенных ресурсов: процессора, внешней и основной памяти. Чем большими возможностями обладает операционная система, тем больше требуется для нее ресурсов. Операционные системы можно генерировать применительно к определенным конфигурациям технических средств вычислительного комплекса и кругу решаемых задач.

Важным компонентом общесистемного программного обеспечения является базовое программное обеспечение. Базовое программное обеспечение не является объектом разработки при создании программ-

ного обеспечения САПР. Примером может служить базовое программное обеспечение для обработки геометрической и графической информации, для формирования и использования баз данных. Использование автоматизированных рабочих мест, в состав которых включено подобное базовое программное обеспечение, реализующее стандартные проектные процедуры, существенно снизит трудоемкость создания программного обеспечения САПР. Однако во всех случаях за создателями САПР останется разработка прикладного программного обеспечения. С расширением области применения вычислительной техники и усложнением задач автоматизации процессов проектирования возрастают сложность и трудоемкость программирования.

**Информационное обеспечение САПР.** Основу информационного обеспечения САПР составляют данные, которыми пользуются проектировщики в процессе проектирования непосредственно для выработки проектных решений. Эта данные могут быть представлены в виде тех или иных документов на различных носителях, содержащих сведения справочного характера о материалах, комплектующих изделиях, типовых проектных решениях, параметрах элементов, сведения о состоянии текущих разработок в виде промежуточных и окончательных проектных решений, структур и параметров проектируемых объектов и т. п.

При этом данные, являющиеся результатом одного процесса преобразования, могут быть исходными для другого процесса. Совокупность данных, используемых всеми компонентами САПР, составляет информационный фонд САПР. Основная функция информационного обеспечения САПР – ведение информационного фонда, т. е. обеспечение создания, поддержки и организации доступа к данным. Таким образом, информационное обеспечение САПР есть совокупность информационного фонда и средств его ведения.

В состав информационного фонда САПР входят:

- программные модули, которые хранятся в виде символических и объектных текстов. Как правило, эти данные мало изменяются в течение жизненного цикла САПР, имеют фиксированные размеры и появляются на этапе создания информационного фонда;

- исходные и результирующие данные, которые необходимы при выполнении программных модулей в процессе преобразования. Эти данные часто меняются в процессе проектирования, однако их тип постоянен и полностью определяется соответствующим программным модулем. При организации промежуточных данных возможны конфликтные ситуации в процессе согласования между собой данных различных типов;

– нормативно-справочная проектная документация, включающая в себя справочные данные о материалах, элементах схем, унифицированных узлах и конструкциях. Эти данные, как правило, хорошо структурированы. К нормативно-справочной проектной документации относятся также государственные и отраслевые стандарты, руководящие материалы и указания, типовые проектные решения, регламентирующие документы;

– текущая проектная информация, отражающая состояние и ход выполнения проекта. Как правило, эта информация слабо структурирована, часто изменяется в процессе проектирования и представляется в форме текстовых документов.

При выборе способов ведения информационного фонда САПР важно сформулировать принципы и определить средства ведения информационного фонда, структурирования данных, выбрать способы управления массивами данных.

Различают следующие способы ведения информационного фонда САПР: использование файловой системы; построение библиотек; использование банков данных; создание информационных программ-адаптеров.

Использование файловой системы и построение библиотек широко распространено в организации информационного обеспечения вычислительных систем, так как поддерживается средствами операционной системы. В приложениях к САПР эти способы применяют при хранении программных модулей в символических и объектных кодах, диалоговых сценариев поддержки процесса проектирования, начального ввода крупных массивов исходных данных, хранения текстовых документов. Однако они малопригодны для быстрого доступа к справочным данным, хранения меняющихся данных, ведения текущей проектной документации, поиска необходимых текстовых документов, организации взаимодействия между разноязыковыми модулями.

**Техническое обеспечение САПР.** Создание и использование компьютеров позволило значительно снизить трудоемкость и продолжительность вычислительных работ. Но в процессе проектирования изделий и технологических процессов доля собственно вычислительных работ не превышает 15%. Автоматизация проектирования потребовала выпуска специализированных средств САПР. Техническое обеспечение САПР представляет собой совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих технических средств, предназначенных для выполнения автоматизированного проектирования.

К техническому обеспечению САПР предъявляются следующие требования:



- удобство использования инженерами-проектировщиками, возможность оперативного взаимодействия инженеров с ЭВМ;
- достаточная производительность и объем оперативной памяти ЭВМ для решения задач всех этапов проектирования за приемлемое время;
- возможность одновременной работы с техническими средствами необходимого числа пользователей для эффективной деятельности всего коллектива разработчиков;
- открытость комплекса технических средств для расширения и модернизации системы по мере совершенствования и развития техники;
- высокая надежность, приемлемая стоимость и т. д.

Удовлетворение перечисленных требований возможно только в условиях организации технического обеспечения в виде специализированной вычислительной сети, допускающей функционирование в нескольких режимах. Такое техническое обеспечение называют комплексом технических средств САПР.

Традиционная форма использования ЭВМ, сконцентрированных в вычислительном центре и работающих только в пакетном режиме, не годится для современных САПР. ЭВМ лишь тогда станет эффективным регулярно используемым инструментом проектирования, когда инженер сможет оперативно обращаться к машине и так же оперативно получать результаты решения. Поэтому в комплексе технических средств должна быть развита группа внешних устройств ввода-вывода информации, причем должен быть включен как стандартный комплект внешних устройств ЭВМ, так и дополнительные устройства оперативного ввода-вывода информации, в том числе в графической форме. Этот комплект внешних устройств устанавливается в помещении проектного подразделения и называется автоматизированным рабочим местом (АРМ) проектировщика. Состав АРМ зависит от характера задач, решаемых в проектном подразделении.

В АРМ могут входить следующие устройства: запоминающие устройства на магнитных дисках (НМД); видеомониторы или графические дисплеи; плоттеры или графопостроители (перьевые, струйные, электростатические); кодировщик графической информации (считыватель координат) или сканеры; принтеры (матричные, струйные, лазерные, цветные лазерные), модемы.

Наличие в одной САПР многих АРМ, возможности одновременной работы на аппаратуре АРМ нескольких пользователей и размещения АРМ на территориях проектных подразделений диктуют необходи-

мость иерархического построения комплекса технических средств с выделением в нем по крайней мере двух уровней ЭВМ. На высшем уровне находится одна или несколько ЭВМ большой производительности. Эти ЭВМ составляют центральный вычислительный комплекс (ЦВК), предназначенный для решения сложных задач проектирования, требующих больших затрат машинного времени и памяти. На низшем уровне находятся входящие в АРМ мини-ЭВМ (персональные компьютеры). Мини-ЭВМ в АРМ управляет работой комплекта внешних устройств, обменом информацией между АРМ и ЦВК; решает сравнительно несложные по затратам машинного времени и памяти проектные задачи.

С увеличением возможностей современных высокопроизводительных компьютеров, базирующихся на двухъядерных процессорах, возможно построение САПР на базе 1-2 компьютеров.

**Лингвистическое обеспечение САПР.** Основу лингвистического обеспечения САПР составляют специальные языковые средства (языки проектирования), предназначенные для описания процедур автоматизированного проектирования и проектных решений. Основная часть лингвистического обеспечения – языки общения человека с компьютером. Проблемно-ориентированные языки проектирования аналогичны алгоритмическим языкам программирования (ФОРТРАН, ПЛ/1 и др.). В одних случаях проблемно-ориентированные языки строят таким образом, что описание любой задачи или задание на ее решение в основном содержит оригинальные термины физического и функционального содержания. Переход от физического и функционального описания задачи к программам для компьютера реализуется далее автоматически с помощью транслятора. В других случаях, например при решении геометрических задач инженерного типа, проблемно-ориентированные языки соединяют в себе средства алгоритмического языка высокого уровня для решения вычислительных математических задач и специальные языковые средства моделирования геометрических объектов. Транслятор алгоритмического языка высокого уровня дополнен необходимыми специальными программами.

**Методическое обеспечение САПР.** Под методическим обеспечением САПР понимают входящие в ее состав документы, регламентирующие порядок ее эксплуатации. Причем документы, относящиеся к процессу создания САПР, не входят в состав методического обеспечения. Так как документы методического обеспечения носят в основном инструктивный характер и их разработка является процессом творческим, то о специальных способах и средствах реализации данного компонента САПР говорить не приходится.

**Организационное обеспечение САПР.** Стандарты по САПР требуют выделения в качестве самостоятельного компонента организационного обеспечения, которое включает в себя положения, инструкции, приказы, штатные расписания, квалификационные требования и другие документы, регламентирующие организационную структуру подразделений проектной организации и взаимодействие подразделений с комплексом средств автоматизированного проектирования.

Функционирование САПР возможно только при наличии и взаимодействии перечисленных средств автоматизированного проектирования.

### **2.2.3. Программно-методические комплексы**

Системное единство САПР обеспечивается наличием комплекса взаимосвязанных моделей, определяющих объект проектирования в целом, а также комплексом системных интерфейсов, осуществляющих указанную взаимосвязь. Системное единство внутри проектирующих подсистем обеспечивается наличием единой информационной модели той части объекта, проектное решение по которой должно быть получено в данной подсистеме.

Формирование и использование моделей объекта проектирования осуществляется комплексом средств автоматизации проектирования (КСАП) системы. Структурными частями КСАП системы являются различные комплексы средств, а также компоненты организационного обеспечения. Комплекс средств – это совокупность компонентов и/или комплексов средств, предназначенная для тиражирования и ориентированная на проектирование объектов определенного класса (вида, типа) и/или выполнение унифицированных процедур, используемая в соответствующих проектирующих или обслуживающих подсистемах САПР.

Комплексы средств подразделяют на комплексы средств одного вида обеспечения (технического, программного, информационного) и комбинированные.

Комплексы средств одного вида обеспечения содержат комплексы и/или компоненты одного вида обеспечения; комплексы средств комбинированные – совокупность комплексов и компонентов разных видов обеспечения. Комбинированные КСАП, относящиеся к продукции производственно-технического назначения, подразделяются на программно-методические и программно-технические.

Программно-методический комплекс (ПМК) представляет собой взаимосвязанную совокупность компонентов программного, информационного и методического обеспечений (включая компоненты математического и лингвистического обеспечений), необходимую для получе-

ния законченного проектного решения по объекту проектирования (одной или нескольким его частям или объекту в целом) или выполнения унифицированных процедур.

Программно-технический комплекс представляет собой взаимосвязанную совокупность ПМК с комплексами и (или) компонентами технического обеспечения.

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

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

Компоненты видов обеспечения выполняют заданную функцию и представляют наименьший (неделимый) самостоятельно разрабатываемый (или покупной) элемент САПР (например, программа, инструкция, монитор и т.п.). Эффективное функционирование комплекса средств автоматизации проектирования и взаимодействие структурных частей САПР всех уровней должно достигаться за счет ориентации на стандартные интерфейсы и протоколы связи, обеспечивающие взаимодействия комплексов средств.

Эффективное функционирование комплекса средств автоматизации проектирования должно достигаться за счет взаимосогласованной разработки компонентов, входящих в состав комплекса средств.

Комплексы средств автоматизации проектирования обслуживающих подсистем, а также отдельные программно-технические комплексы этих подсистем могут использоваться при функционировании всех подсистем.

Общесистемные ПМК включают в себя программное, информационное, методическое и другие виды обеспечений. Они предназначены для выполнения унифицированных процедур по управлению, контролю, планированию вычислительного процесса, распределению ресурса САПР и реализации других функций, являющихся общими для подсистем или САПР в целом.

Примеры общесистемных ПМК: мониторные системы управления функционированием технических средств, информационно-поисковые системы, системы управления базами данных, средства машинной графики, подсистема обеспечения диалогового режима и др.

*Мониторные системы управления функционированием технических средств в САПР.* Основными функциями мониторных систем являются: формирование заданий и контроль пакета задач, требуемых и наличных ресурсов; права доступа к базе данных с установлением при-

оритета и номера очереди; обработка директив языка управления заданиями и задачами, а также реакция на прерывания с перехватом управления, анализом причин и их интерпретацией в терминах, понятных проектировщику; обслуживание потоков задач с организацией диалогового и интерактивно-графического сопровождения в условиях параллельной работы подсистем; управление проектированием в автоматических режимах с анализом качества исполнения проектных операций, проверкой критериев повторения этапа или продолжения маршрута, выбором альтернативных вариантов маршрута; ведение и оптимизация статистики эксплуатации системы; распределение ресурсов САПР с учетом приоритетов заданий, задач и подсистем, плановых заданий и текущих указаний и запросов; защита ресурсов и данных от несанкционированного доступа и непредусмотренных воздействий.

*Информационно-поисковые системы* в САПР выполняют такие функции, как заполнение информационного фонда сведениями; арифметическую обработку цифровых данных и лексическую обработку текстов; обработку информационных запросов с целью поиска требуемых сведений; обработку выходных данных и формирование выходных документов. Особенности информационно-поисковых систем заключаются в том, что запросы к ним формируются не программным путем, а непосредственно пользователями, и не на формальном языке, понятном компьютеру, а на естественном языке в виде последовательности ключевых слов – дескрипторов. Перечень дескрипторов, содержащихся во всех принятых на хранение описаниях, составляет словарь дескрипторов, или тезаурус, и предназначен для формирования поисковых предписаний.

Существуют и более сложные, по сравнению с дескрипторными, информационно-поисковые системы. Важную роль в них играет информационно-поисковый язык, в котором учитываются семантические взаимоотношения между информационными объектами. Это позволяет уменьшить число неправильно распознаваемых языковых конструкций, а обработку запросов производить на основе различных критериев смыслового соответствия.

Банки данных являются наиболее высокой формой организации информации в больших САПР. Они представляют собой проблемно-ориентированные информационно-справочные системы, обеспечивающие ввод необходимой информации, не зависящие от конкретных задач ведения и сохранения информационных массивов и выдачи необходимой информации по запросам пользователей или программ.

*Система управления базами данных (СУБД)* – программно-методический комплекс для обеспечения работы с информационной базой, организованной в виде структуры данных.

СУБД выполняет следующие основные функции: определение баз данных, т.е. внешнего и внутреннего уровней схем; запись данных в базу; организацию хранения, выполняя изменение, дополнение, реорганизацию данных; предоставление доступа к данным (поиск и их выдача).

Для определения данных и доступа к ним в СУБД имеются языковые средства. Так, определение данных, состоящее в описании их структур, обеспечивается с помощью языка определения данных. Функции доступа к данным реализуются с помощью языка манипулирования данными и языка запросов.

*Программно-методические комплексы машинной графики* обеспечивают взаимодействие пользователя с компьютером при обмене графической информацией, решение геометрических задач, формирование изображений и автоматическое формирование графической информации. Графическое взаимодействие пользователя с компьютером (так называемый графический метод доступа) базируется на подпрограммах ввода-вывода, которые обеспечивают прием и обработку команд от устройства ввода-вывода и выдачи управляющих воздействий на эти устройства. Решение геометрических задач (геометрическое моделирование) сводится к преобразованию графической информации, которое представляет собой выполнение той или иной последовательности элементарных графических операций типа сдвиг, поворот, масштабирование и т. п. Для геометрического моделирования могут быть реализованы графические преобразования трехмерных изображений, процедуры построения проекций, сечений и т. п.

*Диалоговый режим* обеспечивается программно-методическими комплексами, осуществляющими ввод, контроль, редактирование, преобразование и вывод графической и/или символьной информации. Диалоговый удаленный ввод заданий обеспечивает ввод и редактирование заданий через каналы связи, выполнение заданий в пакетном режиме и вывод результатов через каналы связи на удаленные терминалы. В САПР могут использоваться как диалоговые ПМК общего назначения, так и специализированные. ПМК общего назначения целесообразно применять на начальных стадиях создания и эксплуатации САПР для отработки и проверки методологии проектирования, технологии обработки данных и прикладных программ. В дальнейшем возможна модификация ПМК с учетом специфических требований по организации диалога в САПР. При этом необходимо учитывать наличие диалогового или пакетного режима обработки запросов; ориентацию системы на

пользователя-непрограммиста; возможность расширения системы путем включения диалоговых прикладных программ на языках высокого уровня; возможность управления диалогом с помощью «меню» и директив, желательность общения на родном языке и т. п.

Базовые ПМК подразделяют на проблемно-ориентированные ПМК и объектно-ориентированные ПМК.

*Проблемно-ориентированные* ПМК могут включать программные средства, предназначенные для автоматизированного упорядочения исходных данных, требований и ограничений к объекту проектирования в целом или к сборочным единицам; выбор физического принципа действия объекта проектирования; выбор технических решений и структуры объекта проектирования; оценку показателей качества (технологичности) конструкций, проектирование маршрута обработки деталей.

Объектно-ориентированные ПМК отражают особенности объектов проектирования как совокупной предметной области. К таким ПМК, например, относят ПМК, поддерживающие автоматизированное проектирование сборочных единиц; проектирование деталей на основе стандартных или заимствованных решений; деталей на основе синтеза их из элементов формы; технологических процессов по видам обработки деталей и т.п.

### **2.3. Классификация САПР**

На основе классификации САПР решают следующие основные задачи [13]:

- формирование укрупненного формализованного описания САПР по совокупности установленных признаков классификации;
- обозначение САПР, создаваемых в организациях отраслей промышленности и в строительстве;
- планирование повышения значений уровня автоматизации проектирования, комплексности автоматизации проектирования и других показателей САПР в процессе их создания и развития;
- задание условий для разработки технически обоснованных норм обеспечения процесса создания, функционирования и развития САПР специалистами, техническими средствами, энергией, информацией, финансовыми и другими ресурсами.

В соответствии с ГОСТ 23501.108–85 формализованное описание САПР включает в себя коды классификационных группировок САПР по установленным стандартам признакам классификации; наименования классификационных группировок, соответствующие приведенным кодам; указания, в соответствии с какими классификаторами, стандартами

или методиками определены коды каждой классификационной группировки.

САПР характеризуют следующие признаки:

- тип объекта проектирования;
- разновидность объекта проектирования;
- сложность объекта проектирования;
- уровень автоматизации проектирования;
- комплексность автоматизации проектирования;
- характер выпускаемых документов;
- количество выпускаемых документов;
- количество уровней в структуре технического обеспечения.

Три первых признака отражают особенности объектов проектирования, следующие четыре возможности систем, восьмой признак – особенности технической базы САПР. Для получения даже общего представления о конкретной САПР она должна быть оценена по всем перечисленным признакам. Рассмотрим их подробнее.

**Тип объекта проектирования.** ГОСТ предусматривает деление САПР на девять групп: 1) САПР изделий машиностроения; 2) САПР изделий приборостроения; 3) САПР технологических процессов в машино- и приборостроении; 4) САПР объектов строительства; 5) САПР технологических процессов в строительстве; 6) САПР программных изделий; 7) САПР организационных систем. Остальные группы (8 и 9) являются резервными и предназначены для выделения и кодирования САПР, не относящихся к перечисленным группировкам.

**Разновидность объектов проектирования.** ГОСТ не устанавливает специальных обозначений на объекты проектирования, а требует их указания и кодирования в соответствии с действующими в каждой отрасли промышленности системами обозначения документации на объекты, проектируемые системой. Например, для САПР изделий машиностроения и приборостроения – по классификаторам ЕСКД.

**Сложность объекта проектирования.** Можно выделить САПР: 1) простых объектов с числом составных частей до  $10^2$ ; 2) объектов средней сложности ( $10^2 - 10^3$ ); 3) сложных объектов ( $10^3 - 10^4$ ); 4) очень сложных объектов ( $10^4 - 10^6$ ); 5) объектов очень высокой сложности (число составных частей свыше  $10^6$ ).

Составной частью объекта проектирования, представляющего собой технический комплекс, сооружение или изделие, является деталь. Если объектом проектирования будет технологический процесс, то выделить его составные части сложнее. Существует два подхода, один из которых основан на разделении технологического процесса на элементарные технологические операции, другой – на разделении объекта на



части условно в соответствии с номенклатурой выпускаемой технологической документации.

**Уровень автоматизации проектирования.** Выделяют системы проектирования: 1) низкоавтоматизированного (до 25% проектных процедур); 2) среднеавтоматизированного (25 – 50 %); 3) высокоавтоматизированного (свыше 50%). Чтобы отнести САПР к третьей группе, в ней должны быть использованы методы многовариантного оптимального проектирования.

**Комплексность автоматизации проектирования.** Различают САПР: 1) одноэтапные; 2) многоэтапные; 3) комплексные. Если система автоматизации охватывает один из этапов проектирования соответствующего объекта, то ее относят к первой группе. Под комплексной САПР подразумевается автоматизация всех этапов проектирования.

**Характер выпускаемых проектных документов.** Установлены пять классификационных групп САПР, выпускающих документы: 1) на бумаге; 2) на машинных носителях; 3) на фотоносителях (в виде микрофильмов, микрофиш, фотошаблонов и др.) 4) комбинированные (выполняют документы на двух носителях данных или более). Пятая группировка является резервной.

**Число выпускаемых проектных документов.** Различают САПР малой, средней и высокой производительности. САПР малой производительности выпускает до  $10^5$  документов, в пересчете на формат А4, за год. Для САПР средней производительности число выпускаемых документов в год составляет от  $10^5$  до  $10^6$ , для САПР высокой производительности свыше  $10^6$ .

**Число уровней в структуре технического обеспечения.** Выделяют САПР одно-, двух- и трехуровневые.

Одноуровневая САПР – это система, построенная на основе средней или большой ЭВМ со штатным набором периферийных устройств, включая средства обработки графической информации.

Двухуровневая САПР – это система, построенная на основе средней или большой ЭВМ и взаимосвязанных с ней одного или нескольких автоматизированных рабочих мест, имеющих собственную ЭВМ.

Трехуровневая САПР – это система, построенная на основе большой ЭВМ, нескольких автоматизированных рабочих мест и периферийного программно-управляемого оборудования для централизованного обслуживания этих рабочих мест, или на основе большой ЭВМ и группы автоматизированных рабочих мест, объединенных в вычислительную сеть.

## 2.4. Разработка САПР

Первые САПР в стране появились задолго до того, как появились персональные компьютеры. Существовали отечественные САПР для таких ныне исторических ЭВМ, как «Минск-32», М-220, МИР-2, СМ-3, СМ-4 и, конечно, ЕС ЭВМ. Безусловно, все эти системы (как сами ЭВМ, так и программное обеспечение) давно морально устарели и не используются. Аналогичные зарубежные системы на базе микро-ЭВМ типа LSI-11, PDP-11 или VAX (фирмы DEC) постигла та же участь.

В основу каждой САПР заложена определенная математическая модель, формализующая описание и функционирование проектируемых объектов и процессы их изготовления. И природа изделий, и производственные процессы накладывают свою специфику на методы их математического моделирования. В конечном счете, эта специфика приводит к существенному различию систем проектирования и условий их использования.

Так, САПР изделий электроники, благодаря практически полной стандартизации конечного числа компонентов, используются функциональные математические модели, основанные на структурном описании разрабатываемого изделия, с весьма высоким уровнем формализации. Во всех же остальных системах, несмотря на различную природу создаваемых с их помощью объектов (детали и узлы машин и механизмов, архитектурные и инженерно-технические сооружения и т. д.), основу математической модели составляет геометрическая модель проектируемого изделия, дополняемая функциональным описанием.

Неоспоримое преимущество автоматизированных, машинных методов проектирования состоит в возможности проводить на ЭВМ эксперименты на математических моделях объектов проектирования, отказавшись от дорогостоящего физического моделирования. Математические модели при этом должны удовлетворять требованиям универсальности, адекватности, точности и экономичности.

Для создания САПР необходимо:

- совершенствование проектирования на основе применения математических методов и средств вычислительной техники;
- автоматизация процесса поиска, обработки и выдачи информации;
- использование методов оптимизации и многовариантного проектирования; применение эффективных математических моделей проектируемых объектов, комплектующих изделий и материалов;
- создание банков данных, содержащих систематизированные сведения справочного характера, необходимые для автоматизированного проектирования объектов;

- повышение качества оформления проектной документации;
- увеличение творческой доли труда проектировщиков за счет автоматизации нетворческих работ;
- унификация и стандартизация методов проектирования;
- подготовка и переподготовка специалистов в области САПР;
- взаимодействие проектных подразделений с автоматизированными системами различного уровня и назначения.

Основная функция САПР – выполнение автоматизированного проектирования на всех или отдельных стадиях проектирования объектов и их составных частей. При создании САПР и их составных частей следует руководствоваться принципами системного единства, совместимости, типизации, развития [14].

Принцип системного единства обеспечивает целостность системы и системную «свежесть» проектирования отдельных элементов и всего объекта проектирования в целом (иерархичность проектирования).

Принцип совместимости обеспечивает совместное функционирование составных частей САПР и сохраняет открытую систему в целом.

Принцип типизации ориентирует на преимущественное создание и использование типовых и унифицированным элементов САПР. Типизации подлежат элементы, имеющие перспективу многократного применения. Типовые и унифицированные элементы периодически проходят экспертизу на соответствие современным требованиям САПР и модифицируются по мере необходимости.

Создание САПР с учетом принципа типизации должно предусматривать разработку базового варианта комплекса средств автоматизированного проектирования (КСАП) и его компонентов, а также создание модификации комплекса средств автоматизированного проектирования и его компонентов на основе базового варианта.

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

Разработка САПР представляет собой крупную научно-техническую проблему, а ее внедрение требует значительных капиталовложений. Накопленный опыт позволяет выделить следующие основные особенности их построения.

САПР – человеко-машинная система. Все создаваемые с помощью ЭВМ системы проектирования являются автоматизированными. Важную роль в них играет человек – инженер, разрабатывающий проект технического средства.

В настоящее время и, по крайней мере, в ближайший годы создание САПР не угрожает монополии человека при принятии узловых решений в процессе проектирования. Человек должен решать в САПР, во-первых, задачи, формализация которых не достигнута, и, во-вторых, задачи, которые решаются человеком на основе эвристических способностей более эффективно, чем у современной ЭВМ. Тесное взаимодействие человека и ЭВМ в процессе проектирования – один из принципов построения и эксплуатации САПР.

САПР – иерархическая система. Она реализует комплексный подход к автоматизации всех уровней проектирования. Блочнo-иерархический подход к проектированию должен быть сохранен при применении САПР. Иерархия уровней проектирования отражается в структуре специального программного обеспечения САПР в виде иерархии подсистем.

На особом месте стоит обеспечение комплексного характера САПР, так как автоматизация проектирования на одном из уровней при сохранении старых форм проектирования на соседних уровнях оказывается значительно менее эффективной, чем полная автоматизация всех уровней. Иерархическое построение относится не только к специальному программному обеспечению, но и к техническим средствам САПР, разделяемым на центральный вычислительный комплекс и автоматизированные рабочие места проектировщиков.

САПР – совокупность информационно согласованных подсистем. Информационная согласованность означает, что все или большинство последовательностей задач проектирования обслуживается информационно согласованными программами. Две программы являются информационно согласованными, если все те данные, которые представляют собой объект переработки в обеих программах, входят в числовые массивы, не требующие изменений при переходе от одной программы к другой. Так, информационные связи могут проявляться в том, что результаты решения одной задачи будут исходными данными для другой задачи. Если для согласования программ требуется существенная переработка общего массива данных с участием человека, который добавляет недостающие параметры, вручную перекомпоновывает массив или изменяет значения отдельных параметров, то это значит, что программы информационно плохо согласованы. Ручная перекомпоновка массива ведет к существенным временным задержкам, росту числа ошибок и поэтому снижает эффективность работы САПР. Плохая информационная согласованность превращает САПР в совокупность автономных программ, при этом из-за неучета в подсистемах многих факторов, оцениваемых в других подсистемах, снижается качество проектных решений.

Принцип информационной согласованности подсистем часто представляют близким по смыслу принципу оптимальности связей человека с ЭВМ внутри САПР, при этом подчеркивается сторона автоматизированного проектирования, требующая рационального распределения функций между человеком и ЭВМ.

Близким по смыслу, но не полностью совпадающим с рассмотренными, является принцип оптимальности связей между САПР и внешней средой. Если каждый раз при проектировании очередного объекта заново вводятся в систему не только действительно специфические новые исходные данные, но и сведения справочного характера (например, параметры унифицированных элементов), то имеет место нерациональная организация связей САПР с окружающей средой. Очевидно, что данные, используемые многократно при проектировании разных объектов, должны храниться системой в банке данных.

САПР – открытая и развивающаяся система. Существуют по крайней мере две причины, по которым САПР должна быть изменяющейся во времени системой. Во-первых, разработка столь сложного объекта, как САПР, занимает продолжительное время и экономически выгодно вводить в эксплуатацию части системы по мере их готовности. Введенный в эксплуатацию базовый вариант системы в дальнейшем расширяется. Во-вторых, постоянный прогресс вычислительной техники и вычислительно математики приводит к появлению новых, более совершенных математических моделей и программ, которые должны заменять старые, менее удачные аналоги. Поэтому САПР должна быть открытой системой, т. е. обладать свойством удобства включения новых методов и средств.

САПР – специализированная система с максимальным использованием унифицированных модулей. Требования высокой эффективности и универсальности, как правило, противоречивы. Высокой эффективности САПР, выражаемой прежде всего малыми временными и материальными затратами при решении проектных задач, добиваются за счет специализации систем. Очевидно, число различных САПР при этом растет. Чтобы снизить расходы на разработку многих специализированных САПР, целесообразно строить их на основе максимального использования унифицированных составных частей. Необходимое условие унификации – поиск общих положений в моделировании, анализе и синтезе разнородных технических объектов.

САПР - человеко-машинная система. Коллектив разработчиков является составной частью системы проектирования, выполняя проектные работы во взаимодействии с ЭВМ.

Комплексная автоматизация всех уровней проектирования позволяет внести такие изменения в структуру проектных предприятий, формы документов, которые соответствуют целям автоматизации – сокращению материальных и временных затрат, повышению качества проектирования, сохранению численности инженерно-технических работников на прежнем уровне, несмотря на усложнение проектируемых объектов.

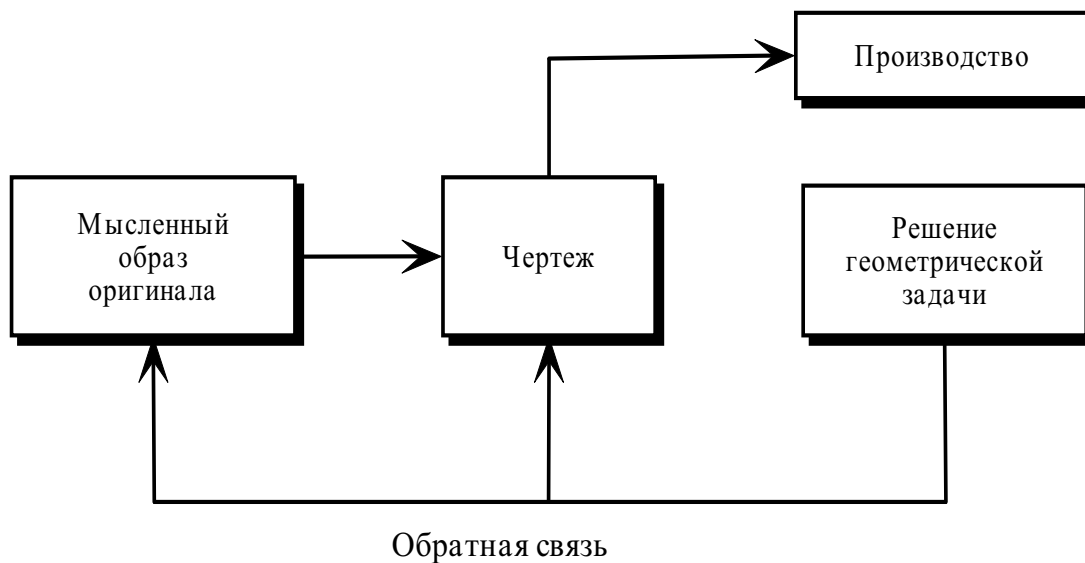
Еще один принцип – совместимость традиционного и автоматизированного проектирования. Этот принцип имеет значение в тех случаях, когда автоматизированное проектирование внедряется на уже действующем предприятии со сложившейся структурой, взаимоотношениями подразделений, формами и способами использования проектной документации. Именно в этих условиях целесообразен эволюционный путь внедрения САПР, при котором изменения, диктуемые особенностями автоматизированного проектирования, не будут нарушать на длительный срок нормального функционирования предприятия

## **2.5. Подходы к автоматизированному проектированию**

### ***2.5.1. Базовые подходы к автоматизированному проектированию***

Можно выделить два базовых подхода к проектированию на основе компьютерных технологий.

**Первый подход** базируется на двухмерной геометрической модели (2D-модели) – графическом изображении и использовании компьютера как «электронного кульмана», позволяющего ускорить процесс конструирования и улучшить качество оформления конструкторской документации. Центральное место в этом подходе к проектированию занимает **чертеж**, который служит средством графического представления изделия, содержащего информацию для решения графических задач, а также для изготовления изделия (рис. 2.2). Этот подход характерен для ранних САПР (конец 80-х - начало 90-х годов).



*Рис. 2.2. Схема традиционной технологии конструирования*

В основе **второго подхода** лежит компьютерная **пространственная геометрическая модель** (3D-модель) изделия (рис. 2.3), которая является более наглядным способом представления оригинала и более мощным и удобным инструментом для решения геометрических задач.

Чертеж в этих условиях начинает играть вспомогательную роль, а методы его создания основаны на методах компьютерной графики, методах отображения пространственной модели. Современные технологии предусматривают построение процесса от трехмерного проектирования к двумерному. В отличие от предыдущего десятилетия, когда плоское двумерное черчение (на кульмане или с помощью компьютера), как правило, определяло идеологию систем проектирования, сегодня, с появлением новой компьютерной техники и развитием математического аппарата, основой построения системы является трехмерное твердотельная параметрическая модель. Данный подход стал возможен с развитием как компьютеров, так и программного обеспечения.

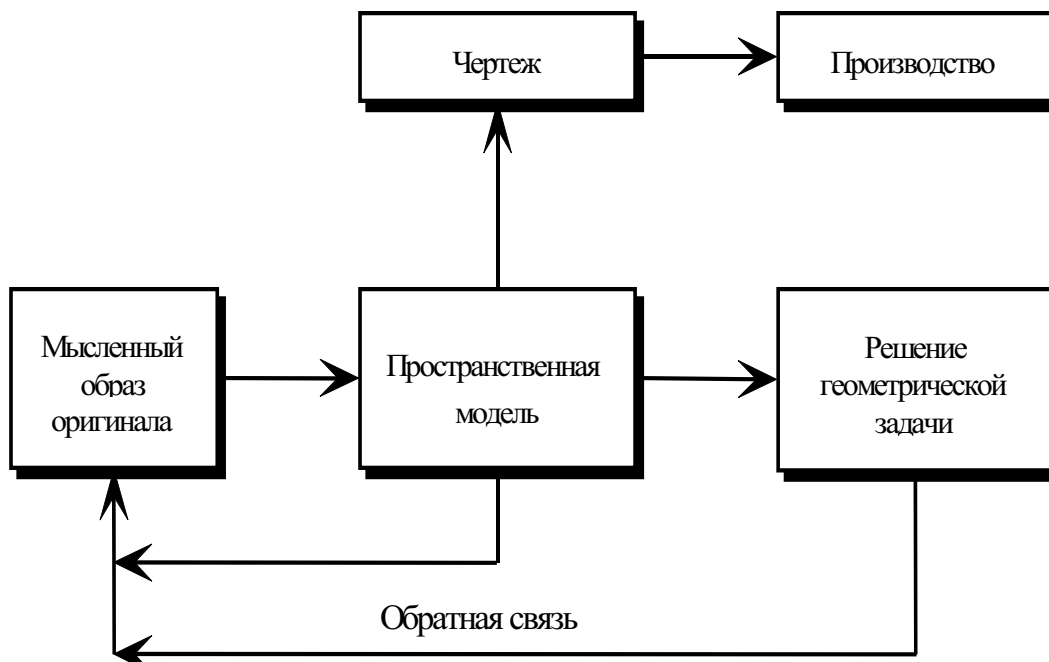


Рис. 2.3. Схема новой технологии проектирования

### 2.5.2. Компьютерная графика

Вся полезная площадь монитора, на которой выводится изображение, называется растром. Растр формируется из прямоугольной матрицы точек, каждая из которых называется пикселем (pixel). Изображение формируется заданием цвета свечения определенных пикселей раstra. Количество пикселей по горизонтали и вертикали в единице длины называется разрешением. Чем выше разрешение, тем четче изображение. В современных компьютерах разрешение монитора обычно устанавливают 1024×768 или 1280×1024 пикселя/дюйм.

Разрешение экрана устанавливается программно операционной системой, но зависит от аппаратного обеспечения, т. е. от возможностей видеоадаптера. Это связано с тем, что изображение, выводимое на монитор, сначала строится в видеопамеи видеоадаптера, а затем считывается оттуда на монитор. Поэтому основным параметром, определяющим максимальное разрешение изображения на мониторе, является размер видеопамеи.

Различают растровую и векторную графику.

Файлы векторной графики представляют собой математическое описание объектов относительно точки начала координат. Проще говоря, чтобы компьютер нарисовал прямую, нужны координаты двух точек, которые связываются по кратчайшей, для дуги задается радиус и т. д.



Векторная иллюстрация – это набор геометрических примитивов. Большинство векторных форматов могут так же содержать внедренные в файл растровые объекты или ссылку на растровый файл (технология OPI). Сложность при передаче данных из одного векторного формата в другой заключается в использовании программами различных алгоритмов, разной математики при построении векторных и описании растровых объектов.

Файлы растрового изображения описываются как расположение отдельных пикселей, которые отображаются как бы на сетке, напоминающей миллиметровую графическую бумагу с крошечными квадратиками. Каждый квадратик представляет собой отдельный пиксель, а каждому пикселю соответствует определенное значение цвета. Таким образом, растровое изображение представляет собой схему расположения и цвета каждого пикселя на экране. Простые растровые изображения часто имеют больший размер, чем простая векторная графика, но сложные растровые изображения, например, фотографии, занимают меньше места и имеют лучшее качество по сравнению с векторной графикой.

Для хранения графической информации используются форматы различных типов (форматов):

*BMP (Windows Device Independent Bitmap)*

Поддерживается всеми графическими редакторами, работающими под управлением операционной системы Windows. Применяется для хранения растровых изображений и, по сути, больше ни на что не пригоден. Способен хранить как индексированный (до 256 цветов), так и RGB-цвет (16700000 оттенков). Использовать BMP нельзя ни в web, ни для печати (особенно), ни для простого переноса и хранения информации.

*WMF (Windows Metafile)*

Векторный формат WMF использует графический язык Windows и, можно сказать, является ее родным форматом. Служит для передачи векторов через буфер обмена (Clipboard). Понимается практически всеми программами Windows, так или иначе связанными с векторной графикой. Однако, несмотря на кажущуюся простоту и универсальность, пользоваться форматом WMF стоит только в крайних случаях. WMF искажает цвет, не может сохранять ряд параметров, которые могут быть присвоены объектам в различных векторных редакторах, не может содержать растровые объекты.

*TIFF (Tagged Image File Format)*

Аппаратно независимый формат TIFF на сегодняшний день является одним из самых распространенных и надежных, его поддерживают практически все программы, так или иначе связанные с графикой. TIFF является лучшим выбором при импорте растровой графики в векторные

программы и издательские системы. Ему доступен весь диапазон цветовых моделей от монохромной до RGB, CMYK и дополнительных цветов Pantone.

#### *JPEG (Joint Photographic Experts Group)*

Срого говоря, JPEG'ом называется не формат, а алгоритм сжатия. Сжатие происходит в несколько этапов (уровней). Чем выше уровень компрессии, тем больше данных отбрасывается, тем ниже качество. Используя JPEG, можно получить файл в 1-500 раз меньше, чем BMP! Формат аппаратно независим, однако относительно нов и не понимается старыми программами (до 1995 года).

#### *GIF (CompuServe Graphics Interchange Format)*

Независящий от аппаратного обеспечения формат GIF был разработан в 1987 году (GIF87a) фирмой CompuServe для передачи растровых изображений по сетям. В 1989-м формат был модифицирован (GIF89a), были добавлены поддержка прозрачности и анимации. GIF использует LZW-компрессию, что позволяет неплохо сжимать файлы, в которых много однородных заливок (логотипы, надписи, схемы).

Основное ограничение формата GIF состоит в том, что цветное изображение может быть записано только в режиме 256 цветов.

### **2.5.3. Компьютерное моделирование**

Как уже было сказано, различают плоское 2D и объемное 3D-моделирование. Плоское 2D-моделирование используется для создания конструкторской документации (чертежи, эскизы, таблицы, схемы и т. д.). Трехмерное 3D-моделирование используется для создания трехмерных моделей объектов. При этом термин *моделирование* можно использовать в равной степени в обоих случаях, так как плоский чертеж так же является моделью объекта, как и его объемное представление.

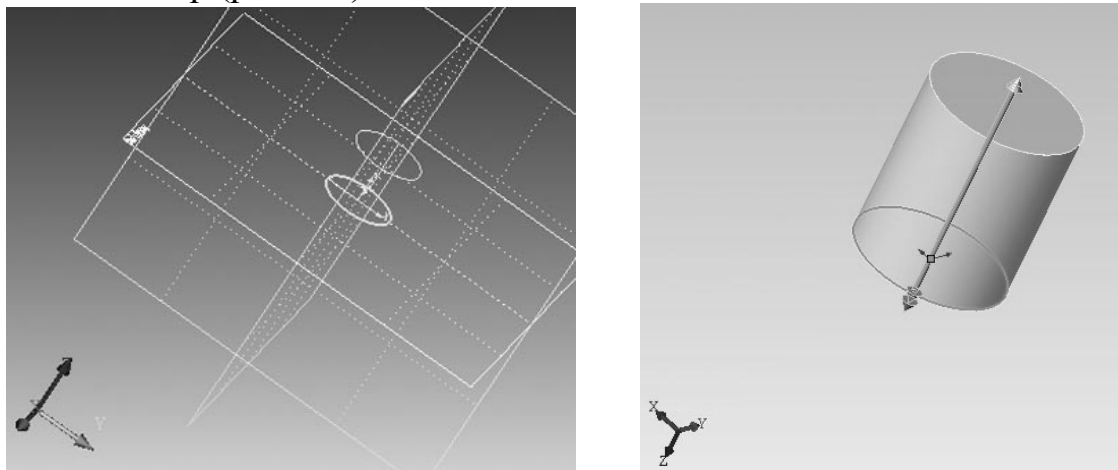
Сущность геометрического моделирования заключается в создании средствами той или иной CAD-системы математической модели объекта, описывающей их геометрические свойства. Следует иметь в виду, что все модели, создаваемые средствами CAD-систем (плоские или трехмерные), имеют внутреннее и внешнее представления. Внутреннее представление хранится в виде файлов и является собственно математической моделью. Внешнее представление мы видим на экране в виде изображения, построенного средствами ядра системы на основе математической модели, хранящейся в файле. Практически все производители CAD-систем сохраняют математические модели в файлах собственного формата, т.е. каждая система может считать данные только из собственного формата. Например, система T-Flex сохраняет информа-

цию о модели (ее математическую модель) в файле \*.grb, система SolidWorks – \*.sldprt. При этом есть ряд общепризнанных файлов обмена информацией, речь о которых будет идти позже.

Геометрия модели любой сложности может быть описана совокупностью следующих объектов: точка, линия, поверхность, тело. Каждый из этих объектов является классом, состоящим из ряда объектов этого класса (разновидностей родительского объекта). Например, класс **линия** содержит такие виды линий: прямая, ломанная, сплайн, окружность, спираль и т. д. Класс поверхность содержит следующие виды поверхностей: плоская, цилиндрическая, поверхность Безье и т.д.

При создании плоского изображения в САД-системе указывается вид (выбирается из меню системы) линии и задаются ее параметры. Например, для создания отрезка выбирается соответствующий пункт меню и задаются координаты двух точек, определяющих его концы. При этом в файле сохраняются именно эти параметры, т.е. координаты двух точек и другие свойства (тип, цвет и т. д.), а задача ее отрисовки на мониторе (или при печати изображения) ложится на графическое ядро САД-системы, использующее эти данные.

Создание объемного 3D-изображения осуществляется путем выполнения какой-либо модифицирующей операции (выталкивание, вращение и т. д.) над плоским графическим изображением, построенным на плоскости. Например, для создания цилиндра следует сначала создать на плоскости окружность, а затем, используя команду *выталкивание*, сам цилиндр (рис. 2.4).



а)

б)

Рис. 2.4. Создание цилиндра выталкиванием окружности:  
а) – в системе T-Flex, б) – в системе SolidWorks

Различия в функциональных возможностях той или иной САД-системы определяются не только возможностями геометрического ядра, но и математикой самой системы. Производители дополняют возможности геометрического ядра собственными алгоритмами построения поверхностей, выполнения сложных операций. При этом возможности выполнения той или иной операции практически полностью зависят от алгоритмов их выполнения, которые являются авторскими секретами разработчиков. Для примера рассмотрим работу команды «сглаживание» в системах T-Flex и SolidWorks (рис. 2.5), имеющих общее геометрическое ядро Parasolid.

При сглаживании ребер, являющихся пересечением цилиндрических поверхностей и плоскости, система SolidWorks по умолчанию строит сглаживание так, что три поверхности (цилиндрическая, плоскость и сглаживающая) имеют одну общую точку (поз. 1, рис. 2.5, а). Система T-Flex при сглаживании не меняет радиус. Результат представлен на рис. 2.5, б. Кроме того, следует обратить внимание на сопряжение (поз. 2, рис. 2.5, а). При сравнении двух аналогичных мест сопряжения можно отметить различие построенных сопрягающих поверхностей.

Эти различия объясняются тем, что в каждой системе заложено несколько алгоритмов построения сглаживания, каждый из которых имеет свою «математику», а, следовательно, и различные результаты построения.

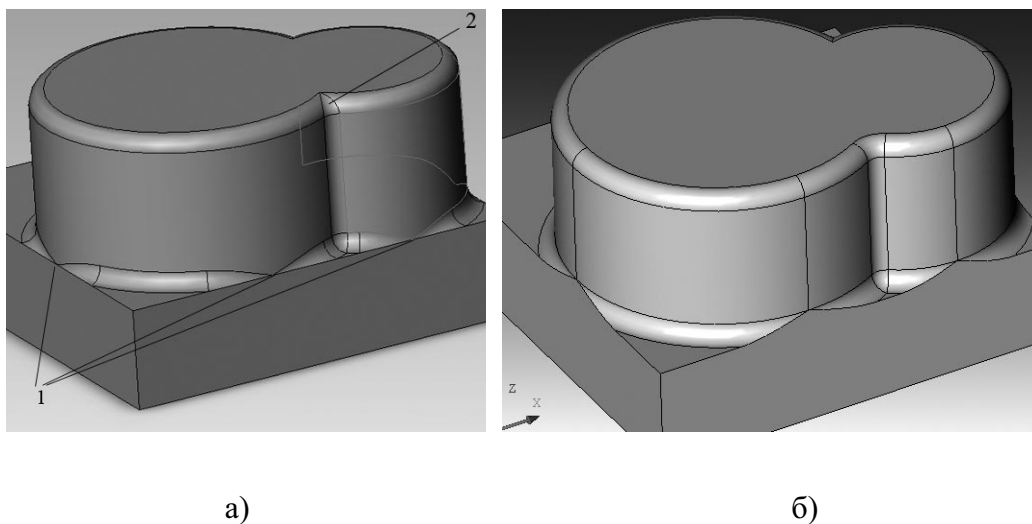


Рис. 2.5. Выполнение операции сглаживание «по умолчанию» в системах: а) SolidWorks; б) T-Flex

#### **2.5.4. Обзор ядер геометрического моделирования**

Ядро геометрического моделирования является сердцем каждой системы 3D-моделирования. Понимание того, как работает ядро и различий между их типами поможет определить, какая система CAD-моделирования лучшая для вас.

##### **Основные понятия**

Ядро – это библиотека основных математических функций CAD-системы, которая определяет и хранит 3D-формы, ожидая команды пользователя.

Ядро обрабатывает команды, сохраняет результаты и осуществляет вывод на экран монитора.

В настоящий момент существуют три типа ядер геометрического моделирования: лицензируемые, частные и доступные в исходном коде. Рассмотрим по два ядра каждого типа.

##### **Лицензируемые ядра**

Лицензируемые ядра геометрического моделирования разработаны и поддерживаются одной компанией, которая лицензирует их другим компаниям для их CAD-систем. К примеру, ядро Parasolid, разработано UGS (Unigraphics Solutions). Оно используется в Unigraphics и Solid Edge и лицензировано другим компаниям, включая CADMAX Corp. (True Solid/Master) и SolidWorks Corp. (SolidWorks). Лицензированные ядра могут обеспечивать более прямую совместимость (через форматы обмена, такие как SAT и X\_T) между CAD-системами, которые их лицензировали.

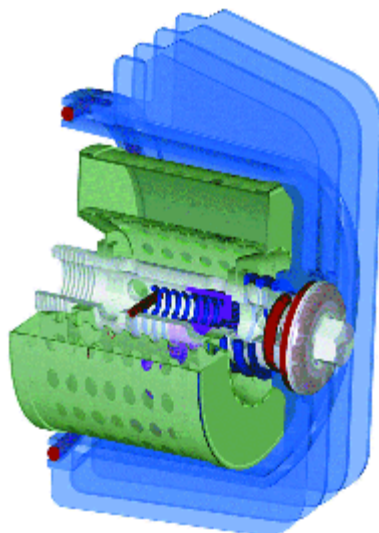
Первое лицензируемое ядро – **ACIS 3D Geometric Modeler (Spatial/Dassault Systemes)**.

ACIS – это объектно-ориентированная C++ геометрическая библиотека, которая состоит из более чем 35 DLL-файлов и включает каркасные структуры, поверхности и твердотельное моделирование. Оно дает разработчикам программ богатый выбор геометрических операций для конструирования и манипулирования сложными моделями, а так же полный набор булевых операций. Его математический интерфейс Laws Symbolic и основанная на NURBS деформация позволяют интегрировать поверхностное и твердотельное моделирование. Ядро ACIS осуществляет вывод в формат файлов SAT, который любая поддерживающая ACIS программа может читать напрямую.

Версия ядра ACIS 6.3 была выпущена в первом квартале 2001 года. Качество и надежность – основные черты этой версии. ACIS 6.3 – всесторонне качественная программа, которая включает строгие тесто-

вые критерии и ситуации. Как результат, в ACIS 6.3 для Windows NT неизвестно ни одной ошибки при работе с памятью.

Также новым является изобилие компонентов, которые позволяют ACIS 6.3 дать разработчикам программного обеспечения больше возможностей при создании приложений. ACIS теперь содержит более чем 50 компонентов, включая смешивание, локальные операции, точные скрытые линии, пространственное изменение масштаба, продвинутое средства работы с поверхностями, ячеистую топологию.



*Рис. 2.6. Фильтр, выполненный в использующей ACIS CAD-системе Autodesk Mechanical Desktop*

### Второе лицензируемое ядро – **Parasolid**.

Parasolid – это самое быстрое ядро из геометрических ядер, доступных для лицензирования, разработано UGS. Parasolid обеспечивает технологию твердотельного моделирования, обобщенного ячеистого моделирования, интегрированные поверхности свободной формы и листовое моделирование. Parasolid позволяет разработчикам быстро создавать конкурентоспособные продукты. На этом ядре разработано много CAD/CAM/CAE систем высокого и среднего уровня, к примеру SolidWorks, Delmia, Pro/DESKTOP, T-Flex и другие.

Parasolid поддерживает SMP (многопроцессорное аппаратное обеспечение), что позволяет увеличить производительность. Parasolid включает более чем 600 объектно-ориентированных функций для приложений под управлением Windows NT, UNIX, и LINUX. Ядро Parasolid используется более чем в 230 программных продуктах (рис. 2.7). Parasolid используют в своих программных продуктах Bentley Systems, Visionary Design Systems, CADKEY, ANSYS, Mechanical Dynamics, MSC.Software.

В дополнении к формату обмена ХТ, Parasolid позволяет трансляцию и восстановление данных из других систем моделирования с помощью уникальной технологии Tolerant Modeling.



*Рис. 2.7. Отвертки, выполненные на ядре Parasolid в Unigraphics*

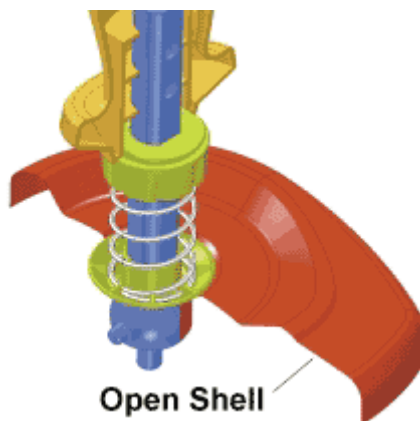
Последние версии Parasolid сфокусированы на расширении экстремального моделирования в наиболее технически сложных областях.

#### **Частные ядра**

Частные ядра геометрического моделирования разрабатываются и поддерживаются разработчиками САД-систем для использования исключительно в своих приложениях. Преимуществом частных ядер является более глубокая интеграция с интерфейсом САД-приложения. Как результат этого – большие возможности управления системой пользователем. Два представленных ниже ядра объединяют пространственное и твердотельное моделирование в одном приложении.

#### **Thinkdesign kernel (think3 Inc.)**

Основой САД-системы think3 является ядро thinkdesign. Его уникальная архитектура дает разработчикам параметризованные твердые тела, расширенные средства по моделированию поверхностей, каркасные структуры и 2D-черчение в одной САД-системе (рис. 2.8). Топология ядра thinkdesign делает возможным смешивать поверхности и твердые тела, импортировать и использовать несовершенную 3D-геометрию, полностью интегрировать 2D-чертежи в трехмерные базы данных и обеспечивает диагностическую информацию на событие, когда операция твердотельного моделирования не может быть завершена. Ядро также может назначать переменные допуски к различным геометрическим примитивам.



*Рис. 2.8. Ядро thinkdesign, поддерживающее внутри сборки все геометрические типы данных*

### **VX Overdrive (Varimetrix Corp.)**

Высокопроизводительное эксклюзивное ядро, которое обладает сложными возможностями трехмерного гибридного моделирования и предоставляет высокотехнологичные средства на рабочем столе. VX Overdrive предлагает реальную гибридную систему, которая объединяет твердотельное и расширенное свободно-форменное поверхностное моделирование.

VX Overdrive (рис. 2.9) поддерживает такие функции, как одновременная разработка, хранит информацию о версиях объекта, гибкий хронологический контроль, сложные средства заполнения и смешивания, и настоящее моделирование сборки «в контексте».

CAM – родная среда для VX Overdrive. Планирование производства и подпрограммы для станков с ЧПУ – интегрированная часть ядра, которая гарантирует полную синхронизацию между проектированием и производством. Изменения в спроектированной геометрии напрямую отражаются изменениями в автоматических производственных операциях.



*Рис. 2.9. Пример разработки на ядре VX Overdrive*



VX Overdrive имеет открытую, масштабированную архитектуру, разработанную, чтобы удовлетворять возрастающие требования рынка, позволяет сторонним разработчикам создавать свои специализированные дополнения.

### **Ядра, доступные в исходном коде**

Ядра, доступные в исходном коде подобны лицензированным ядрам. Они также разрабатываются и поддерживаются одной компанией и затем лицензируются другим компаниям для использования в CAD-приложениях.

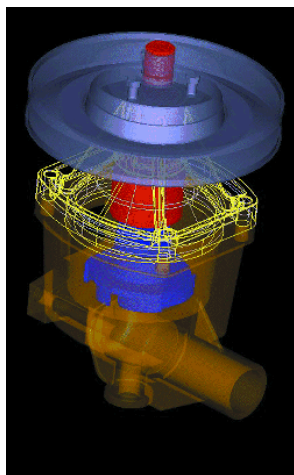
Отличие стоит в том, что разработчики этих ядер обеспечивают исходный код ядра. Для пользователей, которые имеют группы разработки и хотят сами настраивать ядро системы, очень удобно иметь возможности настройки, поскольку исходный код доступен.

### **Open CASCADE (Matra Datavision)**

Open CASCADE v3.1 представляет Visual C++ проекты, которые позволяют пользователям компилировать код Open CASCADE на их платформах. В дополнение, форматы экспорта данных теперь доступны для STL, VRML и HPGL2, и представлен Open CASCADE Application Framework для быстрой разработки приложений 3D-моделирования.

Open CASCADE (2.10) доступен для загрузки. Компания Open CASCADE обеспечивает специфицированную разработку приложений для промышленных клиентов и разработчиков программного обеспечения.

Это облегчают оптимальную реализацию пользовательских проектов и включает обучение, техническую помощь, и ежегодные пакеты поддержки, которые адаптированы к различным требованиям пользователей. Пользователи так же могут заказать индивидуальные дополнения к проекту и консультации.



*Рис. 2.10. Пример модели, разработанной с использованием ядра Open CASCADE.*

Кроме того, принцип распространения исходного кода позволил большому числу пользователей Open CASCADE участвовать в разработке этого продукта, предоставляя свой код, который также публикуется на <http://www.opencascade.org/>. Это дает большие возможности сообществу Open CASCADE по обогащению этого программного продукта.

#### **SMLib (Solid Modeling Solutions).**

SMLib от Solid Modeling Solutions – это набор основанных на NURBS геометрических и топологических библиотек, который существует на рынке несколько лет и который используют более чем 200 компаний и университетов. SMLib включает обширный набор NURBS-функций криволинейного и поверхностного моделирования, а также оптимизированный код для быстрого измерения расстояния между объектами.

Ядро SMLib недавно предоставило новые возможности, включая основанную на топологии сеточную генерацию для двумерных сот, расширенное заполнение и затенение, смещение оболочки и возможности множественного объединения.

SMLib имеет уникальную бизнес-модель, по которой продукт распространяется в форме исходного кода без авторских отчислений. Это обеспечивает чрезвычайно притягательную возможность для поддержки и обновления без всякого смещения к приватизации программного обеспечения или форматов данных.

#### ***2.5.5. Обмен данными между CAD-системами***

Результатом работы конструктора является комплект конструкторской документации, в состав которой входят различные виды документов (чертежи, спецификации, ведомости комплектующих и т.д.). Одним из основных требований производства является выполнение этих документов в электронном виде. Кроме того, при использовании второго подхода к автоматизированному проектированию обязательным становится наличие трехмерной модели изделия.

С конструкторской документацией в процессе подготовки производства работают различные специалисты (технологи, конструкторы оснастки, программисты и наладчики станков с ЧПУ), использующие свои специализированные программные продукты. В связи с этим возникает необходимость передачи данных из одной системы в другую. Программные продукты разных разработчиков имеют свои форматы хранения данных, что затрудняет свободный обмен информацией между специалистами, работающими на различных системах.

Идеальным вариантом было бы использование всеми специалистами предприятия программных продуктов одного разработчика, но в силу определенных причин зачастую рабочие места специалистов предприятия оснащаются программным обеспечением различных производителей.

Практически все разработчики систем САПР, понимая необходимость обмена информацией между системами, включают в их состав специализированные программы, называемые конверторами (трансляторами), основным назначением которых является преобразование данных (геометрических 3D моделей, чертежей и т. д.) в форматы обмена данными.

Преобразование данных из одного формата в другой всегда сопряжено с потерей качества самих данных. Когда речь идет о простых деталях, трансляция геометрии – процесс достаточно надежный. Однако при транслировании моделей сложных деталей в другие форматы возникают довольно значительные погрешности, выражающиеся в потере отдельных поверхностей или в искажении геометрии.

Особое значение это приобретает, когда импортированная модель используется для последующего разбиения модели на конечные элементы для прочностного анализа или для разработки управляющих программ для станков с ЧПУ. В сложной геометрической модели дефекты могут быть едва заметны на глаз, а при расчете траектории движения инструмента эти погрешности могут значительно усложнить процесс разработки перехода обработки.

Так, например, при трансляции модели из одной системы в другую сложные поверхности или разбиваются на большое количество мелких поверхностей или, что еще хуже, образуются «дырки» в поверхностях модели. В таком случае импортирующая система (точнее ее конвертер) заполняет их произвольно. Это затрудняет дальнейшую работу с моделью.

К наиболее распространенным форматам файлов, с помощью которых производится обмен данными между системами, можно отнести следующие: DXF, IGES, DWG, STEP.

Исторически сложилось, что наиболее распространенным форматом обмена данными плоской графики между различными САД-системами оказался формат DXF. Этот формат создан для обмена данными системы AutoCAD (фирма Autodesk) с другими системами.

DXF-файлы являются обычными текстовыми файлами в коде ASCII. Они могут легко преобразовываться в форматы других САПР или передаваться в другие программы для специальной обработки.

### 3. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

#### 3.1. CALS-технологии

##### 3.1.1. Основные понятия

CALS – Continuous Acquisition and life-cycle Support – непрерывное информационное сопровождение жизненного цикла изделия.

Жизненный цикл продукта, как его определяет стандарт ISO 9004-1, – это совокупность процессов, выполняемых от момента выявления потребностей общества в определенной продукции до удовлетворения этих потребностей и утилизации продукта.

Интегрированная информационная среда (ИИС) – совокупность распределенных баз данных, содержащих сведения об изделиях, производственной среде, ресурсах и процессах предприятия, обеспечивающая корректность, актуальность, сохранность и доступность данных тем субъектам производственно-хозяйственной деятельности, участвующим в осуществлении жизненного цикла изделия, кому это необходимо и разрешено.

Основное содержание концепции CALS, принципиально отличающее ее от других, составляют инвариантные понятия, которые реализуются (полностью или частично) в течение жизненного цикла изделия (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Концептуальная модель CALS

Эти инвариантные понятия условно делятся на три группы:

- базовые принципы CALS;
- базовые управленческие технологии;
- базовые технологии управления данными.

*К числу первых относятся:*

- системная информационная поддержка жизненного цикла изделия на основе использования интегрированной информационной среды, обеспечивающая минимизацию затрат в ходе жизненного цикла;
- информационная интеграция за счет стандартизации информационного описания объектов управления;
- разделение программ и данных на основе стандартизации структур данных и интерфейсов доступа к ним, ориентация на готовые коммерческие программно-технические решения (Commercial Of The Shelf - COTS), соответствующие требованиям стандартов;
- безбумажное представление информации, использование электронно-цифровой подписи;
- параллельный инжиниринг (Concurrent Engineering);
- непрерывное совершенствование бизнес-процессов (Business Processes Reengineering).

*К числу вторых относятся технологии управления процессами, инвариантные по отношению к объекту (продукции):*

- управление проектами и заданиями (Project Management/Workflow Management);
- управление ресурсами (Manufacturing Resource Planning);
- управление качеством (Quality Management);
- интегрированная логистическая поддержка (Integrated Logistic Support).

*К числу третьих относятся технологии управления данными об изделии, процессах, ресурсах и среде.*

### ***3.1.2. Базовые принципы CALS***

#### **Интегрированная информационная среда**

Системная информационная поддержка и сопровождение жизненного цикла изделия осуществляется в интегрированной информационной среде (ИИС). Все сведения (данные) в ИИС хранятся в виде информационных объектов.

ИИС, в соответствии с концепцией CALS, представляет собой модульную систему, в которой реализуются следующие базовые принципы CALS:

- прикладные программные средства отделены от данных;

- структуры данных и интерфейс доступа к ним стандартизованы;
- данные об изделии, процессах и ресурсах не дублируются, число ошибок в них минимизируется, обеспечивается полнота и целостность информации;
- прикладные средства работы с данными представляют собой, как правило, типовые коммерческие решения различных производителей, что обеспечивает возможность дальнейшего развития ИИС.

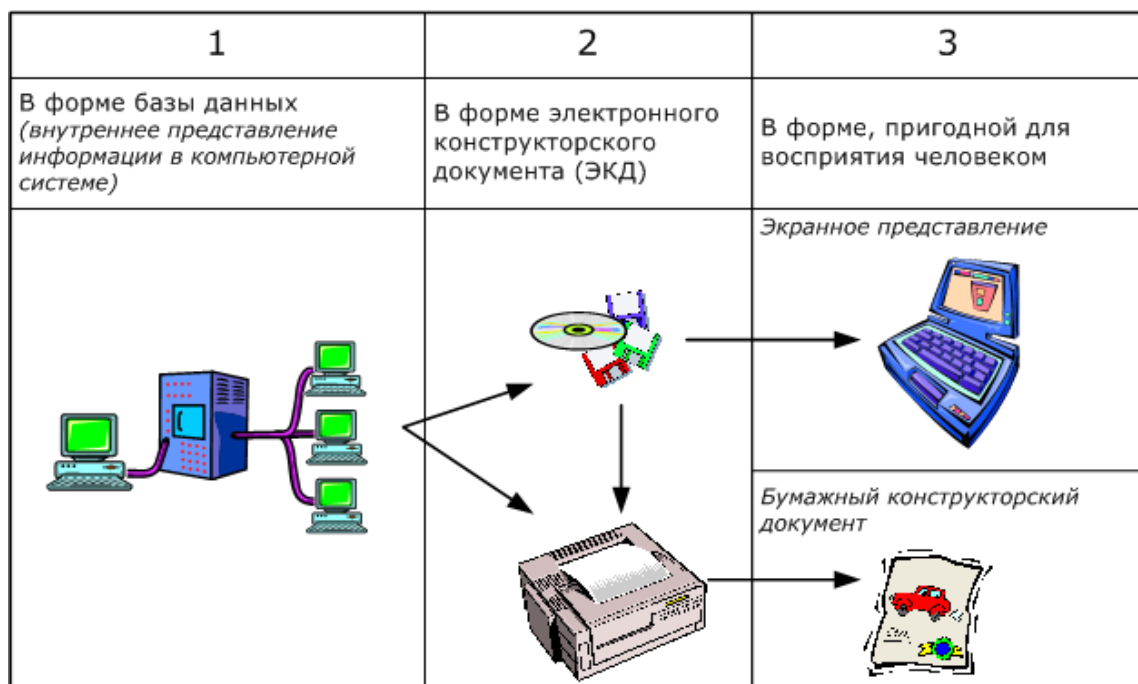
### **Безбумажное представление информации, применение электронно-цифровой подписи**

Все процессы информационного обмена посредством ИИС имеют своей конечной целью максимально возможное исключение из деловой практики традиционных бумажных документов и переход к прямому безбумажному обмену данными. Преимущества и технико-экономическая эффективность такого перехода очевидны. Тем не менее, на переходном периоде нужно обеспечить сосуществование и совместное использование как *бумажной*, так и *электронной форм представления информации* и гармонизировать применяемые понятия. Возможные формы представления конструкторской информации представлены на рис. 3.2.

Информация может быть представлена в форме базы данных, в форме электронного конструкторского документа, или в форме, пригодной для восприятия человеком – бумажной или экранной.

Представление информации в форме базы данных используется при необходимости логического структурирования больших объемов информации. При этом данные определенным образом распределяются между таблицами базы данных, записями в таблицах, полями в записях (при использовании реляционной СУБД) и (или) отдельными файлами и таблицами (при использовании объектно-ориентированной СУБД). Используемые структуры данных ориентированы на специфику решаемых задач.

Другой формой представления информации является электронный документ, представляющий собой структурированный набор данных, включающий в себя заголовок, содержательную часть и электронно-цифровую подпись (ЭЦП). Обобщенная структура электронного документа приведена на рис. 3.3. Электронный документ используется в качестве формы представления результатов работы, предназначенной для передачи из одной автоматизированной системы в другую или последующей визуализации.



Термин	Определение
БД об изделии	хранилище информации, требуемой для выпуска конструкторской документации, необходимой на всех стадиях жизненного цикла изделия [Р50.1.031-2001]
Электронный конструкторский документ (ЭКД)	структурированный набор данных, необходимых для разработки, изготовления, контроля, приемки, эксплуатации и ремонта, снабженный заголовком и подписанный электронно-цифровой подписью
Экранное представление данных	отображение конструкторской информации на экране компьютера в форме, воспринимаемой человеком
Бумажный конструкторский документ	графический и (или) текстовый документ, содержащий данные, необходимые для разработки, изготовления, контроля, приемки, эксплуатации и ремонта [ГОСТ 2.102-93]

Рис. 3.2. Виды представления конструкторской информации

Обе формы представления информации – в форме базы данных (внутреннее представление информации в компьютерной системе) и в форме электронного документа – не пригодны для восприятия человеком и требуют для специальных программных средств визуализации, т. е. преобразования данных в бумажный документ или в экранную форму.

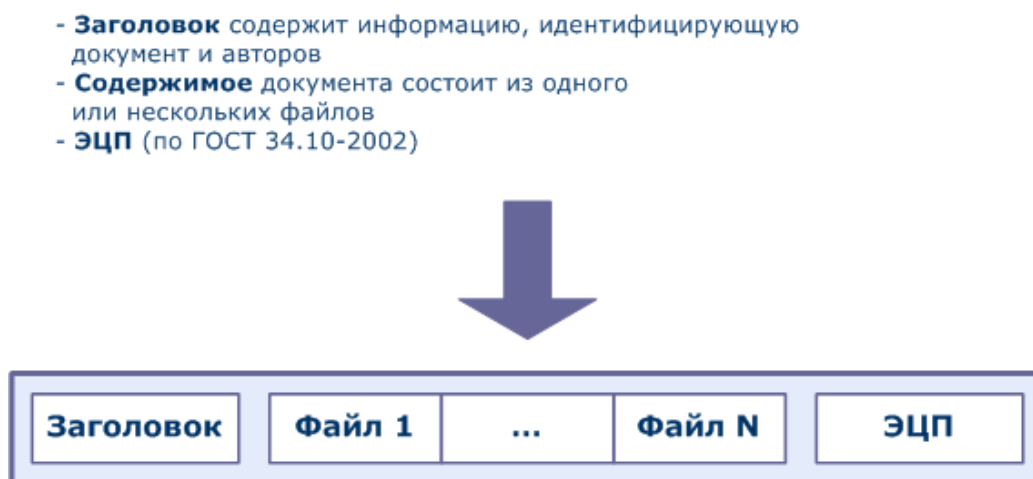


Рис. 3.3. Структура электронного документа

### **Параллельный инжиниринг**

Принцип параллельного инжиниринга (concurrent engineering) предполагает выполнение процессов разработки и проектирования одновременно с моделированием процессов изготовления и эксплуатации. Сюда же относится одновременное проектирование различных компонентов сложного изделия. При параллельном инжиниринге многие проблемы, которые могут возникнуть на более поздних стадиях жизненного цикла изделия, выявляются и решаются на стадии проектирования. Такой подход позволяет улучшить качество изделия, сократить время его вывода на рынок, сократить затраты.

Отличиями параллельного инжиниринга от традиционного подхода к организации процессов инженерной деятельности являются:

- ликвидация традиционных барьеров между функциями отдельных специалистов и организаций путем создания, а при необходимости последующего преобразования, многопрофильных рабочих групп, в том числе территориально распределенных;
- итеративность процесса приближения к необходимому результату.



Многопрофильные рабочие группы, как следует из их названия, включают специалистов разного профиля и создаются для решения конкретных задач. Например, представители эксплуатирующей организации, генерального разработчика и поставщика комплектующих изделий, т. е. специалисты из разных организаций, могут быть собраны в одну многопрофильную группу для решения проблемы, возникающей в ходе эксплуатации.

Параллельный инжиниринг предполагает замену традиционного последовательного подхода комплексом перекрывающихся во времени операций, направленных на систематическое улучшение разрабатываемого решения вплоть до достижения необходимого результата.

Исходное понимание задачи ведет к первой версии документированных требований, на основе которых разрабатывается первоначальное проектное решение. Оно порождает новые вопросы и позволяет уточнить постановку задачи. Поскольку жесткое требование завершить текущую фазу работы перед началом следующей отсутствует, последовательное проектирование заменяется «работой по спирали».

Эффективная реализация такого подхода невозможна вне ИИС. Возможность применения принципов параллельного инжиниринга возникает благодаря тому, что в ИИС все результаты работы представлены в электронном виде, являются актуальным, доступны всем участникам и легко могут быть скорректированы.

### **Реинжиниринг бизнес-процессов**

Концепция CALS предполагает последовательное, непрерывное изменение и совершенствование бизнес-процессов разработки, проектирования, производства и эксплуатации изделия. Для этого используется набор разнообразных методов, в т.ч. реинжиниринг бизнес-процессов (*business process reengineering*), бенчмаркинг (*benchmarking*), непрерывное улучшение процессов (*continuous process improvement*) и т. д.

Построению интегрированной системы информационной поддержки жизненного цикла изделия должны предшествовать:

- анализ существующей ситуации;
- разработка комплекса функциональных моделей бизнес-процессов, описывающих текущее состояние среды, в которой реализуется ЖЦ изделия;
- выработка и сопоставление возможных альтернатив совершенствования как отдельных бизнес-процессов, так и системы в целом.

Результатами анализа являются:

- функциональные модели бизнес-процессов жизненного цикла изделия «как есть сейчас»;

- функциональные модели альтернативных вариантов усовершенствованных бизнес-процессов жизненного цикла изделия «как должно быть»;
- оценка затрат и рисков для каждого варианта;
- выбор предпочтительного варианта на основе взвешенного критерия минимума затрат и рисков;
- описание технической архитектуры ИИС для выбранного варианта;
- оценка технических характеристик ИИС для выбранного варианта;
- план действий по реализации выбранного варианта совершенствования бизнес-процессов жизненного цикла и ИИС.

В настоящее время технология моделирования и анализа бизнес-процессов достаточно формализована. Для разработки функциональных моделей рекомендуется использовать методологию и нотацию SADT, регламентированную под названием IDEF0 федеральным стандартом США FIPS 183 и официально принятую в России.

Общая методика изменения бизнес-процессов в связи с внедрением CALS-технологий на предприятии включает в себя следующие этапы:

1. Мотивация необходимости изменений.
2. Разработка плана изменений и его утверждение руководством. Создание организационной структуры (рабочей группы CALS), которая будет реализовывать разработанный план. На первых этапах эту структуру должен возглавлять руководитель организации.
3. Обучение членов группы CALS и другого персонала, причастного к проведению изменений.
4. Определение промежуточных (тактических) целей и способов оценки результатов.
5. Разработка рабочих планов для всех участников группы CALS.
6. Создание временных многофункциональных рабочих групп для решения тактических задач.
7. Реализация планов.
8. Оценка достигнутых результатов.

### ***3.1.3. Базовые управленческие технологии***

Как уже говорилось, проектом принято называть совокупность действий, направленных на достижение поставленной производственной или коммерческой цели и связанных с использованием и расходом ресурсов различного типа. Примером проекта является выполнение контракта на поставку изделия, предполагающего выполнение целого ряда задач. Другим примером проекта может служить решение отдельной сложной задачи, такой как разработка комплекта документации или

ввод изделия в эксплуатацию. Технология управления проектами не зависит от содержания проектов, что позволяет рассматривать ее как базовую (инвариантную) технологию.

Термин Project Management (PM) обозначает класс управленческих задач, связанных с планированием, организацией и управлением действиями, направленными на достижение поставленных целей при заданных ограничениях на использование ресурсов.

Типовыми задачами PM являются:

- разработка планов выполнения проекта, в том числе разработка структурной декомпозиции работ проекта и сетевых графиков;
- расчет и оптимизация календарных планов с учетом ограничений на ресурсы;
- разработка графиков потребности проекта в ресурсах;
- отслеживание хода выполнения работ и сравнение текущего состояния с исходным планом;
- формирование управленческих решений, связанных с воздействием на процесс или с корректировкой планов;
- формирование различных отчетных документов.

Действия, приводящие к выполнению проекта и потребность в которых выявляется в ходе его планирования, могут представлять собой типовые бизнес-процессы (закупка комплектующих, разработка документации, производство и т. д.). Такие бизнес-процессы часто выполняются по заранее определенным формальным схемам (моделям), фактически определяющим технологию их выполнения. В ходе выполнения проекта исполнители (организации или сотрудники), действуя в соответствии с заданной технологией (моделью процесса), получают и выполняют задания, соответствующие структурным элементам бизнес-процесса (операциям).

Автоматизация управления потоком таких заданий есть функция другой базовой технологии управления – технологии «workflow» (поток работ – буквальный перевод английского «workflow»).

### **Управление ресурсами**

Понятия MRP II (Manufacturing Resource Planning) и ERP (Enterprise Resource Planning) в настоящее время являются общепринятыми обозначениями комплекса задач управления финансово-хозяйственной деятельностью предприятия. Автоматизированные системы, построенные на этих принципах, широко применяются не только в производстве, но и для управления проектной деятельностью (конструкторские бюро), коммерцией, эксплуатацией сложной техники (авиакомпания). Это позволяет рассматривать принципы и стандарты

MRP/ERP как базовую технологию управления ресурсами при решении различных задач.

В соответствии с ISO/IEC 2382-24:1995 системы класса MRP должны выполнять функции, перечисленные в табл.3.1.

**Таблица 3.1**

Управление финансовыми ресурсами (Financial Management)	Расчет потребностей в материалах (Materials Requirement Planning)
Управление персоналом (Human Resources)	Прогнозирование объема реализации и продаж (Forecasting)
Ведения портфеля заказов (Customer Orders)	Оперативно-производственное планирование (Finite Scheduling)
Управление запасами (Inventory Management)	Оперативное управление производством (Production Activity Control)
Управление складами (Warehouse Management)	Управление техническим обслуживанием оборудования (Equipment Maintenance)
Управление закупками (Purchasing)	Расчет себестоимости продукции и затрат (Cost Accounting)
Управление продажами (Sales)	Управление транспортировкой готовой продукции (Transportation)
Объемное планирование (Master Production Scheduling)	Управление сервисным обслуживанием (Service)

Для выполнения перечисленных в таблице 1 функций MRP/ERP-системы используют информацию, содержащуюся в ИИС, и помещают в нее результаты своей работы для использования данных на последующих стадиях ЖЦ.

#### **Управление качеством**

Обеспечение требуемого качества продукции является одной из целей реализации концепции CALS, поэтому управление качеством (в терминах стандартов серии ИСО 9000 система менеджмента качества – СМК) следует отнести к базовым технологиям управления.

Управление качеством в широком смысле необходимо понимать как управление процессами, направленное на обеспечение качества их результатов. Такой подход соответствует идеям всеобщего управления

качеством (Total Quality Management), суть которых как раз и заключается в управлении предприятием через управление качеством.

В контексте концепции CALS методы и технологии управления качеством приобретают новое развитие. Применение ИИС обеспечивает информационную поддержку и интеграцию процессов, а соответственно и возможность использования электронных данных, созданных в ходе различных процессов предприятия, для задач управления качеством.

### **Интегрированная логистическая поддержка**

Одним из важных потребительских параметров сложного наукоемкого изделия является величина затрат на поддержку его жизненного цикла. Они складываются из затрат на разработку и производство изделия, а также затрат на ввод изделия в действие, эксплуатацию и поддержание его в работоспособном состоянии. Сокращение затрат на поддержку жизненного цикла изделия – одна из целей CALS. Комплекс управленческих технологий, направленных на сокращение этих затрат, объединяется понятием интегрированной логистической поддержки (Integrated Logistic Support).

Согласно стандарту DEF STAN 0060, интегрированная логистическая поддержка (ИЛП) включает в себя: анализ логистической поддержки, процедуры планирования процессов технического обслуживания и ремонта, интегрированные процедуры материально-технического обеспечения, меры по обеспечению персонала электронной эксплуатационной и ремонтной документацией.

#### ***3.1.4. Типичный жизненный цикл изделия***

Два главных процесса, составляющих жизненный цикл изделия – процесс проектирования и процесс производства (рис. 3.1). Процесс проектирования начинается с маркетинга, а заканчивается полным описанием изделия. Процесс производства начинается с технических требований и заканчивается поставкой готовых изделий [15].

Первичные операции проектирования, такие как определение необходимости проектирования, формулировка технических требований, анализ осуществимости и сбор важной информации можно отнести к подпроцессу синтеза. Результатом подпроцесса синтеза является концептуальный проект предполагаемого продукта в форме эскиза, отражающего связи различных компонентов продукта. Большая часть информации в рамках этого подпроцесса, является качественной, и, следовательно, неудобной для компьютерной обработки.

Готовый концептуальный проект анализируется и оптимизируется – это уже подпроцесс анализа. Вырабатывается аналитическая модель, поскольку анализируется именно модель, а не сам проект. Качество результатов, которые могут быть получены в результате анализа, непосредственно связано с качеством аналитической модели.

После завершения проектирования и выбора оптимальных параметров начинается этап оценки проекта. Если оценка показывает, что проект не удовлетворяет требованиям, то процесс проектирования повторяется снова.

Если же результат проекта оказывается удовлетворительным, начинается подготовка проектной документации.

Процесс производства начинается с планирования, которое выполняется на основании полученных на этапе проектирования чертежей, а заканчивается готовым продуктом. Технологическая подготовка производства – это операция, устанавливающая список технологических процессов по изготовлению продукта и задающая их параметры. Одновременно выбирается оборудование, на котором будут производиться технологические операции, такие как получение детали нужной формы из заготовки. В результате подготовки производства составляются план выпуска, списки материалов и программы для оборудования. На этом же этапе обрабатываются прочие специфические требования, в частности, рассматриваются конструкции зажимов и креплений. Подготовка занимает в процессе производства примерно такое же место, как подпроцесс синтеза в процессе проектирования, требуя значительного человеческого опыта и принятия качественных решений. Такая характеристика подразумевает сложность компьютеризации данного этапа. После завершения технологической подготовки начинается выпуск готового продукта и его проверка на соответствие требованиям. Детали, успешно проходящие контроль качества, собираются вместе, проходят тестирование функциональности, упаковываются, маркируются и отгружаются заказчику.

Так выглядит типичный жизненный цикл изделия.

## **3.2. Средства автоматизации проектирования**

### ***3.2.1. Технологии CAD/CAM/CAE на этапах жизненного цикла изделия***

Согласно разделу 2.1, *автоматизированное проектирование (CAD)* представляет собой технологию, состоящую в использовании компьютерных систем для облегчения создания, изменения, анализа и

оптимизации проектов [15]. Таким образом, любая программа, работающая с компьютерной графикой, так же как и любое приложение, используемое в инженерных расчетах, относится к системам автоматизированного проектирования. Другими словами, множество средств САД простирается от геометрических программ для работы с формами до специализированных приложений для анализа и оптимизации. Между этими крайностями уместятся программы для анализа допусков, расчета масс-инерционных характеристик, моделирования методом конечных элементов и визуализации результатов анализа и т.п. Самая основная функция САД – определение геометрии конструкции (детали механизма, архитектурные элементы, электронные схемы, планы зданий и т.п.), поскольку геометрия определяет все последующие этапы жизненного цикла продукта. Для этой цели обычно используются системы для разработки рабочих чертежей и геометрического моделирования. Вот почему эти системы обычно и считаются системами автоматизированного проектирования. Более того, геометрия, определенная в этих системах, может использоваться в качестве основы для дальнейших операций в системах CAE и CAM. Это одно из наиболее значительных преимуществ САД, позволяющее экономить время и сокращать количество ошибок, связанных с необходимостью определять геометрию конструкции с нуля каждый раз, когда она требуется в расчетах. Можно, следовательно, утверждать, что системы автоматизированной разработки рабочих чертежей и системы геометрического моделирования являются наиболее важными компонентами автоматизированного проектирования.

Как уже говорилось, компьютеры не могут широко использоваться в подпроцессе синтеза, поскольку они не обладают способностью хорошо обрабатывать качественную информацию. Однако даже на этом этапе разработчик может, например, успешно собирать важную для анализа осуществимости информацию, а также пользоваться данными из каталогов. Непросто представить себе использование компьютера и в процессе концептуализации проекта, потому что компьютер пока еще не стал мощным средством для интеллектуального творчества. На этом этапе компьютер может сделать свой вклад, обеспечивая эффективность создания различных концептуальных проектов.

Главными на этом этапе оказываются средства параметрического и геометрического моделирования, позволяющие создавать 3D-модели и автоматизировать процесс создания рабочих чертежей.

**CAE – инженерный анализ** – это технология, состоящая в использовании компьютерных систем для анализа геометрии, моделирования и изучения поведения продукта для усовершенствования и оптимизации его конструкции. Средства CAE могут осуществлять множест-

во различных вариантах анализа. Программы для кинематических расчетов, например, способны определять траектории движения и скорости звеньев в механизмах. Программы динамического анализа с большими смещениями могут использоваться для определения нагрузок и смещений в сложных составных устройствах типа автомобилей. Программы верификации и анализа логики и синхронизации имитируют работу сложных электронных цепей.

По всей видимости, из всех методов компьютерного анализа наиболее широко в конструировании используется метод конечных элементов. С его помощью рассчитываются напряжения, деформации, теплообмен, распределение магнитного поля, потоки жидкостей и другие задачи с непрерывными средами, решать которые каким-либо иным методом оказывается просто непрактично. В методе конечных элементов аналитическая модель структуры представляет собой соединение элементов, благодаря чему она разбивается на отдельные части, которые уже могут обрабатываться компьютером.

Существует множество программных средств для оптимизации конструкций. Замечательное достоинство методов анализа и оптимизации конструкций заключается в том, что они позволяют конструктору увидеть поведение конечного продукта и выявить возможные ошибки до создания и тестирования реальных прототипов, избежав определенных затрат. Поскольку стоимость конструирования на последних стадиях разработки и производства продукта экспоненциально возрастает, ранняя оптимизация и усовершенствование (возможные только благодаря аналитическим средствам САЕ) окупаются значительным снижением сроков и стоимости разработки.

САЕ-технологии эффективно используются в аналитической фазе проектирования. Программных пакетов для анализа напряжений, контроля столкновений и кинематического анализа существует очень много.

Подпроцесс анализа может выполняться в цикле оптимизации проекта по каким-либо параметрам. Разработано множество алгоритмов поиска оптимальных решений, а на их основе построены коммерчески доступные программы. Процедура оптимизации может считаться компонентом системы автоматизированного проектирования, но можно рассматривать эту процедуру и отдельно.

**Технологическая подготовка производства (САМ)** – это технология, состоящая в использовании компьютерных систем для планирования, управления и контроля операций производства. Одним из наиболее эффективных подходов к автоматизации производства является числовое программное управление (ЧПУ). ЧПУ заключается в использовании запрограммированных команд для управления станком, который



может шлифовать, резать, фрезеровать, штамповать, изгибать и иными способами превращать заготовки в готовые детали. В наше время компьютеры способны генерировать большие программы для станков с ЧПУ на основании геометрических параметров изделий из базы данных CAD.

Планирование процессов также постепенно автоматизируется. План процессов может определять последовательность операций по изготовлению устройства от начала и до конца на всем необходимом оборудовании. Хотя полностью автоматизированное планирование процессов практически невозможно, план обработки конкретной детали вполне может быть сформирован автоматически, если уже имеются планы обработки аналогичных деталей.

Вдобавок, компьютер может использоваться для того, чтобы выявлять необходимость заказа исходных материалов и покупных деталей, а также определять их количество, исходя из графика производства.

Итак, теперь мы имеем представление о том, каким образом компьютерные технологии используются в операциях, составляющих жизненный цикл изделия, и какие задачи решаются при помощи систем автоматизированного проектирования.

### ***3.2.2. Уровень CAD/CAM/CAE-систем и направления развития***

Имеющиеся в настоящее время на мировом рынке CAD/CAM/CAE-системы для приборостроения и машиностроения по широте охвата решаемых с их помощью задач можно разделить на универсальные и специализированные, причем последние используются как самостоятельно, так и в составе универсальных.

Все универсальные CAD/CAE/CAM-системы для приборостроения должны содержать три обязательные категории подсистем:

- пакеты программ для графического ядра системы (см. подраздел 2.5.2).;

- пакеты для всестороннего анализа и оценки функциональных и эксплуатационных свойств с помощью методов моделирования на различных уровнях физического представления проектируемых объектов. Их использование позволяет почти полностью отказаться от дорогостоящего изготовления прототипов проектируемых изделий и их натуральных испытаний. Такие системы обычно отличаются высокой сложностью и стоимостью и охватывают широкий круг задач моделирования технических объектов. Здесь наиболее распространены системы моделирования на распределенном уровне, использующие метод конечных элементов (МКЭ). В зависимости от типа проектируемых изделий, тех-

нологии их изготовления и условий эксплуатации они также подразделяются на универсальные и специализированные. К числу самых известных систем относятся NASRTAN, NISA II, PATRAN, ANSYS, к числу специализированных CAE-систем – пакеты SIMTEC, MAGMAsoft (моделирование процессов отвердевания металлических отливок), MoldFlow (процессы литья пластмасс), OPTRIS (деформация при листовой штамповке) и др. Для моделирования кинематики и динамики используются такие пакеты, как ADAMS, DADS; для моделирования технических объектов различной физической природы на сосредоточенном уровне – система SABER;

– системы для подготовки управляющих программ станков и технологического оборудования с ЧПУ. Как правило, они имеют собственный достаточно развитый графический редактор, позволяющий на основе чертежа детали создавать ее геометрическую модель, которая затем используется для генерации управляющей программы систем ЧПУ. Таких пакетов для персональных компьютеров и рабочих станций создано уже немало. Наиболее известные из них – SmartCAM, CIM CAD, EUCKID, PEPS, DUST, Simplex, «Спрут» и др. Часто они выпускаются как специализированные пакеты для конкретных видов механообработки или имеют набор специализированных модулей.

#### **Уровень систем.**

Несмотря на то, что универсальные CAD/CAE/CAM-системы предназначены для комплексной автоматизации проектирования и производства, по масштабу решаемых ими задач (в зависимости от их функциональных возможностей, набора входящих в них модулей и структуры организации) принято выделять три класса систем: низкого уровня, среднего и полномасштабные системы (масштаба предприятия).

**Системы низкого уровня** обычно имеют ограниченный набор модулей и кроме автоматизации чертежных работ включают в себя графический моделлер с 3D-поверхностной графикой (иногда с 3D-твердотельной), модуль визуализации трехмерных тел, модуль генерации программ для оборудования с ЧПУ и др. В них ограничены возможности параметрического проектирования и ассоциативных связей; как правило, отсутствуют модули управления данными проекта, функционального анализа и управления процессом механосборки. Обычно базовые графические модули этих систем создаются фирмами-разработчиками системы, которые часто выступают и в роли интеграторов внедряемой САПР. Модули для расширения возможностей системы на область задач CAE и CAM обычно разрабатываются и поставляются третьими фирмами. В большинстве случаев системы низкого уровня

могут устанавливаться и работать на персональных компьютерах или недорогих рабочих станциях.

К системам этого класса можно отнести такие недорогие и популярные в нашей стране системы автоматизации как AutoCAD, CADDY, отечественные T-Flex, «Компас», «Спрут» и др. Фирмы-производители стремятся постоянно наращивать функциональные возможности своих систем, приближая их к системам среднего уровня, а за счет приобретения продукции третьих фирм – к полномасштабным системам. В последнее время упомянутые пакеты программ существенно «прибавили в весе».

**Системы среднего уровня** имеют наиболее широкий набор модулей, разрабатываемых фирмами – собственниками пакета. Системы этого класса обеспечивают более высокую функциональность при проектировании, используют геометрические моделиеры с возможностями параметрического моделирования и ассоциативности, а некоторые включают наборы модулей управления проектными данными и механическими сборками. Технической базой для таких систем являются обычно рабочие станции с ОС UNIX или персональные компьютеры уровня графических рабочих станций. К подобным системам могут быть отнесены Cimatron, KONSYS 2000, Pro/JUNIOR, MicroStation (выделяется более развитыми функциональными возможностями) и др. В результате совершенствования и развития эти системы по своим возможностям приближаются к системам масштаба предприятия, а в некоторых случаях даже превосходят их по функциональности.

И, конечно же, наибольшими возможностями обладают **полномасштабные системы CAD/CAE/CAM**. Из них к числу наиболее распространенных в России относятся Pro/Engineer (компания PTC), Uni-graphics (фирма EDS), CADD5 (Computervision), CATIA (IBM). Это сложные, многофункциональные системы, в состав которых входит большой набор модулей (до 40 – 70) различного функционального назначения, из которых как типовые выделяются:

- графическое ядро для создания геометрических моделей отдельных деталей, узлов и изделия в целом;
- модуль создания и оперирования процессами механосборки;
- модули для инженерного анализа с использованием метода конечных элементов, моделирования кинематики и динамики механизмов;
- модули конструирования систем управления (гидравлических, пневматических, электрических и др.) и систем жизнеобеспечения (вентиляция, кондиционирования, теплоснабжения, электропитания и т. п.);

- набор модулей для технологической подготовки производства, в основном модули генерации управляющих программ для различных видов механообработки, литья, штамповки и других техпроцессов;
- модули обмена данными в различных графических форматах (IGES, STEP, DXF, VDA-FS и др.);
- модули управления данными выполняемых проектов;
- собственная или коммерческая СУБД;
- модули подготовки и выпуска проектной и конструкторской документации (разработка чертежей по геометрическим моделям, подготовка спецификаций).

В большинстве случаев приведенный базовый набор модулей дополняется различными вспомогательными, и очень часто в состав универсальных систем включаются специализированные пакеты - ADAMS, MoldFlow, NASTRAN и т.д. Например, некоторые предприятия, используя CAD/CAE/CAM-систему Pro/Engineer, тем не менее для генерации программ станков с ЧПУ предпочитают применять соответствующие модули других систем (CADD5, CIM CAD, SmartCAD), считая их более эффективными.

На большинстве западных приборостроительных предприятий эксплуатируются различные CAD/CAE/CAM-системы разных версий и в разной конфигурации, то есть системы неоднородные или гетерогенные. Можно привести случаи, когда разные системы используются в соседних подразделениях, а иногда и отдельными проектировщиками. Подобный разнородностью объясняется многими причинами: симпатиями и привычками отдельных сотрудников, желанием использовать для различных проектных задач наиболее подходящее программное обеспечение.

Основная проблема, возникающая при использовании гетерогенных систем (нередко усугубляемая неоднородностью инструментальной базы – системных программно-аппаратных средств), заключается в переносе между системами геометрических моделей сконструированных деталей и узлов одного проекта, когда в каждой из систем нужно обеспечить адекватность описания геометрии с заданной точностью. Как правило, для этого используется преобразование внутреннего представления геометрических моделей в формат одного из распространенных графических стандартов. Однако при этом зачастую не удается достаточно полно согласовать графические возможности системы-источника и системы-приемника.

### **Развитие.**

Перечисленные выше возможности для современных интегрированных систем CAD/CAE/CAM уже недостаточны. Системы масштабов

предприятия поддерживают следующие важные с точки зрения пользователя функции:

- твердотельное моделирование как основа для создания и описания геометрических моделей проектируемых изделий с использованием вариационной геометрии и поддержкой межуровневых связей, развивающее метод параметрического моделирования;

- распространение двунаправленных связей на все уровни, включая сборочные единицы, расчетные модули системы, технологическую подготовку производства;

- полное описание всего проекта в определенном формате представления и, как следствие, обеспечение горизонтальной и вертикальной интеграции и сбалансированности модулей в рамках единой системы;

- наличие средств поддержки параллельного проектирования и методов коллективной работы.

Для многих западных фирм, имеющих большой объем наработок в устаревшей дискретной технологии проектирования – с частичной автоматизацией узких мест при использовании модулей различных САПР, – задача перехода к единой базовой системе связана с большими материальными затратами, сложностью переобучения персонала и другими проблемами. Подобное переоснащение могут позволить себе лишь очень мощные фирмы (например, Catarpillar, Cummins Engine, Short Brothers, Rolls-Royce, United Technologies и др.) или, наоборот, совсем молодые, только появляющиеся фирмы. Для российских предприятий с их низким уровнем использования информационных технологий более рациональным представляется переход сразу к единой полномасштабной системе CAD/CAE/CAM для информатизации всего производственного процесса на современном уровне.

Развитие современных САПР идет по нескольким направлениям. С одной стороны, это переход к объектно-ориентированным системам и технологиям проектирования, реализованным в большинстве выпущенных в последнее время CAD/CAE/CAM. Наиболее интересных результатов в развитии этого направления добились следующие фирмы-разработчики: Intergraph (объектно-ориентированная система Solid Edge), Bently System (пакет Objective MicroStation), Computervision (пакет Design Post P&D - реализация объектно-ориентированной управляемой по событиям технологии PELORUS), Straessle (системы ObjectD и FeatureM).

С другой стороны, фирмы стремятся включать в свои системы CAD/CAE/CAM все новые модули, расширяющие сферы их применения: от традиционного проектирования узлов и изделий машиностро-

ния, зданий и сооружений до планировки предприятий, картографии и геоинформатики. Это особенно показательно для систем среднего уровня, в которых наиболее ярко выражена модульная структура построения: выпущенные Bently Systems инструментальный пакет MicroStation GeoGraphics, предназначенный для решения задач картографии, и пакет PlantSpace (совместная с фирмой Jacobud Technology разработка) для перепланировки предприятий в среде MicroStation 95; AutoCAD Map (для картографии) фирмы AutoDesk; модули HVAC и CV Plant Design фирмы ComputerVision для проектирования коммуникаций и сложных производственных объектов.

Наконец, у конструкторов-проектировщиков появляются принципиально новые возможности, связанные с созданием глобальных сетей на базе Internet. В этом направлении развития систем следует отметить работы компаний Bently Systems и AutoDesk. Так, в систему встраивается WWW-браузер, что позволяет в рамках CAD/CAE/CAM оперировать модулями объектов, созданными проектировщиками в различных частях света, загружая их из подключенных к Интернету библиотек.

Современные тенденции и перспективы развития информационных технологий в промышленно развитых странах заключаются в том, что время компьютерных «монстров» уходит. На смену им идут недорогие, легкие в изучении, удобные в работе системы. В одной из систем осуществляется моделирование, в другой – модель подвергается инженерному анализу, в третьей – генерируется программа ЧПУ и т.д. Благодаря использованию современных стандартов инженерные системы стыкуются также легко, как офисные пакеты Word, Excel и т.п.

### **3.2.3. Обзор CAD/CAM/CAE-систем**

В этом разделе приводится краткий обзор *наиболее известных* CAD/CAM/CAE-систем, используемых в приборостроении, с указанием производителя, области применения, особенностей программного продукта в соответствии с Каталогом САПР [12].

#### **AutoCAD**

Производитель – **Autodesk, Inc., США**

Область применения – от приборостроения до аэрокосмической промышленности

Адрес в Интернет: <http://www.autodesk.com>; <http://www.autodesk.ru>.

Программа предназначена для двумерного проектирования и черчения, подготовки проектной документации, выполнения основных задач трехмерного проектирования.

AutoCAD – профессиональная САПР, работающая в среде Microsoft Windows. Высокопроизводительный программный продукт с полной поддержкой формата DWG, DXF. Экспорт в SAT, STL, 3DS, WMF и др. Публикация в DWG, PDF.

Содержит полный перечень инструментов, необходимых для 2D- и 3D-проектирования, оформления конструкторской документации и вывода на печать. Динамические блоки, создание собственной библиотеки параметрических элементов, постоянно используемых при проектировании. Создание подшивок. Динамический ввод команд, ассоциативных размеров. Настройка стилей размеров. Наличие мощного текстового редактора, работа с таблицами непосредственно в среде программы. Все возможные варианты штриховки, градиентная заливка объектов, подсчет площади, периметра. Перевод мер во встроенном инженерном калькуляторе. Инструменты создания презентационных видов, тонирование, камеры, текстуры, свет. Разработка, редактирование твердотельных моделей, работа с поверхностями. Содержит встроенные среды разработки Visual Basic (VB) и Visual LISP (У1Л5Р), интерпретаторы языков DCL, DIESEL, средства расширения меню и поддержку приложений, написанных на ObjectARX Visual C++.

### **AutoCAD LT**

Производитель – **Autodesk, Inc., США**

Область применения – от приборостроения до аэрокосмической промышленности

Адрес в Интернет: <http://www.autodesk.com>; <http://www.autodesk.ru>.

Программа предназначена для двумерного проектирования и черчения, подготовки проектной документации.

AutoCAD работает независимо от специализированных программ, в среде Microsoft Windows.

Высокопроизводительный программный продукт с полной поддержкой формата DWG, DXF. Экспорт в WMF. Публикация в PDF, DWF (многолистовой).

Полный перечень инструментов, необходимых для 2D-проектирования, оформления конструкторской документации и вывода на печать.

Динамические блоки, создание собственной библиотеки параметрических элементов, постоянно используемых при проектировании.

Динамический ввод команд, ассоциативных размеров. Настройка стилей размеров.

Наличие мощного текстового редактора, работа с таблицами непосредственно в среде программы.

Все возможные варианты штриховки, подсчет площади, периметра. Перевод мер во встроенном инженерном калькуляторе.

### **Autodesk Inventor Series**

Производитель – **Autodesk, Inc., США**

Область применения – от приборостроения до аэрокосмической промышленности

Адрес в Интернет: <http://www.autodesk.com>; <http://www.autodesk.ru>.

Программа предназначена для твердотельного, параметрического, адаптивного моделирования от 2D-эскиза до 3D-сборок, сложных узлов и выпуска конструкторской документации.

Двусторонняя связь модели от эскиза до чертежа, работа с геометрией AutoCAD, Mechanical Desktop. Огромный функционал команд для работы с твердыми телами, поверхностями и фотореалистичной визуализацией.

Модули работы со сваркой, тонколистовым металлом (гибка, развертка), создание чертежей. Модуль создания презентационных материалов, изображений и видеороликов с высокой реалистичностью, анимация сборок.

Кинематический анализ механизмов, анализ поверхностей, технологичности модели. Получение массово-габаритных характеристик детали или сборочного элемента.

Мастер проектирования создает готовые элементы механизмов: валы, шестерни, зубчатые колеса, шкивы, червячные передачи и мн. др., оперируя заданными параметрами, как: мощность, скорость, крутящий момент, свойства материала и т.п. Библиотека стандартных элементов по ГОСТ, ISO, DIN, JIS, ANSI и другим, публикация деталей в библиотеку. Генератор создания болтовых соединений.

Публикация в DWF. Работа с универсальными форматами обмена, а также работа с геометрией других форматов напрямую: SAT, IGES, STEP; PRT, ASM (PRO/Engineer).

### **Autodesk Inventor Professional**

Производитель – **Autodesk, Inc., США**

Область применения – от электронного документооборота до аэрокосмической промышленности



Адрес в Интернет: <http://www.autodesk.com>; <http://www.autodesk.ru>.

Программа твердотельного параметрического проектирования для различных отраслей промышленности, позволяющая выпуск конструкторской документации с обратной связью между чертежом и 3D-моделью.

Содержит модули:

- для работы с тонколистовым металлом (гибка, развертка);
- для работы со сваркой (фланговый и лицевой шов, расчет сварочного соединения);
- модуль конечно-элементного анализа элемента, кинематического анализа с учетом трения, демпфирования и жесткости, анализа технологичности модели;
- модуль создания презентационных материалов, изображений и видеороликов;
- проектирования готовых элементов механизмов: валы, шестерни, зубчатые колеса, шкивы, червячные передачи и многое другое, оперируя заданными параметрами, как мощность, скорость, крутящий момент, свойства материала и т.п.;
- проектирование рамных конструкций из стандартных профилей.

Содержит библиотеку стандартных элементов по ГОСТ, ISO, DIN, JIS, ANSI и другие. Публикация деталей в библиотеку. А также весь функционал Autodesk Inventor Series.

## **MechaniCS 5.0**

Производитель – **Consistent Software, Россия**

Область применения – проектирование в машиностроении

Адрес в Интернет: <http://www.consistent.ru>

Система MechaniCS предназначена для проектирования машиностроительных объектов: оформления чертежей по ЕСКД, проектирования систем гидропневмоэлементов, деталей машин, зубчатых зацеплений, валов.

Все детали общей конструкторско-технологической базы. MechaniCS обладают интеллектом и являются объектно-зависимыми. При изменении параметров одной детали все связанные с ней объектно-зависимые детали изменятся автоматически, причем в соответствии с их значениями в базе. Такая технология – мощный инструмент многовари-

антного проектирования, залог повышения качества выпускаемых проектов. Важно, что этот подход одинаково доступен пользователям AutoCAD и Autodesk Inventor. Пользователю предоставлено всё необходимое для проектирования машиностроительных объектов: более 1000 стандартов (включая ГОСТы, ОСТы, DIN и ISO), возможность создавать собственные интеллектуальные объекты, выполнять инженерные расчеты с отображением результатов на модели, оформлять проекции чертежей по ЕСКД:

- проектирование валов, зубчатых зацеплений и других деталей машин;
- трубопроводы и гидropневмоэлементы арматуры;
- оформление проекций чертежей по ЕСКД:
  - автоматизированный конструкторский нормоконтроль;
  - редактор технических требований и технических характеристик;
  - проставка размеров и предельных отклонений;
  - допуски формы и расположения поверхностей;
  - гребенчатая выноска, нанесение уклонов (только в среде AutoCAD);
  - универсальная выноска и универсальный маркер;
  - позиции и спецификации;
  - универсальные таблицы; – рамки (форматы);
  - маркирование и клеймение; – знаки шероховатости;
  - неразъемные соединения; – виды, разрезы, сечения;
- импорт информации о печатных платах из OrCAD и PCAD в формате IDF;
- оформление операционных эскизов.

Система МеспашС5 является сертифицированным приложением для Autodesk Inventor.

## **Pro/ENGINEER**

Производитель – **Parametric Technology Corporation, США**

Область применения – конструкторско-технологическая подготовка в машиностроении

Адрес в Интернет: <http://www.ptc.com>,

<http://www.ptc.com/russia/index.htm>.

Pro/ENGINEER полностью обеспечивает сквозной цикл разработки изделия от конструирования до производства продукции. В основе системы лежит использование уникального ядра GraniteOne® от компании PTC. Pro/ENGINEER имеет модульную структуру. Каждый модуль предназначен для решения определенных задач в процессе разработки и подготовки производства изделия. Названия модулей представлены в

списке программ производителя. Программа работает под управлением MS Windows, Linux UNIX. Среди возможностей программы:

- Автоматизация всего цикла разработки изделий от проектирования до производства. Организация проектирования «сверху вниз» и «снизу вверх».
- Трехмерное твердотельное и поверхностное моделирование деталей и сборок любой сложности.
- Параметризация моделей на уровне ядра системы. Полная двунаправленная ассоциативность моделей, чертежей и всех компонентов проекта.
- Подготовка рабочих чертежей в полном соответствии с ГОСТ.
- Разработка и оптимизация управляющих программ для станков с ЧПУ.
- Специализированные приложения и библиотеки для разработки пресс-форм, штампов, литейных форм; для моделирования металлоконструкций из профиля; для моделирования электрокабельных систем, трубопроводов, принципиальных схем и диаграмм; для структурного, температурного, динамического и кинематического анализа и оптимизации изделий, а так же анализа усталостной прочности.
- Интерфейс с различными CAD/CAM системами на основе Ассоциативной Топологической Шины (ATB – Associative Topology Bus).

Последняя версия программы Pro/ENGINEER Wildfire 3 имеет ряд существенных дополнений и усовершенствований. Система Pro/ENGINEER полностью русифицирована, что обеспечивает высокую скорость освоения системы и удобство ее использования.

## **CATIA**

Производитель – **Dassault Systems, S.A, Франция**

Область применения – Проектирование сложных технических изделий

Адрес в Интернет: <http://www.3ds.com>, <http://www.catia.com>,  
<http://www.catia.ibm.com>, <http://www.catia.ru>.

Программа предназначена для проведения полного цикла проектирования и подготовки производства в различных отраслях промышленности.

CATIA представляет собой систему проектирования высокого уровня, позволяющую выполнять как проектирование, так и проведение исследований, анализ электронноцифровых макетов изделий и подготовку к производству. Является одной из наиболее известных и распространенных программ САПР.

Применяется в различных отраслях промышленности (авиа- и автомобилестроение, производство двигателей, кораблестроение, энергетика и проч.).

Среди возможностей программы:

- трехмерное моделирование;
- дизайн, синтез и анализ изделий различной степени сложности (включая товары массового производства);
- имитация сложных технологических процессов;
- инженерный анализ и оптимизация;
- проектирование на основе «базы знаний»;
- программирование обработки и создание управляющих программ для станков с ЧПУ;
- проектирование оборудования и производственных систем;
- разработка собственных приложений к CATIA.

### **MSC.SimDesigner for CATIA**

Производитель – **The MacNeal-Schwendler Corporation, США**

Область применения – Инженерные расчеты

Адрес в Интернет: <http://www.mscsoftware.com>,

<http://www.mscsoftware.ru>

Программа предназначена для проведения инженерных расчетов в среде CATIA V5.

SimDesigner Motion (SMO) – Моделирование динамики и кинематики механических систем с учетом нагрузок, гравитации, трения, пружин и демпферов.

SimDesigner Linear (SDL) – прочностной FE-анализ любых конструкций. (Препроцессор, решатель MSC.NASTRAN, постпроцессор)

SimDesigner Nonlinear (SDN) – моделирование больших деформаций и сложных эффектов пластичности в материале, используя MSC.Marc в среде CATIA V5. (Препроцессор, постпроцессор, транслятор и решатель интегрированы.)

SimDesigner Thermal (SDT) – выполнение анализа теплопередачи, причем модель берется непосредственно от GPS, а в качестве выходных данных получают температурное распределение, температурные градиенты и тепловые потоки.

SimDesigner Flex (SDF) – преобразовывание твердых тел в упругие и проведение кинематического и динамического анализов механических систем с учетом податливости их компонентов.

SimDesigner Advanced Structures Professional (ASP) – обеспечение работы с различными конечными элементами и сетками не только в мо-

дулях SimDesigner, но и в таких продуктах CATIA V5, как GPS, FMS, GAS и EST.

## **SolidEdge**

Производитель – **UGS Corporation, США**

Область применения – Автоматизация проектирования изделий на машиностроительных предприятиях

Адрес в Интернет: <http://www.ugs.com>; <http://www.solidedge.ru>;  
<http://www.ugs.ru>

Программа предназначена для проектирования изделий общего машиностроения и товаров народного потребления.

SolidEdge представляет собой систему автоматизированного конструирования, применяемую при проектировании и моделировании отдельных деталей и сборочных узлов. Программа интегрирована с программой Unigraphics NX, системой более высокого уровня. В основе программы лежит мощное ядро Parasolid компании UGS Corporation.

Среди возможностей программы:

- конструирование деталей, получаемых штамповкой;
- моделирование как простых, так и сложных деталей из металла, пластика и других материалов;
- построение комплектов чертежей, ассоциативно связанных с трехмерными моделями, а также для выполнения обычных операций плоского черчения;
- проектирование гидравлических и пневматических коммуникаций в контексте сборки, а также для разводки кабельных систем;
- проектирование и компоновка сборочных узлов с большим количеством деталей и вложенных сборок;
- работа с распределенными данными – геометрическими моделями, чертежами, прочими документами и информацией о продукте.

Программа поддерживает большинство промышленных стандартов, среди которых: ANSI, BSI, DIN, ISO, INI.

## **SolidEdge Приложения, Часть 1**

Производитель – **UGS Corporation, США**

Область применения – Автоматизация проектирования изделий на машиностроительных предприятиях

Адрес в Интернет: <http://www.ugs.com>; <http://www.solidedge.ru>;  
<http://www.ugs.ru>

Одно из основных приложений, входящих в состав системы SolidEdge.

Среда «Деталь» предназначена для моделирования как простых, так и сложных деталей из металла, пластика и других материалов.

Пространственная параметрическая модель создается с использованием конструктивно-технологических элементов, характерных для способа изготовления детали. Выступы и вырезы по различным законам, отверстия, уклоны, тонкостенные элементы и области и т. п. позволяют моделировать фрезерованные, литые, кованные, штампованные детали высокой сложности и оснастку для их изготовления.

Конструктор может исследовать варианты конструкции детали, оперативно изменяя форму, геометрические и размерные связи детали на всем протяжении процесса проектирования и доводки изделия.

Уникальный набор средств моделирования сложных поверхностей позволяет использовать SolidEdge как инструмент инженера-дизайнера.

Параметрические NURBS-кривые дают удобные средства контроля формы и характеристик поверхностей деталей.

Средства пространственного управления эскизом (управляющие точки, ассоциативные копии эскизов, динамическое редактирование) облегчают дизайнерские проработки изделий.

Набор булевых операций и специальных команд построения деталей служит для проектирования как деталей, так и оснастки, например литьевых форм.

## **SolidEdge Приложения, Часть 2**

Производитель – **UGS Corporation, США**

Область применения – Автоматизация проектирования изделий на машиностроительных предприятиях

Адрес в Интернет: <http://www.ugs.com>; <http://www.solidedge.ru>;  
<http://www.ugs.ru>

Среда конструирования деталей, получаемых штамповкой. При моделировании листового материала не только задается форма детали с помощью специального набора операций, но и закладываются сведения о технологии ее изготовления – радиусах сгиба, коэффициентах пластичной зоны или удлинения дуги, разгрузке углов и т. д. Листовые детали могут разрабатываться прямо в контексте сборки.

Все функции моделирования листовых изделий используют стандартную терминологию: фланец, пластина, автоматическое добавление радиуса сгиба, разгрузка угла, последовательная гибка/разгибание, плоская ассоциативная развертка, разделка углов.

Кроме этого, SolidEdge имеет уникальные функции построения листовых деталей с более сложным, чем гибка, процессом деформации: вентиляционные отверстия, рифты, прошивки с отбортовкой, буртики.

Другие полезные операции – автоматическое закрытие угла, фигурный фланец, 5-образная подсечка.

Ассоциативная развертка, хранящаяся вместе с деталью, обеспечивает связь SolidEdge с приложениями, используемыми для программирования вырубных или лазерных станков. Уже при проектировании SolidEdge позволяет учитывать технологию изготовления, позволяя ввести в развертку технологические элементы, отсутствующие в рабочей детали.

Среда листовых изделий SolidEdge считается самой удобной и полной в своем классе.

### **SolidEdge Приложения, Часть 3**

Производитель – **UGS Corporation, США**

Область применения – Автоматизация проектирования изделий на машиностроительных предприятиях

Адрес в Интернет: <http://www.ugs.com>; <http://www.solidedge.ru>;  
<http://www.ugs.ru>

Среда «Чертеж» предоставляет полный набор для построения комплектов чертежей, ассоциативно связанных с трехмерными моделями, а также для выполнения обычных операций плоского черчения. Разместив в начале один или несколько чертежных видов на листе, чертежник может в дальнейшем легко добавлять, менять или удалять виды, разрезы или сечения, в том числе местные вырывы, применять и модифицировать разрывы; выполнять в полуавтоматическом или ручном режимах простановку размеров, обозначений и пояснений согласно ЕСКД.

Система оповещения об изменениях видов и размеров облегчает ориентирование в больших комплектах чертежей при внесении изменений в модели. Система подскажет и наглядно продемонстрирует, какие виды и на каких листах были изменены, какие размеры изменились и каковы были их предыдущие значения. Спецификация обладает двусторонней связью с чертежами и моделями SolidEdge. Это упрощает процесс внесения данных и гарантирует точное соответствие модели, чертежа и спецификации.

Среда «Коммуникации» предназначена для проектирования гидравлических и пневматических коммуникаций в контексте сборки, а также для разводки кабельных систем. Труба строится по выбранной

трассе. Среда содержит обширный набор функций для прокладки 3D-трасс в контексте сборки, в том числе трасса может быть построена автоматически. Радиусыгиба и законцовки труб моделируются автоматически. Для дальнейшего изготовления изделия SolidEdge строит также таблицу сгибов. Параметры полученной трубы могут быть легко включены в чертеж изделия. Трасса трубы ассоциативно связана с соответствующими деталями сборки. При изменении компоновки изделия трасса, а за ней и труба будут изменены автоматически. Похожая схема используется и при прокладке электрических кабелей.

#### **SolidEdge Приложения, Часть 4**

Производитель – **UGS Corporation, США**

Область применения – Автоматизация проектирования изделий на машиностроительных предприятиях

Адрес в Интернет: <http://www.ugs.com>; <http://www.solidedge.ru>;  
<http://www.ugs.ru>

Среда «Сборка» дает конструктору широкий выбор инструментов по проектированию и компоновке сборочных узлов с большим количеством деталей и вложенных сборок методами «снизу вверх» и «сверху вниз». Взаимное расположение деталей в сборке задается набором наложенных на них связей совмещения плоскостей, касания и др. Правильно выбранный набор связей гарантирует конструктору, что сборка будет правильно изменять свой вид при изменении параметров или формы отдельных деталей. Прямо в среде сборки конструктор ведет вариантное проектирование, анализируя различные конструктивные решения. Система автоматически запоминает метод размещения деталей и позволяет проводить быстрые замены одних деталей и узлов на другие в процессе поиска решения. Семейства сборок SolidEdge позволяют также вести параллельную разработку вариантов изделия с различным набором компонентов и взаимным расположением деталей, оперативно управляя структурой изделия. Семейства сборок также позволяют создавать ряд однотипных изделий с различными техническими параметрами. Гибкие средства распределения деталей по вложенным сборкам, создания новых сборок и деталей по месту позволяют пользователю работать так, как ему удобно, а затем группировать компоненты в соответствии со структурой изделия или иными требованиями.

Системные библиотеки SolidEdge хранят и позволяют использовать для размещения в сборке не только детали и узлы, но и связанные с ними построения.



## **SolidEdge Приложения, Часть 5**

Производитель – **UGS Corporation, США**

Область применения – Автоматизация проектирования изделий на машиностроительных предприятиях

Адрес в Интернет: <http://www.ugs.com>; <http://www.solidedge.ru>;  
<http://www.ugs.ru>

Технология Solid Edge Insight, реализованная на базе Microsoft Share-Point Portal Server, позволяет в процессе проектирования аккумулировать и совместно использовать знания о продукте. Управление данными Solid Edge Insight позволяет работать с распределенными данными – геометрическими моделями, чертежами, прочими документами и информацией о продукте. Solid Edge Insight автоматизирует управление версиями и инженерными изменениями, обрабатывает связи между файлами или документами и ведет структуру изделия.

Базируясь на стандартные технологии Windows для совместного доступа к информации и маршрутизации сообщений, встроенные средства управления данными Insight дают вам удобные инструменты управления статусом документа (check-in и check-out), проведения инженерных изменений, управления файлами и перекрестными ссылками в рамках сети всей вашей компании.

Патентованное программное решение Smart Sync cache дает существенный выигрыш в производительности при открытии больших сборок в сетевой среде.

Клиент Solid Edge Insight настолько точно вписан в интерфейс Solid Edge, что разработчики смогли обойтись минимальным количеством дополнительных команд. Solid Edge Insight предоставляется бесплатно, все, что необходимо, – Microsoft Share-Point Portal Server.

## **SolidWorks**

Производитель – **SolidWorks Corporation, подразделение компании Dassault Systems, Франция**

Область применения – Комплексная система автоматизированного проектирования на производстве

Адрес в Интернет: <http://www.solidworks.com>; <http://www.solidworks.ru>;

Программа предназначена для организации на предприятии автоматизированного производства.

Система автоматизированного проектирования SolidWorks является самодостаточным продуктом, который, в то же время, тесно интегрирован с большинством известных базовых программ проектирования.

Программа имеет значительное применение на многих предприятиях в разных отраслях промышленности и является одним из стандартов автоматизированного проектирования.

Обеспечивает сквозной процесс проектирования (от идеи до реализации), инженерного анализа и подготовки производства изделий любой сложности и назначения.

Программа позволяет производить:

- проектирование деталей;
- проектирование изделий с учетом специфики изготовления;
- проектирование сборок;
- твердотельное и поверхностное параметрическое моделирование. Трансляция данных в форматах IGES, VDAFS, STEP, Parasolid, ACIS, STL, VRML, DXF, DWG, Pro/ENGINEER, CADKEY, Unigraphics, Solid Edge, Inventor, AutoCAD, Mechanical Desktop Adobe PDF и проч.

### **SolidWorks office**

Производитель – **SolidWorks Corporation, подразделение компании Dassault Systems, Франция**

Область применения – Комплексная система автоматизированного проектирования на производстве

Адрес в Интернет: <http://www.solidworks.com>; <http://www.solidworks.ru>;

Программа предназначена для организации на предприятии автоматизированного производства и предоставляет широкие возможности для этого.

Пакет SolidWorks office предоставляет дополнительные возможности по обмену данными и генерации отчетов и презентаций для программных продуктов компании.

В состав SolidWorks office входят следующие модули:

- 3D Instant WebSite – создание web-страницы, содержащей трехмерные модели SolidWorks.
- eDrawings Professional – создание компактных файлов SolidWorks.
- Feature Works – распознавание элементов из импортированного файла как элементов SolidWorks.
- PhotoWorks – для реалистичных изображений фотографического качества.
- SolidWorks Animator – анимация сборок SolidWorks и генерирование файлов в формате .avi.
- SolidWorks ToolBox – использование библиотеки стандартных крепежных деталей.

– SolidWorks Utilities – проверка и редактирование отдельных деталей, сравнение элементов и геометрии различных деталей и копирование элементов из одной детали в другую.

### **SolidWorks (ГОСТ: 3D-библиотеки, материалы, спецсимволы)**

Производитель – **SolidWorks Russia, Россия**

Область применения – Программные продукты SolidWorks

Адрес в Интернет: <http://www.solidworks.com>; <http://www.solidworks.ru>;

Российское представительство SolidWorks Russia предоставляет широкий спектр библиотек стандартных изделий, соответствующих отечественным и международным стандартам, включая базовые и специализированные программные средства для управления этими библиотеками.

Подборка библиотек стандартных элементов, соответствующих отечественным ГОСТам и стандартам.

Представлены следующие отечественные стандарты:

- SWR-Крепеж – болты, винты, гайки, шайбы, шплинты, шпильки, оси по ГОСТ 9650-80.
- SWR-Подшипники — подшипники качения, шарики.
- SWR-Прокатный сортамент – цветные металлы, черные металлы.
- SWR-Уплотнения – кольца, манжеты.
- SWR-Штампы – втулки, державки, отлипатели, прихваты, пуансоны, толкатели, траверсы, упоры, хвостовики, крышки защитные, пружины, винты, штифты.
- SWR-трубопроводы.
- SWR-материалы.
- SWR-спецсимволы.

### **SWR-Спецификация**

Производитель – **SolidWorks Russia, Россия**

Область применения – Автоматизированное проектирование на производстве

Адрес в Интернет: <http://www.solidworks.com>; <http://www.solidworks.ru>

Программа предназначена для автоматической генерации и оформления конструкторских спецификаций.

SWR-Спецификация позволяет автоматически создавать комплект документации по разработанному проекту.

Предназначена для создания спецификаций по моделям сборок SolidWorks, из SWR-PDM или из XML-файла.

SWR-Спецификация является независимым приложением, работающим совместно с SWR-PDM и SolidWorks.

Программа предоставляет следующие возможности:

- внедрение таблицы спецификации в другие документы;
- генерация спецификаций по структуре изделий в SWR-PDM;
- изменение номеров позиций, дополнительные строки в ручном режиме;
- импорт данных из XML-файла;
- обновление чертежа SolidWorks по спецификации;
- поддержка различных бланков;
- редактирование и запись свойств документов SolidWorks;
- чтение данных из SWR-PDM;
- чтение состава модели сборки SolidWorks и анализ конфигураций. Программа SWR-Спецификация входит в SWR-Report.

### **SprutCAD**

Производитель – **ЗАО «СПРУТ-Технология», Россия**

Область применения – Автоматизация проектирования

Адрес в Интернет: <http://www.sprut.ru>

Программа предназначена для автоматизации конструкторской и проектной работы.

SprutCAD является открытой конструкторской средой для автоматизации труда конструкторов и разработчиков систем проектирования.

SprutCAD в полной мере поддерживает стандарт ЕСКД и имеет расширяемый пользователем набор сервисных функций. Это позволяет создать на его основе рабочее место конструктора, реально автоматизирующее типовые проектные операции, выполняемые конкретным специалистом.

Система имеет библиотеку стандартных параметрических элементов, работает с широким набором шрифтов, позволяет создавать иерархические графические базы данных, компоновать новый чертеж из имеющихся фрагментов, пополнять в процессе эксплуатации пользовательскую базу типовых решений. Реализована возможность «интеллектуального редактирования» – система автоматически откорректирует чертеж при изменении значения любого численного параметра.

Все геометрические объекты имеют в системе двоякое представление: графическое и текстовое. Между этими представлениями существует однозначная связь. Каждому изображенному в графическом окне объекту соответствует строка в программе и наоборот. При интерактивном выборе геометрического элемента автоматически выделяется стро-

ка программы, ему соответствующая, при выборе же строки подсвечивается соответствующий графический элемент. Доступ к текстовому представлению проектируемой модели позволяет реализовать мощный потенциал качественной параметризации. В зависимости от текущих значений параметров модель может изменяться количественно и качественно.

## **SprutCAM**

Производитель – **ЗАО «СПРУТ-Технология», Россия**

Область применения – Создание управляющих программ для станков с ЧПУ

Адрес в Интернет: <http://www.sprut.ru>

Программа предназначена для создания управляющих программ для станков с числовым программным управлением.

Программа предназначена для генерации управляющих программ на 2-, 2,5-, 3-, 4-, 5-координатном оборудовании с ЧПУ. Используется при изготовлении штампов, пресс-форм, литейных форм, прототипов изделий, мастер-моделей, деталей машин и конструкций, шаблонов, гравировки. SprutCAM – высокоинтеллектуальная система. Для получения готовой управляющей программы необходимо лишь загрузить модель, выбрать способ обработки и нажать кнопку «пуск». Быстрое освоение системы, большое количество автоматически выполняемых функций, выбор параметров операций на основании анализа модели, оптимизация обработки детали возможны благодаря мощному математическому ядру, сконцентрировавшему опыт и интеллект лучших отечественных и зарубежных математиков, программистов, технологов ЧПУ.

SprutCAM – система нового поколения, работает непосредственно с геометрическими объектами исходной модели без предварительной аппроксимации и триангуляции. Это позволяет максимально экономить ресурсы компьютера, а также производить расчет траектории движения инструмента с любой необходимой точностью.

Среди особенностей программы:

- интерфейс, созданный специально для технолога;
- минимальная трудоемкость разработки управляющей программы;
- минимальные требования к конфигурации компьютера;
- настройка на любую систему ЧПУ;
- оптимизация обработки детали;
- расчет траектории практически с любой точностью;
- совместимость с существующими САД-системами.

## **SprutExPro**

Производитель – ЗАО «СПРУТ-Технология», Россия

Область применения – Создание программных средств при проектировании

Адрес в Интернет: <http://www.sprut.ru>

Программа предназначена для генерации прикладных программ.

Система SprutExPro представляет собой инструментальную среду, предназначенную для компьютеризации знаний непрограммирующими специалистами с целью создания интеллектуальных конструкторских, технологических и других прикладных систем.

SprutExPro реализует принципиально новый метод генерации программных средств, позволяющий непрограммирующему пользователю создавать прикладные программные комплексы с производительностью на порядок выше, чем профессиональный программист.

В системе использован метод экспертного программирования, объединяющий лучшие качества объектно-ориентированного подхода и экспертных систем искусственного интеллекта. При этом применяется простейший язык, основанный на правилах, записываемых с помощью ограниченного естественного языка. Такие правила, называемые модулями знаний, представляют собой объект-функции с входными, выходными и управляющими переменными. Функции реализуются с помощью различных механизмов, в том числе расчетов по формулам, выборе данных из многовходовых таблиц, выборе данных из локальных, а также сетевых баз данных, обновлении содержания и добавлении информации в базы данных, генерации 2D- и 3D-геометрических образов и чертежей с использованием параметризованных моделей из других подсистем Sprut. В качестве механизма могут использоваться исполняемые модули существующих программ, имеющих свои собственные прикладные интерфейсы, при условии, что исходные и результирующие данные этих программ хранятся в базах данных. На основе модулей знаний автоматически генерируются методы, реализующие их совместную работу. Эти методы в свою очередь могут быть использованы в качестве механизмов модулей знаний. SprutExPro обеспечивает построение циклических методов. С помощью системы сгенерированы программные комплексы конструкторского, технологического и организационно-экономического назначения, насчитывающие сотни правил каждый.

## **SprutTP**

Производитель – ЗАО «СПРУТ-Технология», Россия

Область применения – Проектирование технологических процессов  
Адрес в Интернет: <http://www.sprut.ru>

SprutTP предназначена для проектирования и нормирования технологических процессов. SprutTP максимально приближена к привычной работе технолога по своему внешнему исполнению, что позволяет сократить время освоения и получить результат сразу после установки системы.

Система использует принцип активного документа. Все поля документа связаны с таблицами БД. При перемещении на поле система автоматически из базы данных выводит на экран (в левом окне) только свойственную этому полю информацию. Ввод данных в поле может осуществляться просто набором текста с клавиатуры, либо можно выбрать соответствующие записи из предоставленной в левом окне информации. Данный подход к реализации интерфейса значительно ускоряет процесс освоения программы, и технологи предприятия не будут затрачивать дополнительные усилия на изучение несвойственных выбранному полю форм и таблиц баз данных.

SprutTP – мощный инструмент для нормирования технологических процессов. Производится расчет как подготовительно-заключительного, так и штучного времени с одновременным формированием текстов переходов на операцию.

Автоматическая генерация конкретного техпроцесса по выбранному шаблону ТП и заданным параметрам новой детали позволяет существенно сократить время разработки ТП.

SprutTP можно адаптировать под конкретные условия предприятия, а также модернизировать, расширять базы данных технологических ресурсов.

В системе можно использовать графические документы как растрового, так и векторного формата. Характерные размеры деталей можно вставлять непосредственно из файлов-чертежей, подготовленных в SprutCAD или импортированных в SprutCAD из любой CAD-системы, имеющей формат передачи данных IGES и DXF.

## **T-FLEX CAD**

Производитель – **ЗАО «Топ Системы», Россия**

Область применения – Машиностроение, приборостроение, строительство и т.п.

Адрес в Интернет: <http://www.tflex.com>; <http://www.topsystems.ru>

T-FLEX CAD – полнофункциональная система автоматизированного проектирования, обладающая всеми современными средствами разработки проектов любой сложности.

Система объединяет мощные параметрические возможности трехмерного моделирования со средствами создания и оформления конструкторской документации.

В зависимости от целей проектирования при разработке изделия используют САПР той или иной функциональности. Это позволяет рационально оснащать рабочее место инженера.

Для создания продуктов конструкторской деятельности (чертежи, модели, документация и т. п.) фирма «Топ Системы» предлагает пять систем, которые позволяют охватить все уровни автоматизации конструкторских работ различных подразделений предприятия:

- T-FLEX CAD LT – автоматизация черчения.
- T-FLEX CAD 2D – автоматизация проектирования.
- T-FLEX CAD 3D SE – подготовка чертежей по 3D-моделям.
- T-FLEX CAD 3D – трехмерное моделирование.
- T-FLEX CAD Viewer — бесплатная программа для просмотра и печати 2D-чертежей T-FLEX.

### **T-FLEX DOCs**

Производитель – **ЗАО «Топ Системы», Россия**

Область применения – Машиностроение, приборостроение, строительство и т.п.

Адрес в Интернет: <http://www.tflex.com>; <http://www.topsystems.ru>

T-FLEX DOCs – корпоративная система технического документооборота и управления инженерными данными об изделиях. Доступные пользователю инструменты по созданию и ведению единых конструкторских и технологических данных промышленного предприятия представляют собой информационное ядро комплекта T-FLEX.

T-FLEX DOCs полностью интегрирована с T-FLEX CAD и T-FLEX Технология, что означает, что интерфейс, все справочные данные и функциональность PDM-системы являются общими для конструктора и технолога. Работая над проектом, каждый из них непрерывно взаимодействует с общей информационной базой предприятия, используя единые программные механизмы. Такая идеология обеспечивает быстроту принятия и надежность сохранения проектных решений, облегчает обучение пользователей.

Система T-FLEX DOCs, предназначенная для управления всей информацией об изделии, процедурах и процессах его разработки и



технологической подготовки производства, объединяя в себе всю основную информацию о жизненном цикле изделия, делает эти данные доступными всем пользователям системы.

Интерфейс системы T-FLEX DOCs обеспечивает очень наглядную работу с деревом структуры изделия, делая ее простым и интуитивно понятным процессом.

В системе отсутствуют какие-либо ограничения на структурную сложность и количество хранимых объектов. Пользователю предоставляется возможность работать в привычных понятиях: проект, изделие, архив документов, сборка, деталь, покупное изделие и т. д.

### **T-FLEX Анализ**

Производитель – **ЗАО «Топ Системы», Россия**

Область применения – Машиностроение, приборостроение, строительство и т.п.

Адрес в Интернет: <http://www.tflex.com>; <http://www.topsystems.ru>

Главной отличительной особенностью системы является ее глубокая интеграция с системой T-FLEX CAD 3D. Пользователь T-FLEX CAD 3D создает в среде моделирования объемную модель. Затем, используя специальное меню, пользователь осуществляет конечно-элементное моделирование поведения изделия в различных постановках физических задач.

Весь процесс осуществляется непосредственно в T-FLEX CAD 3D, в привычном для пользователя интерфейсе.

Преимущества такого интегрированного решения для пользователя очевидны: за счет прямой программной интеграции сохраняется ассоциативная связь расчетной математической модели и электронной объемной модели изделия. То есть пользователь может, например, изменить размеры анализируемого изделия, обновить конечно-элементную модель и сразу же получить результаты расчета измененной модели. При этом ему не понадобится повторно осуществлять ввод геометрии, экспорт-импорт, задание граничных условий и т. п. Очевидно, что это очень удобно с точки зрения пользователя и позволяет в короткие сроки просчитать несколько вариантов и выбрать из них оптимальный.

Структурно T-FLEX Анализ организован по модульному принципу, что позволяет пользователю гибко подойти к комплектации рабочего места расчетчика. В зависимости от решаемых задач, пользователь может брать один или несколько расчетных модулей.

В данный момент доступны следующие расчетные модули:

- анализ устойчивости;
- тепловой анализ;
- статический анализ;
- частотный анализ.

### **T-FLEX Динамика**

Производитель – ЗАО «Топ Системы», Россия

Область применения – Машиностроение, приборостроение, строительство и т.п.

Адрес в Интернет: <http://www.tflex.com>; <http://www.topsystems.ru>

Приложение T-FLEX Динамика является интегрированным в программу T-FLEX CAD модулем, позволяющим производить динамические расчеты пространственных механических систем.

Модель механизма описывается как система твердых тел, шарниров и нагрузок, создаваемая на основе трехмерной геометрической модели T-FLEX CAD и сопряжений. Решатель учитывает масс-инерционные характеристики тел трехмерной модели.

При моделировании используются обычные инструменты программы T-FLEX CAD. Для описания системы, решаемой в модуле T-FLEX Динамика, введен специальный объект модели – «Задача динамического анализа». Этот объект содержит данные, задающие направление силы тяжести, свойства элементов задачи по умолчанию (свойства шарниров, силы трения, контактные свойства), временные характеристики моделируемого процесса. В модели T-FLEX CAD динамических задач может быть несколько. Каждая из задач может содержать свой набор элементов и граничных условий для нахождения решения в различных постановках или при различных нагрузках. При расчете задачи динамического анализа система может учитывать контакты между твердыми телами. В задаче может быть задан список тел, контакт которых между собой следует учитывать. Для наиболее естественного моделирования механических систем пользователь имеет возможность задать контактные свойства материалов – коэффициенты трения, возникающего при контакте; коэффициенты восстановления, задающие поведение тел при ударе (отскок) и т. д.

Задача динамического анализа ассоциативно связана с трехмерной моделью. При изменении параметров или состава модели соответствующие изменения в динамических задачах происходят автоматически.

### **T-FLEX Технология**

Производитель – ЗАО «Топ Системы», Россия

Область применения – Машиностроение, приборостроение, строительство и т.п.

Адрес в Интернет: <http://www.tflex.com>; <http://www.topsystems.ru>

T-FLEX Технология – полнофункциональная система автоматизированного проектирования, обладающая гибкими современными средствами разработки технологических проектов любой сложности. В системе реализован специализированный технологический язык, применен оригинальный метод проектирования по обобщенному процессу-аналогу. Обеспечиваются возможности работы различных технологических подразделений предприятия в едином информационном пространстве.

Система T-FLEX Технология обеспечивает автоматизированную разработку маршрутной, маршрутно-операционной и операционной технологии. С помощью T-FLEX Технология возможна разработка любых дискретных технологических процессов: заготовительных, механообработки, сборки, штамповки, термообработки, нанесения покрытий, литья, прессования, сварки, окраски, контроля, транспортирования и других. В системе реализованы следующие методы работы:

- диалоговое проектирование с использованием баз технологических данных;
- проектирование на основе техпроцесса-аналога;
- проектирование с использованием библиотеки технологических решений;
- заимствование технологических решений из ранее разработанных технологий.

Совместно с программой T-FLEX Технология функционирует назначенная для проведения различных расчетов при проектировании технологических процессов система T-FLEX Техническое нормирование.

T-FLEX Техническое нормирование состоит из модулей:

- материальное нормирование;
- трудовое нормирование;
- режимы резания;
- укрупненное трудовое нормирование.

## **T-FLEX ЧПУ**

Производитель – **ЗАО «Топ Системы», Россия**

Область применения – Машиностроение, приборостроение, строительство и т.п.

Адрес в Интернет: <http://www.tflex.com>; <http://www.topsystems.ru>

Система T-FLEX ЧПУ предназначена для создания управляющих программ на оборудование с числовым программным управлением.

T-FLEX ЧПУ поддерживает различные типы систем управления 2D, 2,5D, 3D и 5D и разделена на две независимые системы T-FLEX ЧПУ 2D и T-FLEX ЧПУ 3D.

Система T-FLEX ЧПУ является встраиваемым модулем для системы T-FLEX CAD и функционирует исключительно совместно с ней. Таким образом, получается полноценное CAD/CAM-решение.

Данный подход обеспечивает:

полную ассоциативность конструкторско-технологических данных (однажды созданная траектория обработки будет автоматически перестраиваться после изменения геометрии детали);

единство интерфейсов (пользователь, знакомый с принципами работы в T-FLEX CAD, без труда овладеет T-FLEX ЧПУ);

все богатство инструментария конструкторской системы для доработки технологом приходящей информации под свои нужды (ведь секрет, что геометрию детали приходится каким-либо образом дорабатывать, например, пересчитать геометрию детали в середину поля допуска, а конструкторская система может сделать это автоматически).

T-FLEX ЧПУ – гибко настраиваемая система, построенная по модульному принципу (к базовому модулю можно подключать любой набор методов обработки).

## **Unigraphics NX**

Производитель – **UGS Corporation, США**

Область применения – Автоматизация проектирования на машиностроительных предприятиях.

Адрес в Интернет: <http://www.ugs.com>; <http://www.solidedge.ru>;  
<http://www.ugs.ru>

Программа Unigraphics NX предназначена для созданий изделий любой сложности. Система относится к САПР высшего уровня и состоит из модулей, которые решают задачи пользователей на любой стадии разработки изделия. Производитель классифицирует модули по группам:

NX Инженерный расчет

NX Концептуальный дизайн (Shape Studio)

NX Мастер-процессы

NX Моделирование

NX Обмен/Управление данными

NX Подготовка производства

NX Программирование

NX Специальные приложения

NX Мастер-процессы и NX Моделирование объединены в NX Проектирование. Названия модулей по этой классификации приведены в комментарии Unigraphics NX Классификация модулей. Модули предлагаются в составе пакетов. Приводятся в комментарии Unigraphics NX Пакеты. Комментарии по некоторым модулям приводятся в Unigraphics NX Модули. Кроме этого, имеются программы:

E\_factory.

Imageware – Работа с поверхностями сложной формы.

Jack – С помощью этого решения можно превратить в реальность спроектированный производственный процесс посредством виртуального человека.

NZ MasterFEM – широкие возможности для построения конечно-элементных моделей и представления результатов конечно-элементного анализа.

NX Nastran – Анализы.

### **Классификация модулей**

#### **NX Моделирование**

- UG/Assembly Modelling, UG/Advanced Assembly
- UG/Die Engineering Wizard
- UG/Drafting
- UG/Feature Modeling
- UG/Freeform Modeling
- UG/Geometric Tolerancing
- UG/MoldWizard
- UG/Optimization Wizard
- UG/Progressive Die Wizard
- UG/Quick Stack, UG/Quick Check, UG/Check Mate
- UG/Routing Mechanical/Electrical
- UG/Sheet Metal Design, UG/Advanced Sheet Metal
- UG/Solid Modeling
- UG/User Defined Feature
- UG/WAFE
- UG/Weld Assistant

#### **NX Инженерный расчет**

- NX/MasterFEM
- NX Nastran
- UG/Scenario for Motion
- UG/Scenario for Structure
- UG/Strenght Wizard
- UG/Structure PE

## **NX Концептуальный дизайн (Shape Studio)**

- UG/Analyze Shape
- UG/Freeform Shape
- UG/Render
- UG/Visualize

## **NX Мастер-процессы**

- UG/Die Engineering Wizard
- UG/Die Structure Design
- UG/MoldWizard
- UG/Optimization Wizard
- UG/Progressive Die Wizard

## **NX Обмен/Управление данными**

- Translators
- UG/Collaborat
- UG/Knowledge Fusion
- UG/Manager
- UG/Web Express
- UG/Open ++
- UG/Open API
- UG/Open Grip
- UG/Rapid Prototyping

## **NX Программирование**

- UG/Knowledge Fusion
- UG/Open ++
- UG/Open API
- UG/Open Grip

## **NX Специальные предложения**

- UG/Advanced Sheet Metal Design
- UG/Fabric Flatener
- UG/Routing-Electrical
- UG/Routing-Mechanical
- UG/Schematics
- UG/Sheet Metal Design
- UG/Weld Assistant

## **NX Подготовка производства**

- UG/CAM Base
- UG/CAM Visualize
- UG/Core&Cavity Milling
- UG/Faset Machining
- UG/Feature Based Hole Making
- UG/Fixed Axis Milling

- UG/Flow Cut Milling
- UG/Genius
- UG/Graphical Tool Path Editor
- UG/Integrated Simulation & Visualization
- UG/Nurbs Path Generator
- UG/Planar Milling
- UG/Post Builder Execute
- UG/Sequential Milling
- UG/Stop Docs
- UG/Shops
- UG/Turning
- UG/Unisim
- UG/Variable Axis Milling
- UG/Wire EDM
- UG/Sheet Metal Design
- UG/Weld Assistant

### **Классификация пакетов**

Компания UGS Corporation предлагает решения, построенные на базе модулей и программ компании, для различных отраслей промышленности и конкретного применения. Среди пакетов, состоящих из модулей Unigraphics NX, можно выделить:

- UG/Advanced Shape Studio – расширенный пакет промышленного дизайна.
- UG/Advanced Design Bundle – расширенный пакет конструктора.
- UG/Advanced Machinign Bundle – расширенный пакет технолога ЧПУ.
- UG/Design Bundle – пакет конструктора.
- UG/Manufacturing Bundle – пакет конструктора и технолога ЧПУ.
- UG/Machinery Manufacturing Bundle – пакет технолога ЧПУ.
- UG/Mold Design Bundle – пакет для проектирования пресс-форм.
- UG/Mold Design NC Bundle – пакет для изготовления пресс-форм.
- UG/Progressive Die Wizard Design Bundle – пакет проектирования штампов последовательного действия.
- UG/Progressive Die Wizard Manufacturing Bundle – пакет изготовления штампов последовательного действия.
- UG/Shape Studio – пакет промышленного дизайна. Shape Studio является инструментом для дизайнера, который дает возможность разрабатывать внешний вид изделия и доводить его до производства в еди-

ной среде. Работая с Shape Studio, дизайнер имеет полную свободу в выражении своих творческих идей и в то же время сохраняет тесное взаимодействие с другими специалистами, вовлеченными в процесс создания изделия.

### **Особенности модулей**

Приводятся важные отличительные особенности модулей Uni-graphics NX, входящих в различные пакеты.

- UG/Analyze Shape – Детальный анализ геометрии поверхности и тел. Удобная интерактивная форма представления результатов.

- UG/Assembly Modelinge, UG/Advanced Assembly – Создание сборочной модели как сверху вниз, как и снизу вверх. Поддержка функций для работы с большими сборками, содержащими десятки тысяч компонент.

- UG/CAM Base — Базовый модуль разработки управляющих программ для станков с ЧПУ.

- UG/CAM Visualize – Наблюдение за инструментом во время движения по обрабатываемой детали. Проверка правильности удаления материала заготовки.

- UG/Core&Cavity Milling – Черновая обработка одной или нескольких полостей для удаления большого количества материала вокруг элементов произвольной формы.

- UG/Die Engineering Wizard – Мастер-процесс проектирования рабочих поверхностей штампа для кузовных деталей автомобиля.

- UG/Die Structure Design – Мастер-процесс проектирования штампа для кузовных деталей автомобиля.

- UG/Drafting – Создание любого чертежа на базе существующей 3-мерной геометрической модели, который полностью ассоциативен с ней. Поддержка ЕСКД.

- UG/Facet Mashining – Обработка деталей без необходимого создания поверхностей обработки. Использование фасетной модели для обработки.

- UG/Feature Based Hole Making – Модуль автоматизации обработки отверстий.

- UG/Feature Modeling – Полный набор функций твердотельного моделирования на базе типовых операций построения (типовые элементы, тонкостенное тело, скругление и т. д.).

- UG/Fixed Axis Milling – Набор средств получения траектории для 3-х осевой фрезерной обработки.



- UG/Flow Cut Milling – Анализ геометрии детали и поиск места, в котором инструмент имеет точки двойного контакта, возникающего на вогнутых деталях.
- UG/Freeform Modeling – Создание NURBS поверхностей сложной формы.
- UG/Freeform Shape – Деформация и перемещение поверхности свободной формы. Возможность растягивания, сжимания, перекоса и сдвига поверхности.
- UG/Genius – Создание и классифицирование технологических данных. Поддержка планирования производства и управления данными.
- UG/Geometric Tolerancing – Базовый модуль для работы с геометрическими допусками и для вариационного анализа размеров с обеспечением описания допусков.
- UG/Graphical Tool Path Editor – Редактирование траектории обработки в интерактивном графическом режиме и показа движения инструмента на всех траекториях или на выбранном участке.
- UG/Integrated Simulation & Visualization – Этот модуль предназначен для симуляции работы станка. Он помогает построить точную кинематическую модель станка.
- NX MasterFEM – Расчет линейной статики, модальный анализ, нелинейные расчеты, расчеты усталости/выносливости конструкции, комплекс тепловых расчетов.
- UG/MoldWizard – Мастер-процесс проектирования прессформ для литья пластмассовых деталей.
- NX Nastran – Стандарт в области инженерного анализа, позволяющий выполнять любые расчеты, включая вибрацию, теплопередачу, акустический анализ и т.д.
- UG/Nurbs Path Generator – Программа для ЧПУ, использующая NURBS траектории обработки по твердотельной модели.
- UG/Optimization Wizard – мастер-процесс оптимизации конструкции. UG/Planar Milling – Плоское фрезерование, применяющееся к деталям с вертикальными стенками и плоскими островами.
- UG/Post Builder/Execute – преобразование исходной программы обработки CLSF в программу станка с использованием постпроцессора. Интерактивная среда создания постпроцессора для любого станка и любого известного типа управляющих стоек.
- UG/Progressive Die Wizard – мастер-процесс проектирования штампов последовательного действия для листовых деталей. Проектирование структуры штампа, матриц и пуансонов.
- UG/Quick Stack, UG/Quick Check, UG/Check Mate – инструменты анализа 3-мерных размерных цепочек.

- UG/Render – построение фотореалистичных изображений отдельной детали или сборки с высоким качеством изображения.
- UG/Routing Mechanical/Electrical – проектирование трубопроводов, кабельных систем, конструкций из типовых железных профилей и электропроводки.
- UG/Scenario for Motion – расчет механизмов и моделирование динамических процессов движения твердых тел.
- UG/Scenario for Structure – интегрированный и ассоциативный инструмент инженерного анализа, включающий создание конечно-элементной сетки и анализ полученных результатов.
- UG/Sequential Milling – последовательное построение траектории обработки по границе обрабатываемой поверхности.
- UG/Sheet Metal Design, UG/Advanced Sheet Metal – проектирование деталей из листового материала. Полная или частичная развертка детали с учетом технологических условий деформации.
- UG/StopDocs – разработка и наполнение различных форм технологической документации, включающей в себя списки инструмента, последовательность операций и т.д.
- UG/Shops – Разработка управляющих программ непосредственно у станка.
- UG/Solid Modeling – Проектирование кривых, эскизов и твердотельных примитивов и применение базовых операций над твердыми телами.
- UG/Strenght Wizard – Мастер-процесс расчета линейной статической прочности, который могут использовать конструкторы.
- UG/Structure PE – Конечно-элементный решатель.
- UG/Turning – Модуль токарной обработки, предназначен для черновой и чистовой обработки, нарезания резьбы.
- UG/Unisim – Модуль визуализации, предназначенный для симуляции процесса механообработки в режиме, наиболее приближенным к реальному.
- UG/User Defined Feature – Построение типового элемента, который может быть каким угодно сложным твердым телом.
- UG/Variable Axis Milling – Выполнение полной 5-ти осевой обработки. Предусмотрена возможность задания ориентации инструмента.
- UG/Visualize – Подготовка наглядных презентаций в реальном времени.
- UG/WAVE – Параметрическое моделирование изделия любой сложности. Механизм управляемой ассоциативной связи между геометрическими моделями.

- UG/Weld Assistant – Помощник проектирования сварных соединений, использующий самые распространенные методы сварки.
- UG/Wire EDM – Электро-эрозионная обработка деталей проволокой в режиме 2-х и 4-х осей.

## **КОМПАС 3D**

Производитель – **АСКОН, Россия**

Область применения – Проектирование в машиностроении, приборостроении, промышленном и гражданском строительстве

Адрес в Интернет: <http://www.ascon.ru>

Система КОМПАС-3D предназначена для создания трехмерных ассоциативных моделей отдельных деталей и сборочных единиц, содержащих как оригинальные, так и стандартизованные конструктивные элементы. КОМПАС-3D обладает мощным функционалом для работы над проектами, включающими несколько тысяч подборок, деталей и стандартных изделий. Она поддерживает все возможности трехмерного твердотельного моделирования, являющиеся стандартом для САПР среднего уровня. Ключевой особенностью КОМПАС-3D является использование собственного математического ядра и параметрических технологий, разработанных специалистами АСКОН.

Средства импорта/экспорта моделей (КОМПАС-3D поддерживает форматы IGES, SAT, XT, STEP, VRML) обеспечивают функционирование комплексов, содержащих различные CAD/CAM/CAE-системы. став КОМПАС-3D встроена чертежно-конструкторская система КОМПАС-График, обеспечивающая автоматизацию проектно-конструкторских работ в различных отраслях промышленности. Система изначально ориентирована на полную поддержку стандартов ЕСКД. При этом она обладает возможностью гибкой настройки на стандарты предприятия.

КОМПАС-График может использоваться как полностью интегрированный в КОМПАС-3D модуль работы с чертежами и эскизами, так и в качестве самостоятельного продукта, полностью закрывающего задачи 2D-проектирования и выпуска документации. Средства импорта/экспорта графических документов (КОМПАС-График поддерживает форматы DXF, DWG, IGES) позволяют организовать обмен данными со смежниками и заказчиками, использующими любые чертежно-графические системы.

## **ВЕРТИКАЛЬ**

Производитель – АСКОН, Россия

Область применения – Проектирование технологических процессов

Адрес в Интернет: <http://www.ascon.ru>

Система ВЕРТИКАЛЬ предназначена для автоматизации процессов технологической подготовки производства. В системе ВЕРТИКАЛЬ реализован качественно новый подход к организации данных о технологических процессах, базирующийся на объектной модели представления и обработки информации. Основным компонентом программного комплекса является ВЕРТИКАЛЬ-Технология. Система ВЕРТИКАЛЬ-Технология позволяет пользователю оперировать конструкторско-технологическими элементами (КТЭ). «Технологическая» часть модели содержит сведения об операциях, переходах, оснастке. «Конструкторская» – отображает состав и структуру обрабатываемых поверхностей детали.

В системе ВЕРТИКАЛЬ-Технология реализованы следующие методы проектирования технологических процессов:

- диалоговый режим проектирования с использованием баз данных системы;
- заимствование технологических решений из ранее разработанных технологий;
- проектирование на основе процесса-аналога;
- проектирование с использованием библиотеки часто повторяемых технологических решений;
- проектирование с использованием библиотеки КТЭ.

В системе ВЕРТИКАЛЬ-Технология предусмотрена возможность работы с трехмерными моделями изделий и всеми видами графических документов (чертежами, эскизами). Пользователь может подключить к технологическому процессу документы и модели, созданные на этапе конструирования, и использовать их при проектировании ТП.

## **APM WinMachine**

Производитель – НТЦ АПМ, Россия

Область применения – Автоматизированное проектирование механического оборудования в машиностроении и строительстве

Адрес в Интернет: <http://www.apmwm.com>; <http://www.apm.ru>

Научно-технический центр «Автоматизированное проектирование машин» (НТЦ АПМ) предлагает предприятиям, проектным и исследовательским организациям, а также техническим университетам

CAD/CAE/CAM/PDM систему автоматизированного проектирования APM WinMachine. Это новейшее программное обеспечение, созданное в России, которое в полном объеме учитывает требования ГОСТ, СНиП, относящиеся как к оформлению конструкторской документации, так и к расчетным алгоритмам.

В состав системы входят следующие основные комплексы:

- APM Constructor (APM Graph, APM Mechanical Data, APM Base) – комплекс для оформления конструкторской документации.

- APM Driving Mechanical (APM Drive, APM Trans, APM Shaft, APM Bear, APM Joint, APM Graph, APM Base, APM Mechanical Data, APM Material Data) – комплекс для расчета и проектирования передаточных механизмов произвольной структуры.

- APM Mechanic (APM Drive, APM Trans, APM Shaft, APM Bear, APM Joint, APM Spring, APM Cam, APM Sider, APM Plain, APM Screw, APM Graph, APM Mechanical Data, APM Material Data) – комплекс для расчета и проектирования деталей машин и механизмов.

- APM StructFEM (APM Structure 3D, APM Joint, APM Studio, APM Graph, APM Base, APM Mechanical Data, APM APM Material Data, APM Construction Data) – комплекс для расчета и проектирования металлических и строительных конструкций.

### **APM Constructor**

Производитель – **НТЦ АПМ, Россия**

Область применения – Оформление конструкторской документации

Адрес в Интернет: <http://www.apmwm.com>; <http://www.apm.ru>

Комплекс APM Constructor (входит в состав системы APM WinMachine) предназначен для разработки и систематизации конструкторской документации, созданной на различных стадиях выполнения проекта.

Модули, входящие в состав данного комплекса, предоставляют возможность формирования пользовательских библиотек параметрических моделей стандартных конструкций и их элементов с последующей автоматической генерацией рабочих чертежей. При работе пользователей может использоваться поставляемые вместе с системой конструкторские базы данных, а также создавать свои собственные базы. Также имеется удобный инструмент для расчета размерных цепей.

Комплекс APM Constructor позволяет в полном объеме выполнять графическую часть компьютерной подготовки конструкторской документации. В состав комплекса входят следующие модули:

– APM Graph – плоский параметрический чертежно-графический редактор с инструментом расчета размерных цепей, который можно с успехом использовать для оформления графической части конструкторской документации в различных областях техники, науки, в архитектуре и строительстве. Его можно эффективно использовать для подготовки исходных данных для расчетных модулей системы APM WinMachine. С этой целью в каждой из прикладных расчетных программ имеется возможность импорта необходимой графической информации и инструменты для дальнейшей ее подготовки к работе.

– APM Mechanical Data – библиотека стандартных деталей и узлов, справочных данных по машиностроению.

– APM Base — модуль создания и редактирования баз данных.

### **APM Design Mechanisms**

Производитель – **НТЦ АПМ, Россия**

Область применения – Расчет и проектирование передаточных механизмов произвольной структуры

Адрес в Интернет: <http://www.apmwm.com>; <http://www.apm.ru>

С помощью программ, входящих в комплекс APM Design Mechanisms (входит в состав системы APM WinMachine), пользователь имеет возможность проектировать передаточные механизмы произвольной структуры, используя необходимые атрибуты: валы, механические передачи вращения (включая планетарные) и подшипники наиболее распространенных типов. Ввод ограничений по произвольным параметрам, заданным пользователем. С помощью программ комплекса APM Design Mechanisms можно в полном объеме провести расчеты сопутствующих передаточным механизмам соединений (болтовых, сварных, шпоночных, шлицевых и т. п.). После цикла расчетов производится автоматическая генерация чертежей. В состав комплекса входят следующие модули:

- APM Base – модуль создания и редактирования баз данных.
- APM Bear – модуль расчета и проектирования подшипниковых узлов качения с учетом их класса точности.
- APM Drive – модуль автоматизированного проектирования привода вращательного движения произвольной структуры.
- APM Graph – плоский параметрический чертежно-графический редактор с инструментом расчета размерных цепей.
- APM Joint – модуль расчета и проектирования соединений элементов машин.
- APM Material Data – библиотека материалов.

- APM Mechanical Data – библиотека стандартных деталей и узлов, справочных данных по машиностроению
- APM Trans – модуль расчета и проектирования механических передач вращения.
- APM Shaft – модуль расчета и проектирования валов и осей.

### **APM Mechanic**

Производитель – **НТЦ АПМ, Россия**

Область применения – Расчет и проектирование деталей машин и механизмов

Адрес в Интернет: <http://www.apmwm.com>; <http://www.apm.ru>

Комплекс APM Mechanic (входит в состав системы APM Win-Machine) позволяет решать задачи расчета энергетических и кинематических параметров; прочности, жесткости и устойчивости; выносливости при переменных режимах нагружения; вероятности, надежности и износостойкости; динамических характеристик.

- APM Base – модуль создания и редактирования баз данных.
- APM Bear – модуль расчета и проектирования подшипниковых узлов качения с учетом их класса точности.
- APM Cam – модуль расчета и проектирования кулачковых механизмов.
- APM Drive – модуль автоматизированного проектирования привода вращательного движения произвольной структуры.
- APM Graph – плоский параметрический чертежно-графический редактор с инструментом расчета размерных цепей.
- APM Joint – модуль расчета и проектирования соединений элементов машин.
- APM Material Data – библиотека материалов. APM Mechanical Data – библиотека стандартных деталей и узлов, справочных данных по машиностроению.
- APM Plain – модуль расчета и проектирования подшипников скольжения.
- APM Screw – модуль расчета неидеальных винтовых передач (скольжения, шарико- и планетарно-винтовых).
- APM Slider – модуль расчета и проектирования плоских механизмов произвольной структуры.
- APM Spring – модуль расчета и проектирования упругих элементов машин.
- APM Trans – модуль расчета и проектирования механических передач вращения.
- APM Shaft – модуль расчета и проектирования валов и осей.

## **APM StructFEM**

Производитель – НТЦ АПМ, Россия

Область применения Расчет и проектирование металлических и строительных конструкций

Адрес в Интернет: <http://www.apmwm.com>; <http://www.apm.ru>

Комплекс APM StructFEM (в составе APM WinMachine) предоставляет пользователю широкие возможности по созданию моделей произвольных трехмерных конструкций, состоящих из стержневых, оболочечных и твердотельных элементов. Статический, деформационный и нелинейный расчеты, анализ устойчивости конструкций, вычисление собственных частот и форм и пр. На все программные продукты, входящие в состав комплекса APM StructFEM, получен сертификат соответствия ГОССТРОЯ России № 0311087 от 05.04.2004 г.

В состав комплекса входят следующие модули:

- APM Base – модуль создания и редактирования баз данных.
- APM Graph – модуль оформления графической документации.
- APM Joint – модуль проектирования соединений элементов этих конструкций.
- APM Structure 3D – модуль комплексного анализа трехмерных конструкций. В нем могут быть рассчитаны стержневые, тонкие пластинчатые и объемные твердотельные конструкции, а также их произвольные комбинации. Под комплексным анализом понимается расчет напряженно-деформированного состояния, устойчивости, собственной и вынужденной динамики.
- APM Studio – препроцессор создания моделей для конечно-элементного анализа в модуле APM Structure 3D с возможностью импорта STEP-файлов.

### **3.3. Современные технологии конструкторской подготовки производства**

#### ***3.3.1. Прототипирование***

В процессе подготовки производства нового изделия у конструктора часто возникает необходимость согласования внешнего вида, конструкции и других свойств спроектированного изделия с заказчиком, изготовителем (технологом). На производстве для этого изготавливают макеты из дерева, легкообрабатываемых материалов. В крупных проектных организациях для этого существуют специальные цехи или уча-



стки. Натурные (как правило, в масштабе 1:1) макеты используются для уточнения внешнего вида, конструкции изделия, а так же проверки его на собираемость. Недостатки использования натуральных образцов очевидны – изготовление макета требует значительных временных затрат, а точность зависит от квалификации макетировщика.

Прорывом в технологии визуализации стало появление трехмерных систем компьютерного проектирования. Современная САД-система, к примеру, позволяет в реальном времени анимировать вращение трехмерной модели, варьируя цветовые оттенки на разных ее поверхностях и эмулируя тени. При достаточной вычислительной мощности генерирование фотореалистичного изображения на основе готовой трехмерной модели занимает всего несколько секунд – в отличие от часов или дней, необходимых для изготовления физической модели.

Тем не менее, эффективность такой визуализации намного ниже, чем при макетировании. Фотореалистичное изображение остается плоской картинкой на экране монитора, тогда как физическую модель можно потрогать руками.

Появившиеся в середине 80-х годов *системы быстрого изготовления прототипов* явились логическим продолжением систем компьютерного дизайна. Они стали устройствами вывода – своего рода *трехмерными принтерами*. Получив цифровое описание трехмерной САД-модели на входе, устройство быстрого изготовления прототипов генерирует на выходе твердую объемную модель.

Термин ***Rapid Prototyping*** (RP) связан с совокупностью оборудования, материалов и программного обеспечения, обеспечивающей непосредственное изготовление твердой копии компьютерной модели любого трехмерного объекта независимо от его геометрической копии. **Все без исключения RP-технологии основаны на принципе послойного воспроизведения.** Стандартным форматом входной информации для основных RP-систем является STL (Standard Triangular Language) – язык, в котором все поверхности модели заменяются совокупностями треугольных граней. Качество такой замены для изогнутых поверхностей зависит от числа заменяющих их треугольников. Все современные САД-системы позволяют экспортировать модели в STL-формат с регулируемой точностью.

Программная часть RP-системы «разрезает» трехмерную STL-модель на слои одинаковой толщины (для большинства систем она лежит в пределах 0,1мм). Таким образом, трехмерный объект заменяется совокупностью плоских слоев. При этом единственным ограничением точности является толщина слоя. При изготовлении твердой модели строительный процесс идет снизу вверх. Если геометрия изготавливае-

мой модели такова, что пятно предыдущего слоя не полностью перекрывает пятно последующего (материал как бы «повисает» в воздухе), то формируются поддерживающие структуры из того же материала, что и сама модель (они создаются в виде тонких, легко удаляемых сегментов), либо из вспомогательного, менее прочного материала.

### 3.3.2. Стереолитография

Впервые предложена Чарлзом Хеллом (Charles Hall) в 1984 г. В настоящее время установки по стереолитографии производятся компанией 3D systems Inc, США (90% всего рынка в 1991г.). Технологические установки производятся с 1988 г. В табл. 3.2 приведены производители установок по стереолитографии.

Таблица 3.2

Название процесса	Производитель	Место расположения
JSC	Sony	Токио, Япония
SOUP	СМЕТ	Токио, Япония
SOMOS (DuPon)	Teijin Seiki	Токио, Япония
Stereos	EOS	Munich, Германия
SLA100/250/400/500...	3D systems	Калифорния, США
Colamm	Mitsui	Токио, Япония

Физика процесса основана на поглощении фоточувствительным полимером лазерного излучения конкретной длины волны, в результате чего в месте поглощения наблюдается процесс радикальной полимеризации (т.е. отверждения) полимера (рис. 3.4).

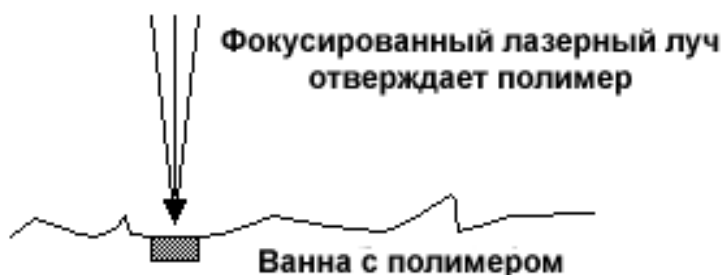


Рис. 3.4. Физический принцип процесса

Процесс синтеза модели осуществляется на платформе, которая расположена в ванне с полимером. После отверждения текущего слоя основание-платформа опускается на высоту отвержденного слоя и лазерный луч по заранее подготовленному контуру обрабатывает (полимеризует) следующий слой.

Поддержки (т.е. внутренние или внешние «переборки») создаются на стадии компьютерной обработки 3-х мерного вида модели при помощи различных программ (SolidConcepts, Los Angeles, California и др.).

Они позволяют:

- стабилизировать выступы, консоли на краях модели;
- предотвратить расслаивание в сложных участках модели;
- корректировать возможное искривление слоев на платформе;
- легко отделять синтезированную модель от основания-платформы;
- облегчают синтез сложных моделей, создавая их из нескольких частей.

Протекание процесса:

Модель опускается (прибл. на 1,3 мм) на некоторое время, в течении которого ее поверхность заполняется неполимеризованной жидкостью, далее нивелирующее устройство удаляет излишки жидкого полимера с поверхности (амплитуда колебаний жидкости должна быть заранее выверена).

Модель опускается вниз, в то время как сфокусированный лазерный луч остается на поверхности полимера.

При отверждении происходит усадка полимера. Эта усадка может привести к изменению объема жидкости в ванне и должна все время проверяться. В случае отклонения уровень восстанавливается.

Толщины слоев составляют от 50 до 500 мкм. Это контролируется для того чтобы определить, на какую величину опускать платформу. Чем тоньше отвержденные слои, тем точнее, «глаже» поверхность модели, но при этом процесс идет дольше.

Параметры лазерного излучения стабилизированы, но дефлекторы позволяют управлять движением луча по поверхности жидкости (рис. 3.5).

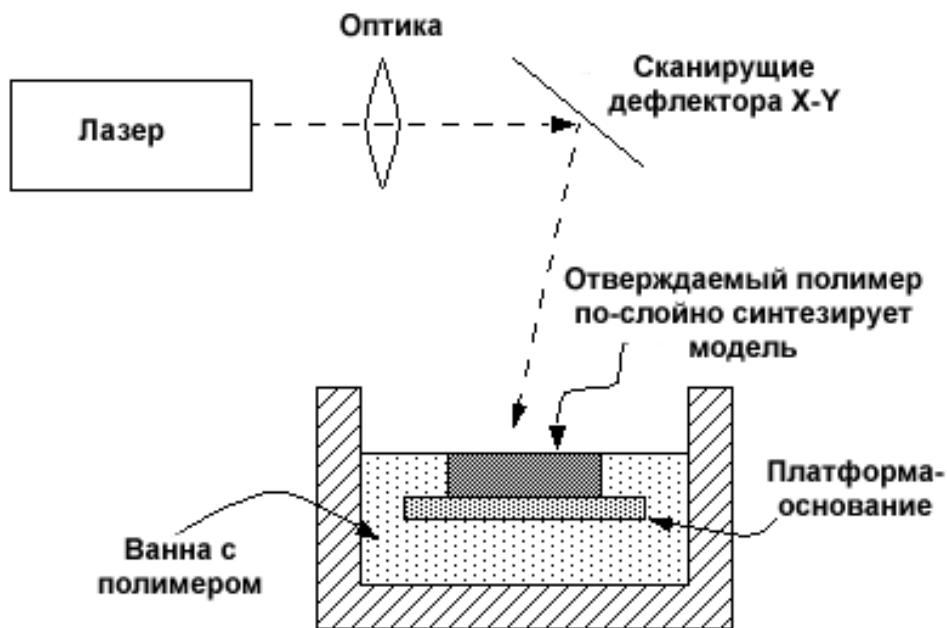


Рис. 3.5. Схема процесса стереолитографии

### 3.3.3. LOM-технология

Данная технология позволяет создавать физические модели из пленок, рулонной бумаги. Термин LOM (Laminated Object Manufacturing) означает создание объектов из пленок. Машины, основанные на этом технологическом принципе, вырезают по контуру каждый слой модели из листового материала, а затем склеивают их вместе. В качестве строительного материала используется смотанная в рулон бумажная лента с нанесенным на одну из поверхностей термоактивируемым клеем, а в качестве режущего инструмента – остросфокусированный лазерный луч. Известны различные модификации данного процесса. Так, в ряде случаев лазер заменен компактным ножом или фрезой, а в качестве строительного материала применяются пластики или даже металлическая фольга.

Рассмотрим подробнее работу LOM-установки.

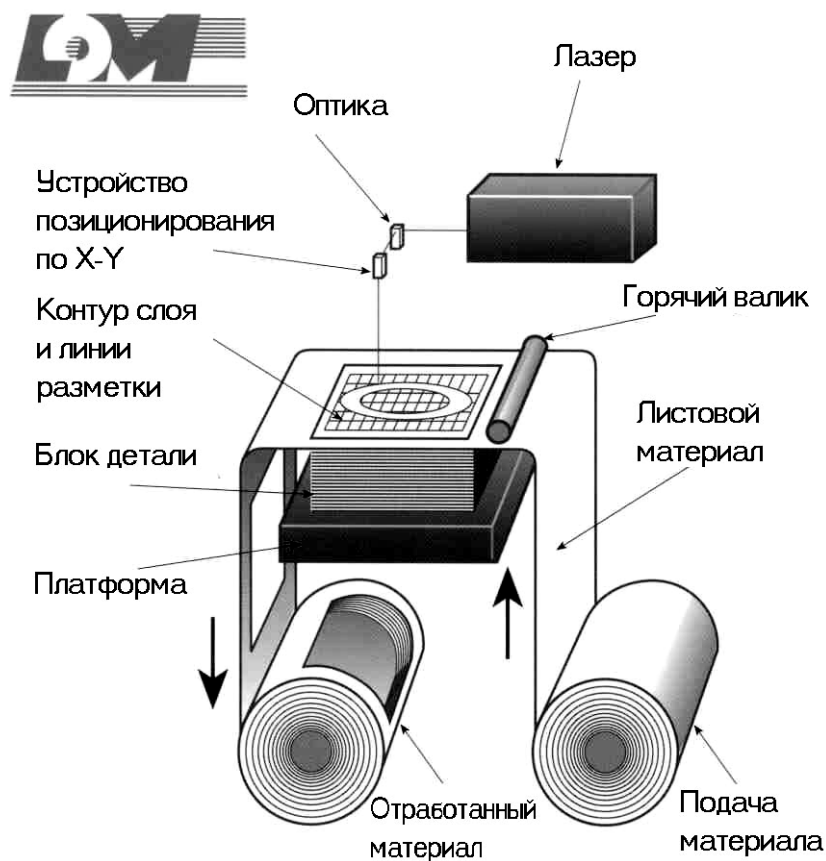
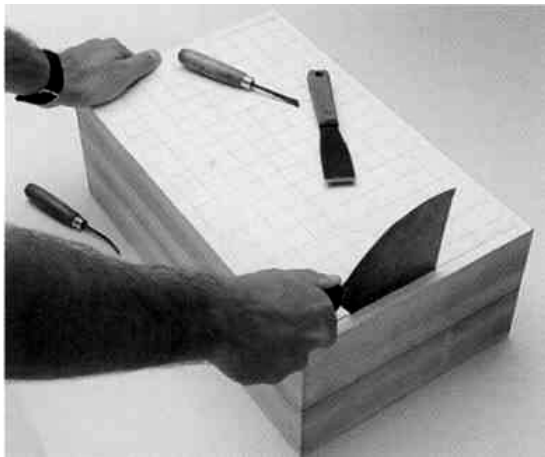


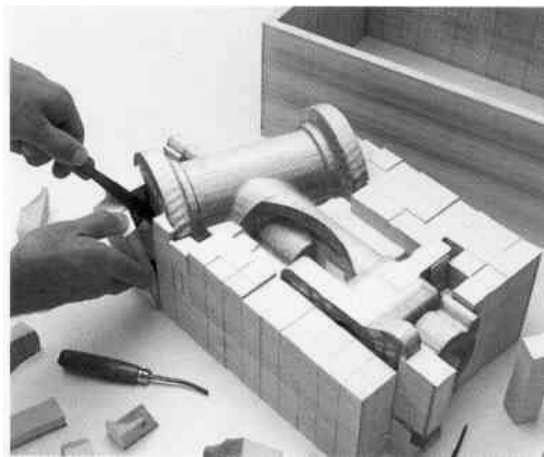
Рис. 3.6. Принцип работы LOM-установки

Бумажная лента (рис. 3.6) разматывается с подающего ролика и собирается на принимающем. При этом лента проходит над строительной платформой. Когда блок детали, создаваемый на платформе, оказывается полностью покрыт лентой, перемещение бумаги останавливается и по ее поверхности прокатывается ламинирующий горячий валик. При этом активируется клей, нанесенный на нижнюю поверхность ленты, и она прочно приклеивается к блоку детали. Далее лазерный луч обходит контур, представляющий собой сечение детали в данном слое. Участки ленты, подлежащие удалению, разрезаются лазером в виде сетки, причем сетка во всех сечениях совершенно одинаковая, для того чтобы облегчить последующее удаление ненужных частей блока. После этого строительная платформа опускается на толщину одного слоя и включается механизм подачи ленты. Процесс повторяется до тех пор, пока высота блока не станет равной высоте модели.

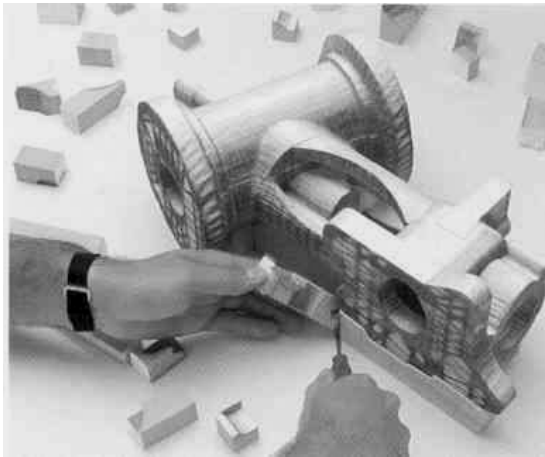
В итоге из машины извлекается прямоугольный параллелепипед. Дальнейшие действия по извлечению из него модели представлены на рис. 3.7.



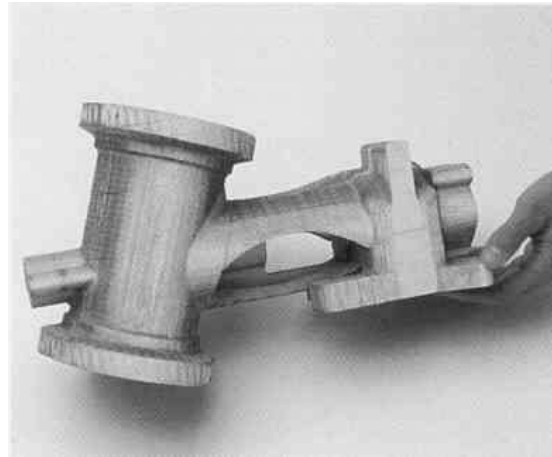
а)



б)



в)



г)

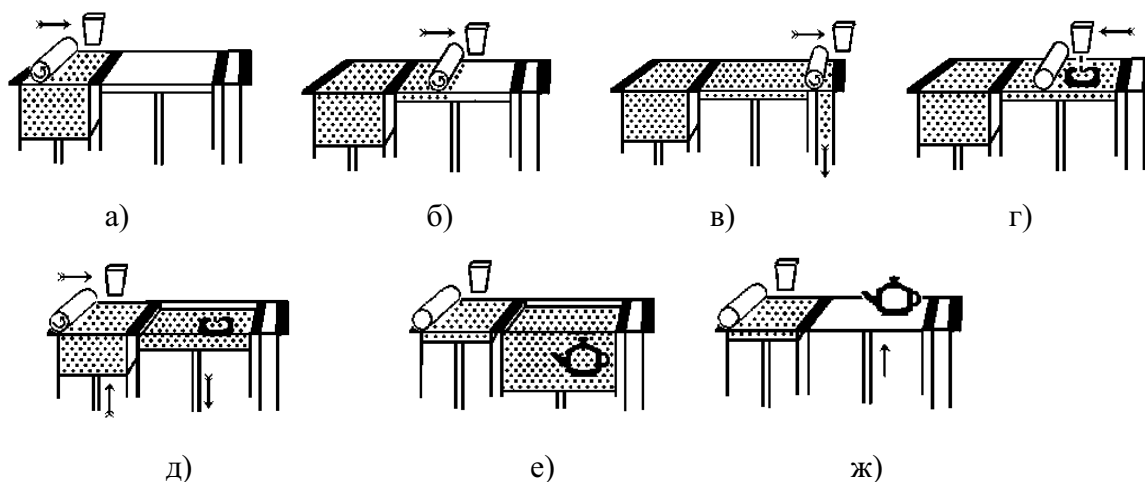
*Рис. 3.7. Извлечение модели из блока:*

- а) Ламинированный блок снимается с платформы LOM установки;*
- б) снимается обойма для освобождения кубиков ненужного материала;*
- в) кубики легко отделяются от поверхности объекта;*
- г) поверхность объекта шлифуется, полируется или окрашивается*

### **3.3.4. Трехмерная печать**

Трехмерная печать – метод быстрого изготовления прототипов и оснастки непосредственно по САД-модели, разработанный Массачусетским технологическим институтом и лицензированный Z Corporation.

Процесс заключается в послойном выращивании деталей из порошковых материалов путем «склеивания» частиц порошка жидким связующим раствором (рис. 3.8) .



*Рис. 3.8. Схема процесса:*

- а) набор порошка; б) нанесение; в) разравнивание;  
 г) нанесение связующего материала; д) подъем контейнера с мате-  
 риалом, опускание рабочей платформы; е) завершение построения;  
 ж) удаление несвязанного порошка*

Работа трехмерных принтеров Z400 и Z406 по своей сути напоминает работу офисного струйного принтера.

Принтеры Z Corporation – новый стандарт для конструкторских бюро, ускоряющий процесс проектирования и облегчающий зрительное восприятие трехмерных моделей.

На рис. 3.9 приведены фотографии современных трехмерных принтеров.

Технические характеристики модели Z406:

**Скорость построения:** Монохромный режим: 6 слоев в минуту.  
 Полноцветный режим: 2 слоя в минуту

**Максимальный размер детали:** 203 x 254 x 203 мм.

**Толщина слоя:** (задается оператором перед печатью): 0,076 – 0,254 мм.

**Цветовая схема:** RGB Full Color

**Системное программное обеспечение** разработано Z Corporation, принимает файлы в форматах STL, ZCP и PLY. Работает под Microsoft Windows.

**Габариты установки:** 102 x 79 x 112 см.

**Вес установки:** 210 кг.

**Питание:** 100-240В, 4А.

**Количество печатающих головок:** 4.

**Количество форсунок:** 1200.

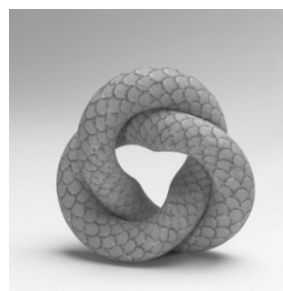


а)

б)

*Рис. 3.9. Трехмерные принтеры:  
а) модель Z406 (цветной); б) модель Z400 (монохромный)*

На рис. 3.10 показаны образцы, изготовленные по технологии трехмерной печати.



*Рис. 3.10. Образцы физических моделей, изготовленных на оборудовании 3D печати фирмы Z Corporation*



### **3.4. Информационная поддержка проектирования**

#### ***3.4.1. Информация в процессе проектирования***

Информация в процессе проектирования играет определяющую роль [1].

Проектирование начинается с исходной информации (техническое задание) и заканчивается информацией о разработанном объекте (проектная документация). Сам процесс проектирования заключается в использовании, переработке и преобразовании исходной информации и создании новой информации. Каждая отдельная проектная процедура или операция заключается в выполнении тех или иных действий над информацией о проектируемом объекте.

Информацию по способу воспроизведения можно разделить на две группы: устные и документальные. Обмен устной информацией является наиболее доступным и эффективным. Без рабочего общения между проектировщиками выполнение проектов просто невозможно. Это общение может осуществляться в виде беседы или дискуссии, которая не требует организации собрания и каких-либо технических средств. Если рабочие места участников проекта расположены в различных комнатах, зданиях, городах или странах, то на помощь приходят технические средства коммуникации: телефон, компьютерные службы (асинхронные, такие как e-mail, и синхронные, такие как ICQ, Skype). Если в дискуссии должны принять участие большая группа проектировщиков, то организуется собрание, которое состоит из выступлений, сопровождаемых иллюстрациями (плакаты, презентации, макеты и другое).

Недостатками обмена устной информацией являются высокая скорость и иногда невозможность повторения, языковые проблемы (в международных проектах).

Документальные информационные источники могут оформляться в различной форме: аудио, текст, графика, видео, мультимедиа. Недостатками документальных источников является потребность в технических средствах (иногда весьма сложных и дорогостоящих).

По источникам получения информацию можно разделить на две группы: внутренняя и внешняя. Внутренней обычно является большинство информации о проекте, отчеты о предыдущих работах и исследованиях, о ранее выполненных проектах. Для инициирования проекта обычно нужна внешняя информация, получаемая от заказчиков и клиентов (маркетинговые исследования, технические задания, статьи и др.) Результаты проектов в большей или меньшей степени могут быть представлены для обозрения (отчеты, статьи, само изделие).

Благодаря широкому обмену научно-технической информацией стало возможно ускорение развития техники, которое мы наблюдаем в последние десятилетия. Сегодня такой обмен реализуется различными способами, с использованием различных технических средств. Организацию такого обмена берут на себя профессиональные сообщества, они же берут на себя организацию конференций, выпуск журналов, научной и учебной литературы.

Научные организации, институты, университеты также стараются обеспечить распространение информации среди своих сотрудников.

Важным источником информации для принятия проектных решения являются патенты. В настоящее время патентная информация становится общедоступной. Информацию о патентах, зарегистрированных в России, можно найти на сайте Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам РОСПАТЕНТ (<http://www.fips.ru>), европейские патенты – на сайте European Patent Office (<http://ep.espacenet.com>). Электронный архив патентов поддерживает фирма MicroPatent (<http://www.micropat.com>).

Патенты, зарегистрированные в последние годы, можно найти на сайте <http://freshpatents.com>.

Для обеспечения современного процесса проектирования необходимой информацией необходимы новые методы и средства хранения, обработки и представления данных, соответствующие последним разработкам в области информационных технологий.

### ***3.4.2. Информационная поддержка жизненного цикла изделий***

В настоящее время на мировом рынке наукоемких промышленных изделий наблюдаются три основные тенденции:

- повышение сложности и ресурсоемкости изделий;
- развитие кооперации между участниками жизненного цикла изделия;
- повышение конкуренции на рынке.

Основной проблемой является повышение конкурентоспособности выпускаемых изделий с учетом перечисленных тенденций. Добиться повышения конкурентоспособности изделия можно за счет:

- повышения степени удовлетворения требований заказчика;
- сокращения сроков создания изделия;
- сокращения материальных затрат на создание изделия.

Основным способом повышения конкурентоспособности изделия является повышение эффективности процессов его жизненного цикла, то есть повышение эффективности управления ресурсами, используе-

мыми при выполнении этих процессов. В настоящее время наиболее распространенной концепцией повышения эффективности управления информационными ресурсами является концепция CALS, которая превратилась в целое направление информационных технологий. Предметом CALS являются технологии совместного использования и обмена информацией (информационной интеграции) в процессах, выполняемых в ходе жизненного цикла изделия. Основой является использование комплекса единых информационных моделей, стандартизация способов доступа к информации и ее корректной интерпретации, обеспечение безопасности информации [8].

Повышение эффективности процессов, выполняемых в ходе жизненного цикла изделия, достигается за счет информационной интеграции и преемственности информации, порождаемой на всех этапах. Информационная интеграция заключается в том, что все автоматизированные системы, применяемые на различных стадиях жизненного цикла, оперируют не с традиционными документами и даже не с их электронными отображениями (например, отсканированными чертежами), а с формализованными информационными моделями, описывающими изделие, технологии его производства и использования. Системы, которым для работы нужны те или иные информационные объекты, по мере необходимости могут извлекать их из интегрированной информационной среды, обрабатывать, создавая новые объекты, и помещать результаты своей работы в ту же интегрированную информационную среду.

Интегрированная информационная среда (см. подраздел 3.1.2) представляет собой совокупность распределенных баз данных, в которой действуют единые, стандартные правила хранения, обновления, поиска и передачи информации, через которую осуществляется безбумажное информационное взаимодействие между всеми участниками жизненного цикла изделия. При этом однажды созданная информация хранится в интегрированной информационной среде, не дублируется, не требует каких-либо перекодировок в процессе обмена, сохраняет актуальность и целостность.

Путь реализации идей CALS содержится в стратегии, предполагающей создание единого информационного пространства (ЕИП) для всех участников жизненного цикла изделия. ЕИП должно обладать следующими свойствами:

- вся информация представлена в электронном виде;
- ЕИП охватывает всю созданную информацию об изделии;
- ЕИП является единственным источником данных об изделии (прямой обмен данными между участниками жизненного цикла изделия исключен);

- ЕИП строится только на основе международных, государственных и отраслевых информационных стандартов;
- для создания ЕИП используются программно-аппаратные средства, уже имеющиеся у участников жизненного цикла изделия;
- ЕИП постоянно развивается.

Стратегия CALS предусматривает двухэтапный план создания ЕИП:

1. Автоматизация отдельных процессов (или этапов) жизненного цикла изделия и представление данных на них в электронном виде.
2. Интеграция автоматизированных процессов и относящихся к ним данных, уже представленных в электронном виде, в рамках ЕИП.

Основными преимуществами ЕИП являются:

- обеспечение целостности данных;
- возможность организации доступа к данным территориально удаленных участников жизненного цикла изделия;
- отсутствие потерь данных при переходе между этапами жизненного цикла изделия;
- изменения данных доступны сразу всем участникам жизненного цикла изделия;
- повышение скорости поиска данных и доступа к ним по сравнению с бумажной документацией;
- возможность использования различных компьютерных систем для работы с данными.

Ядром единого информационного пространства является электронное описание изделия, которое формируется и хранится в базе данных на протяжении всего жизненного цикла. Управление данными об изделии с использованием центральной базы данных осуществляется PDM-системами.

PDM (Product Data Management) – общий термин, охватывающий все системы, которые применяются для управления определяющей информацией о продукте и процессах, используемых для его поддержки и сопровождения.

Таким образом, под PDM понимается управление всей информацией об изделии и связанных с ним процессах на протяжении всего его жизненного цикла – начиная с проектирования и производства до снятия с эксплуатации.

Данные об изделии состоят из идентификационных данных (например, данных о составе или конфигурации изделия) и данных или документов, которые используются для описания изделия или процессов его проектирования, производства или эксплуатации (при этом все данные обязательно представлены в электронном виде). Управление

информационными процессами жизненного цикла представляет собой поддержку различных процедур, создающих и использующих данные об изделии (например, процедуры изменения изделия), то есть фактически поддержку электронного документооборота, например, конструкторского документооборота.

Для реализации PDM-технологии существуют специализированные программные средства, называемые PDM-системами (то есть системами управления данными об изделии; другое название – системы управления проектами). При создании единого информационного пространства для всех участников жизненного цикла изделия PDM-система выступает в качестве средства интеграции всего множества используемых прикладных компьютерных систем (системы автоматизированного проектирования (САПР), автоматизированные системы управления производством (АСУП) и другие) путем аккумуляции поступающих от них данных в логически единую модель на основе стандартных интерфейсов взаимодействия.

Пользователями PDM-системы выступают все сотрудники всех предприятий-участников жизненного цикла изделия: конструкторы, технологи, работники технического архива, а также сотрудники, работающие в других предметных областях: сбыт, маркетинг, снабжение, финансы, сервис, эксплуатация и другие. Главной задачей PDM-системы является предоставление соответствующему сотруднику нужной ему информации в нужное время в удобной форме (в соответствии с правами доступа).

Все функции полноценной PDM-системы можно четко разделить на несколько групп:

1. Управление хранением данных и документов.

Все данные и документы в PDM-системе хранятся в специальной подсистеме – хранилище данных, которая обеспечивает их целостность, организует доступ к ним в соответствии с правами доступа и позволяет осуществлять поиск данных разными способами. При этом документы, хранящиеся в системе, являются электронными документами, то есть, например, обладают электронной подписью.

2. Управление процессами.

PDM-система выступает в качестве рабочей среды пользователей и отслеживает все их действия, в том числе следит за версиями создаваемых ими данных. Кроме того, PDM-система управляет потоком работ (например, в процессе проектирования изделия) и занимается протоколированием действий пользователей и изменений данных.

3. Управление составом изделия.

PDM-система содержит информацию о составе изделия, его исполнениях и конфигурациях. Важной особенностью является наличие нескольких представлений состава изделия для различных предметных областей (конструкторский состав, технологический состав, маркетинговый состав и так далее), а также управление применяемостью компонентов изделия.

Основной выгодой от использования на предприятии PDM-системы является сокращение времени разработки изделия и повышение качества изделия. Сокращение времени выхода на рынок достигается в первую очередь за счет повышения эффективности процесса проектирования изделия, которое характеризуется четырьмя аспектами:

- избавление конструктора от непроизводительных затрат своего времени, связанных с поиском, копированием и архивированием данных, что при работе с бумажными данными составляет 25-30% его времени;
- улучшение взаимодействия между проектировщиками, конструкторами, технологами и другими участниками жизненного цикла изделия за счет поддержки методики параллельного проектирования;
- значительное сокращение срока проведения изменения схем, конструкции изделия или технологии его производства за счет улучшения контроля за потоком работ в проекте;
- резкое увеличение доли заимствованных или слегка измененных компонентов в изделии (до 80%) за счет предоставления возможности поиска компонента с необходимыми характеристиками.

На сегодняшний день рынок PDM-систем достаточно велик. Большинство производителей CAD/CAE/CAM-систем включили такие модули в свои продукты. Но есть и отдельные системы:

PartY PLUS (Lotsia PDM PLUS) (<http://www.lotsia.com>) представляет собой визуальную систему управления информацией об изделии и проектными данными (PDM). Назначение системы – управление проектной информацией при параллельном групповом проектировании сложных технических объектов.

PartY позволяет управлять информацией, необходимой для проектирования изделия, подготовки производства, изготовления изделия, комплектации и отгрузки, дальнейшего сопровождения. PartY поддерживает режим параллельной коллективной работы различных групп пользователей и обеспечивает управление всей информацией, относящейся к изделию.

Pro/INTRALINK (<http://www.ptc.com>) предлагается для управления проектом на уровне рабочих групп Pro/ENGINEER. Pro/INTRALINK решает следующие задачи по управлению данными:

- контроль версий и изменений – возможность координирования всех изменений независимо от их источников, возможность предотвращения случайных или запрещенных модификаций изделия;
- распределенный доступ – администрирование доступа к информации с целью ее надежного хранения и эффективного использования;
- управление конфигурацией изделия – возможность формирования необходимой структуры изделия комбинацией из имеющихся версий компонентов;
- распределение рабочей среды – возможность координирования действий отдельного работника с действиями группы. Разработчик может осуществлять свою работу независимо от других членов группы или распределять работу между другими членами группы, когда это необходимо;
- контроль процесса проектирования на всех стадиях – возможность отслеживания состояния проекта от начала до конца;
- открытость информации по отношению к другим системам и ее двунаправленное использование (с возможностью администрирования распределения прав доступа).

SmarTeam (<http://www.smarteam.ru/>) – PDM-система SmarTeam представляет собой быстро внедряемую, масштабируемую, настраиваемую на информационную модель и бизнес процессы конкретного предприятия систему.

Настроена на работу с САПР. Система реализует как классическую Windows-ориентированную клиент/серверную архитектуру, так и Web-центрическую архитектуру. Все объекты информационной модели SmarTeam построены на основе объектного подхода, включая иерархию классов, механизм суперклассов, абстрактных классов, наследования, атрибуты, методы и т. д.

Особенность SmarTeam состоит в том, что обеспечивается обмен данными как с партнёрами, имеющими системы управления данными о продукции или другие информационные системы, так и с партнёрами, не имеющими подобных систем. В последнем случае используется специальный компонент системы SmarTeam, с помощью которого производится выборка всего или части состава изделия и создается исполняемый модуль. Этот файл передаётся партнёру любым доступным способом, например, по электронной почте или на дискете.

Партнёр выполняет этот модуль на ПК и в диалоговом режиме вносит изменения в полученный состав изделия, после чего возвращает модуль-файл отправителю.

### 3.4.3. Система информационной поддержки жизненного цикла изделий

Обобщенная программная архитектура системы информационной поддержки жизненного цикла изделия представлена на рис. 3.11.



Рис. 3.11. Обобщенная программная архитектура системы информационной поддержки жизненного цикла изделия

Как известно, для решения проектно-технических задач в процессе создания изделия используются CAD/CAM/CAE – системы.

Для управления бизнес-процессами необходимо следующее программное обеспечение:

- система управления ресурсами предприятия (ERP-система);
- система управления потоками работ (Workflow-система);
- система логистической поддержки изделия (ILS-система);
- система распределения материалов (MRP-система).

В процессе производства необходимо решать задачи оптимального обеспечения материалами или готовыми комплектующими. В зависимости от планов производства менеджер проекта должен заказать не-



обходимые материалы и комплектующие. Сотрудники отдела снабжения должны обеспечить заказ материалов у поставщиков, а комплектующих у сторонних производителей. На предприятиях с серийным или массовым производством целесообразно иметь запас материалов и комплектующих на складе. При этом информационная система должна обеспечить складской учет и оптимизацию использования материалов. Для обеспечения всех этих функций можно воспользоваться универсальными системами распределения материалов (MRP-системы).

На всех рассмотренных этапах менеджер проекта определяет приоритеты и последовательность выполнения работ, временные и финансовые затраты, использование других ресурсов. Для этого обычно используются универсальные системы управления потоками работ (Workflow-системы).

После производства жизненный цикл изделия не заканчивается. Необходимо обеспечить его комплектацию, упаковку и доставку заказчику. В процессе эксплуатации изделия также требуется отслеживать состояние изделия с использованием системы информационной поддержки жизненного цикла. Информация о сбоях в работе изделия, о его ремонте и других мероприятиях в процессе эксплуатации должна фиксироваться в системе, чтобы на её основе принимать решения при модернизации изделия. Все эти варианты использования обеспечиваются системой интегрированной логистической поддержки жизненного цикла изделия (ILS-системами), которую необходимо разрабатывать исходя из конкретных требований на предприятии.

Деятельность предприятия не ограничивается разработкой проекта. При управлении ресурсами предприятия можно выделить следующие варианты использования информационной системы: планирование проектов, управление финансами и бухгалтерией, управление кадрами, мониторинг технических и бизнес-процессов предприятия. Эти варианты использования обеспечиваются системами планирования производственных мощностей и ресурсов предприятия (ERP-системами).

Перечисленное программное обеспечение должно быть интегрировано в единую программную систему, которая и составит систему информационной поддержки жизненного цикла изделия. Настройка и адаптация такой системы к использованию на приборостроительном предприятии позволит создать систему информационной поддержки жизненного цикла прибора. Ядром такой системы является единая модель прибора с возможностью его представления как объекта бизнеса, так и технического объекта.

Для обеспечения единства и целостности информации модель прибора должна храниться в едином хранилище. Управление таким

хранилищем, а также передача данных об изделии с одного этапа жизненного цикла на другой осуществляется с использованием универсальной программы управления данными об изделии (PDM-системы). Интегрированная информационная среда, созданная с использованием PDM-системы, представляет собой совокупность распределенных баз данных, в которой действуют единые, стандартные правила хранения, обновления, поиска и передачи информации, через которую осуществляется безбумажное информационное взаимодействие между всеми участниками жизненного цикла изделия. При этом однажды созданная информация хранится в интегрированной информационной среде, не дублируется, не требует каких-либо перекодировок в процессе обмена, сохраняет актуальность и целостность.

## **4. МЕТОДЫ РАСЧЕТА И АНАЛИЗА В УСОВЕРШЕНСТВОВАНИИ КОНСТРУКЦИИ ПРИБОРОВ**

При всё возрастающих требованиях заказчиков для эффективного проектирования приборов всевозможного назначения, наряду с возможностями автоматизированного проектирования, используются различные методы, системы и программные продукты для усовершенствования конструкции приборов.

Остановимся на наиболее актуальных из них на сегодняшний день – параметризации, как эффективном способе поиска всевозможных конструктивных решений, и методе конечных элементов (МКЭ), как наиболее актуальном и широко распространенном численном методе решения задач прочностного анализа конструкций сложных форм.

### **4.1. Параметризация и параметрические возможности систем САПР**

#### *4.1.1. Параметрические возможности систем САПР*

Идея параметрического моделирования появилась еще на ранних этапах развития САПР, но долгое время не могла быть осуществлена по причине недостаточной компьютерной производительности. История параметрического моделирования началась в 1989 году, когда вышли первые системы с возможностью параметризации. Первопроходцами были Pro/ENGINEER (трехмерное твердотельное параметрическое моделирование) от Parametric Technology Corporation и T-Flex CAD (двухмерное параметрическое моделирование) от Топ Систем (г. Москва).

Во всех современных CAD/CAM-системах как среднего, так и высокого уровня имеются средства параметризации создаваемых компьютерных моделей объектов проектирования. Однако реальное использование параметризации в практике конструирования далеко не соответствует затратам разработчиков CAD/CAM-систем на создание этого аппарата. Поэтому имеет смысл более подробно разобраться с вопросами применения средств параметризации к конструированию конкретных объектов.

Идея параметризации компьютерной модели детали, сборочной единицы очевидна, так как объект конструирования постоянно меняется: возникают новые идеи, выявляются ошибки, меняются условия производства и прочие факторы, постоянно приводящие к изменению конструкции. Чтобы эта идея работала, необходимо описать конструкцию объекта набором размерных характеристик, определяющих геометрию объекта, условия взаимосвязей и взаимоотношений отдельных элемен-

тов между собой. При этом набор параметров, которые описывают способ построения геометрии объекта, не совпадает с набором технических размеров, определяющих функционирование и изготовление объекта конструирования. В сущности, задача параметризации конструкции означает на самом деле создание алгоритма, который должен обеспечивать синтез конструкции из отдельных геометрических элементов (метод твердотельного моделирования), предусматривать возможности модификации конструкции в определенном диапазоне, описывать законы функционирования конструкции, отражать определенную технологию ее изготовления.

Исследования показывают, что возможности изменения размерных характеристик значений параметров в рамках принятых конструктивных решений весьма незначительны, а существенное изменение параметров требует зачастую принятия других, новых конструктивных решений и соответственно ломки всего алгоритма параметризации конструкции, что означает переработку ее компьютерной модели. Практика моделирования объектов в среде различных CAD/CAM-систем показывает, что если средства параметризации не ведутся системой автоматически и если система располагает средствами управления деревом создания модели, то аппарат параметризации помогает конструктору в поиске вариантов конструктивных решений, в поддержке ассоциативных связей между геометрической моделью конструкции, ее чертежом, программой ЧПУ, конечно-элементной моделью расчета. Для классов типизированных конструкций, для которых возможно построение алгоритма автоматизированного синтеза, аппарат параметризации можно рассматривать как средство разработки прикладных специализированных систем конструирования. При этом возникают задачи как поиска методов применения средств параметризации в конкретной области, так и использования этих методов в среде различных CAD/CAM-систем. Поскольку в данном случае речь идет о создании прикладных систем, то сразу же встает вопрос их переносимости в среду различных CAD/CAM-систем, что, соответственно, требует рассмотреть проблему совместимости этих систем по средствам параметризации.

Современные системы моделирования высокого уровня позволяют обеспечить специальные требования к дизайну, эргономике либо аэродинамике изделия методами поверхностного и твердотельного моделирования. Проектирование типизированных деталей возможно на основе инструментов параметризации как самих деталей, так и их сборок. Каждый из этих этапов проектирования требует разработки соответствующих методов работы с компьютерными моделями.

Средства параметризации позволяют создавать объектно-ориентированную среду для решения проектных задач в конкретной области. Работа с типовыми деталями требует инструментов управления их типоразмером. Для создания сборок типовых конструкций необходимы инструменты создания и управления сборками деталей, обеспечения их размерных взаимосвязей.

При разработке дизайна изделия необходимы более сложные инструменты поверхностного моделирования. При этом применение параметризации ограничивает гибкость модификации создаваемых форм. Параметрическая поверхностная модель описывается гораздо большим числом параметров, чем твердотельная. Количество параметров, которыми конструктор может свободно оперировать, 10-40 (в зависимости от конструкции), что определяет сферу применения методов параметризации.

Идеальный вариант оснащения предприятия – когда все его подразделения работают на единой программно-технической платформе. На практике предприятия имеют системы различных классов. В таких случаях распределение этапов работ между системами проектирования выполняется с учетом специфики решаемых задач и возможностей имеющихся средств компьютерного моделирования, что существенно ограничивает возможности применения параметризации.

Понятие параметрической модели не является новым в области проектирования и конструирования, однако в свете современной концепции автоматизированного конструирования это понятие носит расширенный и универсальный характер.

*Двухмерное параметрическое черчение и моделирование.*

Параметризация двухмерных чертежей обычно доступна в САД-системах среднего и тяжелого классов. Однако упор в этих системах сделан на трехмерную технологию проектирования и возможности параметризации двухмерных чертежей практически не используются. Параметрические САД-системы, ориентированные на двухмерное черчение (легкий класс) зачастую являются урезанными версиями более продвинутых САПР.

Примеры двухмерных САПР с возможностью параметризации:

T-Flex CAD 2D – урезанный вариант T-Flex CAD 3D от российской компании «Топ Системы». Позволяет создавать полностью параметризованные чертежи. Имеется функция автоматической параметризации.

- Solid Edge 2D – урезанный вариант Solid Edge от компании Siemens PLM Software. Программа полностью бесплатна, в том числе для коммерческого применения.

- AutoCAD (с некоторыми оговорками) – Начиная с версии 2006 в AutoCAD появилась возможность создавать двухмерные динамические блоки. Динамические блоки фактически представляют собой реализацию табличной параметризации. В вертикальных решениях на базе AutoCAD возможности параметризации обычно значительно шире.

AutoCAD Mechanical – специализированное решение для двухмерного машиностроительного проектирования и черчения на базе AutoCAD. В AutoCAD Mechanical используется собственный механизм параметризации, не связанный с динамическими блоками базовой системы.

*Трехмерное твердотельное параметрическое моделирование.*

Трехмерное параметрическое моделирование является гораздо более эффективным (но и более сложным) инструментом, нежели двухмерное параметрическое моделирование. В современных системах среднего и тяжелого класса наличие параметрической модели заложено в идеологию самих САПР. Существование параметрического описания объекта является базой для всего процесса проектирования.

Примеры САПР, использующих трехмерное твердотельное параметрическое моделирование:

- CATIA – САПР тяжелого класса французской фирмы Dassault Systemes;
- Unigraphics – САПР тяжелого класса от Siemens PLM Software;
- Pro/Engineer – САПР тяжелого класса от Parametric Technology Corporation;
- Inventor – САПР среднего класса от Autodesk;
- Solid Edge – САПР среднего класса от Siemens PLM Software;
- SolidWorks – САПР среднего класса от SolidWorks Corporation (подразделение Dassault Systemes);
- T-Flex CAD – российская САПР среднего класса, использующая геометрическую параметризацию от компании Топ Системы;
- Компас – известная российская САПР среднего класса от компании АСКОН.

#### ***4.1.2. Типы параметризации***

*Табличная параметризация*

Табличная параметризация заключается в создании таблицы параметров типовых деталей. Создание нового экземпляра детали производится путем выбора из таблицы типоразмеров. Возможности табличной параметризации весьма ограничены, поскольку задание произвольных новых значений параметров и геометрических отношений обычно невозможно.

Однако табличная параметризация находит широкое применение во всех параметрических САПР, поскольку позволяет существенно упростить и ускорить создание библиотек стандартных и типовых деталей, а также их применение в процессе конструкторского проектирования.

#### *Иерархическая параметризация*

Иерархическая параметризация (параметризация на основе истории построений) заключается в том, что в ходе построения модели вся последовательность построения отображается в отдельном окне в виде «дерева построения». В нем перечислены все существующие в модели вспомогательные элементы, эскизы и выполненные операции в порядке их создания.

Помимо «дерева построения» модели, система запоминает не только порядок ее формирования, но и иерархию ее элементов (отношения между элементами). (Например: сборки → под сборки → детали).

Параметризация на основе истории построений присутствует во всех САПР, использующих трехмерное твердотельное параметрическое моделирование. Обычно такой тип параметрического моделирования сочетается с вариационной и/или геометрической параметризацией.

#### *Вариационная (размерная) параметризация*

Вариационная или размерная параметризация основана на построении эскизов (с наложением на объекты эскиза различных параметрических связей) и наложении пользователем ограничений в виде системы уравнений, определяющих зависимости между параметрами.

Процесс создания параметрической модели с использованием вариационной параметризации выглядит следующим образом.

На первом этапе создается эскиз (профиль) для трехмерной операции. На эскиз накладываются необходимые параметрические связи.

Затем эскиз «образмеривается». Уточняются отдельные размеры профиля. На этом этапе отдельные размеры можно обозначить как переменные (например, присвоить имя «L») и задать зависимости других размеров от этих переменных в виде формул (например, «L/2»).

Затем выполняется трехмерная операция (например, выталкивание), значение атрибутов операции тоже служит параметром (например, величина выталкивания).

В случае необходимости создания сборки взаимное положение компонентов сборки задается путем указания сопряжений между ними (совпадение, параллельность или перпендикулярность граней и ребер, расположение объектов на расстоянии или под углом друг к другу и т. п.).

Вариационная параметризация позволяет легко изменять форму эскиза или величину параметров операций, что позволяет удобно модифицировать трехмерную модель.

### *Геометрическая параметризация*

Геометрической параметризацией называется параметрическое моделирование, при котором геометрия каждого параметрического объекта пересчитывается в зависимости от положения родительских объектов, его параметров и переменных.

Параметрическая модель в случае геометрической параметризации состоит из элементов построения и элементов изображения. Элементы построения (конструкторские линии) задают параметрические связи. К элементам изображения относятся линии изображения (которыми обводятся конструкторские линии), а также элементы оформления (размеры, надписи, штриховки и т. п.).

Одни элементы построения могут зависеть от других элементов построения. Элементы построения могут содержать и параметры (например, радиус окружности или угол наклона прямой). При изменении одного из элементов модели все зависящие от него элементы перестраиваются в соответствии со своими параметрами и способами их задания.

Процесс создания параметрической модели методом геометрической параметризации выглядит следующим образом.

На первом этапе конструктор задает геометрию профиля конструкторскими линиями, отмечает ключевые точки, затем обводит конструкторские линии линиями изображения – получается профиль, с которым можно осуществлять различные трехмерные операции.

Последующие этапы в целом аналогичны процессу моделирования с использованием метода вариационной параметризации.

Геометрическая параметризация дает возможность более гибкого редактирования модели. В случае необходимости внесения незапланированного изменения в геометрию модели не обязательно удалять исходные линии построения (это может привести к потере ассоциативных взаимосвязей между элементами модели), можно провести новую линию построения и перенести на нее линию изображения.

Существует три подхода к созданию параметризованной геометрической модели изделия:

- параметрическое конструирование (parametric/variational-associative design);
- ассоциативная геометрия (associative geometry);
- объектно-ориентированное конструирование с использованием базовых операций добавления/удаления материала (feature-based modeling).

Определить цель конструирования достаточно просто, однако процесс поиска рационального решения сложен и требует гармоничного сочетания различных методов автоматизированного конструирования



изделий. Параметрическое конструирование как методология автоматизированной разработки является основой для параллельного ведения проектно-конструкторских работ и позволяет уточнить конечную цель конструирования уже на ранних стадиях реализации проекта, что и определяет эффективность совмещения процессов конструирования, инженерного анализа и производства в едином временном интервале и их взаимной интеграции. Параметризация подразумевает использование различных видов взаимосвязей между компонентами модели и приложениями, которые используют данную модель.

Использование технологии параметрического конструирования позволяет, при необходимости, легко изменять форму модели, в результате чего пользователь имеет возможность быстро и эффективно получать альтернативные конструкции или пересмотреть концепцию изделия в целом. При отсутствии средств обеспечения параметрического конструирования модель определена однозначно только своей геометрией, поэтому внесение даже малейших изменений требует значительных трудовых затрат. Изменения же параметрической модели выполняются также легко, как и изменения значения размеров на чертежах.

Параметризация – концепция, которая охватывает все методы для решения задач конструирования. Важной особенностью современной концепции параметрического конструирования является, прежде всего, возможность создания геометрической модели с использованием связей и правил, которые могут переопределяться и дополняться на любом этапе ее создания. Связи представляются в виде размерных, геометрических и алгебраических соотношений. Правила же определяются как условия выполнения базовой операции (например, сквозное или «слепое» отверстие).

**Параметрическое конструирование** с полным набором связей или «жесткая» параметризация (*Parametric Design*).

Параметрическое конструирование с полным набором связей или «жесткая» параметризация – интеллектуальное моделирование, где геометрия и конструкторские намерения заложены в самом определении модели. «Жесткая» параметризация – режим параметрического конструирования, при котором конструктор полностью задает все необходимые связи, однозначно определяя тем самым форму геометрической модели изделия. В этом случае изменение значения какого-либо параметра или переопределение связей влечет за собой автоматическое изменение геометрии модели и не требует от конструктора выполнения каких-либо действий по модификации геометрической модели.

Для режима «жесткой» параметризации характерно наличие случаев, когда при изменении параметров геометрической модели решение

вообще не может быть найдено, так как часть параметров и установленные связи вступают в противоречие друг с другом. Другими словами, такая технология позволяет, при необходимости, управлять изменением формы конструкции в некоторых пределах, которые определяются интервалом взаимной непротиворечивости всей совокупности параметров и наложенных связей.

Существует много способов задания параметров и связей для одной и той же конструкции, поэтому при использовании этой технологии очень важным является порядок определения и характер наложенных связей, которые будут управлять изменением формы конструкции, т.к. для каждого способа наложения связей интервалы их взаимной непротиворечивости будут разными.

Параметрическое конструирование с неполным набором связей или «мягкая» параметризация (*Variational Design*).

«Мягкая» параметризация (работа с недоопределенной системой связей) – режим параметрического конструирования, который позволяет конструктору работать, не задумываясь о порядке, в котором определены или учтены связи, а также об их достаточности для полного описания геометрии конструкции. Такой подход позволяет пользователю решать проблему, следуя по интуитивному, наиболее естественному пути.

Ключевое преимущество использования технологии «мягкой» параметризации при конструировании – возможность решения геометрически недоопределенных задач путем предоставления пользователю возможности выявления неизвестных факторов в виде связей и нахождения нужного решения.

С точки зрения практической реализации, «мягкая» параметризация – это метод для нахождения необходимых размеров и уточнения ориентации геометрических элементов, определяющих форму конструкции. В основе метода лежит принцип решения системы нелинейных уравнений, которые описывают систему связей, управляющую формой.

#### **Ассоциативное конструирование** (*Associative Design*)

Ассоциативное конструирование – это обобщающее название технологии параметрического конструирования, обеспечивающей единую, в том числе и двустороннюю, информационную взаимосвязь между геометрической моделью, расчетными моделями, программами для изготовления изделия на станках с ЧПУ, конструкторской документацией, базой данных проекта.

#### **Ассоциативная геометрия** (*Associative Geometry*)

Технология ассоциативной геометрии, иногда именуемая как направленная ассоциативность (*directed associativity*) – это технология ассоциативного конструирования, которая базируется на непосредствен-

ных взаимосвязях между объектами. Простейший пример – определение параллельности двух отрезков. Отрезок А может быть определен как параллельный отрезку В. В результате при перемещении отрезка В отрезок А также изменит свое положение с сохранением ориентации по отношению к отрезку В. Собственное же положение отрезка А не может быть непосредственно изменено. Можно определить отрезки А и В как параллельные и другим способом, так что можно будет изменять положение любого из этих отрезков, удовлетворяя условиям других наложенных связей – это случай так называемой «мягкой» ассоциативности. Преимущество использования ассоциативной геометрии – скорость. Недостаток же заключается в том, что пользователь должен полностью определить размеры и ориентацию элемента, прежде чем приступить к созданию следующего элемента.

### **Объектно-ориентированное конструирование (Feature-Based Modeling)**

Объектно-ориентированное конструирование на основе базовых операций является одним из подходов ассоциативного конструирования, с помощью которого определяется поведение геометрической формы при дальнейших изменениях. Этот подход реализован на основе определенного набора правил и атрибутов, задаваемых при выполнении базовой операции, в дополнение к уже заданным связям и ассоциативной геометрии. Базовые операции являются высокоэффективным инструментом для создания геометрической модели конструкции, инженерного анализа или изготовления.

Объектно-ориентированное моделирование предоставляет в распоряжение пользователя макрофункции, ранее определенные как последовательность действий, использующих булевы операции. Например, сквозное отверстие может быть представлено как булева операция вычитания и цилиндр достаточной длины. Сразу можно возразить, что если модель станет несколько толще, то цилиндр уже не будет обладать достаточной длиной и отверстие превратится в «слепое». Однако под сквозным отверстием понимается правило, которое определяет сквозной проход в указанном месте через тело модели, независимо от того, изменилась форма модели или нет. Базовые операции также могут иметь и дополнительные атрибуты, которые используются в других приложениях, таких как анализ и изготовление.

Обязательные требования к базовым операциям при объектно-ориентированном моделировании:

– Используемая базовая операция должна быть полностью определена. После выполнения базовой операции ее топология должна сохраняться и распознаваться как базовая операция (отверстие, паз и т.д.),

а также предоставлять возможность изменения определяющих ее геометрических параметров (диаметр, глубина, и т.д.).

Определение базовой операции должно включать в себя правила, определяющие поведение геометрической формы, а также средства контроля за соблюдением этих правил после выполнения базовой операции. Например, сквозное отверстие должно оставаться таковым, в то время как форма модели подвергается изменению.

Для повышения эффективности процесса параллельной разработки приложения для инженерного анализа и изготовления должны иметь доступ к описанию объекта, не требуя при этом от пользователя информации об объекте, использованной ранее при выполнении базовой операции.

## **4.2. Прочностной анализ конструкций с использованием МКЭ**

В настоящее время все большее распространение получают системы, использующий конечно-элементный анализ для моделирования сложных физических задач. Как и всякий другой, метод конечных элементов (МКЭ) имеет свои достоинства и недостатки. Но несомненно, что его развитие и использование в научных и производственных целях дает огромный экономический эффект, поскольку метод дает достаточно точные результаты. Область применения этого метода весьма обширна и постоянно расширяется. Развитие метода стало возможным благодаря развитию компьютерной техники и ее вычислительных способностей. Использование систем конечно-элементного анализа, основанных на этом методе, делает возможным исследование объектов без создания их материального прототипа, путем создания и решения адекватной математической модели, что позволяет в несколько раз уменьшить период создания продукции, материальные расходы и оптимизировать конструкцию в соответствии с основными критериями. Однако применение метода конечных элементов требует знаний о самом методе, опыта работы и инженерного таланта.

### ***4.2.1. Основы метода конечных элементов***

В процессе проектирования часто возникает потребность в оценке как наиболее значимых физико-механических свойств деталей и узлов, так и изделия в целом. Например, при проектировании необходимо оценить прочность деталей при заданных нагружениях или максимальные деформации корпуса изделия. Раньше единственным средством оценки физико-механических свойств изделий были оценочные расчеты с ис-

пользованием приближенных аналитических или полуэмпирических методик. Точность подобных методик применительно к реальным объектам проектирования обычно невысока, поэтому в конструкцию изделия закладывались значительные коэффициенты запаса (например, по прочности), снижающие риск принятия ошибочного проектного решения. В большинстве случаев подобный подход в проектировании остается наиболее распространенным и в настоящее время.

Появление компьютерной техники и развитие вычислительной математики обусловили серьезные изменения традиционных подходов к инженерным расчетам. Начиная с середины 60-х годов, доминирующим методом численного решения самых разных физических задач становится метод конечных элементов. Особенности МКЭ, обеспечившими ему ведущее положение в прикладной вычислительной математике, стали следующие свойства:

- универсальность – пригодность для решения самых разных задач математической физики (механика деформируемого тела, теплопроводность, задачи электродинамики);
- хорошая алгоритмируемость – возможность разработки программных комплексов, охватывающих широкий круг прикладных задач;
- хорошая численная устойчивость МКЭ-алгоритмов.

Длительное время распространение МКЭ сдерживалось недостаточным развитием компьютерной техники и связанными с этим трудностями при подготовке исходных данных для расчетов (отсутствие универсальных средств автоматической генерации конечно-элементных моделей) и при оценке результатов расчетов (недостаточное развитие средств визуализации).

Однако в начале 90-х годов ситуация стала быстро меняться. Совершенствование персональных компьютеров и начало их широкого использования в проектных целях привело к появлению и ускоренному развитию прикладных систем конечно-элементного анализа, которые не требуют от пользователя глубоких знаний теории МКЭ, исключают трудоемкие операции ручной подготовки исходных данных и предоставляют прекрасные возможности по обработке результатов математического моделирования.

Суть метода конечных элементов можно кратко изложить на примере распространенных задач механики [22]. Рассмотрим, например, произвольную конструкцию, находящуюся под воздействием приложенных к ней сил. Конструкция, представляющая собой распределенную систему сложной геометрической формы (рис. 4.1), изображается в виде совокупности конечного количества относительно простых объек-

тов правильной геометрической формы (конечных элементов) (рис. 4.2).

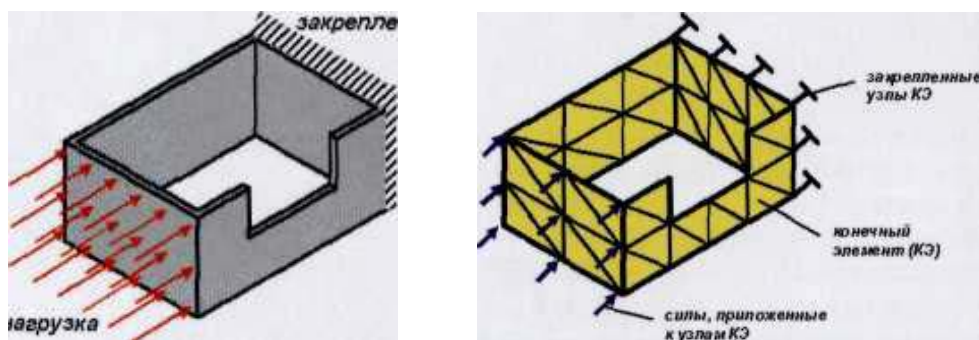


Рис. 4.1. Исходная конструкция и ее конечно-элементное представление


Элемент конструкции		Конечный элемент
	стержень	
	балка	
	труба	
	пластина	
		
	объёмное тело	

Рис. 4.2. Примеры конечных элементов

В качестве таких элементов могут выступать стержни, элементы пластин, многогранники. Конечные элементы (КЭ), аппроксимирующие исходную конструкцию, считаются связанными между собой в граничных точках – узлах, в каждом из которых вводится несколько степеней свободы, количество которых зависит от геометрической формы элемента и типа решаемой физической задачи. Например, для аппроксимации конструкций стержневыми элементами обычно вводится шесть степеней свободы в узле (рис. 4.3 а), а при моделировании

объемными элементами – по три поступательных перемещения (рис. 4.3 б).

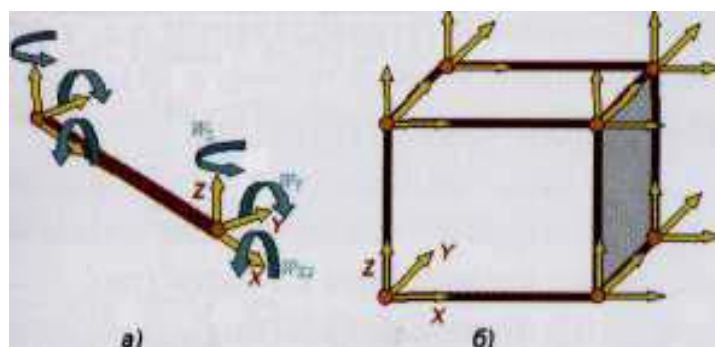


Рис. 4.3. а) – стержневой конечный элемент с шестью степенями свободы в узле б) объемный элемент параллелепипеда с тремя степенями свободы в каждом узле

Действующие на конструкцию внешние нагрузки приводятся к эквивалентным силам (моментам), прикладываемым в узлах конечных элементов. Ограничения на перемещение конструкции (закрепления) также переносятся на конечные элементы, которыми моделируется исходный объект. Поскольку каждый КЭ имеет заранее определенную форму и известны его геометрические характеристики и характеристики материала, для каждого КЭ, которыми моделируется конструкция, можно записать систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), определяющих смещение узлов КЭ под действием приложенных в эти узлы сил. Так, для задачи статического анализа конструкций такая система уравнений в матричной форме записывается следующим образом:

$$K^{КЭ} \cdot X^{КЭ} = P^{КЭ}, \quad (4.1)$$

где  $K^{КЭ}$  – так называемая матрица жесткости конечного элемента, порядок которой равен количеству степеней свободы в узле КЭ;  $P^{КЭ}$  – вектор сил, приложенных к узлам конечного элемента;  $X^{КЭ}$  – вектор неизвестных узловых перемещений конечного элемента.

Записывая систему (4.1) для каждого конечного элемента, аппроксимирующего исходную физическую систему, рассматриваем их совместно и получаем аналогичную систему уравнений для полной конструкции:

$$K^{\Gamma} \cdot X^{\Gamma} = P^{\Gamma}, \quad (4.2)$$

где  $K^{\Gamma}$  – глобальная матрица жесткости конструкции, порядок которой

равен произведению количества подвижных узлов конструкции на число степеней свободы в одном узле;  $P^T$  – глобальный вектор сил, приложенных к узлам конечно-элементной дискретизации;  $X^T$  – глобальный вектор неизвестных узловых перемещений конструкции, подлежащий определению.

Формируя и решая систему уравнений (4.2), получаем значения перемещений в узлах конечно-элементной сетки, а также дополнительные физические величины, например, напряжения. Эти значения будут приближенными (с позиции теоретически возможного «точного» решения соответствующего дифференциального уравнения математической физики), но погрешность решения может быть очень небольшой – доли процента на тестовых задачах, имеющих «точное» аналитическое решение. Погрешность получаемого в результате конечно-элементной аппроксимации решения обычно плавно уменьшается по мере увеличения степени дискретизации моделируемой системы. Другими словами, чем большее количество КЭ участвует в дискретизации (или чем меньше относительные размеры КЭ), тем точнее получаемое решение. Естественно, что более плотное КЭ разбиение требует более значительных вычислительных затрат.

Описанный алгоритм конечно-элементного моделирования применим для решения и других задач, с которыми может столкнуться современный инженер, – теплопроводности, электродинамики и т.п. Благодаря вышеперечисленным достоинствам, метод конечных элементов стал доминирующим методом компьютерного моделирования физических задач и фактически ассоциируется с целой отраслью современной индустрии программного обеспечения, известной под аббревиатурой CAE.

#### ***4.2.2. CAE-системы, использующие МКЭ***

Системы инженерного анализа (Computer Aided Engineering, CAE) прочно заняли свое место в машиностроительном проектировании.

Это такие известные самостоятельные системы как ANSYS, ABAQUS, NASTRAN, PATRAN и соответствующие модули в полномасштабных («тяжелых») системах – CATIA, Unigraphics, PRO/Engineer. Кроме того, сейчас CAD-системы среднего уровня обязательно включают в состав своих модулей полнофункциональные модули прочностного анализа, в крайнем случае, модули экспресс-анализа. К таким системам относятся Solid Edge, SolidWorks, AutoCAD, Inventor, T-Flex, Win-Machine.

Типичная схема использования таких систем в рамках концепции



автоматизированного проектирования, как уже говорилось, предусматривает создание электронной модели проектируемого изделия. Эта электронная модель адекватно отражает требуемые конструктивные характеристики изделия (геометрические, механико-физические и т. п.) и является главным источником проектной информации об изделии. В последние годы в качестве такой модели выступают, как правило, трехмерные твердотельные и поверхностные геометрические модели проектируемых изделий или их двумерные аналоги.

Удобнее всего рассмотреть типичную схему построения современной CAE-системы на примере какой-нибудь системы, например, отечественной системы конечно-элементного анализа T-FLEX Анализ разработки компании «Топ Системы» [22,23,24,25]. В ней можно выделить четыре базовые части, как показано на рис. 4.4.

Для построения корректной конечно-элементной модели изделия в первую очередь требуется осуществить передачу исходной геометрии изделия в CAE-систему. Возможны три варианта такой передачи:

1. Генерация геометрической модели средствами моделирования CAE-системы. CAE-системы могут иметь в своем составе геометрический редактор, предоставляющий возможность построения модели изделия, подлежащего анализу.

2. Импорт геометрической модели из специализированной CAD-системы через нейтральные форматы обмена данными (STEP, XMT, SAT, DXF и т.п.).

3. Прямая интеграция CAE-системы и некоторой CAD-системы, то есть обмен геометрическими данными не через внешние универсальные обменные форматы, а через внутренние структуры данных напрямую из одного программного модуля в другой.

Последний вариант – прямая интеграция модулей МКЭ-анализа с CAD-системой – длительное время был признаком САПР так называемого тяжелого уровня. Однако в последние годы, как уже говорилось, ситуация меняется: появились интегрированные приложения конечно-элементного анализа и для САПР среднего уровня.



*Рис. 4.4. Обобщенная структурная схема системы  
конечно-элементного анализа*

Именно к такому решению относится разработка АО «Топ Системы» T-FLEX/Анализ. Модули конечно-элементного анализа интегрированы непосредственно в систему 3D-моделирования T-FLEX CAD 3D.

В среде моделирования T-FLEX CAD 3D создается объемная модель. Непосредственно в интерфейсе T-FLEX CAD 3D имеется специальное меню, используя команды которого можно осуществить конечно-элементное моделирование поведения изделия в различных постановках физических задач. Весь процесс реализуется непосредственно в T-FLEX CAD 3D, в привычном для пользователя интерфейсе.

Преимущества такого интегрированного решения очевидны:

- отсутствуют затраты времени на повторный ввод информации об изделии в САЕ-систему с помощью редактора САЕ-системы;
- модель передается из T-FLEX CAD 3D в САЕ-систему максимально точно, поскольку отсутствуют возможные погрешности экспорта-импорта моделей через универсальные обменные форматы или погрешности повторного ручного ввода;

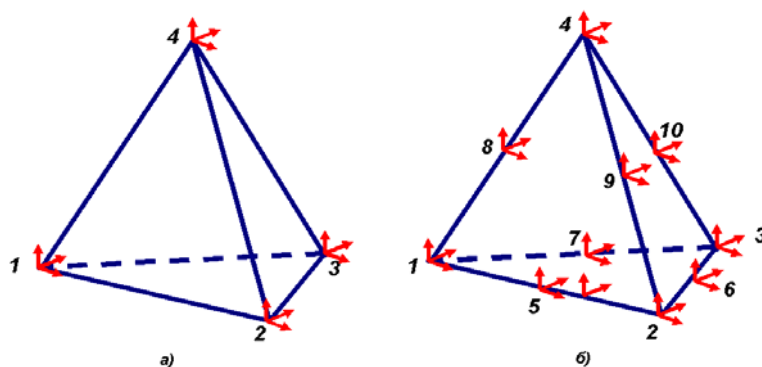
- за счет прямой программной интеграции сохраняется ассоциативная связь расчетной математической модели и электронной объемной модели изделия. Можно, например, изменить размеры анализируемого изделия, обновить КЭ-модель и сразу же получить результаты расчета измененной модели. При этом ему не нужно повторно осуществлять ввод геометрии, экспорт-импорт, задание граничных условий и т.п. Очевидно, что это очень удобно с точки зрения пользователя, так как позволяет ему в короткие сроки просчитать несколько вариантов и выбрать из них оптимальный.

Второй важной частью САЕ-системы является подготовка расчетной конечно-элементной модели по имеющимся геометрическим данным, так называемый препроцессор. Работу по подготовке расчетной КЭ-модели можно разделить на две части:

- построение адекватной конечно-элементной сетки, которая с требуемой точностью и надежностью будет аппроксимировать поведение моделируемого изделия;
- задание так называемых граничных условий – нагрузок, закреплений, температур и т.п., определяющих анализируемую физическую задачу.

Построение конечно-элементной сетки возможно вручную (обычно совмещается с вводом информации о геометрии изделия) либо автоматически. Первый подход в настоящее время все еще используется в некоторых САЕ-системах при построении КЭ моделей из стержневых элементов. Очевидно, что наряду с низкой эффективностью ручного процесса построения сетки, от пользователя требуется также хорошее знание теории МКЭ, чтобы построить корректную расчетную модель. Поэтому сегодня наибольшее распространение получили автоматизированные методы генерации расчетных КЭ-сеток.

T-FLEX/Анализ ориентирован на решение физических задач в объемной постановке. Геометрию анализируемой детали в этом случае удобнее всего описывать тетраэдральным конечным элементом, поэтому препроцессор T-FLEX/Анализ ориентирован на автоматическое построение тетраэдральных конечно-элементных сеток. Тетраэдральная сетка позволяет достаточно точно аппроксимировать сколь угодно сложную произвольную геометрию изделия, поэтому часто используется для объемного МКЭ-анализа. Препроцессор T-FLEX/Анализ дает возможность строить сетки из тетраэдральных конечных элементов двух типов – четырехузловых тетраэдров (рис. 4.5 а) и десятиузловых тетраэдров (рис. 4.5 б).



*Рис. 4.5. Тетраэдральные конечные элементы, используемые в T-FLEX/Анализ для моделирования объемных тел: а – линейный, четырехузловой; б – квадратичный, десятиузловой*

Элементы первого типа обеспечивают линейную аппроксимацию искомой функции (например, перемещений или температуры) в пределах объема КЭ. Элементы второго типа, десятиузловые, обеспечивают более высокий порядок аппроксимации – квадратичную аппроксимацию – и лучше аппроксимируют криволинейные границы. Для быстрой качественной оценки можно выбрать расчет линейным тетраэдральным КЭ, а для ответственного количественного анализа – расчет квадратичным тетраэдром.

Кроме того, препроцессор T-FLEX Анализ позволяет задавать самые разные опции по управлению параметрами конечно-элементной сетки – размеры КЭ, степень аппроксимации криволинейных границ, режимы оптимизации и т.п. Настройки генератора сеток позволяют создавать адаптивные тетраэдральные сетки с переменным шагом. Такие сетки имеют сгущения конечных элементов в местах модели со сложной геометрией (рис. 4.6), в которых можно ожидать концентрацию напряжений.

Помимо построения конечно-элементной сетки, с помощью препроцессора задаются граничные условия, необходимые для решения физической задачи. В T-FLEX Анализ для этого предусмотрены специальные команды, позволяющие в интерактивном режиме задать внешние воздействия путем прикладывания их непосредственно к элементам твердотельной модели (рис. 4.7). Препроцессор автоматически переносит граничные условия на конечно-элементную модель для выполнения расчета.

Третьим важнейшим элементом САЕ-системы является модуль формирования систем линейных алгебраических уравнений и их последующего решения.

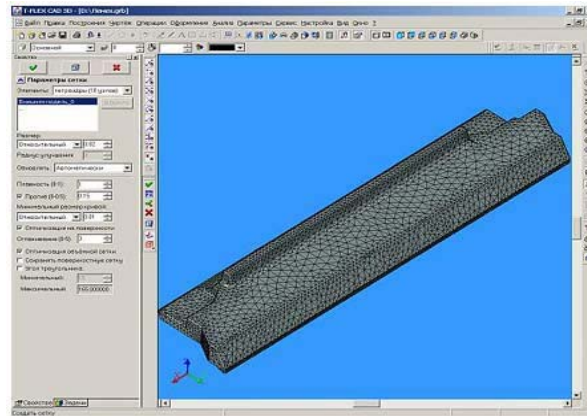


Рис. 4.6. Использование команды T-FLEX/Анализ «Сетка» для построения тетраэдральной конечно-элементной модели изделия

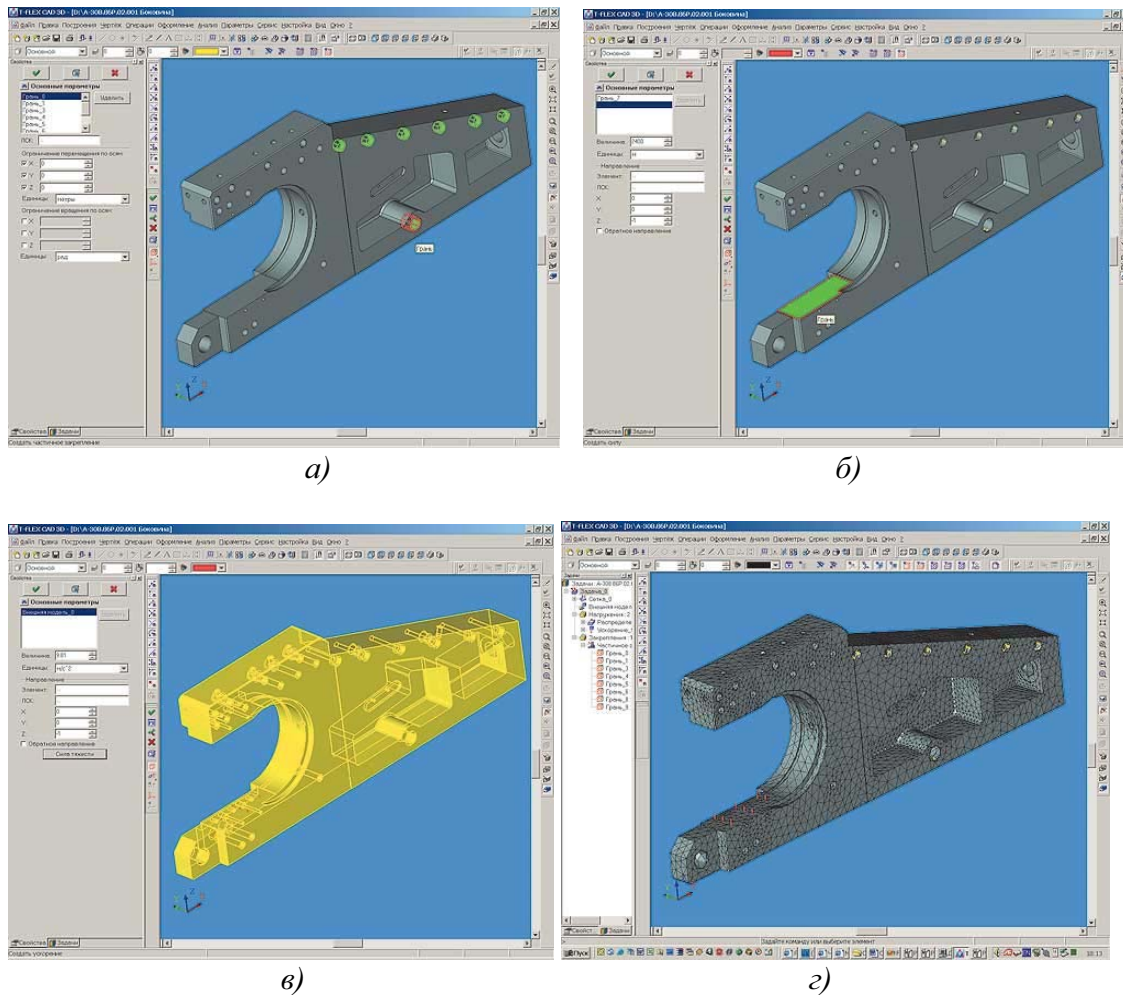
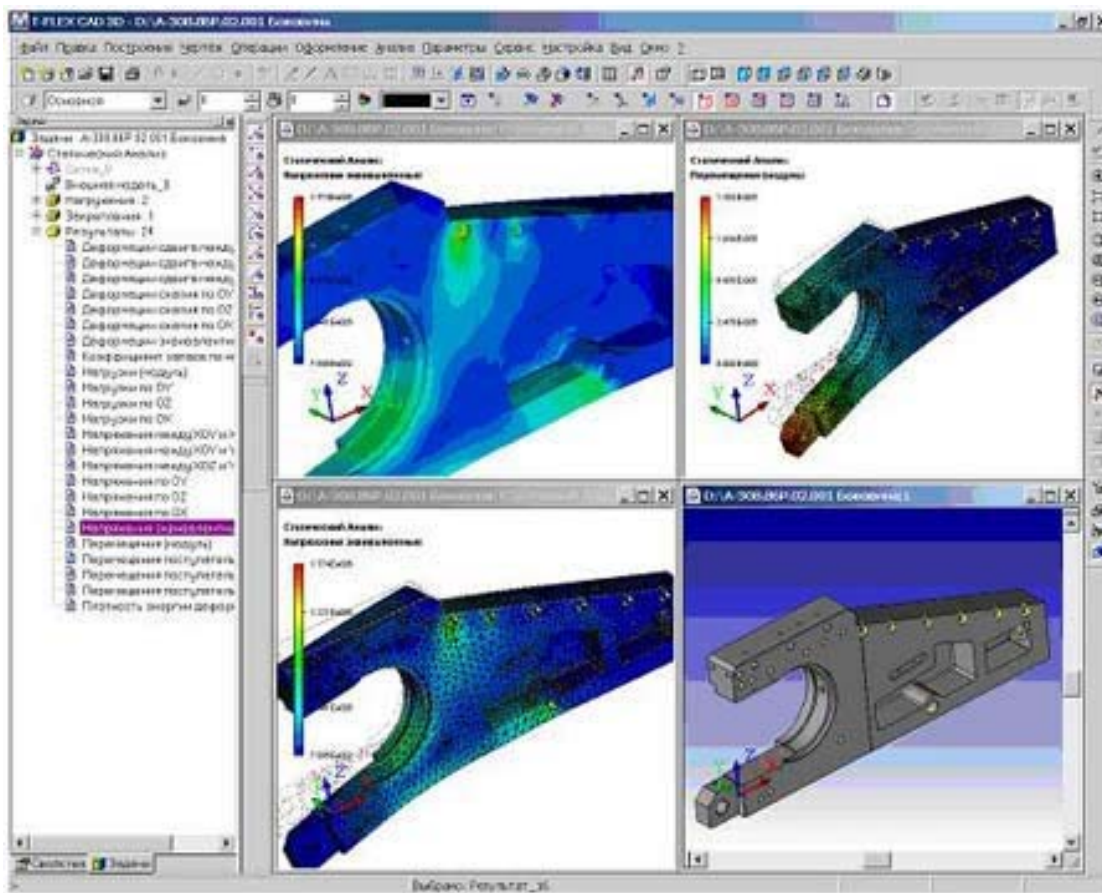


Рис. 4.7. Этапы задания граничных условий в T-FLEX/Анализе:  
 а) – задание закреплений; б) – задание силовой нагрузки; в) – задание нагрузки «сила тяжести»; г) – конечно-элементная модель изделия с заданными граничными условиями

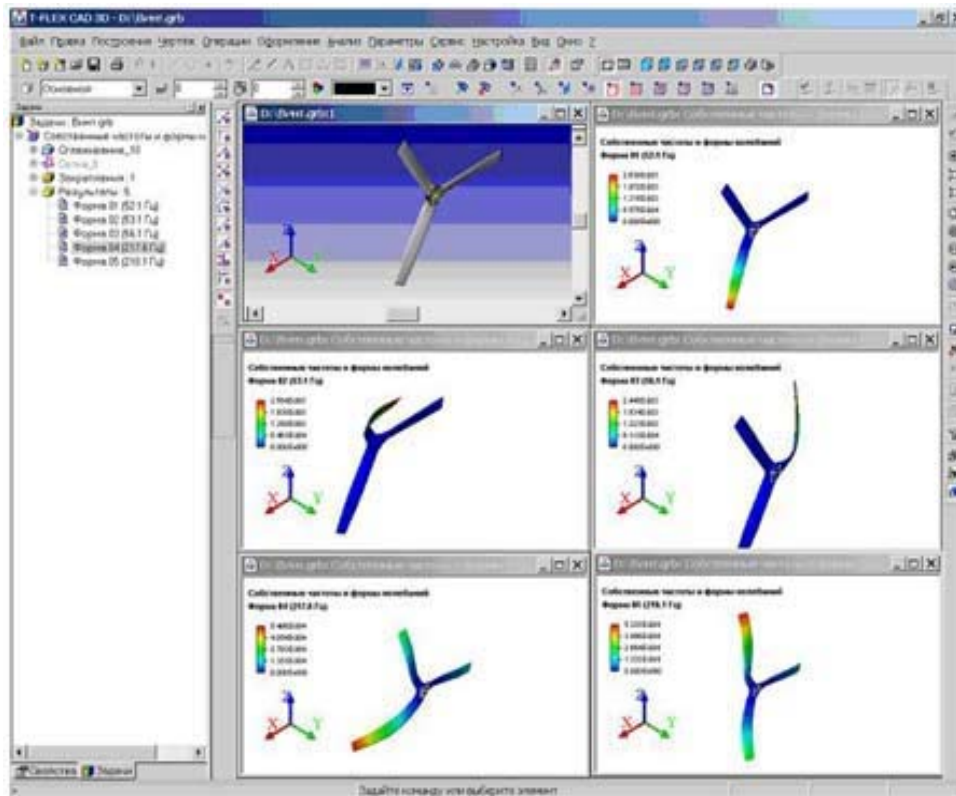
Конечно-элементный процессор T-FLEX Анализ обеспечивает решение наиболее востребованных пользователями физических задач механики, таких как линейная статика, расчет собственных частот и форм колебаний, расчет критических нагрузок (устойчивость), а также решение задач термоупругости и теплопроводности.

Системы алгебраических уравнений решаются посредством прямых или итерационных методов. Основные настройки процессора выбираются в автоматическом режиме процессором или назначаются пользователем.

Результатами работы конечно-элементного процессора T-FLEX Анализ являются значения искомых целевых функций, таких, например, как перемещения и напряжения при статическом анализе (рис. 4.8) или собственные частоты и формы колебаний при частотном анализе (рис. 4.9).



*Рис. 4.8. Окно постпроцессора T-FLEX Анализ с результатами статического прочностного расчета конструкции*



*Рис. 4.9. Окно постпроцессора T-FLEX Анализ с результатами расчета собственных частот и форм колебаний воздушного винта*

Для всестороннего исследования результатов работы процессора используется четвертая составная часть системы – постпроцессор системы конечно-элементных расчетов T-FLEX Анализ. Постпроцессор, так же как и предыдущие модули, глубоко интегрирован в T-FLEX CAD 3D и позволяет пользователю после завершения расчетов осуществить всестороннее изучение полученных результатов. Постпроцессор T-FLEX Анализ обладает набором удобных пользовательских функций, таких как анимация, отображение деформированного состояния, настраиваемые шкалы, многооконный интерфейс и др.

Подобный алгоритм построения с некоторыми вариациями реализован и в других CAE-системах.

#### ***4.2.3. Решение различных физических задач в T-FLEX Анализ***

Конечно-элементное моделирование поведения проектируемого изделия рассмотрим также на примере CAE-системы T-FLEX Анализ для трех видов анализа: статического, частотного и анализа устойчивости.

## *Статический анализ*

Статические расчеты конструкций на прочность занимают особое место в проектировании. Действительно, очень часто возникает необходимость оценки напряженного состояния отдельных элементов (деталей) изделия или конструкции в целом. Обычно при проверочном расчете изделия на прочность проектировщика интересуют:

– распределение составляющих напряжений по объему элементов конструкции. По этим данным можно сделать выводы о наиболее уязвимых местах конструкции и на этапе проектирования оптимизировать изделие с целью достижения равнопрочности;

– максимальные значения компонентов напряжений в материале. В соответствии с различными теориями прочности по отношению максимальных расчетных значений напряжений к максимальному допускаемому для данного материала можно сделать выводы о надежности конструкции в плане ее прочности (способности не разрушаться) под действием приложенных к системе нагрузок.

Современные системы конечно-элементного моделирования позволяют конструктору на этапе проектирования изделия решить обе эти задачи, обеспечив высокие механические характеристики будущего изделия.

Другими словами, основная цель статического прочностного анализа конструкций заключается в оценке напряжённого состояния конструкции, находящейся под действием не изменяющихся во времени (статических) силовых воздействий. Эта оценка напряжённого состояния выполняется обычно с целью проверки принятых конструкторских решений на условие прочности. Условие прочности в общем случае формулируется следующим образом:

***Напряжения  $\sigma$ , возникающие в конструкции, под действием приложенных к ней внешних сил должны быть меньше допускаемых напряжений  $[\sigma]$  для данного конструкционного материала с учётом поправочного коэффициента запаса  $K_{зап}$  по прочности.***

$$\sigma \cdot K_{зап} \leq [\sigma]$$

Общий алгоритм осуществления прочностных расчетов под действием статических нагрузок в T-FLEX Анализ включает этапы, представленные на рис. 4.10.

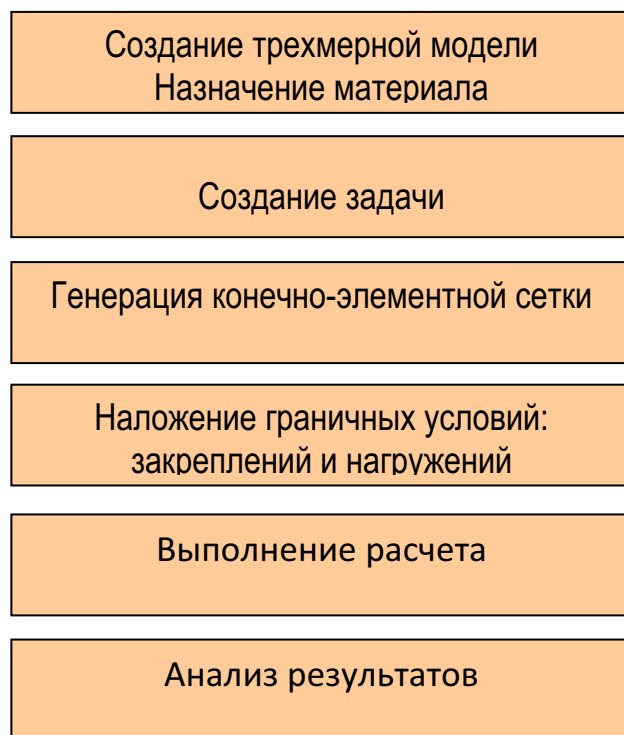
Шаг 1. Создание объемной твердотельной модели изделия

Модель может быть построена пользователем в среде трехмерного моделирования T-FLEX CAD 3D.

Это может быть как рабочая модель, содержащая проекции и



оформленные рабочие чертежи участвующая в составе сборки, так и используемая для расчета траекторий ЧПУ-обработки.



*Рис. 4.10. Общий алгоритм осуществления статических прочностных расчетов в T-FLEX Анализ*

Другими словами, для выполнения прочностного расчета нет необходимости специально готовить некоторую расчетную модель, а можно непосредственно использовать электронные документы, с которыми работает разработчик. Кроме того, используя средства импорта объемных моделей, имеющихся в составе T-FLEX CAD 3D, можно загрузить в систему модель, созданную в другой системе объемного моделирования, поддерживающей для обмена данными о твердотельных моделях форматы STEP и XMT.

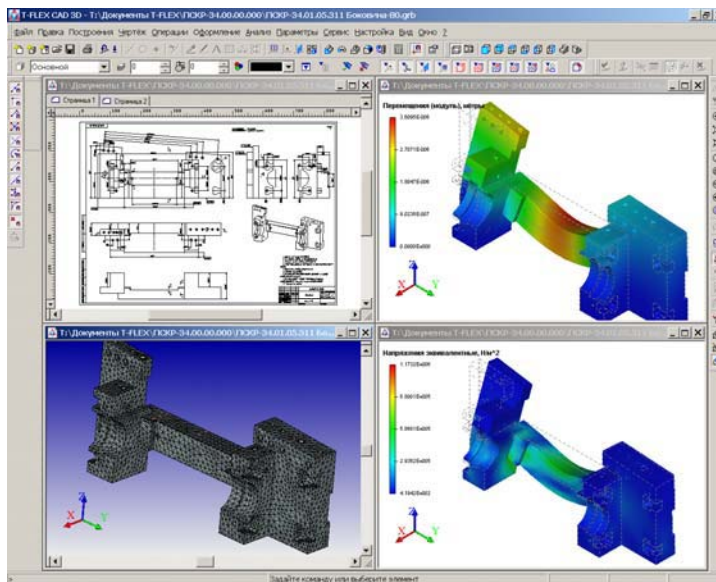
Рассмотрим в качестве примера последовательность действий по статическому расчету детали «лемех» – тяжело нагруженного элемента забойного шахтного конвейера (рис. 4.11).

Расчетная схема нагружения данной детали показана на рис. 4.12.

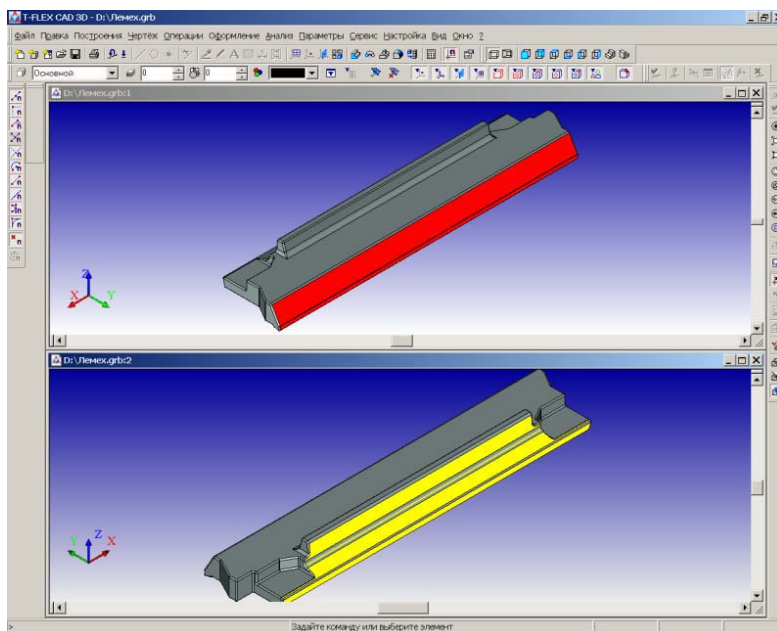
Шаг 2. Создание задачи

После того как трехмерная модель изделия была создана или импортирована в систему T-FLEX CAD 3D, можно приступить непосредственно к конечно-элементному моделированию. Любой расчет в T-FLEX Анализ начинается с создания задачи при помощи команды «Но-

вая задача» меню «Анализ» T-FLEX CAD. При создании задачи определяется ее тип («Статический анализ», «Частотный анализ», «Устойчивость», «Тепловой анализ»).



*Рис. 4.11. Пример расчета по трехмерной модели с рабочим чертежом. Все данные хранятся в одном документе*



*Рис. 4.12. Схема нагружения детали «лемех»: красный цвет соответствует приложенной на поверхность суммарной нагрузке 20 кН, желтый цвет соответствует условно закрепленной опорной поверхности детали*

В T-FLEX Анализ обеспечивается мультизадачный режим конечно-элементного моделирования. Это означает, что для одной и той же трехмерной модели можно осуществить несколько расчетов подобных по типу или различных физических задач. Например, выполнив статический анализ некоторой конструкции, можно создать следующую задачу типа «Устойчивость» и осуществить расчет критических нагружений для той же конструкции. Для управления задачами используется специализированный инструмент «Дерево задач», отображаемый в специальном окне T-FLEX CAD (рис. 4.13).

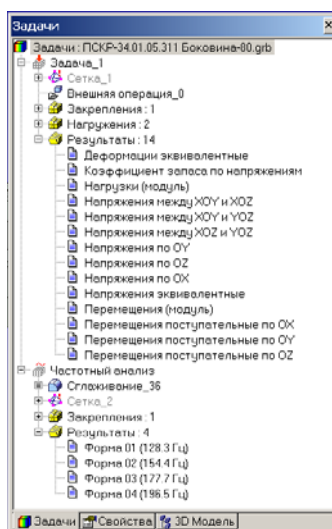


Рис. 4.13. Окно с деревом задач T-FLEX/Анализ для управления задачами

Дерево задач обеспечивает удобный доступ к элементам задач (сетке, закреплениям, нагрузениям) и результатам расчетов. Создадим, используя описанные команды, задачу типа «Статический анализ» для нашей модельной детали. Для того чтобы осуществлять какие-либо расчеты с твердотельной моделью детали, необходимо определить материал, из которого она изготовлена. В T-FLEX Анализ есть две возможности задания материала для выполнения анализа. По умолчанию в расчете используются характеристики материала «С операции». В стандартной версии T-FLEX CAD 3D есть возможность присваивать телам, участвующим в создании трехмерной модели изделия, материал из внутренней базы T-FLEX CAD, например «Сталь» или «Алюминий». Можно пополнять стандартную базу материалов своими материалами. Кроме того, в составе системы T-FLE Анализ есть собственная независимая база материалов, которую также можно использовать для задания физико-механических свойств анализируемого изделия. Установим для нашей детали материал «Сталь» из библиотеки материалов T-FLEX Анализ.

### Шаг 3. Генерация конечно-элементной сетки

Как уже говорилось, для осуществления конечно-элементного моделирования необходимо построение расчетной сетки из тетраэдральных элементов. Команда построения такой сетки («Сетка») инициируется автоматически при создании задачи или может быть вызвана из меню «Анализ» T-FLEX CAD. При создании сетки определяется степень дискретизации твердотельной модели, указывается в параметрах сетки ориентировочный размер конечных элементов (тетраэдров), при помощи которых будет описана математическая модель моделируемого изделия. Здесь необходимо отметить следующие моменты. Конечно-элементная сетка может существенно влиять на качество получаемых решений в случае сложной пространственной конфигурации изделий. Обычно более мелкое разбиение обеспечивает лучшие по точности результаты. Однако аппроксимация модели большим количеством маленьких тетраэдров приводит к возникновению системы алгебраических уравнений большого порядка, что может сказаться на скорости выполнения расчета. Вообще, оценить качество конечно-элементной модели можно последовательным решением нескольких задач с различными возрастающими степенями дискретизации. Если решения (максимальные перемещения и напряжения) перестают заметно меняться при использовании более густой сетки, то можно со значительной долей уверенности считать, что достигнут некий оптимальный уровень дискретизации и дальнейшее увеличение дискретизации сетки нерационально.

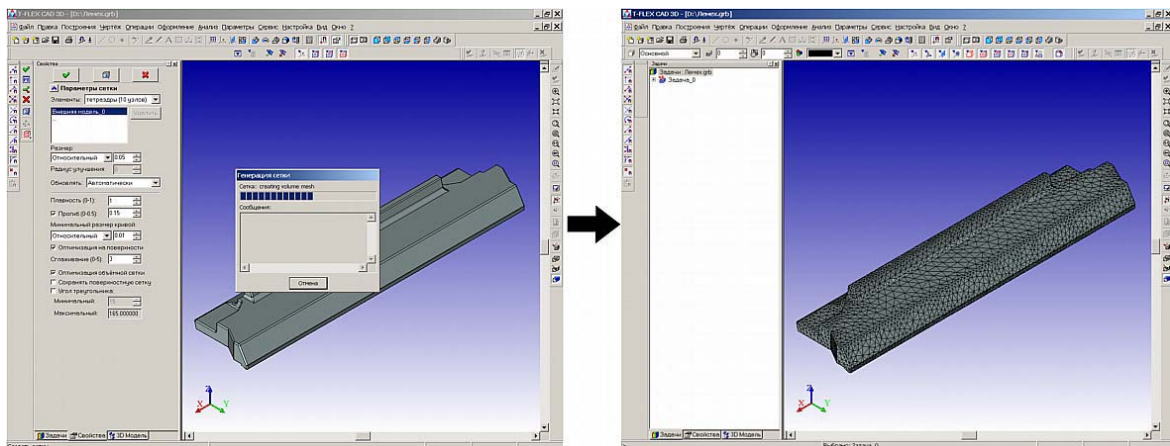
На рис. 4.14 показано построение конечно-элементной сетки для детали «лемех».

### Шаг 4. Наложение граничных условий

Для успешного решения физической задачи в конечно-элементной постановке помимо создания конечно-элементной сетки необходимо корректно определить так называемые граничные условия. В статике их роль выполняют закрепления и приложенные к системе внешние нагрузки. Этап задания граничных условий очень ответственный и требует хорошего понимания расчетчиком сути решаемой задачи. Поэтому прежде чем приступить к наложению граничных условий, следует хорошо продумать физическую сторону задачи.

#### **Задание закреплений**

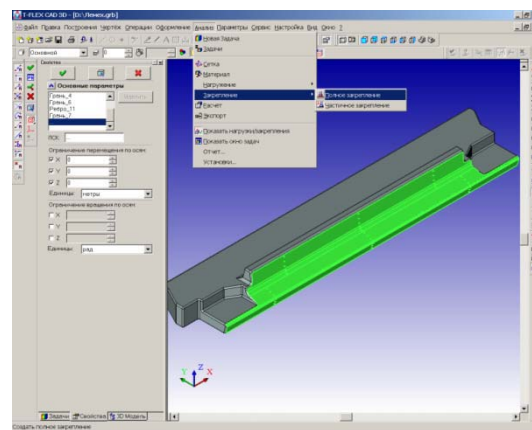
Для задания закреплений в T-FLEX Анализ предусмотрены две команды: «Полное закрепление» и «Частичное закрепление». Команда «Полное закрепление» применяется к вершинам, граням и ребрам модели и определяет, что данный элемент трехмерного тела полностью неподвижен, то есть сохраняет свое первоначальное расположение и не меняет положения под действием приложенных к системе нагрузок. Команда «Частичное закрепление» обладает более широкими возможностями.



*Рис. 4.14. Процесс генерации конечно-элементной сетки и готовая сеточная модель*

С помощью этой команды можно ограничить перемещение тела в определенных координатных направлениях или определить заданное положение элементов модели. Последнее свойство позволяет осуществить расчет напряженного состояния конструкции, для которой известна ее конечная деформация. В этом случае для осуществления расчета не обязательно даже наложение сил.

Зададим условия закрепления для нашей детали (рис. 4.15).



*Рис. 4.15. Наложение граничных условий – задание закреплений*

### **Задание нагрузений**

Для задания нагрузок в T-FLEX Анализ предусмотрен целый набор специализированных команд (рис. 4.16). Кратко рассмотрим их назначение.

Нагрузка «Сила» позволяет задать сосредоточенную или распре-

деленную силу, приложенную к вершине, ребру или грани модели.

Нагрузка «Давление» позволяет приложить к грани модели известное давление, распределенное по площади. Нагрузка «Линейное ускорение» позволяет задать такие нагрузки, как, например, сила тяжести или другое постоянное инерционное ускорение.

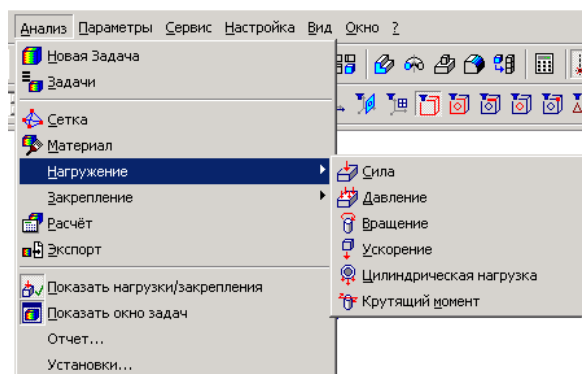


Рис. 4.16. Команды задания нагрузок для статического анализа

Нагрузка «Вращение» позволяет приложить к системе центробежные и касательные силы инерции, возникающие при равномерном или ускоренном вращательном движении модели.

Специальный тип нагружения «Цилиндрическая нагрузка» предназначена для передачи силовых взаимодействий между цилиндрическими гранями элементов конструкции, часто встречающимися в практике машиностроительного проектирования.

Нагрузка «Крутящий момент» обеспечивает возможность приложения моментов к цилиндрическим поверхностям изделия.

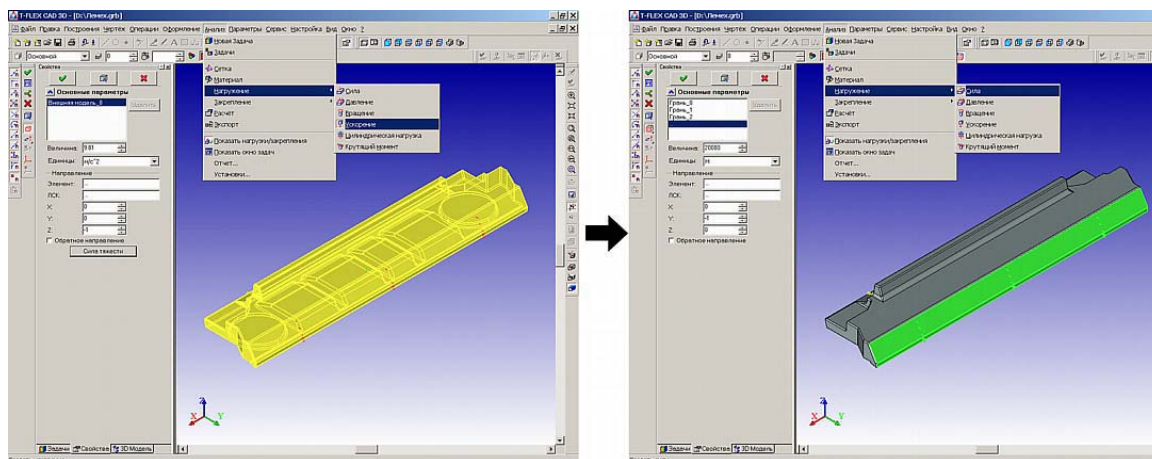
Зададим условия нагружения для нашей детали (рис. 4.17). Учитывая значительный вес детали, дополнительно зададим в качестве нагрузки ускорение свободного падения.

#### Шаг 5. Выполнение расчета

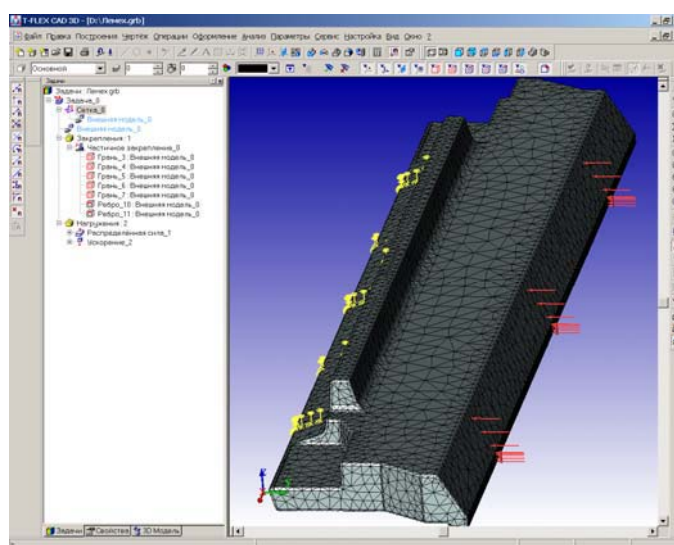
После создания конечно-элементной сетки и наложения граничных условий (рис. 4.18) можно инициализировать команду «Расчет» и запустить процесс формирования систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) и их решения.

Большинство режимов для формирования СЛАУ и их решения выбираются автоматически процессором T-FLEX Анализ. Как уже говорилось, в T-FLEX Анализ для конечно-элементного моделирования могут быть использованы тетраэдральные элементы двух типов – линейный (четырёх-узловой) и квадратичный (десятиузловой). По умолчанию расчет выполняется квадратичным тетраэдральным конечным элементом. Этот элемент обеспечивает высокую точность решения при от-

носителю небольших уровнях дискретизации. Однако на сетках с большим количеством элементов использование квадратичного элемента может потребовать значительных вычислительных ресурсов.



*Рис. 4.17. Наложение граничных условий – задание нагружения силой и ускорением свободного падения*



*Рис. 4.18. Подготовленная для расчета конечно-элементная модель детали «Лемех»*

Во многих случаях целесообразен следующий подход. Если модель сложная и для точной аппроксимации геометрии требуется большое количество тетраэдральных элементов, можно сначала задать режим расчета линейным тетраэдром для быстрой качественной оценки распределения полей перемещений и напряжений, а также для предварительной (грубой) оценки их амплитудных значений.

Уже качественный анализ может дать много полезной информации о поведении конструкции под действием нагрузок. А для того, чтобы сделать выводы о количественных значениях максимумов значений и перемещений, пользователь может провести расчет квадратичным тетраэдром, который обычно дает более достоверные результаты расчета.

По окончании расчета можно перейти к следующему этапу – анализу результатов расчета.

#### Шаг 6. Анализ результатов расчета

Важнейшим элементом любой системы конечно-элементного моделирования является так называемый постпроцессор – инструментарий, позволяющий проанализировать полученные результаты расчетов и сделать обоснованные выводы о напряженном поведении конструкции и о ее прочности. Система T-FLEX Анализ предоставляет качественные и удобные средства для этих целей. Результаты расчета отражаются в дереве задач, что обеспечивает удобный и быстрый доступ к ним.

Визуализация результатов осуществляется непосредственно в интерфейсе T-FLEX CAD. Одновременно могут быть открыты несколько результатов одной или разных задач (рис. 4.19).

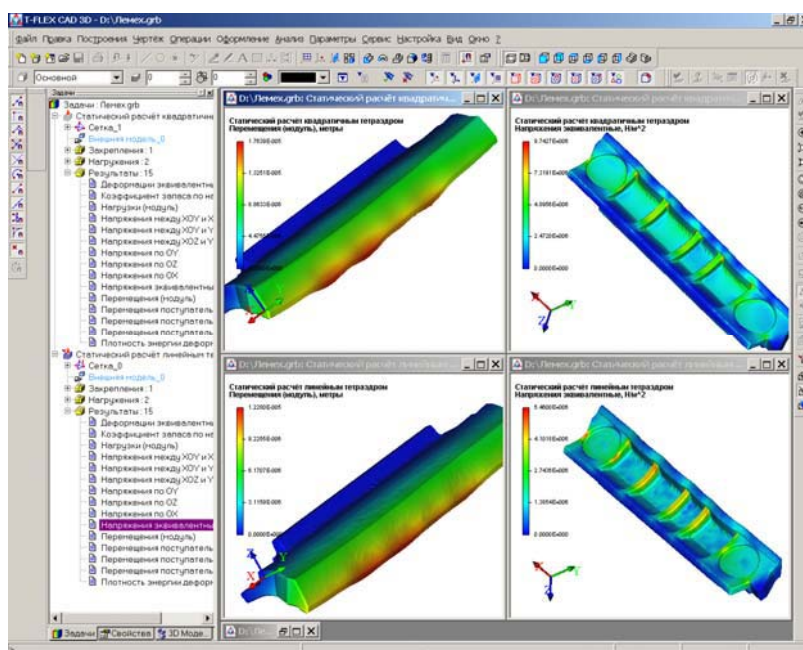


Рис. 4.19. Одновременный просмотр результатов расчета перемещений и напряжений квадратичным (верхний ряд) и линейным элементами

Доступны все команды масштабирования и позиционирования точной модели с результатами расчетов, к которым он привык при работе в T-FLEX CAD 3D. Кроме того, конечно же, имеется набор специали-



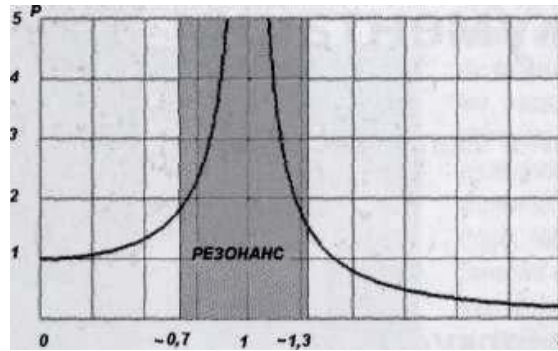
зированных команд и опций, позволяющих решать разнообразные сервисные функции по обработке результатов расчетов. Наиболее важные из них – анимация, управление отображением сеточной модели, настройка шкалы.

Вернёмся к оценке прочности нашей детали «Лемех». На рис. 4.19 видно, что результаты расчёта линейным и квадратичным элементами тетраэдра качественно очень близки, т.е. раскраска полей перемещений и напряжений в обоих расчётах почти не отличается. Однако с количественными значениями максимумов перемещений дело обстоит иначе. Максимальное перемещение при расчёте лемеха линейным тетраэдром составляет лишь 70% от максимума перемещения при расчёте квадратичным элементом. С напряжениями ситуация ещё хуже. При расчёте линейным элементом они меньше почти в два раза, чем при расчете квадратичным. Эти результаты закономерны. Линейный тетраэдр слишком «жесткий» для количественного моделирования задач упругости. Поэтому количественную оценку всегда нужно производить с использованием более точного квадратичного элемента. Оценим прочность детали «Лемех» по отношению максимума эквивалентных напряжений к пределу текучести материала. Мы получили расчётное значение эквивалентного напряжения равным 9,74 МПа.

Сравнивая это значение с известным пределом текучести данной стали (351 МПа), мы видим, что условие прочности выполняется с 35-кратным запасом. Для сложных случаев нагружения удобно пользоваться специальным типом результата «Коэффициент безопасности по напряжениям», для того, чтобы получить картины распределения коэффициентов запаса по элементам конструкции.

### ***Расчет собственных частот и форм колебаний конструкций***

Необходимость в расчете собственных частот и соответствующих им форм колебаний нередко возникает при анализе динамического поведения конструкции под действием переменных нагрузок. Наиболее распространена ситуация, когда при проектировании требуется убедиться в малой вероятности возникновения в условиях эксплуатации такого механического явления, как резонанс. Как известно, суть резонанса заключается в значительном (в десятки раз и более) усилении амплитуд вынужденных колебаний на определенных частотах внешних воздействий – так называемых резонансных частотах (рис. 4.20).

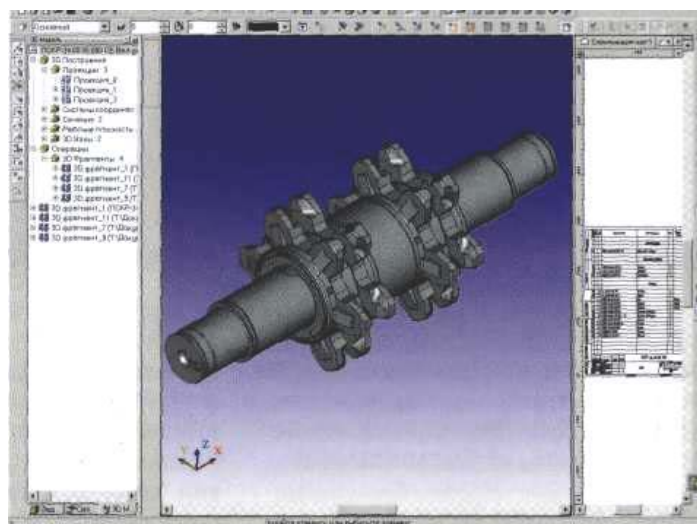


*Рис. 4.20. Изменение коэффициента усиления амплитуд в зависимости от отношения частоты собственных колебаний и внешнего воздействия в системе с недостаточным демпфированием*

В большинстве случаев возникновение резонанса является крайне нежелательным явлением для обеспечения надежности изделия. Многократное увеличение амплитуд колебаний при резонансе и вызываемые этим высокие уровни напряжений – одна из основных причин выхода из строя изделий, эксплуатируемых в условиях вибрационных нагрузок. Для защиты от резонансных воздействий можно использовать различные механические устройства, которые принципиально меняют спектральные характеристики конструкции и поглощают энергию колебаний (например, виброизоляторы). Однако есть и другой эффективный способ противодействия резонансам. Известно, что резонансы наблюдаются на частотах, близких к частотам собственных колебаний конструкции. Если при проектировании изделия имеется возможность оценить спектр собственных частот конструкции, то можно со значительной долей вероятности прогнозировать риск возникновения резонансов в известном диапазоне частот внешних воздействий. Во избежание или для значительного уменьшения вероятности появления резонансов необходимо, чтобы большая часть нижних собственных частот конструкции не лежала в диапазоне частот внешних воздействий. В этом случае можно обойтись без применения специальных виброизолирующих систем. Но для оптимизации спектра собственных частот конструкции прежде всего необходимо оценить эти частоты на этапе проектирования изделия. Именно эту функцию и выполняет модуль частотного анализа системы T-FLEX Анализ. Модуль позволяет на этапе проектирования оценить спектр собственных частот конструкции. Далее можно оптимизировать конструктивные параметры изделия таким образом, чтобы вывести большую часть собственных частот из рабочего диапазона вибровоздействий. Общий порядок выполнения расчета собственных частот в T-FLEX Анализ выглядит следующим образом.

### Шаг 1. Создание объемной твердотельной модели изделия

Для проведения частотного анализа необходимо иметь трехмерную модель изделия. Модель может быть построена в среде трехмерного моделирования T-FLEX CAD 3D или импортирована из другой системы объемного моделирования, поддерживающей для обмена данными о твердотельных моделях форматы STEP, IGES или Parasolid. Рассмотрим в качестве примера использование приложения T-FLEX Анализ для проверки надежности работы вала привода с угловой скоростью вращения до 900 об/мин (рис. 4.21).



*Рис. 4.21. Исходная сборочная модель вала со звездочками*

Для этого осуществим частотный анализ конструкции. Если собственные частоты вала не попадут в рабочий диапазон частот вращения, обеспечиваемый приводом, то можно быть уверенным в отсутствии резонансных явлений в работе механизма. Конструкция, на примере которой мы иллюстрируем работу с модулем частотного анализа, представляет собой сборочную трехмерную модель и состоит из нескольких отдельных твердотельных деталей.

### Шаг 2. Создание «Задачи»

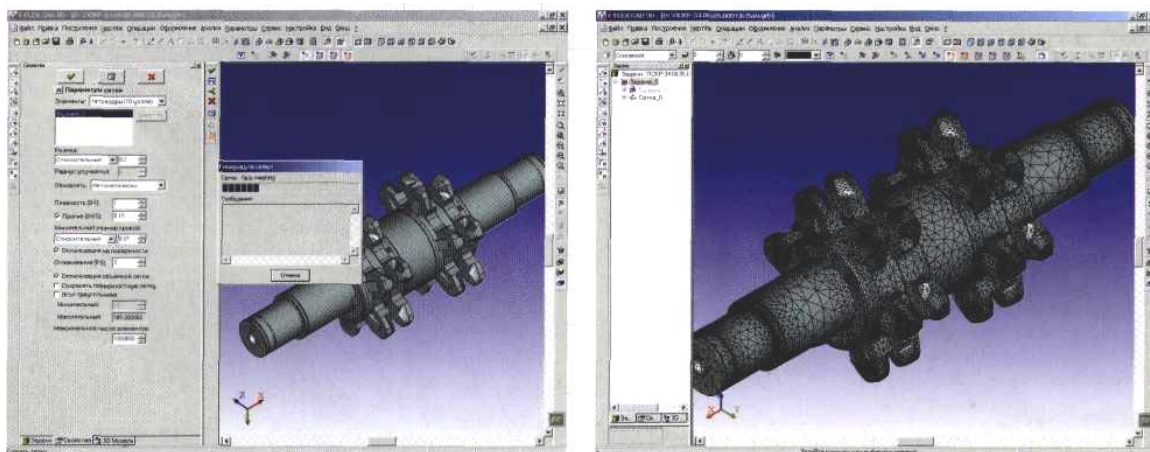
После того как трехмерная модель изделия была создана или импортирована в систему T-FLEX CAD 3D, можно приступать непосредственно к конечно-элементному моделированию. Любой расчет в T-FLEX/Анализ начинается с создания «Задачи» с помощью команды «Новая задача» меню «Анализ» T-FLEX CAD. При создании задачи определим ее тип: «Частотный анализ».

### Шаг 3. Задание материала.

Выберем для нашей конструкции материал «Сталь» из стандартной библиотеки материалов T-FLEX CAD 3D.

### Шаг 4. Генерация конечно-элементной сетки

Для осуществления конечно-элементного моделирования необходимо построение расчетной сетки из тетраэдральных элементов. Команда построения такой сетки (которая так и называется «Сетка») инициируется автоматически при создании «Задачи» или может быть вызвана пользователем из меню «Анализ» T-FLEX CAD. При создании сетки определяется степень дискретизации твердотельной модели указанием в параметрах ориентировочного размера конечных элементов (тетраэдров), при помощи которых будет описана математическая модель моделируемого изделия. Создадим конечно-элементную сетку для нашей конструкции (рис. 4.22).



*Рис. 4.22. Использование команды T-FLEX Анализ «Сетка» для построения конечно-элементной модели вала*

### Шаг 5. Наложение граничных условий. Задание закреплений

Для успешного решения физической задачи в конечно-элементной постановке, помимо создания конечно-элементной сетки, необходимо корректно определить так называемые граничные условия. В частотном анализе их роль выполняют закрепления. Этап задания граничных условий – очень ответственный и требующий хорошего понимания расчетчиком сути решаемой задачи. Поэтому, прежде чем приступить к наложению граничных условий, следует хорошо продумать физическую сторону задачи. Для задания закреплений в T-FLEX/ Анализ предусмотрены две команды: «Полное закрепление» и «Частичное закрепление». Команда «Полное закрепление» применяется к вершинам, граням и ребрам модели и определяет, что данный элемент трехмерного тела полно-

стью неподвижен, то есть сохраняет свое первоначальное расположение и не меняет своего положения под действием приложенных к системе нагрузок. Команда «Частичное закрепление» обладает более широкими возможностями: с ее помощью можно ограничить перемещение тела в определенных координатных направлениях или определить заданное положение элементов модели.

Зададим условия закрепления для нашей конструкции. Используя команду «Частичное закрепление», для опорных шеек вала зададим ограничение (нулевые перемещения) по осям  $Y$  и  $Z$  глобальной системы координат. Кроме того, с помощью той же команды исключим возможность продольного перемещения вала, наложив соответствующее ограничение на торцовую грань (рис. 4.23). После задания закреплений получена готовая для расчета конечно-элементная модель.

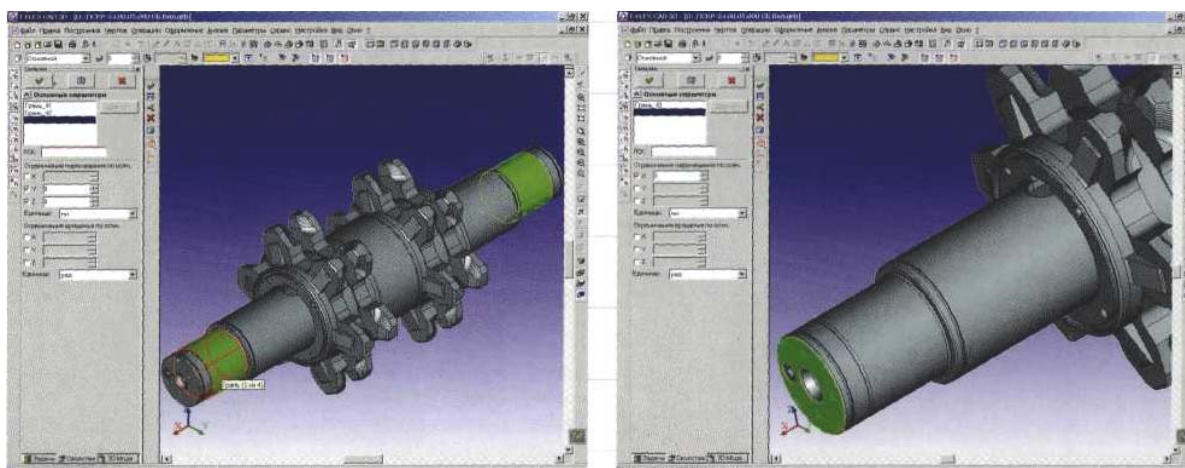


Рис. 4.23. Наложение граничных условий – задание закреплений

#### Шаг 6. Выполнение расчета

После создания конечно-элементной сетки и наложения граничных условий можно инициировать команду «Расчет» и запустить процесс формирования систем линейных алгебраических уравнений и их решения. В свойствах процессора можно определить такие дополнительные свойства, как точности вычислений или количество нижних собственных частот конструкции, подлежащих определению. Известно, что почти вся энергия механических колебаний аккумулируется на нескольких нижних гармониках изделия, поэтому при частотном анализе в первую очередь представляют интерес первые три-пять наименьших собственных частот.

## Шаг 7. Анализ результатов расчета

Результатами частотного анализа являются собственные частоты изделия и соответствующие им собственные формы колебаний. Формы колебаний представляют собой относительные амплитуды перемещений конструкции в узлах конечно-элементной сетки. По ним можно определить характер движения, осуществляемого системой на частоте колебаний, соответствующей собственной. Анализ результатов осуществляется в модуле постпроцессора системы T-FLEX Анализ.

Проанализируем полученные результаты. Первые две формы свободных колебаний конструкции соответствуют изгибным колебаниям вала с частотами, превышающими 135 Гц (рис. 4.24), что, в свою очередь, соответствует угловой скорости вращения, в девять раз превышающей максимальную рабочую для данного привода. Таким образом, согласно проведенному расчету, в рабочем диапазоне частот вращения резонансы данному валу не угрожают.

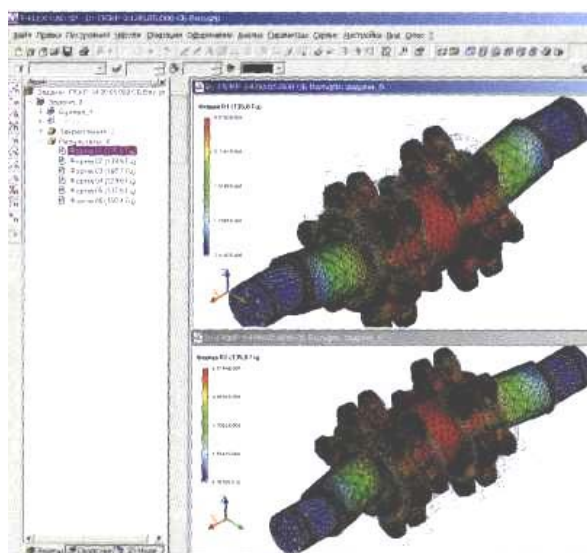


Рис. 4.24. Формы колебаний вала в окнах постпроцессора T-Flex/Анализ

Таким образом, система конечно-элементного моделирования T-FLEX Анализ позволяет осуществлять расчет собственных частот и форм колебаний конструкций.

### ***Анализ устойчивости конструкции***

Задача оценки устойчивости конструкций нередко возникает, особенно если конструкция имеет в составе много длинных или тонкостенных элементов, нагружаемых в процессе эксплуатации преимущественно

но вдоль своей оси или плоскости (рис. 4.25).

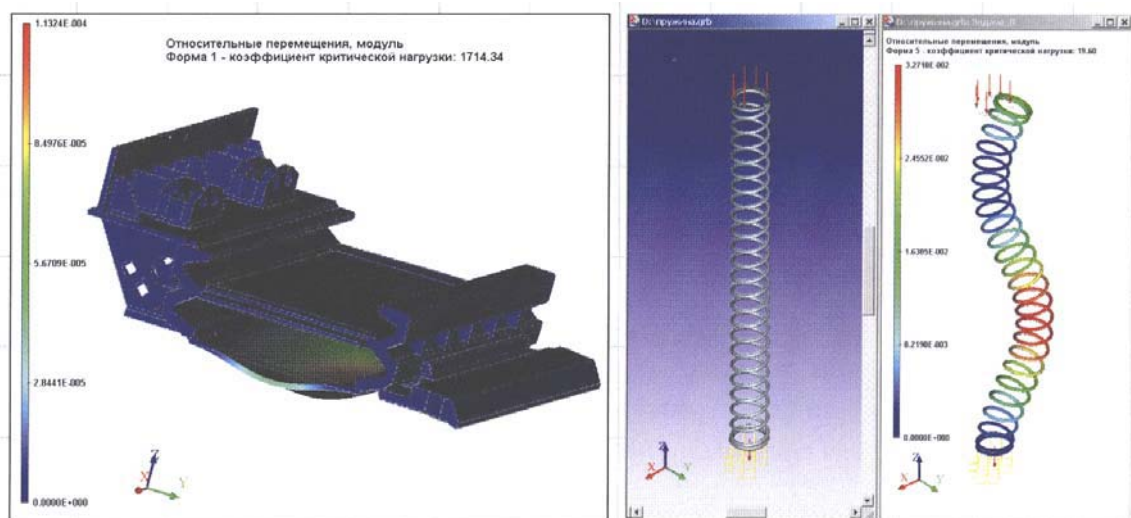


Рис. 4.25. Примеры решения задач на устойчивость в T-Flex/Анализ

Согласно теории устойчивости, равновесие статически нагруженной конструкции называют устойчивым, если малым возмущающим воздействиям соответствуют малые деформации. В определенных случаях нагружения конструкций возможна так называемая потеря устойчивости, когда малые возмущения приложенных к системе сил приводят к большим деформациям конструкции, выходящим за рамки линейной теории упругости. Нагрузки, при которых происходит потеря устойчивости, называют *критическими*, а соответствующие состояния – *критическими состояниями*. При сжимающих силах, даже незначительно превышающих критическое значение, дополнительные напряжения изгиба достигают весьма больших значений и угрожают прочности конструкции. Поэтому критическое состояние, как непосредственно предшествующее разрушению, считается недопустимым в условиях реальной эксплуатации. Явления потери устойчивости весьма разнообразны: появление качественно новых форм равновесия, исчезновение устойчивых форм равновесия и др.

Модуль анализа устойчивости предназначен для решения задачи так называемой начальной устойчивости конструкции. Результатом расчета являются коэффициент критической нагрузки, под действием которой конструкция может скачкообразно перейти в новое равновесное состояние, и соответствующая этой нагрузке форма нового равновесного состояния. Задача оценки устойчивости конструкций возникает в основном в том случае, когда основные силовые воздействия направлены вдоль оси некоторой стержневой, балочной или пластинчатой системы.

В этом случае возможна ситуация, когда критическая нагрузка, при которой произойдет потеря устойчивости и переход в новое равновесное состояние, может быть значительно меньше нагрузки, при которой произойдет потеря прочности конструкции по критериям линейного статически-напряженного состояния. Другими словами, хотя напряжения в материале конструкции еще не достигнут уровня напряжений пластичности материала, но деформации, вызванные потерей устойчивости, могут привести к разрушению конструкции. Таким образом, условие устойчивости по критерию критических нагрузок может быть сформулировано так:

**Фактические нагрузки, приложенные к конструкции, с учетом назначаемого коэффициента запаса, должны быть меньше расчетных критических нагрузок:**

$$F_{\text{фактические}} K_{\text{запаса}} < F_{\text{критические}}$$

Оценив значение критической нагрузки, при котором конструкция может потерять устойчивость, можно оптимизировать изделие с целью достижения условия надежности. Например, для протяженного объекта можно повысить устойчивость, уменьшив длину или увеличив толщину объекта.

В качестве примера, иллюстрирующего расчет устойчивости в среде T-FLEX/Анализ, рассмотрим расчет на устойчивость несущего элемента металлоконструкции подъемного механизма, нагруженного вдоль оси. Расчетная статическая нагрузка на опору составляет 5 кН. В общем случае последовательность действий следующая.

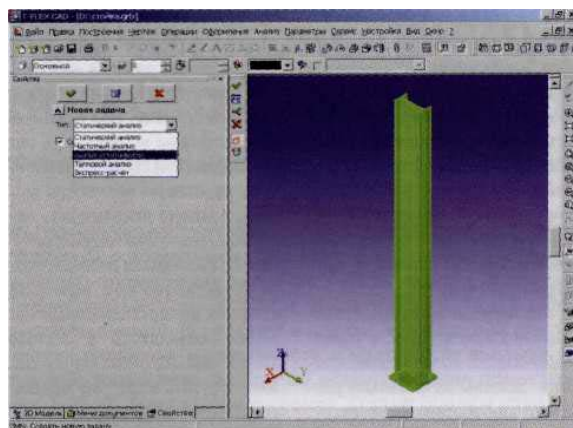
Шаг 1. Создание объемной твердотельной модели изделия.

Модель изделия, в нашем случае опоры, может быть построена в среде трехмерного моделирования T-FLEX CAD 3D. Это может быть рабочая модель, содержащая проекции и оформленные рабочие чертежи, участвующая в составе сборки. В нашем случае мы использовали для создания изделия стандартную библиотеку швеллеров T-FLEX CAD 3D, поставляемую вместе с системой.

Шаг 2. Создание задачи.

После того как трехмерная модель изделия будет создана, можно приступить непосредственно к подготовке к конечно-элементному моделированию. Любой расчет в T-FLEX Анализ начинается с создания задачи. Для осуществления расчета на устойчивость при создании задачи пользователь указывает ее тип «Анализ устойчивости» (рис.4.26). Затем необходимо определить материал изделия. По умолчанию в расчете используются характеристики материала «С операции». Этот режим особенно удобно применять, если в расчете участвуют тела из разных материалов.





*Рис. 4.26. Создание задачи анализа устойчивости для опоры металлоконструкции*

### Шаг 3. Создание сетки.

Для осуществления конечно-элементного моделирования необходимо построение расчетной сетки из тетраэдральных элементов. Тетраэдры аппроксимируют геометрию модели и используются для построения математической модели исходной конструкции.

По умолчанию команда построения такой сетки инициируется автоматически при создании задачи. При создании сетки определяются различные параметры дискретизации твердотельной модели.

**Шаг 4.1. Наложение граничных условий. Задание закреплений.** Для успешного решения задачи анализа устойчивости в конечно-элементной постановке, помимо создания конечно-элементной сетки, необходимо корректно определить так называемые граничные условия. В анализе устойчивости их роль выполняют закрепления и нагрузки. Для задания закреплений в T-FLEX Анализ предусмотрены специальные команды «Полное закрепление» и «Частичное закрепление». Задать закрепления для нашей конструкции.

**Шаг 4.2. Наложение граничных условий. Задание нагрузжений.** Для задания нагрузок в T-FLEX Анализ предусмотрен набор специализированных команд, позволяющих задать основные виды нагрузок («Сила», «Давление», «Вращение», «Ускорение», «Цилиндрическая нагрузка», «Крутящий момент»). Отметим, что задание нагрузок имеет большое значение для обеспечения корректности постановки задачи расчета начальной устойчивости. В частности, при определенных случаях нагружения решение задачи может не иметь физического смысла (например, стержень, растягиваемый продольной силой). В случае нашей конструкции приложим к системе заданную силу и силу тяжести.

Выполнив команды построения конечно-элементной сетки и задания закреплений и нагрузок, мы получаем готовую к расчету конечно-элементную модель.

#### Шаг 5. Выполнение расчета.

После того как для модели будет построена конечно-элементная сетка и наложены граничные условия (нагрузки и закрепления), можно запустить процесс формирования и решения линейных алгебраических уравнений анализа устойчивости. В процессе решения систем уравнений выводится диалог, отображающий основные этапы расчета и диагностические сообщения, а также текущее время решения уравнений (рис. 4.27).

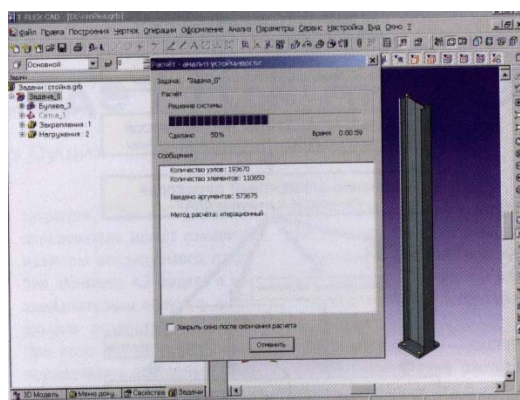


Рис. 4.27. Процесс решения систем уравнений

#### Шаг 6. Анализ результатов расчета на устойчивость.

По окончании решения систем уравнений в дереве задач появятся результаты. Результатами анализа устойчивости являются два основных параметра (рис. 4.28):

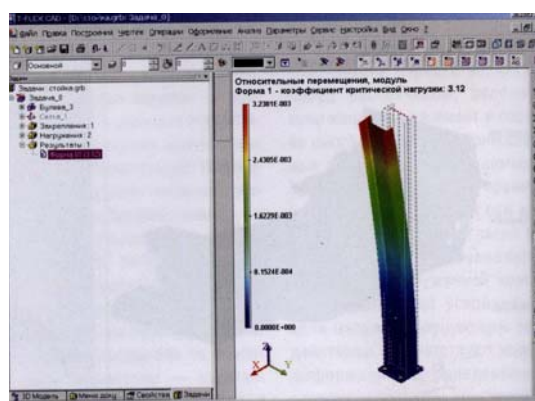


Рис. 4.28. Результаты расчета устойчивости

*Коэффициент критической нагрузки* – расчетное значение коэффициента, произведение которого на приложенные к системе нагрузки

дает фактическое значение критической нагрузки, приводящей систему в неустойчивое состояние. Например, для нашей модели коэффициент критической нагрузки по результатам расчета составил 3,12. Это означает, что первая форма устойчивого равновесного состояния для данной модели имеет критическую нагрузку 15,6 кН.

*Относительные перемещения*, соответствующие данной критической нагрузке. Этот тип результата отражает форму равновесного устойчивого состояния конструкции, соответствующую определенной критической нагрузке. Формы равновесных состояний, отображаемые в окне постпроцессора после завершения расчета, представляют собой относительные перемещения. Анализируя эти формы, можно сделать заключение о характере перемещений в случае потери устойчивости.

Для сравнения выполним также статический расчет конструкции при заданных условиях нагружения. Для этого, используя инструменты управления задачами T-FLEX/Анализ, создадим копию задачи и, изменив ее тип на «Статический анализ», осуществим расчет.

Интересно сравнить полученные результаты (рис. 4.29). По результатам статического расчета мы получаем коэффициент запаса 13,56, а по результатам анализа устойчивости – 3,12. На этом примере хорошо видно, что по критерию потери устойчивости конструкция имеет гораздо меньший запас прочности, чем по критерию линейного упругого состояния.

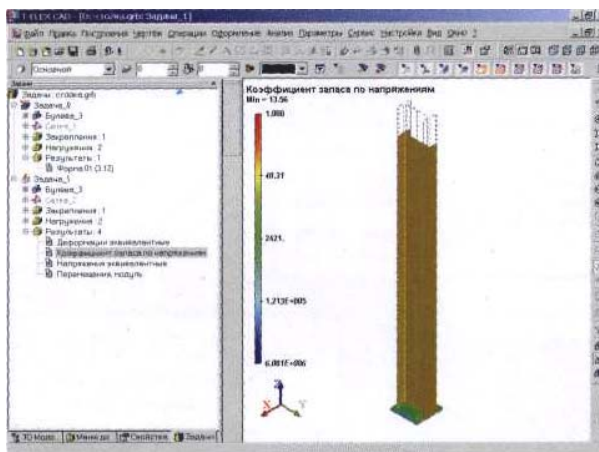


Рис. 4.29. Коэффициент запаса по напряжениям в статическом расчете

Таким образом, пользователи T-FLEX CAD 3D имеют в своем распоряжении удобный современный инструмент для оценки начальной устойчивости конструкций.

## 5. ВЫБОР САД-СИСТЕМЫ

### 5.1. Проблема выбора САД-системы

Выбор той или иной САД-системы имеет большое значение для успешной автоматизации подготовки производства [27,28]. Это связано с тем, что затраты на приобретение и внедрение современных САД-систем весьма значительны. Кроме того, процесс внедрения новой системы связан с необходимостью переподготовки инженерно-технических работников, ломки их привычного стиля работы. Поэтому необходимо тщательно подходить к процессу выбора САД-систем. Первым шагом при этом является формулирование критериев выбора.

#### *Критерии выбора*

Единых правил формирования критериев выбора САД-систем в настоящее время не существует. Это связано с тем, что каждое предприятие имеет свои индивидуальные особенности как производственного, так и организационного характера. Поэтому формирование критериев выбора, сам выбор и дальнейшее внедрение систем САПР на различных предприятиях происходит по-разному.

При принятии решения важно учитывать следующее:

- применяемые алгоритмы моделирования, определяющие скорость работы системы;
- методы организации хранения данных, влияющие на возможность управления информацией;
- диапазон и специфику решаемых задач, определяющие масштабы применения системы;
- возможность интеграции или совмещения со смежными САПР;
- стоимость приобретения системы;
- стоимость эксплуатации (поддержки) системы.

Количество критериев для выбора подходящего программного обеспечения, в принципе, может быть каким угодно. Чем больше подразделений и специалистов участвуют в принятии решения, тем больше требований к продукту.

Сначала следует выбрать главные критерии, а уже потом перейти к выбору конкретной системы САПР. Чего же следует ожидать от внедрения САД-системы? В первую очередь улучшения экономических показателей деятельности предприятия, а именно – сокращения затрат и сроков на проектирование и подготовку производства, а также повышения качества выпускаемой продукции. Другой немаловажный аспект – привлечение и закрепление кадров за счет современной культуры про-

ектирования и производства, которую несет в себе автоматизация на базе программно-аппаратных комплексов. Однако это присуще практически всем современным системам и проводить какой-либо анализ в этом плане бессмысленно.

Итак, показатели эффективности. Начнем с сокращения сроков на проектирование и подготовку производства. Они напрямую влияют на расходы и, самое главное, на маневренность в условиях переменного спроса на продукцию. Первое, за счет чего позволяют экономить время САПР – обмен и хранение данных в виде электронных документов. Это общее свойство распространяется на все компьютерные технологии, однако важнейшим критерием при выборе САПР является вопрос о «всеядности» системы. Насколько широки возможности системы в части приема-передачи данных в признанных стандартах и протоколах, каков уровень интерфейсной части системы.

Единственный способ разобраться в качестве интерфейсов импорта/экспорта – опытная эксплуатация системы. Многие компании предоставляют подобный вид услуг бесплатно или за некую условную плату до принятия решения о покупке. Если есть такая возможность, то, получив систему, в первую очередь следует заняться именно этим.

Для проведения тестирования необходимо иметь набор файлов в различных форматах (DXF, IGES, STEP, SAT и т. п.), созданных другими САПР. При этом предварительно стоит проверить, способна ли та или иная система читать то, что она сама записала.

Применение на практике систем моделирования дает ощутимые результаты по времени и качеству. В том случае, когда моделирующая система соединена в единую цепочку с модулем проектирования управляющих программ для станков с ЧПУ, сокращение сроков подготовки производства становится просто фантастическим! Стоимость систем (модулей) среднего уровня объемного моделирования сегодня варьируется от 2 до 9 тыс. \$.

Систему геометрического моделирования надо обязательно брать в опытную эксплуатацию – только так можно понять, подойдет ли она для конкретных задач. Следует только помнить, что объемное моделирование требует определенных навыков работы, причем с конкретной системой.

Из вышесказанного можно сформулировать примерный перечень критериев выбора САПР:

– *САПР должна автоматизировать работу.* Инструменты САПР должны экономить ваше время, обеспечивать продуктивность и не противоречить традиционному проектированию.

– САПР должна быть надежной. Не следует забывать, что данные, хранящиеся в электронной форме, недоступны для прямого чтения (для доступа к ним как минимум нужны компьютер и специальная программа).

– САПР должна быть доступной. Если после покупки САПР вы не сможете пройти необходимого обучения или не на высоте окажется техническая поддержка, нормальная работа любой САПР (даже самой легкой и умной) маловероятна.

– САПР должна быть открытой. Если систему нельзя настроить или доработать под потребности предприятия, выбор такой системы – ошибка!

– САПР должна быть универсальной. Следует остерегаться приобретать САПР, которая «сама в себе», даже если она и устраивает по функциональным возможностям. Необходимо подумать о смежниках и масштабируемости системы.

### ***Рекомендации по выбору и внедрению САД-систем***

На основе вышеизложенного можно рекомендовать следующий порядок автоматизации проектно-конструкторских работ:

1. Определение требований, предъявляемых к программному обеспечению.

2. Формирование критериев выбора.

3. Ознакомление с различными САД-системами по материалам рекламного характера, периодической печати и д.п. с последующим выбором 2-3 наиболее подходящих.

4. Подробное ознакомление с выбранными системами (посещение семинаров, предприятий, использующих системы) и выбор наиболее подходящей САД-системы.

5. Обучение группы работников у разработчика САД-системы.

6. Внедрение на нескольких рабочих местах выбранной системы в опытно-промышленную эксплуатацию. На данном этапе целесообразно максимально загрузить эксплуатируемые системы сложными задачами с целью выявления недостатков. При возникновении претензий сообщать разработчику для устранения.

7. По завершении опытно-промышленной эксплуатации коллектив, участвующий в ней, должен представить отчет, в котором должны быть представлены все возникшие проблемы и их устранение. В заключении отчета должен быть сделан вывод о целесообразности приобретения и внедрения САД-системы на предприятии.

8. В случае отказа от приобретения САД-системы следует взять в опытно-промышленную эксплуатацию САД-систему другого разработчика и протестировать ее аналогично предыдущей.

9. Если в результате опытно-промышленной эксплуатации принято решение о приобретении системы, следует внедрять ее на рабочие места поэтапно, т.е. начав с наименее загруженных рабочих мест, в течение 2-3 месяцев внедрять на остальных. При этом, если имеется возможность, на наиболее ответственных рабочих местах новая система должна внедряться в последнюю очередь.

Эффект от внедрения САПР появится не сразу. Процесс это достаточно длительный и связан с перестройкой мышления персонала и руководства предприятия. Зачастую возникает сопротивление сотрудников изменениям – это естественная человеческая реакция на новое. Автоматизация проектирования – новый процесс для предприятия, поэтому нужно проводить разъяснительную работу среди сотрудников, ведь они могут просто не понимать, к чему ведет внедрение САПР.

## **5.2. Проблема подготовки кадров для САПР**

Нехватка квалифицированных специалистов в области САПР – актуальная проблема сегодняшнего дня. Это касается как специалистов, умеющих работать на компьютерах в системах САПР, так и высококвалифицированных проектировщиков.

Несмотря на то, что специалистов по САПР готовят чуть ли не в каждом техническом ВУЗе, выпускники не готовы к реальной работе. Реальное положение дел таково, что современный выпускник имеет иллюзорное представление о своей профессии [11], не владеет приемами реальной работы, не разбирается в современных нормативных требованиях, не умеет читать чертежи, не обладает навыками оформления рабочей документации. Выпускник ВУЗа имеет самое смутное представление о составе выполняемого проекта и комплектации технических документов, организации проектного труда. Требуется еще несколько лет, чтобы подготовить из него квалифицированного проектировщика.

Для предприятия, нуждающегося в таких специалистах, есть два пути. Это купить готового специалиста на рынке труда или подготовить непосредственно в процессе практической работы. Но купить готового специалиста крайне трудно – хорошие специалисты редко меняют работу. А подготовка в процессе работы связана с тем, что обучать его просто некогда. Времени у других специалистов на это нет, поэтому эффективность такого обучения крайне низкая.

Проблема подготовки квалифицированных кадров в современных условиях может быть решена только нестандартными путями.

Их, в первую очередь, предлагают производители программного обеспечения. Вот варианты таких путей.

1. Производитель ПО готов буквально завалить дешевыми или бесплатными учебными лицензиями всех, кто так или иначе имеет отношение к образованию в области САПР. Он прекрасно понимает – это лучший способ «приручить» свой рынок.

2. Производитель/поставщик ПО проводит целенаправленную работу с техническими вузами: организует презентации, переподготовку преподавателей, широко публикует информацию и рекламу в учебной литературе и профессиональной прессе. Цель – максимальная популяризация САПР в будущей профессиональной среде.

3. Производитель ПО организует профильные учебные центры в первую очередь у себя, в качестве самостоятельного бизнес-направления, а также у наиболее крупных клиентов, где выполняются проекты по внедрению САПР.

4. Потенциальный заказчик стремится организовать с помощью поставщика ПО повышение квалификации и обучение своих сотрудников, понимая, что только так он сможет организовать это качественно.

5. При заключении контракта на поставку ПО заказчик стремится наиболее полно использовать интеллектуальный ресурс поставщика/разработчика: в контракт включаются консалтинговые услуги, тестирование и оценка качества персонала, разработка оптимального плана графика обучения.

6. Заказчик организует собственный учебный центр и заинтересован в передаче методики обучения САПР от поставщика/производителя. Отраслевой специализированный центр сможет более квалифицированно применять САПР при обучении практическим приемам проектной работы.

Подходы при взаимодействии с ВУЗами у проектных организаций и разработчиков ПО разные.

Проектные организации ведут в отношении ВУЗов реалистичную и осторожную политику. Понимая, что прямая «закачка» средств в университеты – это безнадежный путь в убытки, такие организации напрямую сотрудничают с отдельными структурами ВУЗа, имеющими солидную репутацию, авторами методик, экспертами. Это гарантия того, что вместо конкретной работы не будет предложена имитация.

От отечественных высших технических школ производители и поставщики САПР ждут продуктивного сотрудничества, поскольку



именно преподаватели-исследователи являются главными генераторами идей и постановщиками задач при создании САПР. И именно в САПР концентрируется проектно-аналитическая методология современного проектирования. Создание и развитие САПР является наиболее приоритетной задачей для прикладной науки. Если раньше ученый или специалист-практик предлагал теории создания машин, методику проектирования строительных конструкций, различные теории расчетов, то теперь он участвует в создании соответствующего CAD/CAM/CAE-продукта.

Поставщики/разработчики САПР еще находятся в плену иллюзий относительно высшей школы. Бывает, они встречаются с ректорами, деканами, организуют семинары для преподавателей, проводят PR-акции по раздаче бесплатных лицензий. Их вежливо благодарят, жмут руки, и больше ничего не делается. Коробки с ПО либо пылятся на какой-нибудь кафедре, либо растворяются среди преподавателей. Надежды на широкое применение САПР в учебном процессе оказываются ложными – педагоги высшей школы в большинстве своем смогут лишь поверхностно ознакомить своих студентов с простейшими приемами компьютерной графики. В большем они не заинтересованы, у них другие задачи.

Что же должны совместно делать производители/продавцы ПО и инжиниринговые компании-клиенты – потребители их продукции?

1. Необходимо всемерно поддерживать становление отраслевых и корпоративных учебных центров, помогать их развитию. Только там можно обеспечить подготовку специалиста, связать задачи обучения с практической проектной работой.

2. Нужно совместно добиваться систематической подготовки специалистов, выстраивая систему непрерывного ротационного обучения. Только постоянно повышая квалификацию, можно увеличивать производительность труда. Малейшая остановка будет вести к непрерывной текучке кадров.

3. Следует более четко определить границы сотрудничества в образовательной сфере поставщика ПО и клиента. Разработчик/продавец САПР может обеспечить лишь начальное освоение своих систем специалистами клиента (базовое обучение). Поставщик ограничен временем выполнения контракта, его главная задача – максимально быстрая разработка и совершенствование своих продуктов. Поэтому основная форма обучения у продавца – короткие тренинг-курсы. Более основательное и детальное изучение САПР требует уже других подходов.

4. Поскольку возможности обучения ограничены временем, а само обучение при этом исключительно востребовано, нужно приступить к разработке методик обучения на технологичных программных плат-

формах, применив опыт разработки САПР к созданию систем обучения этим САПР.

5. По отношению к ВУЗам вести себя очень разумно и прагматично. В современных условиях высшая школа должна выступать в роли нормального делового партнера-клиента.

6. Следует ввести практику заказных исследований и открытых конкурсов по постановке задач в области САПР для преподавателей высшей школы, то есть предоставлять гранты. Это позволит эффективно использовать опыт адекватных своему времени преподавателей, работающих в отечественном образовании.

## **6. ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ**

В этой главе приводятся примеры эффективного использования современных технологий проектирования на различных этапах жизненного цикла изделия.

### **6.1. Комплекс T-FLEX - единая программно-технологическая платформа поддержки жизненного цикла изделия**

Изделие, выпущенное на современном производстве, является результатом и материальным носителем совместных усилий специалистов в области маркетинга и менеджмента, дизайнеров, проектировщиков, технологов, производителей. На этапе эксплуатации изделие возвратит весь потенциал, заложенный в него трудом сотен людей, и в конце концов уйдет в небытие, т.е. цикл замкнется. Идея поддержки и сопровождения жизненного цикла изделия – это объективное требование сегодняшнего дня. Наибольшего успеха в этой области в настоящий момент удалось добиться на этапе проектирования и производства изделия.

Именно здесь формируется основной объем информации о продукте в целом, а также о его параметрах и особенностях изготовления, во многом определяющих эксплуатационные характеристики.

Комплекс программных продуктов, распространяемый на рынке CAD/CAM/CAE/PDM-систем российской компанией АО «Топ Системы» под торговой маркой T-FLEX, предназначен для решения задачи комплексной автоматизации проектирования и производства изделий машиностроения и приборостроения. Будучи интегрированным решением, комплекс T-FLEX выступает в роли программно-технологической платформы для поддержки и сопровождения важнейших этапов жизненного цикла изделия: проектирования и конструирования, разработки технологического процесса производства, проектирования оснастки, генерации управляющих программ для обрабатывающего оборудования.

Комплекс T-FLEX архитектурно построен по модульному принципу с обеспечением тесной интеграции между модулями. В отличие от распространенного подхода, основанного на передаче данных между модулями с помощью экспортно-импортных операций, T-FLEX реализует интеграцию за счет низкоуровневых механизмов обмена данными. По сути, это означает работу специализированных модулей комплекса с одним и тем же объектом и исключает потребность в трансляции данных. С одной стороны, при этом гарантируется отсутствие искажений при передаче модели для работы другого модуля, с другой – изменения,

внесенные в модель изделия, становятся доступными всем модулям комплекса. В полном объеме мощь этого ассоциативного механизма проявляется при реализации сквозного процесса проектирования и технологической подготовки производства изделия.

Процесс проектирования и технологической подготовки производства в системе T-FLEX упрощенно выглядит следующим образом. С помощью модуля геометрического моделирования T-FLEX CAD создается параметрическая твердотельная модель будущего изделия. Мощный инструментарий модуля позволяет получать самые сложные модели, не уступая в этом современным западным системам твердотельного моделирования. Модель представляет собой цифровой образ объекта, хранит историю создания (последовательность операций), информацию о свойствах и может быть либо сохранена в виде совокупности файлов, либо экспортирована в любой из известных форматов. По трехмерной модели изделия можно получить всю необходимую конструкторскую документацию (чертежи и спецификации) в полном соответствии с действующими российскими стандартами. Модель выступает ключевым элементом, за обработку которого отвечают остальные модули комплекса. Модуль автоматизации проектирования технологических процессов T-FLEX Технология использует геометрию модели для разработки соответствующего техпроцесса. T-FLEX ЧПУ по модели генерирует управляющую программу для обрабатывающего оборудования. T-FLEX Динамика обеспечивает проведение динамического анализа конструкции. Модуль T-FLEX Штампы позволяет по модели спроектировать штамповую оснастку, а T-FLEX Пресс-формы автоматизирует проектирование пресс-форм для литья термопластов под давлением. Модуль T-FLEX Анализ разбивает модель на конечно-элементную сетку и моделирует поведение изделия под воздействием силовых и тепловых нагрузок.

Все полученные данные сохраняются в соответствующих файлах, обеспечивая накопление информации об изделии в соответствии с технологией поддержки жизненного цикла изделия (CALS). Упомянутые файлы представляют собой электронные документы, а их хранение, редактирование и сопровождение обеспечивается системой электронного документооборота T-FLEX DOCs. Таким образом, комплекс T-FLEX позволяет охватить основные этапы жизненного цикла изделия за исключением эксплуатации и утилизации. При этом гарантируется полнота, целостность и актуальность информации об изделии, а также ее прозрачность и доступность в соответствии с предоставленными правами доступа, что является ключевыми требованиями стандартов серии ISO 9000 «Системы качества».

## **6.2. Моделирование двигателя внутреннего сгорания в T-FLEX CAD 3D**

В качестве примера эффективного использования современных технологий проектирования приведем опыт моделирования двигателя внутреннего сгорания на кафедре «Теплотехника и автотракторные двигатели» Московского автомобильно-дорожного института, где в процесс моделирования были включены студенты [26].

Двигатель внутреннего сгорания (ДВС) является сложной системой, поэтому его расчет и анализ весьма трудоемки. Сегодня с развитием систем твердотельного моделирования появилась возможность упрощения процессов проектирования как двигателя целиком, так и его отдельных компонентов. Кроме того, при использовании встроенных операций в комплексах твердотельного моделирования возможно получение информации, которая до этого находилась путем сложных расчетов, занимавших много времени. Например, с помощью операции «Характеристики» в системе T-FLEX CAD 3D можно определить следующие параметры: площадь поверхности, объем, массу, положение центра масс относительно выбранной системы координат, а также моменты инерции относительно осей заданной системы координат. Эта информация является весьма ценной для качественного проектирования ДВС, а трудоемкость ее получения при ручном проектировании или при работе в системах 2D-проектирования несопоставимо выше.

На кафедре «Теплотехника и автотракторные двигатели» Московского автомобильно-дорожного института (МАДИ (ГТУ)) накоплен большой опыт по созданию САПР «ДВС». В рамках этой деятельности для отработки подходов к построению САПР и для уточнения методик проектирования перед студентами специальности «Двигатели внутреннего сгорания» была поставлена задача смоделировать отдельные механизмы реально существующего двигателя внутреннего сгорания. В качестве прототипа был выбран двигатель ВАЗ-21083. На основании имеющихся чертежей общего вида были смоделированы параметрические модели кривошипно-шатунного механизма (КШМ), механизма газораспределения (МГР) и привода распределительного вала.

Система T-FLEX CAD содержит обширный набор функций для решения поставленной задачи. В частности, возможность вставки как 2D-, так и 3D-фрагментов позволяет создавать модели двигателей нужной компоновки, будь то линейная или V-образная. А использование диалогов для вставки фрагментов позволяет специалистам быстро создавать отдельные компоненты САПР, которые будут использоваться многими проектировщиками. При решении поставленной задачи эта

возможность очень важна. Можно создавать двумерные чертежи и трехмерные модели отдельных деталей механизмов, а потом формировать ДВС нужной компоновки. Если потребуется заменить, например, поршень, то благодаря поддержке системой механизма функциональных замен вся задача сведется лишь к изменению названия файла фрагмента. При этом все взаимосвязи между элементами сборки сохранятся.

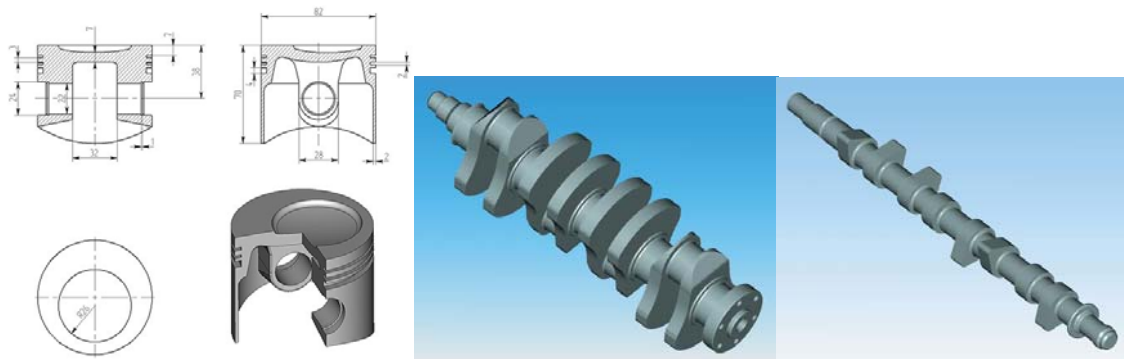
Указанная задача решалась в несколько этапов:

1. Создание двумерных чертежей и трехмерных моделей отдельных деталей.
2. Создание двумерных и трехмерных сборок первого уровня.
3. Создание сборок механизмов КШМ и МГР без привода распределительного вала.
4. Создание сборки механизмов КШМ и МГР вместе с приводом распределительного вала.
5. Анимация полученных сборок КШМ, МГР и КШМ, МГР и привод распределительного вала.

Рассмотрим более подробно каждый этап.

### **Создание двумерных чертежей и трехмерных моделей отдельных деталей**

Для выполнения поставленной задачи студенты были объединены в три группы. Одна группа моделировала КШМ, другая – МГР без привода распределительного вала, третья – привод распределительного вала. Все работы производились с использованием двух чертежей общего вида, где были обозначены размеры отдельных деталей. При моделировании отдельных деталей узлов необходимо было достичь максимальной параметризации чертежей, а T-FLEX CAD в полной мере предоставляет такие возможности. В результате были созданы двумерные параметрические чертежи отдельных элементов двигателя и их трехмерные модели (рис. 6.1).



*Рис. 6.1. Чертеж и 3D-модели элементов двигателя*

## Создание двумерных и трехмерных сборок первого уровня

На основе полученных моделей были созданы сборки первого уровня отдельных узлов в механизмах двигателя: поршневой группы и группы шатуна в КШМ, клапанные узлы, привод распределительного вала. Здесь следует особо отметить возможность разбирать данные сборки с помощью специальной команды «Разборка», что дает наглядное представление об устройстве сборочного узла (рис. 6.2).

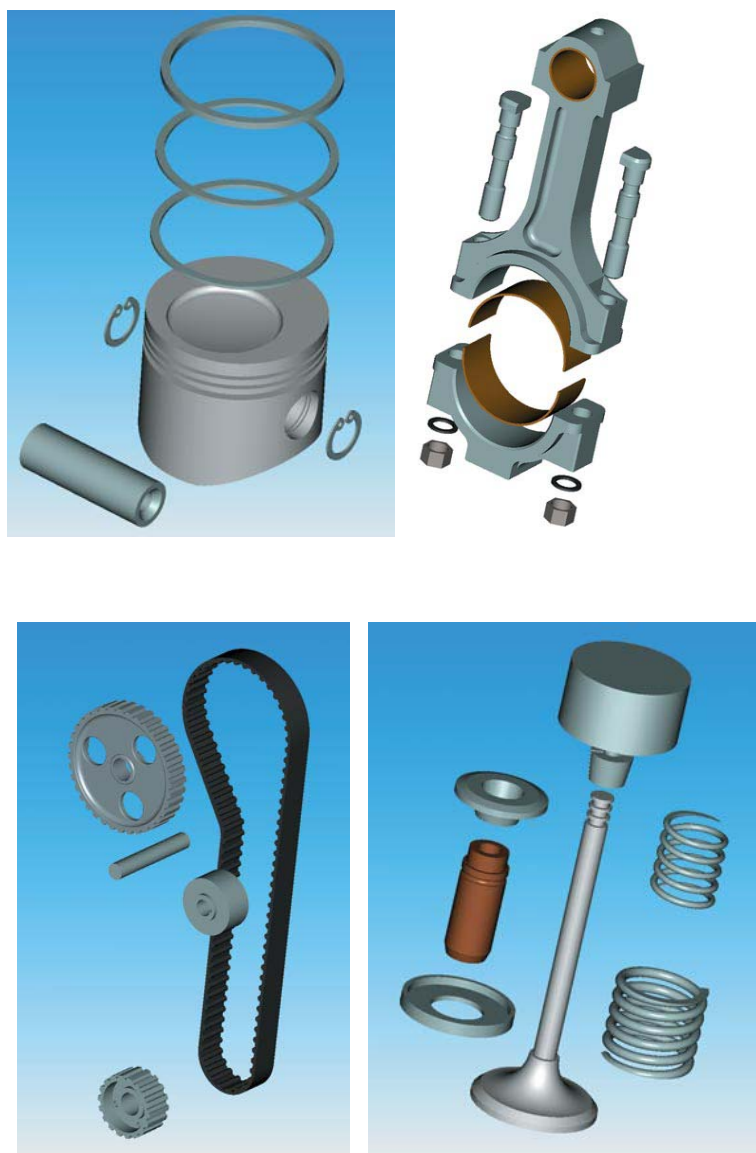


Рис. 6.2. Сборки отдельных узлов двигателя

## Создание сборок механизмов КШМ и МГР

На данном этапе моделирования создавались сборки отдельных механизмов (рис. 6.3). Эти элементы называются сборками второго уровня, так как в их составе, помимо обычных фрагментов, присутствуют и сборки первого уровня.

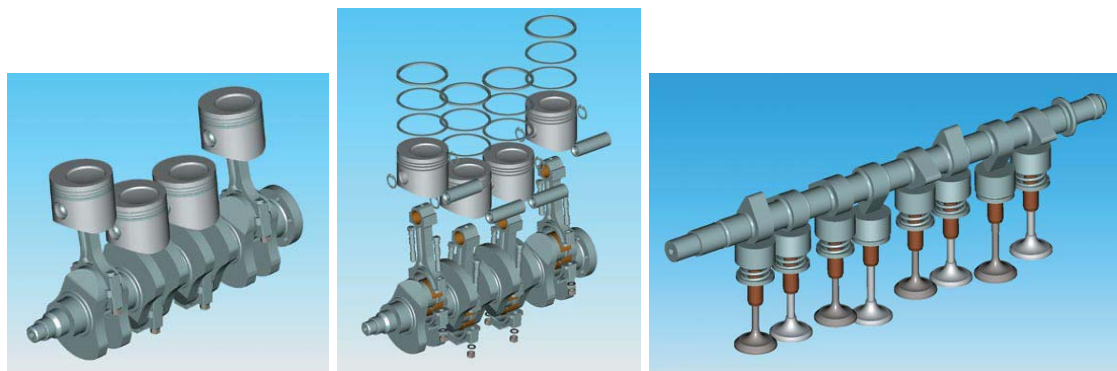


Рис. 6.3. Сборки отдельных механизмов двигателя

## Создание сборки механизмов КШМ и МГР вместе с приводом распределительного вала

Это самый сложный этап всей операции моделирования, но не в плане сборки, а в плане обеспечения такого взаимного положения всех смоделированных элементов, чтобы они соответствовали реальной картине при движении механизмов.

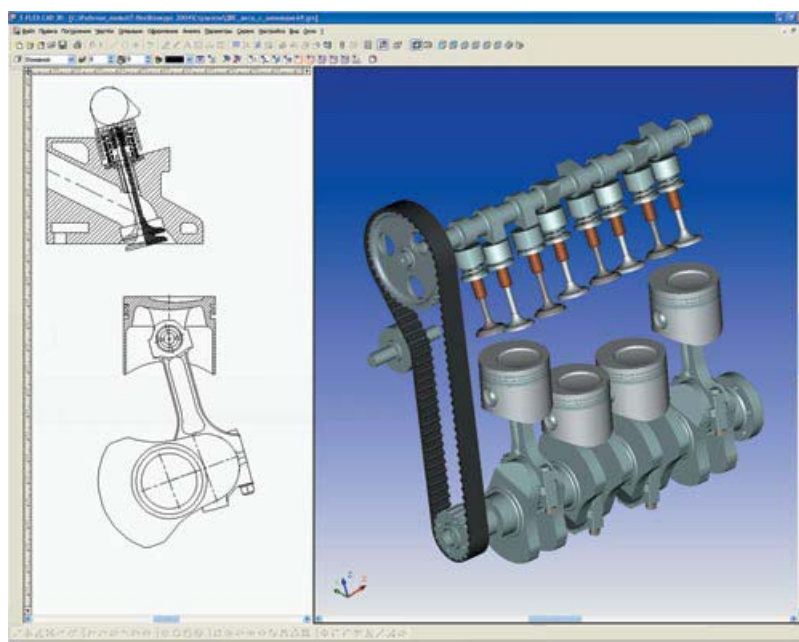
Сборка создавалась с помощью уже упомянутой операции вставки фрагментов с использованием трех файлов, содержащих по отдельности КШМ, МГР без привода распределительного вала и привод распределительного вала. После вставки соответствующих фрагментов в их переменные записывались необходимые выражения для того, чтобы осуществить правильность установки фаз газораспределения в соответствии с их реальными значениями. Общий вид сборки представлен на рис. 6.4.

## Анимация полученных сборок КШМ, МГР, КШМ и МГР и привода распределительного вала

Параллельно с созданием параметрических чертежей и трехмерных моделей указанных механизмов проводилась их анимация, которая осуществлялась следующим образом. В КШМ задавалась переменная, задающая угол поворота коленчатого вала, а на чертеже КШМ эта пе-



ременная присваивалась реальному углу между кривошипом коленчатого вала и осью цилиндра.



*Рис. 6.4. Общая сборка двигателя*

Далее в процессе создания каркасной схемы КШМ все последующие построения связывались с указанным углом. После этого в диалоговом окне операции «Анимация» в качестве изменяемой переменной задавалась переменная угла, затем указывались диапазон значений (как правило, два оборота, то есть  $720^\circ$ ), шаг анимации и некоторые дополнительные параметры, например название камеры, с которой осуществлялась запись, название файла, в который осуществлялась запись анимации, название кодека для записи и т.д.

Анимация МГР имела некоторые отличия: за основу был выбран поворот распределительного вала, задавались законы движения клапанов и фазовый сдвиг, соответствующий порядку работы цилиндров двигателя.

При создании анимации сборки «КШМ, МГР и привод МГР» основной переменной являлся угол поворота коленчатого вала, к которому привязывались переменные соответствующих фрагментов. Кроме того, проверялась правильность установки фаз газораспределения.

После анимации указанных механизмов, сборки и записи видеороликов с анимацией был сделан фильм, в котором были представлены не только вышеназванные видеоролики с анимацией, но и видеоролики, показывающие работу отдельных деталей и узлов механизмов.

Возможности T-FLEX для моделирования всего двигателя и его отдельных деталей и механизмов очень широки и этот комплекс предоставляет для решения данной задачи обширный набор инструментов, который динамично расширяется.

По итогам применения системы T-FLEX CAD 3D на кафедре можно сделать следующие выводы:

1. За год использования системы T-FLEX CAD 3D разработаны методы формализованного 3D-описания применительно к поршневому двигателю внутреннего сгорания.

2. Созданы макеты отдельных модулей моделирования конструкции ДВС.

3. Отработана методика обучения студентов навыкам коллективного проектирования деталей и механизмов ДВС.

4. На основе полученного опыта была разработана программа дальнейших работ по созданию САПР ДВС на основе системы T-FLEX CAD 3D, которая включает создание моделей других систем двигателя (в частности, планируется создание модели системы питания дизельного двигателя, моделирование процессов, происходящих при работе системы).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шехонин А.А., Домненко В.М., Гаврилина О.А. Методология проектирования оптических приборов: учебное пособие – СПб: Изд-во СПбГУ ИТМО, 2006. – 91 с.
2. ГОСТ Р ИСО 10303-1-99. Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Часть 1. Общие представления и основополагающие принципы. – Введ. 2000-01-07. – М.: Изд-во стандартов, 1999. – 27 с.
3. Джонс, Дж.К. Методы проектирования / Пер. с англ. Г. Бурмистровой, И.В. Фриденберга; под ред. В.Ф. Венды, В.М. Мунипова. 2-е изд. – М.: Мир, 1986. – 326 с.
4. Зильбербург Л.И., Молочник В.И., Яблочников Е.И.. Реинжиниринг и автоматизация технологической подготовки производства в машиностроении. – СПб: Компьютербург, 2003. – 152 с.
5. Марка Д., Мак-Гоуэн К.. Методология структурного анализа и проектирования / Пер. с англ. – М.: Метатехнология, 1993. – 240 с.
6. Норенков И.П. Информационная поддержка наукоемких изделий. CALS-технологии / И.П. Норенков, П.К. Кузьмик. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 320 с.
7. Р 50.1.031-2001. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Терминологический словарь. Часть 1. Стадии жизненного цикла продукции. – Введ. 2002-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 32 с.
8. Судов Е.В. Концепция развития CALS-технологий в промышленности России / Е.В. Судов [и др.]. – М.: НИЦ CALS-технологий «Прикладная логистика», 2002. – 129 с.
9. Родионов С.А., Шехонин А.А. Методология проектирования оптических приборов: учеб. пособие / под общ. ред. проф. М.И. Потеева. – СПб.: Изд-во СПбГИТМО(ТУ), 1996. – 84 с.
10. Хилл П. Наука и искусство проектирования / П. Хилл; Пер. с англ. Е.Г. Коваленко; под ред. В. Ф. Венды. – М.: Мир, 1973. – 262 с.
11. Ишмяков А.. Заглянуть за горизонт... // CAD master. – 2007. – № 5. – С. 16-19.
12. Латышев П.Н.. Каталог САПР. Программы и производители. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2006. – 608 с.
13. ГОСТ 23501.108-85. Системы автоматизированного проектирования. Классификация и обозначение.
14. ГОСТ 23501.101-87. Системы автоматизированного проектирования. Основные положения.
15. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE). – СПб.: Питер, 2004. – 560 с.

16. Корячко В.П., Курейчик В.М., Норенков И.П. Теоретические основы САПР. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
17. Кузина И.В., Жданов В.С., Денисова Т.С., Ваганова М.Ю. Математическое обеспечение САПР элементов и систем автоматики: Текст лекций. – М.: МИЭМ, 1990.
18. Норенков И.П. Системы автоматизированного проектирования. Кн. 1: Учеб. пособие для втузов. - М.: Высшая школа, 1986.
19. Материалы сайта <http://www.cadalyst.com>.
20. Справочник по САПР / А.П. Будя, А.Е. Кононюк, Г.П. Куценко и др.; Под ред. В.И. Скурихина. – К.: Тэхника, 1988. – 375 с.
21. Разработка САПР. В 10-ти книгах; под ред. д.т.н., проф. А.В. Петрова. – М.: Высшая школа, 1990.
22. Сущих А., Ануфриков П. T-Flex Анализ – новая интегрированная среда конечно-элементных расчетов // САПР и графика. – 2004. – № 9. – С. 46-51.
23. Сущих А., Ануфриков П. Статические прочностные расчеты конструкций в среде T-Flex Анализ // САПР и графика. – 2004. – № 10. – С. 78-82.
24. Сущих А., Ануфриков П. Расчет собственных частот и форм колебаний в среде T-Flex Анализ // САПР и графика. – 2004. – № 11. – С. 52-56.
25. Ануфриков П., Козлов С., Сущих А.. Расчет конструкций на устойчивость в среде T-Flex Анализ // САПР и графика. – 2005. – № 5. – С. 58-62.
26. Яковенко А. Возможности моделирования двигателя внутреннего сгорания с применением системы T-Flex CAD 3D// САПР и графика. – 2005. – № 2. – С. 78-80.
27. Островский В. Выбираем САПР для работы// САПР и графика. – 2004. – № 5. – С. 35-37.
28. Конвисар Е. Организационные аспекты выбора САПР// САПР и графика. – 2004. – № 5. – С. 30-34.

## Содержание

Введение .....	3
1. Процесс проектирования приборов .....	5
1.1. Проектирование – творческий процесс .....	5
1.2. Организация процесса проектирования .....	8
1.2.1. Виды проектных работ .....	8
1.2.2. Системно-иерархический подход к проектированию.....	13
1.3. Ветви проектирования .....	16
1.3.1. Функциональное проектирование .....	16
1.3.2. Конструкторское проектирование .....	18
1.3.3. Технологическое проектирование .....	19
1.4. Проектные процедуры и задачи .....	20
1.4.1. Проектные процедуры и операции .....	20
1.4.2. Математическая модель прибора при проектировании.....	22
1.4.3. Синтез .....	24
1.4.4. Анализ .....	27
1.4.5. Оптимизация .....	31
1.4.6. Типовой алгоритм проектирования .....	36
2. Автоматизация проектирования .....	39
2.1. САПР – определение, назначение, области применения .....	39
2.2. Состав и структура САПР .....	44
2.2.1. Подсистемы САПР .....	44
2.2.2. Компоненты видов обеспечения САПР .....	44
2.2.3. Программно-методические комплексы .....	51
2.3. Классификация САПР .....	55
2.4. Разработка САПР .....	58
2.5. Подходы к автоматизированному проектированию .....	62
2.5.1. Базовые подходы к автоматизированному проектиро- ванию .....	62
2.5.2. Компьютерная графика .....	64
2.5.3. Компьютерное моделирование .....	66
2.5.4. Обзор ядер геометрического моделирования .....	69
2.5.5. Обмен данными между САД-системами .....	74
3. Современные технологии проектирования .....	76
3.1. CALS-технологии .....	76
3.1.1. Основные понятия .....	76
3.1.2. Базовые принципы CALS .....	77
3.1.3. Базовые управленческие технологии .....	82
3.1.4. Типичный жизненный цикл изделия .....	85
3.2. Средства автоматизации проектирования .....	86

3.2.1. Технологии CAD/CAM/CAE на этапах жизненного цикла изделия .....	86
3.2.2. Уровень CAD/CAM/CAE-систем и направления развития .....	89
3.2.3. Обзор CAD/CAM/CAE-систем .....	94
3.3. Современные технологии конструкторской подготовки производства .....	128
3.3.1. Прототипирование .....	128
3.3.2. Стереолитография .....	130
3.3.3. LOM-технология .....	132
3.3.4. Трехмерная печать .....	134
3.4. Информационная поддержка проектирования .....	137
3.4.1. Информация в процессе проектирования .....	137
3.4.2. Информационная поддержка жизненного цикла изделий .....	138
3.4.3. Система информационной поддержки жизненного цикла изделий .....	144
4. Методы расчета и анализа в усовершенствовании конструкции приборов .....	147
4.1. Параметризация и параметрические возможности систем САПР .....	147
4.1.1. Параметрические возможности систем САПР .....	147
4.1.2. Типы параметризации .....	150
4.2. Прочностной анализ конструкций с использованием МКЭ.....	156
4.2.1. Основы метода конечных элементов .....	156
4.2.2. CAE-системы, использующие МКЭ .....	160
4.2.3. Решение различных физических задач в T-FLEX Анализ .....	167
5. Выбор CAD-системы .....	188
5.1. Проблема выбора CAD-системы .....	188
5.2. Проблема подготовки кадров для САПР .....	191
6. Опыт использования технологий .....	195
6.1. Комплекс T-FLEX - единая программно-технологическая платформа поддержки жизненного цикла изделия .....	195
6.2. Моделирование двигателя внутреннего сгорания в T-FLEX CAD 3D .....	197
Литература .....	203

Учебное издание

КОСТЮЧЕНКО Тамара Георгиевна

## САПР В ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Учебное пособие

**Издано в авторской редакции**

Компьютерная верстка *Т.Г. Костюченко*  
Дизайн обложки *О.Ю. Аршинова*


**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии  
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати 24.02.2009. Формат 60х84/16. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл.печ.л. 12,03. Уч.-изд.л. 10,89.  
Заказ . Тираж 200 экз.



Томский политехнический университет  
Система менеджмента качества  
Томского политехнического университета сертифицирована  
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, [www.tpu.ru](http://www.tpu.ru)