

Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Уральский государственный университет путей сообщения
Кафедра «Мехатроника»

Б. М. Готлиб

Проектирование мехатронных систем

Часть 1. Информационная поддержка процесса проектирования мехатронных систем

Курс лекций для студентов
специальности 220401.65 – Мехатроника

Екатеринбург
2007

УДК 621.865.8
Г 73

Готлиб Б. М. Проектирование мехатронных систем. Ч.1. Информационное обеспечение процесса проектирования мехатронных систем: курс лекций для студентов специальности «Мехатроника». – Екатеринбург: УрГУПС, 2007. – 115 с.

Курс лекций охватывает первую часть дисциплины «Проектирование мехатронных систем», которая читается студентам специальности 220401.65 – Мехатроника. Рассматриваются вопросы информационного обеспечения процесса проектирования мехатронных устройств и систем (системный подход к проектированию, порядок и принципы проектирования, САПР, CALS-технологии, концептуальное и конструктивное проектирование, особенности проектирования мехатронных модулей и систем).

Курс лекций отражает главным образом перспективные направления и подходы к проектированию сложных технических систем любого назначения (в том числе и мехатронных) и полностью соответствует учебному плану дисциплины «Проектирование мехатронных систем».

Рекомендован к изданию на заседании кафедры «Мехатроника», протокол № 36 от 17.10.2007 г.

Автор: Б. М. Готлиб, заведующий кафедрой «Мехатроника»,
доктор технических наук, профессор.

Рецензенты: С. А. Румянцев, заведующий кафедрой «Механика
деформируемого твердого тела, основания и фундаменты»
УрГУПС, доктор технических наук, профессор;
В. А. Шилов, профессор кафедры «Обработка металлов
давлением» УГТУ-УПИ, доктор технических наук,
профессор.

© УрГУПС, 2007
© Б. М. Готлиб, 2007

Оглавление

Предисловие	4
Лекция 1. Общие понятия о проектировании мехатронных систем	5
1.1. Системный подход к проектированию	5
1.2. Стадии проектирования	7
Лекция 2. Предпроектная стадия разработки мехатронных систем	13
Лекция 3. Системы проектирования	26
3.1. Основные принципы проектирования	26
3.2. Системы автоматизированного проектирования	29
3.3. Структура и разновидности САПР	32
3.4. Интеграция CAD- и САМ-систем	35
Лекция 4. Средства моделирования в САПР	44
4.1. Математическое моделирование	44
4.2. Имитационное моделирование	45
4.3. Физическое моделирование	47
4.4. Виртуальная инженерия	57
Лекция 5. Системы автоматизированного проектирования в машиностроении	67
5.1. Примеры программ	69
5.2. Методы обмена данными технических требований	74
Лекция 6. Информационная поддержка проектирования мехатронных систем	78
6.1. CALS-технологии (основные понятия)	78
6.2. STEP-стандарты	83
6.3. Организация в STEP информационных обменов	85
6.4. Проблемы практического использования CALS-технологий	86
Лекция 7. Концепция проектирования мехатронных модулей и систем	89
7.1. Методика концептуального проектирования	89
7.2. Концепция проектирования мехатронных модулей и систем	98
Заключение	114
Литература	115

Предисловие

Курс лекций охватывает первую часть дисциплины СД.08 «Проектирование мехатронных систем», которая читается на 4-м курсе (7-й и 8-й семестры) студентам специальности 220401.65 «Мехатроника».

Лекции охватывают вопросы информационного обеспечения процесса проектирования мехатронных устройств и систем (системный подход к проектированию, порядок и принципы проектирования, САПР, CALS-технологии, концептуальное и конструктивное проектирование, особенности проектирования мехатронных модулей и систем).

Предполагается, что студенты прослушали дисциплины «Основы мехатроники», «Конструирование мехатронных модулей», «Микропроцессорная техника», «Информационные устройства и системы в мехатронике».

Данный курс является основополагающим в системе образования специалиста по мехатронике.

Объем лекций первой части составляет 24 часа. Отражаются главным образом перспективные направления и подходы к проектированию сложных технических систем любого назначения (в том числе и мехатронных). Курс полностью соответствует учебному плану дисциплины «Проектирование мехатронных систем».

Лекция 1

Общие понятия о проектировании мехатронных систем

Проектирование технического объекта – создание, преобразование и представление в принятой форме образца этого, еще не существующего, объекта.

Инженерное проектирование начинается при наличии выраженной потребности в некоторых технических объектах. Результатом проектирования, как правило, служит полный комплект документации, содержащей сведения, достаточные для изготовления объекта в заданных условиях. Эта документация и есть **проект** – окончательное описание объекта.

Проектирование предполагает выполнение комплекса работ исследовательского, расчетного и конструкторского характера.

Проектирование, при котором все проектные решения или их часть получают путем взаимодействия человека с ЭВМ, называется **автоматизированным**. Система, реализующая автоматизированное проектирование, представляет собой **систему автоматизированного проектирования – САПР** (CAD – *Computer Aided Design*).

Процесс проектирования имеет две основные особенности. Во-первых, состав и последовательность его этапов не зависят от целевого назначения проекта. Во-вторых, логика процесса проектирования инвариантна к способу проектирования – традиционному или автоматизированному.

1.1. Системный подход к проектированию

Наиболее общим подходом к проектированию является **системный подход**. Принцип системного подхода заключается в рассмотрении частей сложной системы с учетом их взаимодействия. Системный подход включает в себя выявление структуры системы, типизацию связей, определение свойств (атрибутов) системы, анализ влияния внешней среды.

В технике дисциплину, в которой исследуются сложные технические системы и их проектирование, чаще всего называют **системотехникой** (вместо «**теории систем**» или «**системного анализа**»).

Предметом системотехники является, во-первых, организация процесса создания, использования и развития технических систем, а во-вторых, методы их проектирования и исследования.

В системотехнике можно выделить три основных подхода к процессу проектирования: **структурный**, **блочнo-иерархический** и **объектно-ориентированный**.

При **структурном подходе** требуется синтезировать варианты системы из компонентов (блоков, модулей) и оценить эти варианты (предварительно

спрогнозировав характеристики компонентов). Он основан на идее алгоритмической декомпозиции, где каждый блок (модуль) системы выполняет один из этапов общего процесса.

Блочно-иерархический подход к проектированию использует идеи декомпозиции описания сложных объектов на иерархические уровни, вводит понятие стиля проектирования (восходящее, нисходящее), устанавливает связь между параметрами соседних иерархических уровней.

При блочно-иерархическом подходе к проектированию представление о проектируемой системе расчленяют на иерархические уровни. На верхнем уровне используют только самые общие черты и особенности проектируемой системы. На следующих – степень подробности описания возрастает (при этом рассматриваются уже отдельные блоки системы с учетом их взаимодействия), что позволяет на каждом иерархическом уровне формулировать задачи приемлемой сложности.

Для большинства приложений характерны следующие иерархические уровни:

- **системный уровень**, на котором решаются наиболее общие задачи проектирования систем, машин и процессов; результаты проектирования представляют в виде структурных схем, генеральных планов, схем размещения оборудования и т. д.;
- **макроуровень**, на котором проектируют отдельные устройства, узлы машин и приборов; результаты представляют в виде функциональных, принципиальных и кинематических схем, сборочных чертежей и т. д.;
- **микроуровень**, на котором проектируют отдельные детали и элементы машин и приборов.

В каждом приложении число выделяемых уровней и их наименований может быть различным (в радиотехнике, вычислительной технике, машиностроении и т. п.). В машиностроении имеются уровни деталей, узлов, машин и комплексов.

В зависимости от последовательности решения задач иерархических уровней различают **нисходящее**, **восходящее** и **смешанное** проектирование (стили проектирования).

Восходящее проектирование предполагает решение задач от нижних уровней к верхним. **Нисходящее** проектирование – от верхних к нижним. **Смешанный стиль** имеет элементы как восходящего, так и нисходящего проектирования. В большинстве случаев для сложных систем предпочтение отдают нисходящему проектированию, но часто используют и смешанное.

Неопределенность и нечеткость исходных данных при нисходящем проектировании (так как еще не спроектированы компоненты) или исходных требований при восходящем проектировании (поскольку техническое задание имеется на всю систему, а не на ее части) обуславливают необходимость прогнозирования недостающих данных с последующим их уточнением, т. е. последовательного приближения к окончательному решению (итерационность проектирования).

Наряду с декомпозицией описаний на иерархические уровни применяют разделение представлений о проектируемых объектах на аспекты.

Аспект описания (страта) – описание системы или ее части с некоторой оговоренной точки зрения, определяемой функциональными, физическими или иного типа отношениями между свойствами и элементами.

Различают **функциональный, информационный, структурный и поведенческий** (процессный) **аспекты**. Функциональное описание относят к функциям системы и чаще всего представляют его функциональными схемами.

Информационное описание включает в себя основные понятия предметной области (сущности), словесное пояснение или числовые значения характеристик (атрибутов) используемых объектов, а также описание связей между этими понятиями и характеристиками. Информационные модели можно представлять графически (графы, диаграммы *сущность – отношение*), в виде таблиц или списков.

Структурное описание относится к морфологии системы, характеризует составные части системы и их межсоединения и может быть представлено структурными схемами, а также различного рода конструкторской документацией.

Поведенческое описание характеризует процессы функционирования (алгоритмы) системы и (или) технологические процессы создания системы.

Иногда аспекты описаний связывают с подсистемами, функционирование которых основано на различных физических процессах.

Отметим, что в общем случае выделение страт может быть неоднозначным. Так, помимо указанного подхода очевидна целесообразность выделения таких аспектов, как **функциональное** (разработка принципов действия, структурных, функциональных, принципиальных схем), **конструкторское** (определение форм и пространственного расположения компонентов изделий), **алгоритмическое** (разработка алгоритмов и программного обеспечения) и **технологическое** (разработка технологических процессов) проектирование систем. Примерами страт в случае САПР могут служить также рассматриваемые далее виды обеспечения автоматизированного проектирования.

Объектно-ориентированный подход рассматривает сложную систему как совокупность взаимодействующих друг с другом объектов, каждый из которых является экземпляром определенного класса. Такой подход наиболее перспективен при проектировании сложных систем.

При использовании любого из трех описанных выше подходов к проектированию сам процесс проектирования разбивается на отдельные **стадии** проектирования.

1.2. Стадии проектирования

Стадии проектирования – наиболее крупные части проектирования процесса, развивающегося во времени. В общем случае выделяют стадии

научно-исследовательских работ (НИР), эскизного проекта или опытно-конструкторских работ, технического, рабочего проектов, испытаний опытных образцов или опытных партий. Стадию НИР иногда называют предпроектными исследованиями или стадией технического предложения. Очевидно, что по мере перехода от стадии к стадии степень подробности и тщательность проработки проекта возрастают. Рабочий проект должен быть вполне достаточным для изготовления опытных или серийных образцов. Близким к определению стадии, но менее четко оговоренным понятием является понятие этапа проектирования.

Стадии (этапы) проектирования подразделяют на составные части, называемые **проектными процедурами**. Примерами проектных процедур могут служить подготовка детализовочных чертежей, анализ кинематики, моделирование переходного процесса, оптимизация параметров и другие проектные задачи.

В свою очередь, проектные процедуры можно расчленить на более мелкие компоненты, называемые **проектными операциями**. Например, при анализе прочности детали сеточными методами операциями могут быть построены сетки, произведен выбор или расчет внешних воздействий, собственно моделирование полей напряжений и деформаций, представление результатов моделирования в графической и текстовой формах. Проектирование сводится к выполнению некоторых последовательностей проектных процедур – **маршрутов проектирования**.

На рис. 1.1 показана укрупненная схема процесса проектирования.

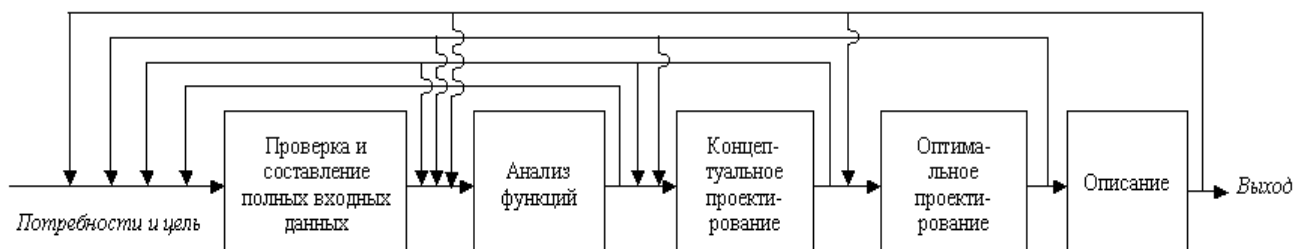


Рис. 1.1. Укрупненная схема процесса проектирования

Техническая разработка системы начинается с определения нужд потенциального пользователя разрабатываемой системы. Часто оказывается, что пользователь желает иметь систему, выполняющую данную работу, однако испытывает трудности при количественной формулировке своих потребностей и целей. Поэтому у инженера и пользователя возникает дополнительная задача количественного воплощения целей системы так, чтобы была определена содержательная совокупность целевых функционалов для последующей разработки.

Когда скоро потребности и цели системы определены, необходимо дать количественное описание функций, которые должны выполнять система

и любая требуемая подсистема. Эта процедура называется анализом функций. Его цель состоит в выборе функций, или операций, которые должны быть проведены для выполнения задачи, требуемой от разрабатываемой системы. Эти функции становятся затем целями низшего уровня для разработки подсистем. Определение функций по своей природе носит качественный характер. Однако, коль скоро функция, или операция, определена, она должна быть описана в количественных терминах. Например, если операцию нужно провести быстро, необходимо оговорить допустимое время.

Следующий шаг, показанный на рис. 1.1, является одним из наиболее трудных этапов в технической разработке системы и, конечно, самым трудным шагом для аналитического описания. Концептуальное проектирование, как видно из названия, состоит в определении концепций, или основных конфигураций системы, которые могут удовлетворить целям системы. На этом шаге желательно оставить концепции по возможности в общем виде, с тем чтобы не исключить кандидатуры систем, которые могут оказаться эффективными. Например, если операция, подлежащая выполнению, есть продвижение летательного аппарата над поверхностью Земли, то концептуальные проекты могут включать в себя проектирование колес, направляющих, стоек и воздушной подушки. На этом этапе процесса проектирования важно определить границы приемлемых значений параметров, описывающих систему. Для параметров проектирования в пределах этих значений система должна уметь выполнять функции, определенные на предыдущем шаге.

Пусть мы имеем дело с оптимальным проектом, для которого целью является выбор неопределенных параметров, введенных на предыдущем шаге. Эти параметры должны быть в пределах, определяемых технологическими ограничениями и назначением системы. Критерием выбора параметров системы является максимизация стоимости системы или минимизация меры затрат. Следует особо отметить, что математически точный оптимум может оказаться недостижимым и, следовательно, служить лишь ориентиром. Однако методы выбора параметров системы должны обладать таким свойством, что если оптимум существует, то при достаточном терпении и заданном машинном времени он должен быть в пределе достижим.

То, что является последним шагом в модели технической разработки системы на рис. 1.1 (описание оптимальной системы), в действительности оказывается промежуточным шагом. До тех пор пока процедура проектирования системы не станет исключительно эффективной, система, предложенная группой разработчиков, не будет удовлетворять заказчика. Получив результаты одного прохождения через процедуру проектирования системы, заказчик, вероятно, вспомнит некоторые ограничения, которые он забыл описать и которые оптимальная система нарушает. Проектировщик также может найти привлекательные решения, которых он ранее не видел. Он опять-таки в большей мере, чем заказчик, вспомнит технологические ограничения, которые он забыл описать и которые оптимальная система

нарушает. Наконец, заказчик, несомненно, решит, что неплохо бы уменьшить на малую величину уровни качества системы, если это приведет к экономии денег.

На следующем шаге процедуры каждый участник группы должен сделать глубокий вдох и вернуться к работе, вооруженный добытыми с трудом новыми знаниями. Именно с этой целью указаны все каналы обратной связи в модели на рис. 1.1. Эта итеративная процедура продолжается до тех пор, пока заказчик не решит, что предлагаемая система является той, в которой он действительно нуждается. Это будет еще одно решение, принимаемое человеком, но математически не запрограммированное.

Основные стадии и процедуры процесса проектирования показаны на рис. 1.2. Разделение процесса проектирования на последовательные стадии (этапы) является в известной степени условным, поскольку в процессе проектирования пересматриваются и уточняются ранее принятые решения.

Прокомментируем основные стадии проектирования. **Техническое задание** (ТЗ) обосновывает те новые качества, которыми должен обладать проектируемый объект, и является наряду с техническим предложением итогом предпроектной подготовки. ТЗ устанавливает основное назначение объекта, обосновывает целесообразность его создания и регламентирует все основные технические характеристики (требования).

В процессе подготовки ТЗ разрабатывается основная концепция проектирования. Разработкой концепции занимается небольшая по численности группа проектантов высшей квалификации.

Техническое предложение формулирует принятую концепцию, уточняя и развивая техническое задание. Оно состоит из совокупности конструкторских документов, необходимых для дальнейшего проектирования. Техническое предложение обеспечивает и уточняет технические характеристики проектируемой машины и диапазоны эксплуатационных нагрузок и скоростей. На этом этапе выбирают окончательный вариант компоновки машины, ее узлов и агрегатов, пользуясь результатами анализа, синтеза и оптимизации вариантов компоновок, и разрабатывают принципиальные схемы машины: кинематическую, гидравлическую, пневматическую, электрическую и др., а также принимают тип и характеристики системы управления, определяют общие габаритные размеры.

Техническое предложение дает полное представление о компоновке и возможностях проектируемых механизмов или машин.

Эскизный проект содержит предварительную конструкторскую проработку всех основных узлов и является развитием технического предложения. Он базируется на анализе различных конструкторских решений, результатах расчетов, оптимизации важнейших параметров и характеристик машины.

При конструировании машины, ее узлов и систем следует максимально использовать стандартные и унифицированные детали, механизмы и элементы, что удешевляет проектируемую машину.

Каждое конструкторское решение должно быть обосновано результатами расчетов, рассмотрено с точки зрения обеспечения качества и надежности функционирования проектируемой машины, технологичности изготовления и сборки, удобства эксплуатации, ремонтпригодности и т. д.

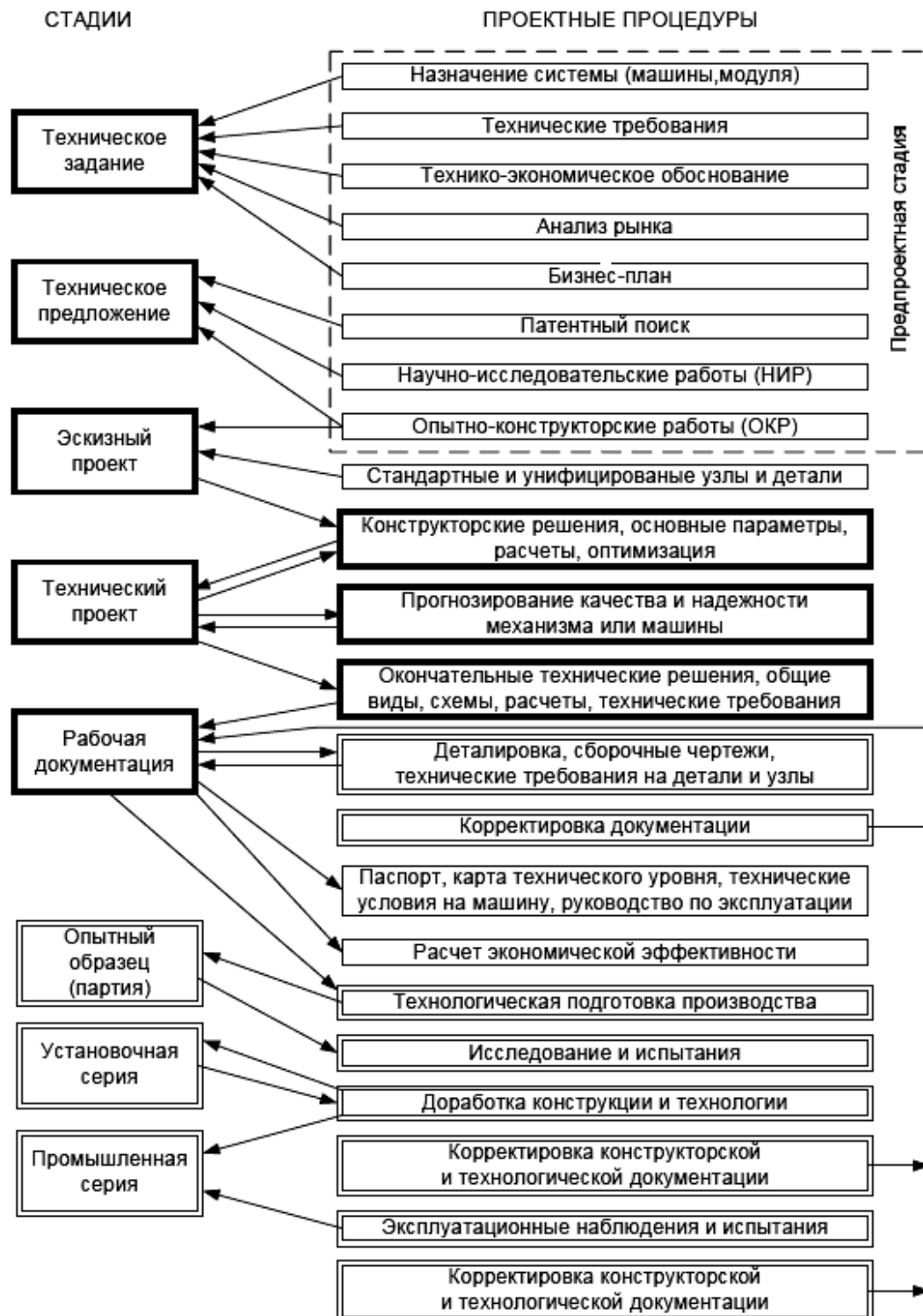


Рис. 1.2. Стадии и процедуры процесса проектирования

Технический проект включает в себя окончательную конструкторскую проработку всех узлов чертежей, схем машины и ее общих видов. На этом этапе производят все виды уточненных и поверочных расчетов, оптимизируют необходимые параметры узлов и систем машины, окончательно определяют ее эффективность; прогнозируют выходные характеристики и оценивают надежность машины с учетом вероятностной природы режимов ее эксплуатации. Проект должен содержать все исходные данные, необходимые для разработки комплекта технической документации на проектируемый механизм или машину, его согласовывают и утверждают в установленном порядке.

Рабочая документация – завершающий этап проектирования. Он включает в себя разработку рабочих чертежей всех оригинальных деталей и простановку технических требований на их изготовление, составление технологической документации, корректировки (в случае необходимости) технического проекта, составление спецификаций оригинальных и покупных комплектующих деталей, формирование паспорта машины, карты технического уровня, инструкции по эксплуатации и ряда других документов. Рабочая документация должна содержать все данные, необходимые для изготовления проектируемого механизма или машины. Выпуск рабочей документации существенно упрощается при применении САПР.

После завершения разработки комплекта рабочей документации осуществляются **технологическая подготовка производства** и последующие этапы изготовления и отладки спроектированной машины. В ряде случаев для сокращения сроков выпуска новой техники технологическую подготовку производства начинают заранее до завершения выпуска комплекта рабочей документации. Применение техники CAD/CAM значительно сокращает сроки подготовки производства.

Лекция 2

Предпроектная стадия разработки мехатронных систем

Предпроектная стадия разработки мехатронной системы (МС) включает в себя следующие проектные процедуры (см. рис. 1.2):

- определение основных функций (назначение) системы (модуля, машины, агрегата);
- подготовка технических требований к системе;
- технико-экономическое обоснование проекта;
- анализ рынка сбыта;
- составление бизнес-плана проекта;
- патентный поиск аналогов;
- научно-исследовательские работы (НИР);
- опытно-конструкторские работы (ОКР).

Предпроектная стадия разработки (проекта) заканчивается созданием технического задания (ТЗ) и технического предложения на проект.

Необходимость критического подхода к формулировке цели (назначения) системы является одной из особенностей инженерных, в частности конструкторских, задач. Определение функций мехатронной системы является проблемой концептуального проектирования и базируется на анализе исходных данных для проектирования (специальные и постоянно расширяющиеся базы данных, включающие в себя сравнительный анализ существующих систем; потребность рынка сбыта, существующие и перспективные тенденции развития данной отрасли производства; реальные возможности предприятия-изготовителя).

Таким образом, цель проектирования – наиболее полное решение поставленных функциональных задач.

Технические требования, разработанные на предпроектной стадии, обычно называются исходными техническими требованиями и охватывают широкий круг вопросов. Прежде всего, в них приводятся «входные» и «выходные» характеристики (параметры) мехатронной системы и ее основные параметры. Затем дается описание наиболее характерных внешних воздействий на систему, которые могут иметь место при ее эксплуатации, а также вызванных этими воздействиями допустимых отклонений от нормальных режимов работы.

Наконец, перечисляются меры, обеспечивающие удобство эксплуатации системы заказчиком. Эти требования составляют лишь часть того материала, который должен учитывать разработчик при последующей реализации задания. Поэтому исходные технические требования дополняются и уточняются при формулировке технического задания и технического предложения. После этого формируется четкое представление о процессе функционирования мехатронной системы и о возможности реализации технического задания.

Техническая целесообразность, как правило, обусловлена появлением новых материалов, новых технологических процессов или принципиально новых технических решений.

Экономическая целесообразность обычно определяется существенным повышением производительности, либо экономией энергоресурсов, либо увеличением универсальности, т. е. возможностью использования проектируемого механизма в машинах нового поколения, а машин – в сложных системах.

Во всех случаях техническое задание должно содержать тщательное экономическое обоснование предполагаемой эффективности проектируемого оборудования. Проектируемая система должна иметь более высокие технико-экономические показатели по сравнению с существующими.

Технико-экономическое обоснование проекта (ТЭО) нужно для доказательства необходимости выбора именно предлагаемого варианта оборудования, технологии, процесса, размещения оборудования и т. п.

Оно отличается от бизнес-плана следующим:

- обычно ТЭО пишется для проектов внедрения новых технологий, процессов и оборудования на уже существующем, работающем предприятии, поэтому анализ рынка, маркетинговая стратегия, описание компании и продукта, а также анализ рисков часто просто отсутствуют;
- в ТЭО приводится информация о причинах выбора предлагаемых технологий и процессов, а также решений, принятых в проекте, результаты от их внедрения и экономические расчеты эффективности.

Следовательно, можно говорить о гораздо более узком, специфическом характере ТЭО по сравнению с бизнес-планом.

Методика составления ТЭО разработана Организацией Объединенных Наций по промышленному развитию (ЮНИДО). В соответствии с разработками ЮНИДО предлагается следующая последовательность изложения материалов ТЭО:

1. Общие исходные данные и условия.
2. Рынок и мощность предприятия.
3. Материальные факторы производства.
4. Место нахождения предприятия.
5. Проектно-конструкторская документация.
6. Организация предприятия и накладные расходы.
7. Трудовые ресурсы.
8. Планирование сроков осуществления проектов.
9. Финансово-экономическая оценка проекта.

Такая последовательность изложения материалов позволяет раскрыть три основных раздела проекта:

1. Резюме проекта.
2. Описание проекта.
3. Финансовые расчеты.

При относительно невысокой стоимости проекта ТЭО может заменить бизнес-план проекта. Во всех остальных случаях обоснованием проекта является его бизнес-план.

Бизнес-план может быть использован в качестве внутреннего документа при планировании деятельности и в качестве коммерческого предложения для внешней стороны – инвестора, кредитора. В последнем случае бизнес-план служит обоснованием того, что существуют реальные возможности достижения поставленных в нем целей и компания достаточно компетентна для их достижения и способна отвечать по своим обязательствам, в том числе своевременно и в полном объеме выплачивать лизинговые платежи.

При разработке плана необходимо придерживаться принципа «разумной достаточности». Дальнейшее описание разделов бизнес-плана направлено на инвестиционные проекты действующих предприятий, ориентированных на привлечение внешних инвесторов.

Резюме. Раздел должен показать потенциальным инвесторам привлекательность проекта. Главная задача – «зацепить» инвестора. Резюме – это концентрированное описание инвестиционного проекта – его идеи, шагов, осуществляемых для реализации идеи, требуемых затрат, итоговых показателей. Содержание резюме должно очень четко отражать идею проекта, требуемые ресурсы, возможные риски и результаты реализации проекта в «оцифренном» виде.

В данном разделе отражается:

- основная идея проекта,
- планируемые результаты от его реализации,
- показатели эффективности инвестиций, которые характеризуют соотношение доходов и затрат, связанных с проектом: срок окупаемости (простой, дисконтированный), внутренняя норма доходности (IRR), чистая текущая стоимость (NPV), рентабельность инвестиций (NPVR).

Финансовую состоятельность проекта характеризует модель расчетного счета проекта, график привлечения и возврата кредита.

Инвесторы начинают знакомство с проектом с резюме, и нередко рассмотрение проекта на этом и заканчивается. Поэтому необходимо отнестись к написанию резюме с особым вниманием – к четкости, понятности и содержательности его информации.

В практике работы зарубежных консультантов оформление отчетов в *Power Point* – общепринятая практика (безусловно, к такому отчету разрабатывается много дополнительных приложений, схем и т. д.). Оформленные таким образом бизнес-планы смотрятся презентабельно. В практике работы российских банков также все чаще возникает требование представлять разработанные заявителями бизнес-планы в форме презентаций.

Информация о предприятии. В разделе необходимо четко и структурировано отразить информацию о предприятии (если проект осуществляется на действующем предприятии). Первую часть раздела необходимо

отвести для описания истории создания, области деятельности, динамики развития предприятия.

Вторая часть должна содержать анализ деятельности предприятия за предшествующий период: отражаются финансово-хозяйственные показатели его работы за последний отчетный год. По сути, эта часть представляет собой краткую аналитическую записку, в которой производится анализ финансового состояния предприятия. Можно рассчитать ряд показателей самостоятельно, можно воспользоваться компьютерными моделями, например «Альт-Финансы». Если предприятие имеет ранее привлеченные кредиты, необходимо указать условия и график возврата средств.

Желательно представлять информацию о финансовом состоянии предприятия не в целом за год, а в разбивке по кварталам или месяцам. Это позволит более четко показать динамику изменения финансового положения предприятия в течение года. Графики и диаграммы сделают представление информации более наглядным. По возможности следует провести сравнительный анализ показателей деятельности предприятия со среднеотраслевыми значениями (если есть доступ к информационным базам). Также можно использовать открытую информацию, например годовые отчеты, для расчета финансовых коэффициентов компаний-конкурентов.

Информация об отрасли. В этом разделе приводятся результаты анализа характера отрасли (развивающаяся, стабильная, стагнирующая). Отражается информация о положении дел в отрасли: общая характеристика объемов и динамики производства и потребления продукции (в целом по стране, а также по регионам, в которых предполагается реализация продукции проекта), динамика импорта. Можно привести прогноз развития отрасли. Такие документы часто «рождаются» в недрах отраслевых министерств, коммерческих ассоциаций. Прогнозы развития рынка, что не то же самое, готовят консультационные компании, когда проводят комплексные проекты. Информацию можно получить в различных источниках: отраслевых изданиях, Интернете, ГТК (импорт, экспорт), Госкомстате и т. д. Можно купить готовые отчеты, заказать исследование в консультационной компании. Но надо помнить, что некорректно сформулированный вопрос может дать ответ, который не будет содержать информации, необходимой для принятия решения.

Продукция. В разделе даются характеристики продукции (услуг) проекта, описание продуктов-аналогов и проводится сравнительный анализ продукции проекта с продуктами-аналогами, заменителями. Акцент следует сделать на преимуществах продукции по сравнению с конкурентными товарами: лучшие технические характеристики, лучший дизайн, надежность, простота в эксплуатации, что-то еще. Для этого можно определить и проанализировать ключевые факторы принятия решения о покупке путем проведения опросов потребителей, экспертов, целевых фокус-групп. Полезно привести фотографии образцов продукции, отзывы потенциальных покупателей.

Производственный план. Определение и аргументация выбора производственного процесса и оборудования – основная задача этого раздела бизнес-плана.

Здесь дается краткое описание производственного процесса и технологии производства, которое будет понятно неспециалисту, приводится перечень, стоимость, условия поставки и условия оплаты необходимого оборудования, перечень работ. Если предполагается аренда оборудования, то определяются ее условия.

В разделе также указываются потребности в сырье и материалах для производства продукции (предоставления услуг).

Часто к составлению раздела привлекаются отраслевые специализированные проектные компании, ведь выбор технологии, организации производства – один из определяющих моментов эффективности проекта.

В качестве примера можно привести проект экономической оценки модернизации цеха деревообработки одного из предприятий Западной Сибири. Консультантам был предоставлен план модернизации, перечень необходимых работ и оборудования. По договору работа консультантов заключалась в разработке финансового плана проекта, вся остальная информация предоставлялась заказчиком. Тем не менее была проведена дополнительная работа по экспертизе технологического плана производства. В ходе интервью с экспертами было выяснено, что одним из важных моментов в таком производстве является система аспирации (удаление отходов деревообрабатывающего производства – опилок). Оказывается, что даже самое совершенное оборудование может не использоваться на полную мощность из-за того, что система удаления опилок «не справляется». Затраты на модернизацию системы аспирации не были предусмотрены в проекте. После разговора с заказчиком выяснилось, что изначально система аспирации была спроектирована «с запасом». Таким образом, увеличения капитальных затрат не произошло (приведенный пример является, скорее, исключением: нередко капитальные затраты проекта недооцениваются).

Потребители. Сбытовая политика. Доказать, что реализация продукции (предоставление услуг) не вызовет серьезных проблем – основная цель этого раздела.

Здесь должен быть приведен прогноз спроса на продукцию, география его распределения, структура, прогноз динамики развития различных сегментов, определены спросообразующие факторы и построен прогноз их динамики. Приводится характеристика основных потребителей продукции.

Один из консультационных проектов ИКФ «АЛТ» предполагал разработку экономической части бизнес-плана по строительству хлебозавода. Заказчиком была предоставлена информация о планируемом объеме производства и реализации продукции и поставлена задача верификации (проверки) возможных объемов сбыта.

Укрупненная оценка возможных объемов сбыта продукции предприятия была осуществлена следующим образом: была получена информация

о среднестатистическом потреблении хлеба на душу населения в России, получена информация о численности населения в районе, где предполагалось реализовать проект. В результате были получены цифры (довольно приблизительные, конечно), на которые можно было ориентироваться:

- возможный максимальный объем спроса в районе;
- прогнозная доля предприятия на региональном рынке после осуществления проекта. Доля предприятия была определена с учетом объемов реализации предприятия-конкурента.

Определяется характер спроса: есть ли сезонность, ее причины.

Так, на одном предприятии, выпускающем кассовые аппараты, сбытовики заметили явную сезонность спроса на продукцию (кассовые аппараты). Оказалось, что сезонность вызвана – чем бы вы думали? – проверками налоговых органов, которые проводятся достаточно регулярно.

В разделе необходимо отразить ситуацию с патентной защитой товара. Особенно это важно при выводе на рынок нового бренда. Использование наименования продукции, которое юридически не защищено, может привести к печальным последствиям: кто-то раньше выпустил продукцию с таким же или похожим именем. Рекламный бюджет проекта может «вылететь в трубу».

Дается характеристика планируемым методам продвижения и каналам сбыта продукции. Например, создается собственная торговая сеть, или предполагается реализация через существующие торговые сети.

Большим плюсом бизнес-плана будут протоколы о намерениях, предварительно заключенные договоры на поставку продукции.

Ценообразование. В разделе дается характеристика ценообразования – метода установления цены на продукцию, рассматриваемую в проекте. Определяется себестоимость продукции, основные ее составляющие, конечная цена на продукцию и возможные скидки. Анализируется конкурентоспособность товара по цене. Приводится прогноз продаж продукции.

На практике используют два метода ценообразования – затратный и рыночный. В первом случае цена определяется на основании себестоимости продукции, затрат на аналогичную продукцию, выбранной нормой прибыльности. Во втором случае принимается во внимание цена на аналогичную продукцию, позиция конкурентов на рынке, анализируются возможные действия конкурентов: какова вероятность демпинга, планы по продвижению продукции и т. д.

Интересным может быть следующий пример. Компании-разработчики научно-технической продукции определяли цену на свою продукцию значительно более низкую, чем на зарубежные аналоги, даже несмотря на то, что некоторые технические характеристики были значительно лучше. Разработчики исходили из того, что известность компании, возможность предоставления дополнительных услуг при выборе такой продукции играет большую роль, чем цена. Поэтому цена была выбрана как одно из конкурентных преимуществ отечественных разработок.

При выводе нового продукта на рынок полезно вспомнить маркетинговые стратегии, которые были рассмотрены И. Ансоффом:

- Стратегия интенсивного маркетинга. Стратегия выборочного проникновения. Стратегия широкого проникновения. Стратегия пассивного маркетинга.
- Осведомленность потребителей. Малая (или нет). Низкая. Низкая.
- Емкость рынка. Большая. Малая. Большая. Средняя.
- Цена продукта. Средняя. Высокая. Низкая. Низкая.
- Конкуренция. Высокая. Незначительная. Высокая. Средняя.
- Затраты на продвижение. Высокие. Низкие. Высокие. Низкие.

Однако будет очень неразумно слепо следовать тому, что написано в учебниках. Базовые подходы всегда должны быть скорректированы с учетом специфики предприятия, проекта, продукта.

Конкуренция. Оценка конкурентоспособности предприятия и продукции – задача этого раздела. В разделе приводятся характеристика и анализ потенциальных конкурентов: численность персонала, структура затрат на производство, планируемые капиталовложения, объем продаж, система организации сбыта и производства, организационная структура и др. Степень анализа зависит от доступности информации. Производится анализ слабых и сильных сторон конкурентов. Определяются основные факторы конкурентоспособности предприятия, как внутренние, так и внешние.

Оценка сильных и слабых сторон продукции и услуг компании, предложения по повышению ее конкурентоспособности, предложения по корректировке продуктовой стратегии, системы сбыта и продвижения и повышения квалификации сбытового персонала – все это должно быть отражено в данном разделе.

Поставщики. Приводится краткое описание поставщиков сырья и материалов. Определяются альтернативные источники снабжения сырьем и материалами. Дается характеристика по группам сырья и материалов, используемых поставщиками (условия поставки, оплаты).

При формировании плана реализации проекта желательно предусматривать «запасной выход» – альтернативные варианты снабжения производства необходимыми ресурсами. Такой подход является одним из рычагов минимизации рисков проекта. Ориентация только на одного поставщика значительно увеличивает риски реализации проекта.

Организационный план. В этом разделе должна быть приведена характеристика системы управления проектом и описана организационная структура предприятия.

Определяется численность персонала, планируемые затраты на оплату труда. Дается характеристика формы собственности (ООО, ОАО, др.).

Обязательно следует предоставить схематическое изображение организационной структуры предприятия и проекта.

Рабочий график реализации проекта. Тут следует описать временной график реализации проекта и проведения запланированных мероприятий. Приводится график осуществления капитальных вложений, выполнения работ, производственный график: начало производства продукции, выход на проектную мощность, объемы производства в периоды сезонных колебаний.

Финансовый план. Раздел предназначен для определения эффективности и финансовой состоятельности проекта. Он является ключевым разделом бизнес-плана. Составление этого раздела – один из самых ответственных моментов. На основании данных финансового плана производится анализ коммерческой привлекательности проекта.

Здесь должна быть отражена информация о планируемых доходах проекта (объемы реализации), текущих затратах проекта, об инвестиционных затратах (капитальные вложения, прирост оборотного капитала), планируемые источники финансирования, их структура (собственные, заемные), графики, условия привлечения и возврата заемных источников финансирования. Обязательно должны быть приведены прогнозные формы финансовой отчетности: отчет о прибыли, отчет о движении денежных средств, баланс.

Приводится сводная характеристика эффективности проекта. Дается краткая интерпретация показателей. Первая группа – показатели эффективности инвестиций. Традиционно выделяют следующие показатели.

Срок окупаемости инвестиций (простой и дисконтированный). Рассчитывается на основании чистого денежного дохода (простого и дисконтированного). **Чистый денежный поток** – сумма притоков и оттоков денежных средств. **Дисконтирование** – приведение денежных потоков разных интервалов планирования к начальному моменту времени (первому интервалу планирования). Суть дисконтирования заключается в том, что мы принимаем разновеликую стоимость одной условной денежной единицы в разные периоды времени.

К примеру, на рубль мы сегодня можем купить 0,1 пачки сигарет, а через год, возможно, всего лишь 0,05 пачки. Или еще. Мы точно знаем, что, вложив сегодня рубль в низко рискованные ценные бумаги или просто положив рубль на депозит в банк, мы получим через какой-то интервал времени процент с этих денег.

Дисконтирование, по сути, – это учет упущенной экономической выгоды от использования наших финансовых ресурсов.

Использование дисконтирования предполагает расчет коэффициента дисконтирования (на каждый интервал планирования), на который умножается величина чистого денежного потока каждого интервала планирования. Он рассчитывается на основании ставки сравнения.

Внутренняя норма доходности (IRR) показывает, при какой ставке сравнения чистая текущая стоимость проекта становится равной нулю. Для расчета подбираем такую ставку сравнения, при которой значение дисконтированного чистого денежного потока на протяжении периода времени,

обычно – срока жизни проекта (или можно употреблять термин «срок рассмотрения проекта», звучит не так мрачно), становится равным нулю.

Чистая текущая стоимость проекта (NPV). Показывает накопленный дисконтированный доход (или убыток) проекта. Рассчитывается как сумма дисконтированного чистого потока денежных средств и остаточной стоимости проекта. Рекомендуют рассчитывать NPV без учета остаточной стоимости проекта, а уже отдельно показывать остаточную стоимость.

Остаточную стоимость можно рассчитать следующим образом. Определяется остаточная стоимость основных средств и нематериальных активов. Она может корректироваться на коэффициент «усыхания», который придется определить экспертным путем (актив, скорее всего, не удастся реализовать по остаточной стоимости). Определить коэффициент «усыхания» стоимости актива по проекту довольно сложно, особенно если оборудование специализированное, срок рассмотрения проекта большой.

Есть еще одна составляющая остаточной стоимости. Это стоимость оборотных активов – готовая продукция, сырье и материалы, дебиторская задолженность, авансы поставщикам за вычетом краткосрочных обязательств (кредиторская задолженность, авансы покупателей, задолженность по заработной плате и по расчетам с бюджетами). Получаем остаточную стоимость проекта.

Вторая группа – показатели финансовой состоятельности проекта. Это максимальная ставка процентов по кредиту и остаток свободных денежных средств на прогнозном расчете проекта. Проводится анализ рисков осуществления проекта. Для этого могут быть проанализированы границы изменения основных исходных параметров проекта, при которых проект остается безубыточным.

При оценке проекта на действующем предприятии строится прогнозный финансовый план предприятия без учета реализации проекта, финансовый план проекта, финансовый план предприятия с учетом реализации инвестиционного проекта.

Расчет показателей инвестиций необходимо проводить, помня о следующем: расчет и интерпретация показателей эффективности полных инвестиций проводится до подбора схемы финансирования проекта. Показатели характеризуют «внутреннюю» эффективность проекта.

Расчет и интерпретация показателей эффективности собственных средств проводится с учетом привлечения источников финансирования (собственных средств или заемного капитала). Для составления финансового плана проекта можно воспользоваться стандартными программными продуктами. Компьютерные модели «Альт-Инвест» и «Альт-Инвест-Прим» позволяют подготовить финансовый план для проектов различной направленности (новое производство, проекты модернизации) и различной отраслевой принадлежности.

Некоторые особенности проектов с лизингом оборудования. Инвестиционные проекты, в которых предполагается покупка оборудования

на условиях лизинга, отличаются некоторой спецификой оценки их эффективности: для таких проектов довольно сложно корректно рассчитать классические показатели эффективности. Классически срок окупаемости рассчитывается с учетом произведенных инвестиционных затрат, которые складываются из капитальных затрат и прироста оборотного капитала. Затраты при лизинге оборудования – лизинговые платежи – являются текущими затратами. Поэтому величина капитальных затрат незначительна или равна нулю на начальных этапах реализации проекта. В этом случае и срок окупаемости будет мал.

Чистый поток денежных средств в классическом варианте для расчета показателей эффективности проекта определяется как сумма денежных потоков проекта без учета источников финансирования – собственных и заемных. Поэтому для оценки эффективности инвестиционных проектов с финансированием через механизм лизинга можно воспользоваться «условным» показателем «совокупный дисконтированный денежный поток». Данный показатель будет рассчитан с учетом лизинговых платежей в оттоке денежных средств.

Это даст базу для сравнения альтернатив реализации проекта. Например, что нам выгоднее – покупать оборудование за счет собственных/заемных средств или брать оборудование в лизинг. Хотелось бы отметить некоторые преимущества лизинга:

- не предполагает быстрого возврата всей суммы долга. Как правило, срок договора лизинга совпадает со сроком полной амортизации оборудования (с учетом коэффициента ускоренной амортизации);
- лизинговые платежи могут быть согласованы с лизинговой компанией таким образом, чтобы обеспечить более выгодные условия возмещения стоимости оборудования и выплаты процента лизинговой компании;
- заключить договор лизинга обычно проще, чем кредитный договор.

Для расчета возможных вариантов графиков лизинговых платежей и оценки результатов реализации проекта можно работать со специализированными компьютерными моделями оценки инвестиционных проектов «Альт-Инвест», где есть отдельный блок «Лизинг». Для более детального расчета графика лизинговых платежей и моделирования различных условий можно работать с моделью «Альт-Лизинг».

Обычный объем бизнес-плана 15–35 страниц. Если в бизнес-плане менее 10 страниц, он может произвести впечатление недостаточной его основательности, хотя в целом объем бизнес-плана зависит от его назначения. Компьютер позволяет без большого труда внести в план изменения с учетом возможных нюансов. Для написания бизнес-плана можно воспользоваться услугами консультантов и консультационных фирм. Однако планировать необходимо самим, так как этот план предназначен для нашего бизнеса и должен основываться на наших идеях и предложениях.

Научно-исследовательские работы (НИР) на предварительной стадии начинаются с **патентного поиска** в предметной области проекта. Поиск патентной информации осуществляется преимущественно в фондах патентной документации.

Цели патентного поиска определяются задачами использования технических решений, содержащихся в патентных документах. Поиск может проводиться на этапах создания, освоения и реализации новой техники и технологии.

Различают три основные группы патентного поиска:

- установление уровня технических решений;
- установление объема прав патентообладателя (ранее выданные патенты, утратившие силу патенты, срок действия патента и т. д.);
- установление условий осуществления прав патентообладателя (продажа лицензий, судебные споры и т. д.).

Установление уровня технических решений обычно проводится при составлении и экспертизе заявок на выдачу патента на объекты интеллектуальной собственности, при планировании и выполнении НИР и ОКР, при выполнении конструкторских разработок студентами в дипломных проектах. Поиск для определения уровня технических решений, как правило, проводится по документации последних лет, но не менее среднего срока обновления технических средств.

Поиск необходимых патентных документов рекомендуется проводить в следующем порядке:

- определение предмета поиска;
- выбор страны (стран) поиска;
- определение глубины поиска;
- установление основных и смежных классификационных рубрик.

Регламент поиска зависит от задач, которые определяют область проведения поиска по патентной и другой научно-технической информации.

При определении предмета поиска должен быть охвачен не только весь исследуемый объект в целом, но и включены комбинации элементов, входящих в этот объект.

Например, для устройства предметом поиска могут быть:

- принципиальная схема и общая компоновка устройства;
- принцип работы, область возможного применения устройства;
- узлы и детали устройства;
- материалы, используемые для изготовления элементов устройства, технология их изготовления.

Если темой патентного поиска является технологический процесс (способ), то предметом поиска могут быть:

- технологический процесс в целом;
- этапы технологического процесса;
- исходные продукты, промежуточные продукты и способы их получения;

- конечные продукты и области их применения;
- оборудование, на базе которого реализуется данный способ.

При выборе страны поиска по данному вопросу следует учитывать, что в региональных и территориальных фондах имеется недостаточное количество описаний изобретений. Достаточно полную информацию по решаемой проблеме можно, в частности, найти в реферативных журналах ВИНТИ (Всероссийский институт научной и технической информации), где патентные документы распределены по предметно-тематическому принципу. Реферативный журнал поможет выявить не только страны и фирмы, занимающиеся данной проблемой, но и основные и смежные рубрики **МПК** (международная патентная классификация), **НКИ** (национальная классификация изобретений) и **УДК** (универсальная десятичная классификация).

В основном поиск должен быть проведен по следующим странам: Россия (включая СССР), США, Франция, Великобритания, Германия, Япония и Швейцария, а также по другим странам, в которых прогрессирует данная область техники.

Глубина поиска информации определяется в зависимости от задач информационных исследований. Если поиск ведется с целью определения достигнутого уровня и тенденций развития вида техники, то глубина его составляет 5–15 лет.

Для определения новизны разрабатываемых технических решений при составлении и экспертизе заявок на изобретение по существу глубина поиска устанавливается с 1920 г.

Результаты патентного поиска затем используются при выполнении *научно-исследовательских работ* (НИР) и *опытно-конструкторских работ* (ОКР) на предварительной стадии проектирования для оформления *технического задания* и конкретного *технического предложения* по проекту.

НИР и ОКР призваны обеспечить научную и конструкторскую проработку принципиальной схемы мехатронной системы, техническую и технологическую возможности ее реализации, технические требования к системе.

Арсенал методов НИР весьма широк. Он включает в себя математические методы программирования в задачах проектирования (линейное, квадратичное, математическое программирование, различные методы оптимизации и т. п.), методы конечных элементов определения напряжений, деформаций и форм конструкций в статических и динамических системах с конечномерными и распределенными параметрами. В НИР используются также различные методы моделирования и имитации сложных технических систем с целью их оптимизации и проверки работоспособности. Широко используются также системы автоматизированного проектирования (САПР), включая методы виртуального проектирования.

При выполнении ОКР перспективным является создание и использование *систематизированного банка известных проектных решений* применительно к мехатронным системам для решения функциональных задач

(см.: *А. Ф. Крайнев. Идеология конструирования.* – М.: Машиностроение, 2003. – С. 41–45). После формулирования задачи достаточно по определенной системе выбрать аналоги и прототип, а затем работать с одним или несколькими вариантами. Такой подход реален при наличии современной вычислительной техники. Результаты ОКР используются на стадиях «Техническое предложение» и «Эскизный проект».

Подготовленное на предпроектной стадии техническое задание (ТЗ) содержит следующие основные разделы:

- наименование и область применения изделия;
- назначение изделия;
- технические требования к изделию;
- технико-экономические показатели;
- порядок испытаний и приемки изделия.

Выбор критериев качества проектной работы зависит от множества взаимосвязанных факторов и, прежде всего, от требований технического задания. К критериям качества можно отнести: функциональную полноту системы, технологичность конструктивных элементов, минимизацию ресурсов, минимизацию массы конструктивных элементов, глубину синергетической интеграции (функционально-структурной и структурно-конструктивной), надежность, экономичность, эргодичность, возможность развития системы и т. п.

Лекция 3

Системы проектирования

3.1. Основные принципы проектирования

При решении задач проектирования руководствуются рядом основных принципов.

Последовательность и итерационность. Последовательность заключается в строгой очередности выполнения этапов проектирования механизма или машины, а итерационность – в корректировках проектных решений, полученных на предыдущих этапах проектирования.

Модульный принцип проектирования состоит в максимально возможном использовании однотипных узлов (или элементов узлов) при проектировании семейства машин различного целевого назначения. Сложные системы необходимо проектировать так, чтобы поведение одной части системы оказывало минимальное воздействие на остальную систему. Этот принцип базируется на активном использовании компьютерной техники и применяется тогда, когда уже имеется достаточно четкое представление о семействе проектируемых машин.

Применение модульного принципа при проектировании одного механизма или одной машины бессмысленно и невозможно. Только в случае разработки семейства машин и использовании при этом ограниченного числа готовых узлов последние становятся модулями. Модули являются следствием принятого технического решения, ибо в принципе проектировать можно так, что узлы одного назначения не будут даже отдаленно похожи друг на друга.

Различают модули *производственные* (применяемые без каких-либо изменений в машинах различного целевого назначения), *технологические* (отличающиеся в основном технологией изготовления и незначительными конструкторскими изменениями, относящимися, как правило, к местам крепления узлов, например: правый–левый, верхний–нижний, передний–задний и т. п.) и *конструкционные* (имеющие конструкционное подобие, но различные размеры).

Современное техническое обеспечение САПР позволяет легко получать зеркальные изображения узлов (технологические модули) с минимальными затратами труда и времени. Несколько сложнее получить конструкционные модули, так как при их проектировании необходимо одновременно выполнять требования соблюдения размерных рядов и максимально возможной унификации.

При использовании модульного принципа проектирования на уровне принятия концепции должен быть решен вопрос о критерии целесообразности его применения для проектируемого семейства машин. Модули, используемые в последующих разработках, переходят в категорию унифицированных узлов.

Принцип унификации связан с применением в семействе проектируемых механизмов или машин унифицированных сборочных единиц (узлов, подузлов, агрегатов), деталей (оригинальных и стандартных), комплектующих. Как показывает опыт автоматизированного проектирования, применение типовых унифицированных деталей нецелесообразно. Значительно выгоднее иметь большое количество макрусов и существенные заделы в банках данных по модификациям и унифицированным узлам, что позволяет избегать излишней детализации конструкторских разработок. Информацию об унифицированных деталях, узлах и системах целесообразно хранить на микрофишах систематизированно по группам.

Принцип соответствия выбора номенклатуры и значений выходных характеристик целевому назначению проектируемой машины или механизма. Чем ответственнее проектируемый объект, тем большее число выходных характеристик и параметров объекта регламентируется и тем более жесткие требования к ним предъявляются. Например, вероятность безотказной работы станков принимается в пределах 0,95–0,99, а самолетов – 0,999 99.

Другой пример. Число установленных и проверяемых выходных параметров точности станка при высоких требованиях к точности обрабатываемых деталей может достигать 20–30, в то время как для станков нормальной точности достаточно регламентировать 8–10 показателей. Основная цель регламентации выходных параметров станка – обеспечить погрешность обработки, которая находилась бы в установленных пределах в течение всего периода его эксплуатации.

Во всех случаях проектировщику необходимо помнить, что соответствие выходных характеристик механизма или машины их целевому назначению в первую очередь определяет общая компоновка, принимаемая на концептуальном уровне.

Принцип компромиссов. Проектирование – это непрерывная цепь компромиссов, которые приходится принимать на всех стадиях создания механизма или машины. Например, стремление к увеличению частоты вращения шпиндельных узлов всегда приводит к увеличению тепловыделения в опорах, которое не может превышать определенного уровня, и принятие окончательного решения всегда требует компромисса.

Улучшение любой технической характеристики машины (скорости, грузоподъемности, точности, надежности, производительности и др.) неизбежно вызывает увеличение ее стоимости, трудоемкости изготовления, часто требует другого уровня обслуживания и повышения культуры эксплуатации, что всегда приводит к компромиссным решениям.

Тенденция современных машиностроительных производств к концентрации операций постоянно требует от проектировщика решения задачи рационального сочетания технологических возможностей и усложнения конструкций оборудования. Избыточность технологических возможностей может быть не оправдана экономически.

Увеличение надежности машины почти всегда сопровождается ее усложнением и удорожанием. Выбор опор и направляющих, обеспечивающих незначительный износ, применение новых материалов, специальных покрытий, смазок, термообработки повышают трудоемкость и стоимость. Далеко не всегда ясно, *что* экономически целесообразнее – удорожать механизм или машину изначально либо совершенствовать систему обслуживания и ремонта в период эксплуатации. Компромисс заключается в обеспечении надежности в первую очередь наиболее ответственных деталей и узлов машины.

Принцип преемственности. Практически любые механизмы и машины являются продуктом эволюции, и в них всегда имеются элементы, детали и узлы, разработанные ранее. Соблюдение преемственности является одним из эффективных путей снижения затрат и сокращения сроков создания машины.

Хорошо отработанные элементы и узлы нет нужды заменять, и в одной машине прекрасно могут сосуществовать «новое» и «старое». Изыскание новых принципов построения механизмов и машин не является, как правило, задачей конструирования. *Суть проектирования – обеспечение требуемых характеристик машины, а не погоня за оригинальностью.* Преемственность определяется самой логикой последовательного развития машин. Модернизация, систематическое совершенствование позволяют поддерживать показатели выпускаемых машин на уровне постоянно возрастающих требований в течение определенного времени без коренной переработки конструкции. Например, ведущие автомобильные фирмы выпускают принципиально новую модель только раз в 8–10 лет.

Вопрос заключается в том, как *наиболее рационально сочетать новое со старым.* Это зависит как от качества отработки отдельных проектных решений (стоит ли заменить), так и от уровня технологической подготовки производства (можем ли заменить). На этом пути существуют две основные опасности: консерватизм, влекущий за собой добровольный отказ от творческого поиска и приводящий к необъективной критике новых решений и отказу от них, и психологическая инерция, ослабляющая самоконтроль, в результате чего конструктору очень трудно отрешиться от своего решения, так как он находится в плену идеи.

Преемственность при проектировании имеет несколько аспектов:

- приверженность фирм к определенным, отработанным годами решениям (в области компоновки, конструкции узлов, дизайна и т. п.). Это то, что определяет «почерк» фирм, и они весьма неохотно расстаются со своими традиционными решениями, часто связанными с «ноу-хау» и даже иногда носящими названия фирм;
- индивидуализация конструкций механизмов и машин не должна распространяться на все элементы и узлы. Модули могут и должны использоваться для различных моделей;
- конструктивная преемственность дает возможность увеличить эффективность разработки за счет использования модулей и унифицированных элементов и узлов;

- степень заимствования определяется на концептуальном уровне и зависит от возможности принятия своих и чужих технических решений в неизменном или модифицированном виде, реальных возможностей проектировщика, определяемых квалификацией, сроками и другими обстоятельствами.

Работающая сложная система неизбежно оказывается результатом работающей простой системы. Сложная система, разработанная на бумаге от начала и до конца, как правило, никогда не работает, и ее невозможно заставить работать. Всегда надо начинать с работающей простой системы.

3.2. Системы автоматизированного проектирования

Чтобы понять значение автоматизированных систем проектирования, мы должны изучить различные задачи и операции, которые решаются и выполняются в процессе разработки и производства продукции. Все эти задачи, взятые вместе, называются жизненным циклом продукта (*product life cycle*).

На рис. 3.1 показаны этапы жизненного цикла изделий и системы их автоматизации.

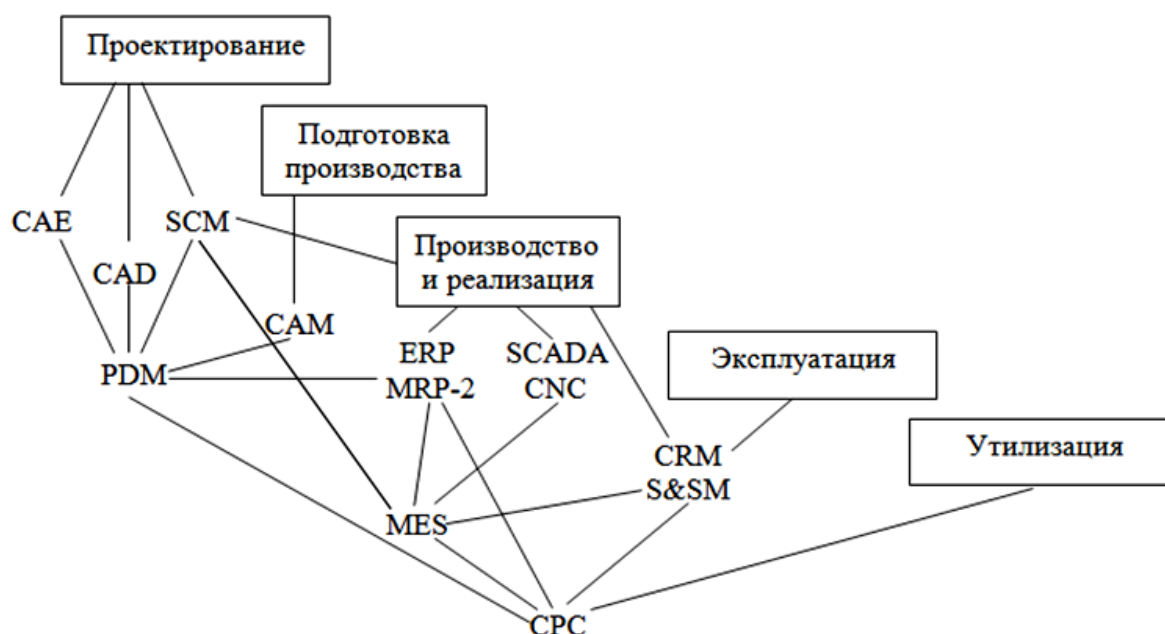


Рис. 3.1. Этапы жизненного цикла промышленных изделий и системы их автоматизации

На всех этапах жизненного цикла изделий имеются свои целевые установки. При этом участники жизненного цикла стремятся достичь поставленных целей с максимальной эффективностью. На этапах проектирования, ТПП и производства нужно обеспечить выполнение ТЗ при заданной степени надежности изделия и минимизации материальных и временных

затрат, что необходимо для достижения успеха в конкурентной борьбе в условиях рыночной экономики.

Под эффективностью понимают не только снижение себестоимости продукции и сокращение сроков проектирования и производства, но и обеспечение удобства освоения и снижение затрат на будущую эксплуатацию изделий. Особую важность требование удобства эксплуатации имеет для сложной техники, например, в таких отраслях, как авиа- или автомобилестроение.

Достижение поставленных целей на современных предприятиях, выпускающих сложные промышленные изделия, оказывается невозможным без широкого использования *автоматизированных систем* (АС), основанных на применении компьютеров и предназначенных для создания, переработки и использования всей необходимой информации о свойствах изделий и сопровождающих процессов. Специфика задач, решаемых на различных этапах жизненного цикла изделий, обуславливает разнообразие применяемых АС.

Основные типы АС с их привязкой к тем или иным этапам жизненного цикла изделий указаны на рис. 3.1.

CAE – *Computer Aided Engineering* (автоматизированные расчеты и анализ);

CAD – *Computer Aided Design* (автоматизированное проектирование);

CAM – *Computer Aided Manufacturing* (автоматизированная технологическая подготовка производства);

PDM – *Product Data Management* (управление проектными данными);

ERP – *Enterprise Resource Planning* (планирование и управление предприятием);

MRP-2 – *Manufacturing (Material) Requirement Planning* (планирование производства);

MES – *Manufacturing Execution System* (производственная исполнительная система);

SCM – *Supply Chain Management* (управление цепочками поставок);

CRM – *Customer Relationship Management* (управление взаимоотношениями с заказчиками);

SCADA – *Supervisory Control and Data Acquisition* (диспетчерское управление производственными процессами);

CNC – *Computer Numerical Control* (компьютерное числовое управление);

S&SM – *Sales and Service Management* (управление продажами и обслуживанием);

CPC – *Collaborative Product Commerce* (совместный электронный бизнес).

Современные САПР (или система CAE/CAD), обеспечивающие сквозное проектирование сложных изделий или, по крайней мере, выполняющие большинство проектных процедур, имеют многомодульную структуру. Модули различаются своей ориентацией на те или иные проектные задачи применительно к тем или иным типам устройств и конструкций. При этом возникают естественные проблемы, связанные с построением общих баз

данных, с выбором протоколов, форматов данных и интерфейсов разнородных подсистем, с организацией совместного использования модулей при групповой работе. Эти проблемы усугубляются на предприятиях, производящих сложные изделия, в частности, с механическими и радиоэлектронными подсистемами, поскольку САПР машиностроения и радиоэлектроники до недавнего времени развивались самостоятельно, в отрыве друг от друга.

Для решения проблем совместного функционирования компонентов САПР различного назначения разрабатываются системы управления проектными данными – системы PDM. Они либо входят в состав модулей конкретной САПР, либо имеют самостоятельное значение и могут работать совместно с разными САПР.

Уже на этапе проектирования требуются услуги системы SCM, иногда называемой *системой управления поставками комплектующих* (*Component Supplier Management*), которая на этапе производства обеспечивает поставки необходимых материалов и комплектующих.

АСТПП, составляющие основу системы САМ, выполняют синтез технологических процессов и программ для оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ), выбор технологического оборудования, инструмента, оснастки, расчет норм времени и т. п. Модули систем САМ обычно входят в состав развитых САПР, и потому интегрированные САПР часто называют системами CAE/CAD/CAM/PDM.

Функции управления на промышленных предприятиях выполняются автоматизированными системами на нескольких иерархических уровнях. Автоматизацию управления на верхних уровнях от корпорации (производственных объединений предприятий) до цеха осуществляют АСУП, классифицируемые как системы ERP или MRP-2.

Наиболее известные системы ERP выполняют различные бизнес-функции, связанные с планированием производства, закупками, сбытом продукции, анализом перспектив маркетинга, управлением финансами, персоналом, складским хозяйством, учетом основных фондов и т. п. Системы MRP-2 ориентированы главным образом на бизнес-функции, непосредственно связанные с производством.

АСУТП контролируют и используют данные, характеризующие состояние технологического оборудования и протекание технологических процессов. Именно их чаще всего называют системами промышленной автоматизации.

Для выполнения диспетчерских функций (сбора и обработки данных о состоянии оборудования и технологических процессов) и разработки программного обеспечения для встроенного оборудования в состав АСУТП вводят систему SCADA. Для непосредственного программного управления технологическим оборудованием используют системы CNC на базе контроллеров (специализированных компьютеров, называемых промышленными), встроенных в технологическое оборудование.

На этапе реализации продукции выполняются функции управления отношениями с заказчиками и покупателями, проводится анализ рыночной ситуации, определяются перспективы спроса на планируемые к выпуску изделия. Эти задачи решаются с помощью системы CRM. Маркетинговые функции иногда возлагаются на систему S&SM, которая, кроме того, служит для решения проблем обслуживания.

На этапе эксплуатации применяются специализированные компьютерные системы, предназначенные для ремонта, контроля, диагностики эксплуатируемых систем. Обслуживающий персонал использует интерактивные учебные пособия и технические руководства, а также средства для дистанционного консультирования при поиске неисправностей, программы для автоматизированного заказа деталей взамен отказавших.

Следует отметить, что функции некоторых автоматизированных систем часто перекрываются. В частности, это относится к системам ERP и MRP-2. Управление маркетингом может быть поручено как системе ERP, так и системе CRM или S&SM.

На решение оперативных задач управления проектированием, производством и маркетингом ориентированы системы MES. Они близки по некоторым выполняемым функциям к системам ERP, PDM, SCM, S&SM и отличаются от них именно оперативностью, принятием решений в реальном времени, причем большое значение придается оптимизации этих решений с учетом текущей информации о состоянии оборудования и процессов.

Перечисленные автоматизированные системы могут работать автономно, что в настоящее время обычно и происходит. Однако эффективность автоматизации будет заметно выше, если данные, генерируемые в одной из систем, будут доступны в других системах, поскольку принимаемые в них решения станут более обоснованными.

Чтобы достичь должного уровня взаимодействия промышленных автоматизированных систем, требуется создание единого информационного пространства не только на отдельных предприятиях, но и, что более важно, в рамках объединения предприятий (системы CPC или PLM – *Product Lifecycle Management*).

Единое информационное пространство обеспечивается благодаря унификации как формы, так и содержания информации о конкретных изделиях на различных этапах их жизненного цикла. Унификация формы достигается использованием стандартных форматов и языков представления информации в межпрограммных обменах и при документировании, т. е. применением так называемых *CALS (Continuous Acquisition and Lifecycle Support)* – технологий, которые будут рассмотрены ниже.

3.3. Структура и разновидности САПР

Как и любая сложная система, САПР состоит из подсистем. Различают подсистемы проектирующие и обслуживающие.

Проектирующие подсистемы непосредственно выполняют проектные процедуры. Примерами проектирующих подсистем могут служить подсистемы геометрического трехмерного моделирования механических объектов, изготовления конструкторской документации, схемотехнического анализа, трассировки соединений в печатных платах.

Обслуживающие подсистемы обеспечивают функционирование проектирующих подсистем, их совокупность часто называют системной средой (или оболочкой) САПР. Типичными обслуживающими подсистемами являются подсистемы управления проектными данными, подсистемы разработки и сопровождения программного обеспечения *CASE (Computer Aided Software Engineering)*, обучающие подсистемы для освоения пользователями технологий, реализованных в САПР.

Структурирование САПР по различным аспектам обуславливает появление *видов обеспечения* САПР. Принято выделять семь видов обеспечения САПР:

- *техническое (ТО)*, включающее различные аппаратные средства (ЭВМ, периферийные устройства, сетевое коммутационное оборудование, линии связи, измерительные средства);
- *математическое (МО)*, объединяющее математические методы, модели и алгоритмы для выполнения проектирования;
- *программное*, представляемое компьютерными программами САПР;
- *информационное*, состоящее из базы данных, СУБД, а также включающее другие данные, используемые при проектировании (отметим, что вся совокупность используемых при проектировании данных называется информационным фондом САПР, а база данных вместе с СУБД носит название банка данных);
- *лингвистическое*, выражаемое языками общения между проектировщиками и ЭВМ, языками программирования и языками обмена данными между техническими средствами САПР;
- *методическое*, включающее различные методики проектирования; иногда к нему относят также математическое обеспечение;
- *организационное*, представляемое штатными расписаниями, должностными инструкциями и другими документами, регламентирующими работу проектного предприятия.

Классификацию САПР осуществляют по ряду признаков, например, по приложению, целевому назначению, масштабам (комплексности решаемых задач), характеру базовой подсистемы – ядра САПР.

По приложениям наиболее представительными и широко используемыми являются следующие группы САПР:

1. САПР для применения в отраслях общего машиностроения. Их часто называют машиностроительными САПР или системами *MCAD (Mechanical CAD)*.

2. САПР для радиоэлектроники: системы *ECAD (Electronic CAD)* или *EDA (Electronic Design Automation)*.

3. САПР в области архитектуры и строительства.

Кроме того, известно большое число специализированных САПР или выделяемых в указанных группах, или представляющих самостоятельную ветвь в классификации. Примерами таких систем являются САПР больших интегральных схем (БИС), САПР летательных аппаратов, САПР электрических машин и т. п.

По целевому назначению различают САПР, обеспечивающие разные аспекты (страты) проектирования. Так, в составе MCAD появляются рассмотренные выше CAE/CAD/CAM-системы.

По масштабам различают отдельные программно-методические комплексы (ПМК) САПР, например: комплекс анализа прочности механических изделий в соответствии с методом конечных элементов (МКЭ) или комплекс анализа электронных схем; системы ПМК; системы с уникальными архитектурами не только программного (*software*), но и технического (*hardware*) обеспечения.

По характеру базовой подсистемы различают следующие разновидности САПР:

1. САПР на базе подсистемы машинной графики и геометрического моделирования. Эти САПР ориентированы на приложения, где основной процедурой проектирования является конструирование, т.е. определение пространственных форм и взаимного расположения объектов. К этой группе систем относится большинство САПР в области машиностроения, построенных на базе графических ядер.

В настоящее время широко используются унифицированные графические ядра, применяемые более чем в одной САПР (ядра *Parasolid* фирмы *EDS Unigraphics* и *ACIS* фирмы *Integraph*).

2. САПР на базе СУБД. Они ориентированы на приложения, в которых при сравнительно несложных математических расчетах прорабатывается большой объем данных. Такие САПР преимущественно встречаются в технико-экономических приложениях, например, при проектировании бизнес-планов, но они имеются также при проектировании объектов, подобных щитам управления в системах автоматики.

3. САПР на базе конкретного прикладного пакета. Фактически это автономно используемые ПМК, например, имитационного моделирования производственных процессов, расчета прочности по МКЭ, синтеза и анализа систем автоматического управления и т. п. Часто такие САПР относятся к системам CAE. Примерами могут служить программы логического проектирования на базе языка VHDL, математические пакеты типа MathCAD.

4. Комплексные (интегрированные) САПР, состоящие из совокупности подсистем предыдущих видов. Характерными примерами комплексных САПР являются CAE/CAD/CAM-системы в машиностроении или САПР БИС. Так, САПР БИС включает в себя СУБД и подсистемы проектирования компонентов, принципиальных, логических и функциональных схем, топологии кристаллов,

тестов для проверки годности изделий. Для управления столь сложными системами применяются специализированные *системные среды*.

3.4. Интеграция CAD- и CAM- систем

Наибольшего успеха САПР может достигнуть только в случае полной интеграции CAD и CAM. Поэтому первоочередной задачей является полная автоматизация технологической подготовки производства, потому что эта фаза связывает проектирование и производство. Именно подготовка производства стала основным препятствием на пути к интеграции CAD и CAM. Интеграция средств проектирования и производства не завершится до тех пор, пока технологическая подготовка не будет автоматизирована.

Технологическая подготовка производства (*Computer Aided Process Planning – CAPP*) заключается в выборе технологических процессов и их параметров, а также оборудования для проведения этих процессов. Задача состоит в том, чтобы превратить заготовку в деталь, изображенную на техническом чертеже.

Технологическую подготовку можно определить также как составление подробных технологических инструкций для станка или сборщика агрегата изделий.

На выходе этапа технологической подготовки получается план, описывающий последовательность технологических процессов или сборочных операций. План производства иногда называется операционной картой, маршрутной картой или сводкой планирования операций.

В табл. 3.1 приведен план процесса производства детали, изображенной на рис. 3.2. Помимо выбора и упорядочения операций важную часть плана составляет выбор инструментов и крепежа. Выбор инструмента включает в себя также выбор станка, на котором этот инструмент будет установлен. Крепежные устройства направляют инструмент или держат обрабатываемую деталь.

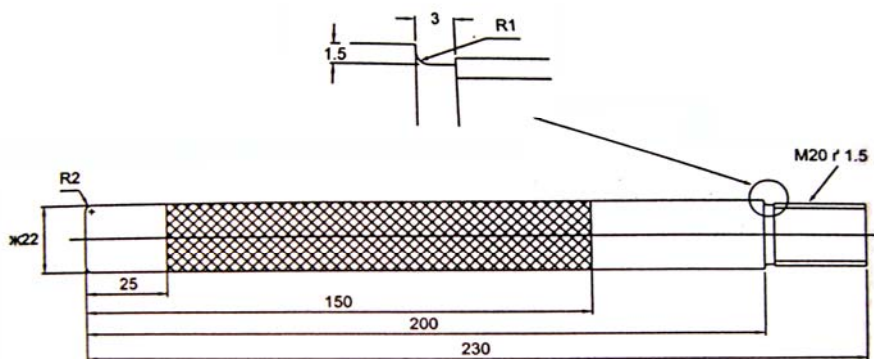


Рис. 3.2. Изготавливаемая деталь

Таблица 3.1

Пример плана производства

Деталь №				Название	Дата
SNU-SM-001				Ручка	10 февраля 1998 г.
Материал				Размер	
6061-T6 алюминий				Ø22 × 206	
№ оп	Станок	Стандартная настройка	Время работы, мин	Инструкции	Инструменты и параметры
010	Токарный	6	0,5	Установить материал в патрон. Длина выступающей части 45 мм Обработать торец Внешний диаметр Ø21,8 × 25 Напильником снять фаску R2	700 об/мин 0,15 мм/об 80° алмазный напильник T/F
020	Токарный	7	0,5	Установить материал наоборот. Длина выступающей части 45 мм Обработать торец Снять 30 мм до выступа Сформировать канавку 3 × 1,5 × R1	Гравировальный резец Резец для бороздки
030	Токарный	5	2	Однозаходная резьба M20 × 1,5 Довести резьбу леркой	Резец для резьбы 200 об/мин Рычаг подачи установить по резьбе Шаг винта 1,5 мм Лерка M20 × 1,5
040	Токарный	2	1,5	Галтование резьбы	Напильник № 3
050	Токарный	9	2	Сверление по центру 60° × Ø8 (приблизит.)	Сверло, теплоотвод
060	Токарный	3	3	Продвинуть заготовку Зажать 12 мм необработанного материала Пододвинуть бабку Сделать насечку 125 мм	Резец для насечки
070	Верстак	0	3	Очистить, снять заусенцы, проверить	

План производства детали или агрегата зависит от множества факторов. К ним относятся: геометрия детали, требуемая точность и качество поверхности, количество деталей и используемый материал. Например, для изготовления очень гладкой поверхности может потребоваться шлифовка, тогда как более грубой поверхности достаточно токарной обработки (при той же самой геометрии детали). Небольшое количество деталей можно изготовить на станке, а большие количества выгоднее штамповать на прессе. Выбор операций также во многом определяется имеющимися средствами.

Неавтоматизированный подход к подготовке производства

Традиционно планирование производства выполнялось вручную. Теперь это называется неавтоматизированным подходом. Опытный сотрудник, часто бывший оператор-станочник, изучает чертеж детали и подготавливает инструкции по ее изготовлению, т. е. план производства. В зависимости от цеха вырабатываемый им план может быть достаточно сложным, а может быть просто совокупностью описаний отдельных операций.

В опытном производстве, где все операторы имеют высокую квалификацию и могут работать с несколькими станками, а большинство деталей относятся к одному и тому же типу, технологический план обычно становится не более чем последовательностью операций обработки, а все подробности выполнения этих операций определяются операторами самостоятельно. Однако если деталь должна быть изготовлена на полностью автоматизированной линии, технологический план будет содержать подробные сведения о каждой операции. Вне зависимости от сложности плана его подготовка очень сильно зависит от знаний планировщика, имеющихся инструментов, материалов, стандартных приемов и характерных масштабов стоимости.

К сожалению, эти сведения обычно документируются недостаточно полно, а чаще всего хранятся исключительно в памяти технолога. Если память у него хорошая, он может вспомнить план производства аналогичной детали и видоизменить его под новую деталь. В некоторых компаниях планы классифицируются вручную и хранятся в рабочих журналах.

В процессе разработки планов производства новых продуктов инженеры-технологи чаще всего действуют примерно одинаково. Типичная последовательность этапов планировки приведена ниже.

1. *Изучение формы детали в целом.* Технолог изучает инженерно-техническую документацию, определяет общую структуру детали и потенциальные трудности, которые могут возникнуть при ее производстве. Можно ли зажать эту деталь в тиски, поместится ли она между губками? Не окажется ли, что она слишком длинная и тонкая и изогнется, когда ее зажмут? И так далее.

2. *Определение оптимальной формы заготовки, если она не задана в документации.* По чертежу планировщик обычно с легкостью определяет

очертания детали. Это помогает ему выбрать форму заготовки, из которой данная деталь может быть изготовлена с минимальным объемом отходов. Размеры заготовки обычно на 6–8 мм превышают размеры готовой детали.

3. *Определение базовых поверхностей и конфигураций.* Инженер-технолог определяет минимальное количество конфигураций, необходимых для получения базовых поверхностей механической обработки. Затем он записывает операции для каждой конфигурации.

4. *Определение элементов детали.* Инженер-технолог выделяет элементы детали, т. е. геометрические формы, которые должны быть вырезаны на заготовке, из которой будет сделана деталь. Форма элементов определяет форму инструментов и траекторию их перемещения при обработке заготовки.

5. *Группировка элементов по конфигурациям.* Инженер-технолог группирует элементы таким образом, что каждая группа формируется в рамках одной и той же конфигурации. Некоторые детали могут быть произведены в конфигурациях, определенных ранее для базовых поверхностей, другие могут потребовать задания новых конфигураций. Затем формируется список операций по изготовлению элементов детали для каждой конфигурации.

6. *Упорядочение операций.* Внутри каждой конфигурации порядок операций по производству соответствующих базовых поверхностей и элементов определяется взаимозависимостями этих операций и их взаимным влиянием.

7. *Выбор инструментов для каждой операции.* Технолог старается по возможности использовать один и тот же инструмент для нескольких операций. Ему приходится учитывать время на смену инструмента и время на обработку.

8. *Выбор или проектирование зажимов для каждой конфигурации.* Этот этап планирования сильно зависит от опыта технолога, потому что количество стандартных зажимов и крепежных приспособлений невелико. Правильный выбор зажимов очень важен для достижения высокого качества продукта.

9. *Итоговая проверка плана.* Инженер-технолог проверяет осуществимость конкретных конфигураций, вероятность создания помех инструментам крепежными приспособлениями и т. д.

10. *Уточнение плана производства.* Технолог добавляет в план подробности по изготовлению отдельных элементов, выбирает скорость подачи и обработки, оценивает затраты и время изготовления и т. д.

11. *Подготовка документации.* Готовый технологический план производства отдается главному технологу.

Автоматизированный подход к подготовке производства

Модифицированный подход (variant approach) – это один из двух методов, используемых для разработки систем автоматизированной технологической подготовки. Другой подход называется *генеративным (generative approach)*, речь о нем пойдет ниже.

Модифицированный подход называется так потому, что он является модификацией неавтоматизированного подхода: технолог пользуется не только

своей памятью, но и памятью компьютера. Другими словами, рабочий журнал технолога хранится в компьютерном файле.

Типичный технологический план производства подобной детали может автоматически извлекаться из такого файла после описания анализируемой детали в соответствии с определенной системой кодирования. Выбранный план производства может редактироваться в интерактивном режиме; в него вносятся поправки, соответствующие специфике конкретной детали. Таким образом, модифицированный подход требует наличия базы данных со стандартными планами производства для каждого семейства деталей. Такой план должен содержать все инструкции, которые будут входить в план производства любой детали из данного семейства. Детали классифицируются по семействам на основании концепции групповой технологии. Согласно этой концепции каждой детали присваивается код, зависящий от ее элементов, после чего детали группируются в семейства в соответствии с присвоенными кодами. О групповой технологии будет рассказано в другом разделе.

Итак, модифицированный подход к разработке плана производства выражается в следующем. Технологическая подготовка производства новой детали начинается с кодирования ее особенностей, что эквивалентно описанию детали на языке группой технологии. Затем деталь может быть отнесена к какому-либо семейству на основании ее кода, после чего из базы данных извлекается стандартный план производства для деталей этого семейства. В плане содержатся общие инструкции по производству любых деталей семейства, поэтому может потребоваться его редактирование для получения плана нужной детали.

Редактирование осуществляется средствами компьютерной системы. Часто изменения оказываются незначительными, потому что новый план представляет собой лишь небольшую модификацию стандартного. Благодаря этому на этапе подготовки плана экономится время, а готовые планы оказываются гораздо более последовательными, чем разрабатываемые вручную.

Если деталь нельзя отнести к одному из существующих семейств, технолог может разработать новый стандартный план производства в интерактивном режиме.

Генеративный подход (generative approach) состоит в том, что технологический план вырабатывается автоматически на основании технических требований к детали. В технические требования должны включаться подробные сведения о материале, особенностях обработки и предлагаемых методиках проверки, а также графическое изображение формы детали.

На первом этапе разработки плана производства новой детали при генеративном подходе технические требования вводятся в компьютерную систему. В идеале они должны считываться непосредственно из базы данных САПР. Для этого необходимо, чтобы автоматизированная система технологической подготовки могла распознавать элементы детали, требующие машинной обработки, такие, как отверстия, пазы и выемки.

Реализация первого этапа значительно упрощается, если при моделировании детали используется объектно-ориентированный подход. Однако даже конструктивные элементы, используемые в системе объектно-ориентированного моделирования, могут потребовать преобразования к элементам, которые изготовлены машинной обработкой.

Некоторые конструктивные элементы однозначно сопоставляются с технологическими, тогда как преобразования других представляют собой не совсем обычную процедуру. Кроме того, информации об элементах, вообще говоря, недостаточно для технологической подготовки производства. Например, большинство моделей САД не содержат сведений о допусках и материалах, и их приходится вводить вручную. При этом схема кодирования должна определять все геометрические элементы и их параметры, в частности положение, размеры и допуски. Закодированные данные сопровождаются информацией в текстовом формате. Наконец, система должна иметь сведения о форме заготовки.

На втором этапе закодированные данные и текстовая информация преобразуются в подробный технологический план производства детали. На этом этапе определяется оптимальная последовательность операций и условия их выполнения. К условиям относятся используемые инструменты, крепления, измерительные приборы, зажимы, схемы подачи и скорости обработки. Для построения столь подробного плана производства детали произвольной сложности требуется большая база данных и сложная логическая система.

На сегодняшний день автоматизированный подход ограничивается отдельными классами деталей с относительно ограниченным набором элементов. Поэтому большинство существующих систем автоматизированной технологической подготовки производства (например, CAM-1 CAPP, MIPLAN, MITURN, MIAPP, ACUDATA/UNIVATION, CINTURN и COMCAPPV) основаны на альтернативном подходе. Однако в литературе уже появляются упоминания о системах, основанных на генеративном подходе (CPPP, AUTAP, APPAS, GENPLAN, CAR, MetCAPP, ICEM-PART). В последующих разделах мы кратко остановимся на наиболее популярных системах автоматизированной технологической подготовки производства.

Групповая технология проектирования и подготовки производства

Как было показано в предыдущем разделе, объединение подобных деталей в семейство в рамках правильной системы координирования совершенно необходимо для автоматизированной технологической подготовки производства. Концепция групповой технологии – то, на чем основана эта классификация. Определение *групповой технологии* (*group technology – GT*) может быть записано следующим образом:

Групповая технология – это группировка задач, в основе подобных друг другу, позволяющая найти общее их решение, сэкономив тем самым время и усилия.

Это всеобъемлющее определение можно конкретизировать, определив область его применения. Суть групповой технологии состоит в создании базы данных подобных деталей, проектов и технологий и использовании этой базы для внедрения общей процедуры проектирования и производства таких деталей. Детали объединяются в семейства по конструктивному подобию (например, по схожести форм) и по технологическому подобию (например, по необходимым операциям, таким как фрезерование или сверление).

Групповая технология широко используется для упрощения продвижения продуктов на производстве. Выделение деталей с общими технологическими параметрами позволяет разработать эффективные планы производства, выделяя для каждого семейства одну ячейку плана. Таким образом упрощаются технологические маршруты, сокращаются временные затраты на передачу материалов между станками и длительность производственных циклов.

Более того, поскольку подобные детали производятся на одних и тех же станках, часто сокращаются и временные затраты на настройку станков. Может использоваться специальное технологическое оснащение. В предыдущем разделе отмечалось, что коды групповой технологии используются для выбора существующих планов в автоматизированной технологической подготовке производства.

Инженерам-технологам не приходится разрабатывать планы с нуля для каждой новой детали – вместо этого они могут обращаться к планам производства аналогичных деталей и изменять их в соответствии с техническими требованиями к новым деталям.

Концепция групповой технологии дает преимущества и на этапе проектирования. С ее помощью часто удается устранить избыточное разнообразие деталей, предоставив конструкторам возможность осуществлять поиск по семействам деталей. Часто конструкторы просто не знают о наличии аналогичных проектов среди текущих разработок. Обычно это бывает связано с тем, что система нумерации деталей не дает им достаточной информации. В таких случаях возникает тенденция к дублированию деталей с незначительными изменениями, не имеющими отношения к назначению деталей. Избыток деталей приводит к быстрому увеличению количества бумаг, а также к расходам заготовок.

Системы управления данными о продуктах (PDM)

В предыдущем разделе мы рассмотрели технологическую подготовку производства – ключевой элемент, без которого невозможна интеграция CAD и CAM. Однако цикл разработки продукта включает в себя не только проектирование и производство, но и анализ, контроль качества, упаковку, доставку и маркетинг. Цель компьютеризации состоит в том, чтобы интегрировать все эти виды деятельности посредством общей базы данных, поэтому существует потребность в механизме передачи информации между ними.

Если рассматривать ситуацию в динамике, то маркетинговые концепции должны передаваться в отдел планирования продуктов и в группу проектирования. Группа проектирования взаимодействует с производственным отделом и группой поддержки. Сведения об обнаруженных проблемах возвращаются в отделы проектирования и производства. Сведения о продажах и проектах передаются поставщикам и партнерам. Данные о расходах обрабатывает бухгалтерия.

Все эти виды деятельности тесно связаны друг с другом, поэтому изменения в содержании или состоянии проекта должны быть доступны всем участникам во избежание дорогостоящих ошибок.

Объем технических данных по мере разработки чрезвычайно возрастает, из-за чего просмотр и поиск по базе данных становятся крайне неэффективными. К счастью, существуют программные пакеты, называемые *системами управления данными о продуктах (product data management – PDM)*. Системы PDM упрощают передачу данных между отделами. Использование такой системы улучшает взаимодействие и повышает эффективность управления проектами.

Системы PDM были разработаны для управления огромными объемами электронных данных, создаваемых системами CAD, CAM и CAE. Инженеры страдали от переизбытка данных и тратили слишком много времени на поиск информации. Важность PDM особенно возросла, когда детали стали разрабатываться в разных CAD. Собственная система управления, встроенная в программу CAD, могла достаточно эффективно работать с чертежами и моделями, созданными в этой конкретной программе, но чаще всего оказывалась неспособной взаимодействовать с другими программами CAD или продуктами третьих фирм.

Системы PDM, связанные с множеством различных пакетов приложений, лучше справляются с управлением данными в масштабе предприятия. Кроме того, PDM облегчают доступ к вспомогательным данным: номерам деталей, техническим требованиям, результатам тестов и анализов.

Со временем возможности PDM расширились. К ним добавилась поддержка проектирования путем автоматизированной маршрутизации документации на этапе корректирования. Безбумажный документооборот сократил длительность цикла разработки продукта. Появилась возможность выделять данные и отслеживать историю каждого продукта и его компонентов вместе со всеми данными по различным версиям и модификациям продуктов. Вскоре область применения PDM была еще более расширена, она охватила не только проектирование и разработку, но и отделы продаж, производства и поддержки.

В последнее время системы PDM стали еще более популярны благодаря развитию Интернета, Web и интрасетей. Практически все производители PDM рекламируют поддержку работы с Web, а веб-технологии действуют как катализатор внедрения PDM в новые корпорации. Концепция Web стала популярной благодаря универсальности, дешевизне и доступности, а также аппаратной независимости. Самым большим препятствием на пути к широкому признанию PDM были трудности с доступом у конечных пользователей.

Web решает эту проблему, предоставляя простой и универсальный интерфейс пользователя при очень низких затратах на поддержку. Благодаря поддержке веб-технологий PDM стали играть ключевую роль в предоставлении доступа к актуальной информации множеству групп. PDM обеспечивает согласованность данных и управляет документооборотом, гарантируя доставку информации адресату в самое подходящее для принятия решений время.

Лекция 4

Средства моделирования в САПР

Моделирование используется в САПР для определения параметров проектируемых объектов еще на этапе их создания и оценки. При этом оно позволяет определять статические и динамические параметры как объекта в целом, так и его отдельных модулей. Например, методом моделирования можно выполнить кинематический анализ механизмов, определить напряженное состояние деталей, оценить работоспособность привода и системы управления объекта и т. п.

Моделирование можно разделить на аналитическое и физическое. К аналитическому моделированию относятся математическое и имитационное моделирование, геометрическое, а также виртуальное моделирование.

Физическое моделирование реализует физическую модель проектируемого объекта (например, технология быстрого прототипирования – *rapid prototyping*).

4.1. Математическое моделирование

Математическое моделирование (ММ) является основой основ проектирования механизмов и машин. Моделирование в процессе проектирования с внедрением САПР получило принципиально новые возможности: за существенно меньшее время стало возможным сравнить значительно большее число вариантов конструкции.

Полнота и адекватность математических моделей определяют достоверность оценки выходных характеристик и параметров проектируемых механизмов и машин, а также возможность их оптимизации и прогнозирования с учетом вероятностной природы эксплуатационных нагрузок и происходящих в машинах процессов.

Модель объекта проектирования в общем виде представляет уравнение функционирования механизма или машины:

$$\bar{y} = \bar{Y}(\bar{P}, \bar{X}),$$

где \bar{Y} – вектор выходных параметров объекта; \bar{P} – вектор внешних и внутренних воздействий; $\bar{X} = (x_1, x_2, \dots, x_k)$ – вектор структурных и параметрических переменных объекта проектирования.

По выходным параметрам объекта проектирования вычисляют вектор качества объекта проектирования \bar{y} , который сравнивают с регламентированным значением $[\bar{y}]$: $\Delta \bar{y} = [\bar{y}] - \bar{y}$. Знак и величина составляющих вектора определяют качество и надежность объекта проектирования.

В любом случае подробность и точность выбираемой или составляемой математической модели должны находиться в соответствии с заданным качеством объекта. Излишняя подробность модели приводит к неоправданному увеличению машинного времени, недостаточная – к неправильному результату. Весьма желательна проверка адекватности принятой модели.

4.2. Имитационное моделирование

Имитационное моделирование (ИМ) предполагает проведение численных экспериментов с математическими моделями, описывающими поведение систем, с привлечением для этого ЭВМ. Таким образом, имитационная модель представляет собой машинный аналог сложной системы, она позволяет заменить эксперимент с реальной системой экспериментом с математической моделью этой системы в ЭВМ. Поэтому ИМ так широко применяется для проектирования сложных объектов и для изучения сложных систем, особенно в тех случаях, когда реальный эксперимент слишком дорог или вообще невозможен.

Имитационное моделирование позволяет использовать как точную количественную информацию, так и информацию, полученную от экспертов с учетом оценок, суждений и различных эвристик. В этом состоит *главное преимущество* ИМ перед математическими моделями.

Имитационную модель сложной системы (СС) можно использовать при решении задач в следующих случаях:

- если не существует законченной постановки задачи исследования и идет процесс познания объекта моделирования; имитационная модель служит средством изучения явления;
- если аналитические методы имеются, но математические процедуры столь сложны и трудоемки, что имитационное моделирование дает более простой способ решения задачи;
- когда кроме оценки влияния параметров СС желательно наблюдение за поведением компонентов СС в течение определенного периода;
- если имитационное моделирование оказывается единственным способом исследования сложной системы из-за невозможности наблюдения явлений в реальных условиях;
- когда необходимо контролировать протекание процессов в СС путем замедления или ускорения явлений в ходе имитации;
- при подготовке специалистов и освоении новой техники, когда на имитационной модели обеспечивается возможность приобретения необходимых навыков в эксплуатации новой техники;
- когда изучаются новые ситуации в СС, о которых мало что известно или не известно ничего; в этом случае имитация служит для предварительной проверки новых стратегий и правил принятия решений перед проведением экспериментов на реальной системе;

- когда особое значение имеет последовательность событий в проектируемой СС и модель используется для предсказания «узких» мест в функционировании системы и других трудностей, появляющихся в поведении СС при введении в нее новых компонентов.

Недостатки ИМ: разработка хорошего ИМ часто обходится дороже создания математической модели и требует больших временных затрат; ИМ не может точно отражать реальную сложную систему (быть полностью адекватной сложной системе).

На рис. 4.1 показаны основные этапы имитационного моделирования.

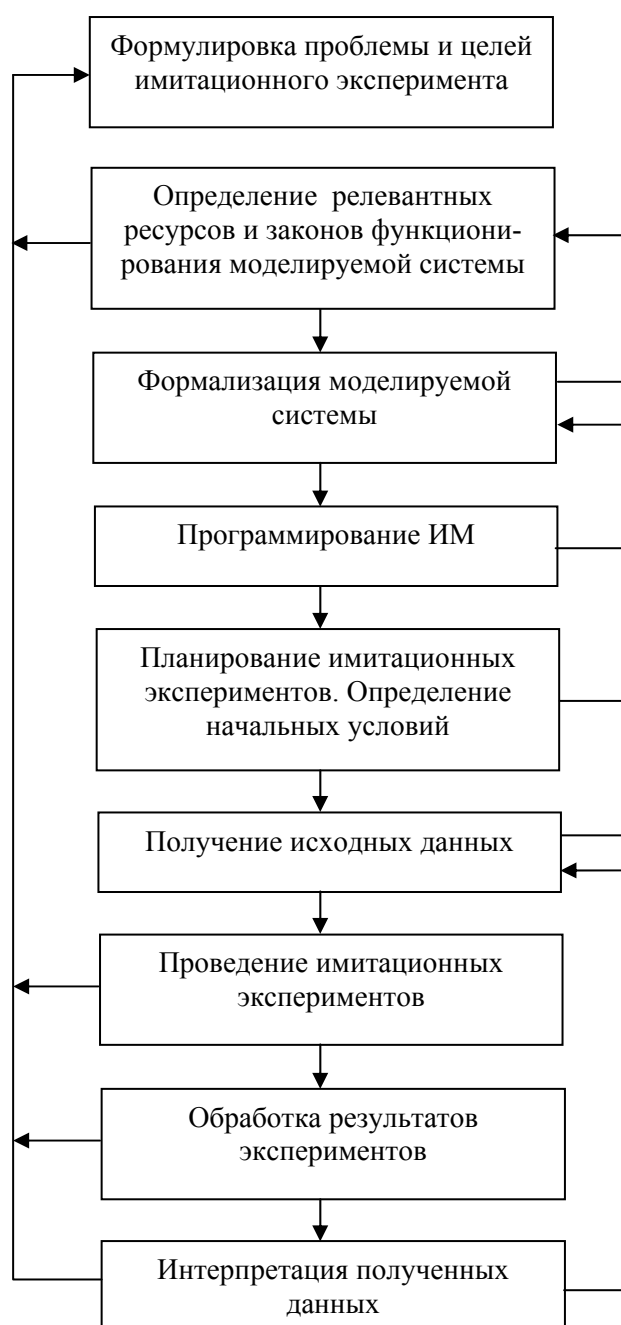


Рис. 4.1. Этапы имитационного моделирования

Системы геометрического моделирования позволяют работать с формами в трехмерном пространстве (в отличие от системы автоматизированной разработки чертежей в двухмерном пространстве).

Пример геометрического моделирования – ребенок, лепящий из пластилина фигурку. Системы геометрического моделирования созданы для того, чтобы решить проблемы, связанные с использованием физических моделей в процессе проектирования. Они легко воспроизводятся в виде трехмерного рисунка.

Системы геометрического моделирования делятся на *каркасные, поверхностные, твердотельные и немногочисленные*.

Каркасное моделирование представляет форму тела в виде набора характеризующих ее линий и конечных точек.

Поверхностное моделирование – математическое описание модели, включающее данные о поверхностях тела.

Твердотельное моделирование предназначено для работы с объектами, состоящими из замкнутого объема. Системы линий и поверхностей должны образовывать замкнутый объем, т. е. объем тела полностью заполнен материалом.

4.3. Физическое моделирование

Быстрое прототипирование и изготовление (БПИ) – это способ физического моделирования для получения физического прототипа конструкции, например детали (физический объект). Широко используется на стадии анализа проекта (детали) по окончании концептуального проектирования.

В своей основе процессы быстрого прототипирования и изготовления (БПИ) (*rapid prototyping and manufacturing*) состоят из трех шагов: формирование поперечных сечений изготавливаемого объекта из полимерных материалов (или за счет спекания твердых частиц и порошка лучом лазера); послойное наложение этих сечений и комбинация слоев. Поэтому для создания физического объекта требуются только данные о его поперечных сечениях. Процессы БПИ являются безынструментальными – позволяют создавать физический объект без использования инструментов (по сравнению, например, со станками с ЧПУ).

Данные о поперечных сечениях изделия можно получить, используя объемные 3D-чертежи деталей, полученных методами геометрического (например, твердотельного) моделирования.

Методы БПИ [3, с. 379–412]

1. Стереолитография.
2. Отверждение на твердом основании.
3. Избирательное лазерное спекание.

4. Трехмерная печать.
5. Ламинирование.
6. Моделирование методом наплавления.
7. Недорогие станки для БПИ (настольные, офисные станки).

Кратко рассмотрим все перечисленные методы.

1. Стереолитография. Метод основан на избирательном отверждении поверхностного слоя фотополимера и построении трехмерных объектов из последовательно наложенных слоев.

Процесс изготовления детали протекает и следующим образом (рис. 4.2):

- 1) Фоточувствительный полимер, затвердевающий на свету, поддерживается в жидком состоянии.
- 2) На толщину одного слоя ниже поверхности жидкого полимера помещается платформа, способная двигаться в вертикальном направлении.

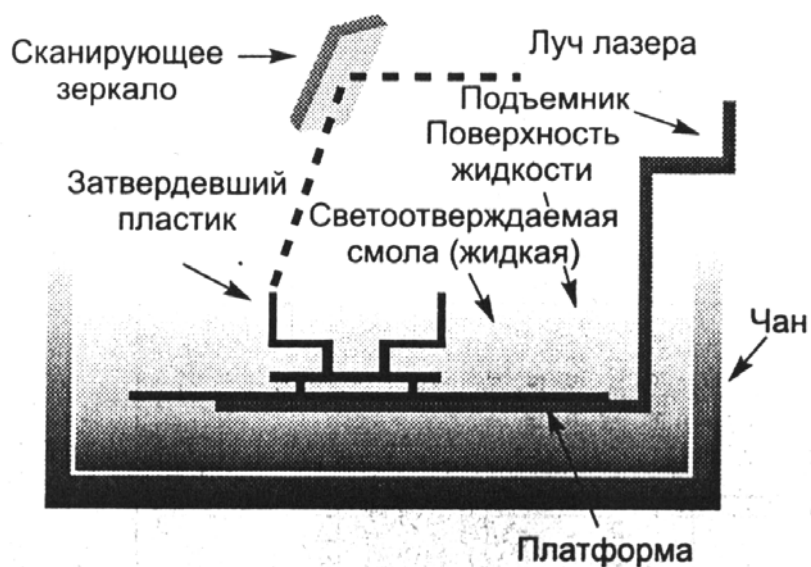


Рис. 4.2. Процесс стереолитографии

- 3) Ультрафиолетовый лазер сканирует слой полимера над платформой, отверждая полимер по форме соответствующего поперечного сечения. Обратите внимание, что этот процесс начинается с нижнего поперечного сечения детали.
- 4) Платформа опускается в ванну с полимером на толщину одного слоя, давая полимеру растечься по поверхности детали для начала нового слоя.
- 5) Шаги 3 и 4 повторяются до тех пор, пока не будет наращен верхний слой детали.

- 6) Для полного затвердевания детали выполняется окончательное отверждение. Этот шаг необходим, поскольку в каждом слое могут еще оставаться жидкие участки. Так как лазерный луч имеет конечные размеры, сканирование каждого слоя аналогично закрашиванию некоторой фигуры тонкой цветной ручкой.

2. *Отверждение на твердом основании* (solid ground curing – SGC).

В этом случае каждый слой отверждается путем экспонирования ультрафиолетовой лампой, а не сканирования лазерным лучом. Таким образом, все точки слоя затвердевают одновременно и окончательного отверждения не требуется. Типичный процесс отверждения на твердом основании имеет место в системе *Solider* от *Cubatal Israel*, работа которой происходит следующим образом:

- 1) По данным геометрической модели детали и желаемой толщине слоя рассчитывается поперечное сечение каждого слоя.
- 2) Для каждого слоя изготавливается оптическая маска по форме соответствующего поперечного сечения.

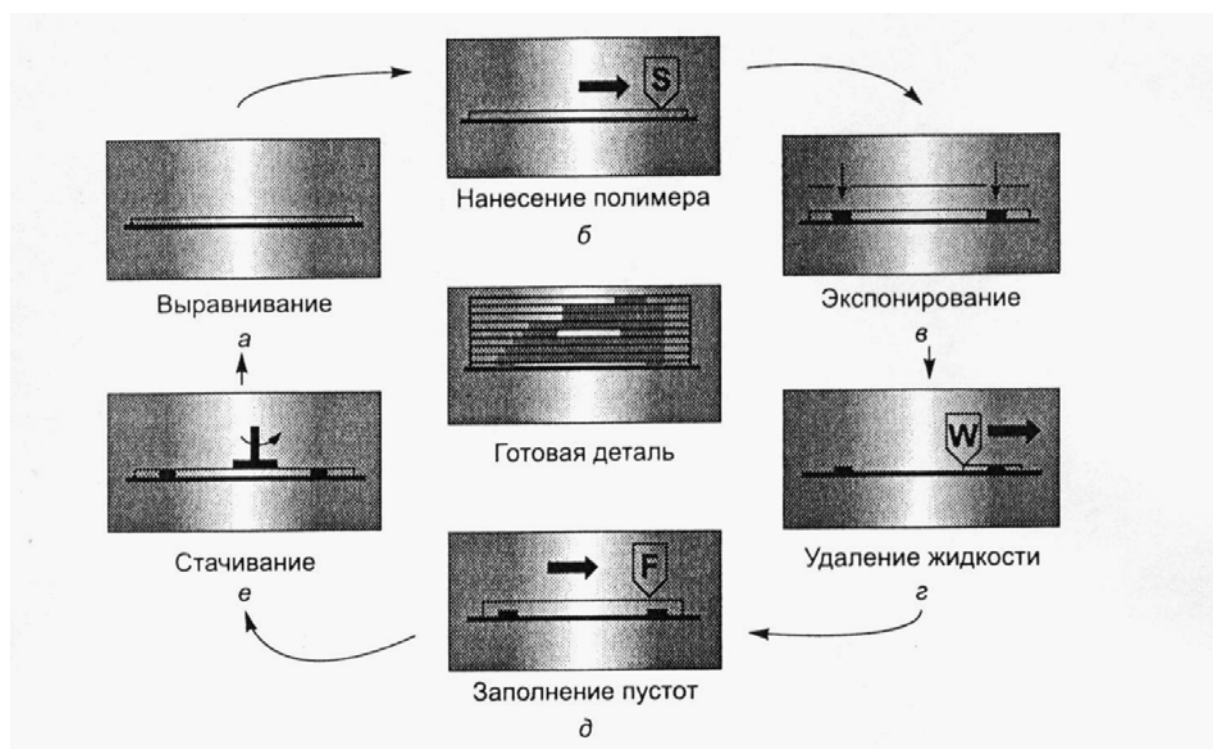


Рис. 4.3. Система Solider

- 3) После выравнивания (рис. 4.3, а) платформа покрывается тонким слоем жидкого фотополимера (рис. 4.3, б).
- 4) Над поверхностью жидкой пластмассы помещается маска, соответствующая текущему слою, и пластмасса экспонируется светом

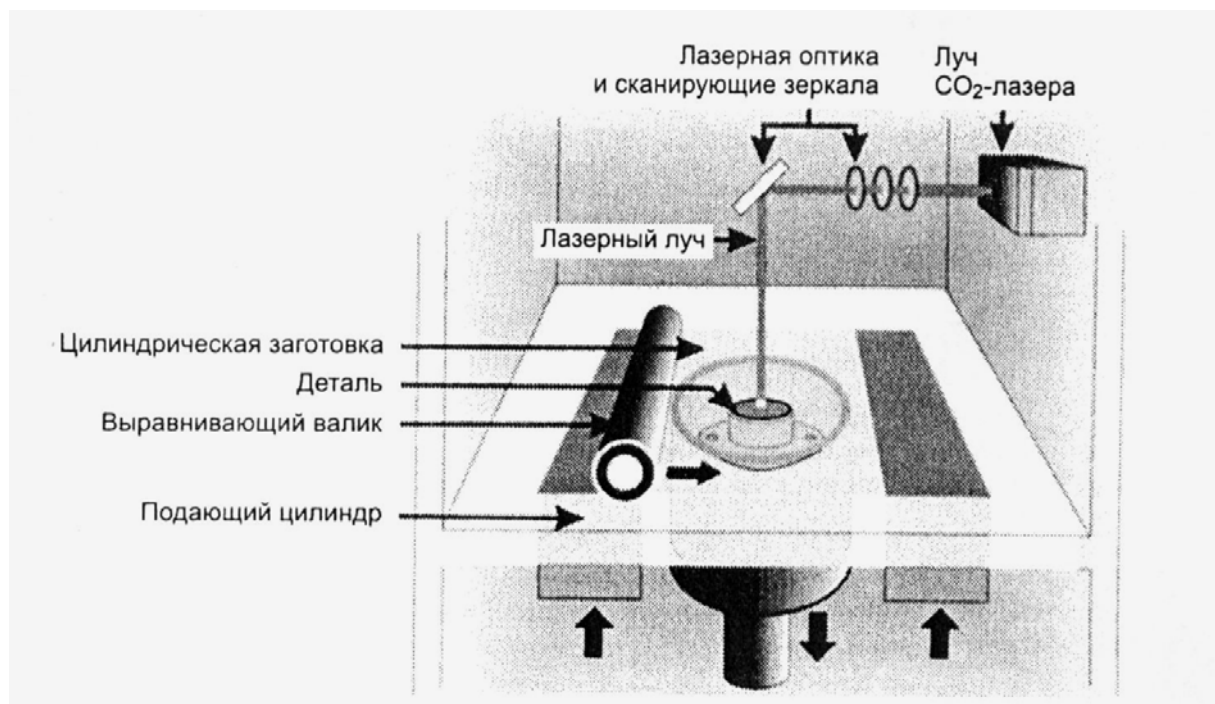
мощной ультрафиолетовой лампы (рис. 4.3, *в*). Обратите внимание, что процесс начинается с маски, соответствующей нижнему слою.

- 5) Оставшаяся жидкость удаляется с изделия аэродинамическим *wiper* ['waɪpə] – очистителем (рис. 4.3, *з*).
- 6) Изделие покрывается слоем жидкого воска, который заполняет пустоты (рис. 4.3, *д*). Затем к воску прикладывается холодная пластина, и он затвердевает.
- 7) Слой стачивается до желаемой толщины с помощью шлифовального диска (рис. 4.3, *е*).
- 8) Готовая часть изделия покрывается тонким слоем жидкого полимера, и шаги 4–7 повторяются для каждого последующего слоя, пока не будет обработан самый верхний слой.
- 9) Воск расплавляется и удаляется из готовой детали.

Главным преимуществом метода отверждения на твердом основании по сравнению с методом стереолитографии является отсутствие необходимости в поддерживающих структурах. Это обусловлено тем, что пустоты заполняются воском. Кроме того, благодаря использованию света лампы вместо лазерного луча исключается операция окончательного отверждения. Хотя отверждение на твердом основании позволяет изготавливать детали с большей точностью, чем стереолитография, процесс этот весьма сложен.

3. Избирательное лазерное спекание. Процесс изготовления детали путем избирательного лазерного спекания, разработанный фирмой DTM (США), протекает следующим образом (рис. 4.4):

- 1) Цилиндрическая заготовка помещается на высоте, необходимой для того, чтобы на нее можно было осадить слой порошкового материала желаемой толщины. Порошковый материал, используемый для изготовления прототипа, поступает из подающего цилиндра и наносится выравнивающим валиком (рис. 4.4).
- 2) Слой порошка избирательно сканируется и нагревается лучом лазера, вследствие чего частицы слипаются между собой. Просканированные частицы порошка образуют требуемое поперечное сечение. Обратите внимание, что этот процесс начинается с нижнего поперечного сечения детали.
- 3) Цилиндрическая заготовка опускается на толщину одного слоя для нанесения нового слоя порошка.
- 4) Луч лазера сканирует новый слой порошка, склеивая его с предыдущим и формируя следующее поперечное сечение.
- 5) Шаги 3 и 4 повторяются до тех пор, пока не будет создан самый верхний слой детали.
- 6) Для некоторых материалов может понадобиться окончательное отверждение.



4.4. Избирательное лазерное спекание

Поддерживающая структура не требуется, потому что пустоты каждого слоя заполняются необработанным порошком. Более того, в качестве материала для процесса избирательного спекания потенциально может использоваться любой плавкий порошок, даже металлический, если лазер обладает достаточной мощностью.

На практике для металлических порошков, частицы которых покрыты термопластическим связующим материалом, используется косвенное спекание. Под лучом лазера связующий материал расплавляется и свободно связывает частицы металлического порошка, образуя желаемую форму, которая называется *зеленой деталью* (*green part*). В этом случае достаточно, чтобы мощности лазера хватало для расплавления связующего материала.

Затем зеленая часть подвергается обработке в печи, в ходе которой связующий материал выжигается, а частицы металлического порошка связываются за счет обычных механизмов спекания. Получившаяся деталь носит название *коричневой детали* (*brown part*). Без дальнейшей обработки деталь будет довольно пористой из-за наличия пустот, которые ранее занимали частицы связующего материала. Чтобы снизить пористость, в печь помещается еще один материал – инфильтрант. Этот металл расплавляется при рабочей температуре печи и проникает в поры детали за счет капиллярного эффекта. Данный метод используется для изготовления форм для литья непосредственно по их геометрическим моделям. Ресурса таких форм достаточно для изготовления от 2 500 до 10 000 деталей-прототипов.

4. Трехмерная печать. Разработанный в Массачусетском технологическом институте процесс трехмерной печати был назван так из-за своей

схожести с печатью на струйном принтере. В трехмерной печати вместо чернил используется жидкое связующее вещество. Процесс трехмерной печати происходит следующим образом (рис. 4.5):

- 1) Платформа располагается на высоте, необходимой для того, чтобы можно было нанести на нее слой керамического порошка надлежащей толщины.
- 2) Нанесенный слой керамического порошка избирательно сканируется печатающей головкой, из которой поступает жидкое связующее вещество, вызывающее прилипание частиц друг к другу. Отсканированные печатающей головкой частицы образуют требуемую форму поперечного сечения. Обратите внимание, что этот шаг начинается с нижнего поперечного сечения.

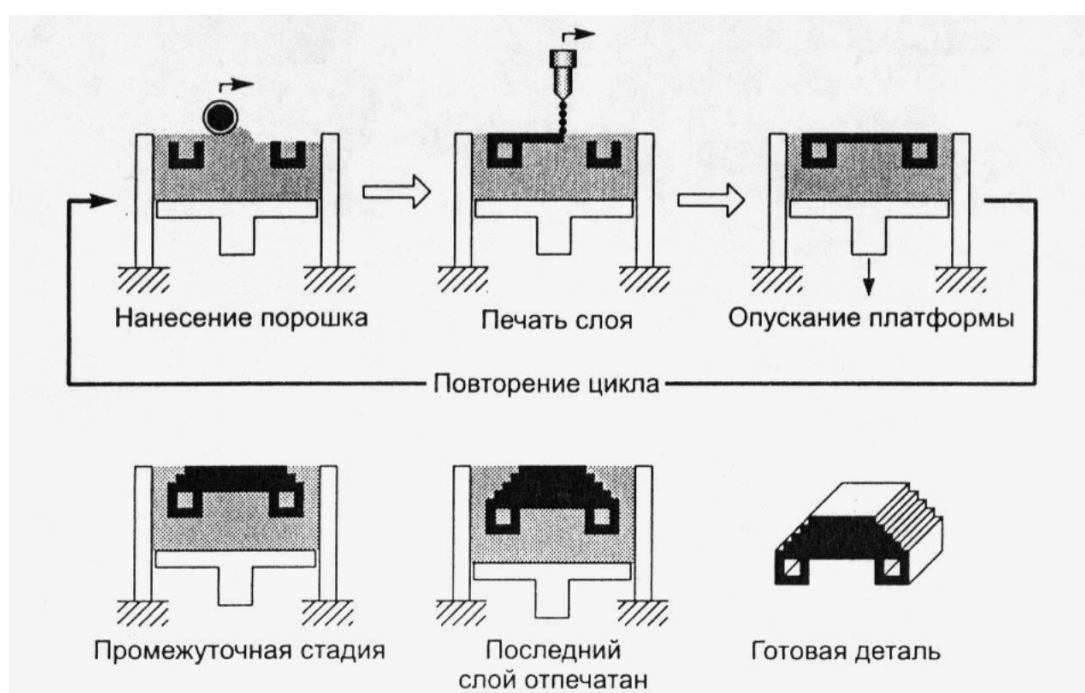


Рис. 4.5. Трехмерная печать

- 3) Платформа опускается на одну толщину слоя, позволяя нанести следующий слой порошка.
- 4) Новый слой сканируется, образуя следующее поперечное сечение и склеиваясь с предыдущим слоем.
- 5) Шаги 3 и 4 повторяются, пока не будет создан верхний слой детали.
- 6) Для отверждения детали проводится последующая тепловая обработка.

С помощью трехмерной печати было бы удобно изготавливать формы для литья, поскольку форма изготавливается как цельная деталь, состоящая из оболочки и полостей, и положение полостей относительно оболочки можно

было бы задавать точно. Однако формы для литья, изготовленные путем современной трехмерной печати, имеют невысокое качество поверхности.

5. Ламинирование (*laminated object manufacturing* – LOM).

Коммерциализированной фирмой *Helisys* деталь изготавливается путем ламинирования и лазерной резки материалов, поступающих в листовом виде. Слипание листов происходит за счет наличия термо-адгезивного покрытия. Процесс протекает следующим образом (рис. 4.6):

- 1) Каждый лист приклеивается к заготовке с помощью нагрева и давления, образуя очередной слой. Листовой материал подается в виде непрерывного рулона с одной стороны машины и принимается с противоположной стороны. Температуру и давление, необходимые для ламинирования, обеспечивает нагретый валик. Обратите внимание на то, что, когда к стопке приклеивается следующий лист, платформа опускается на толщину одного листа.

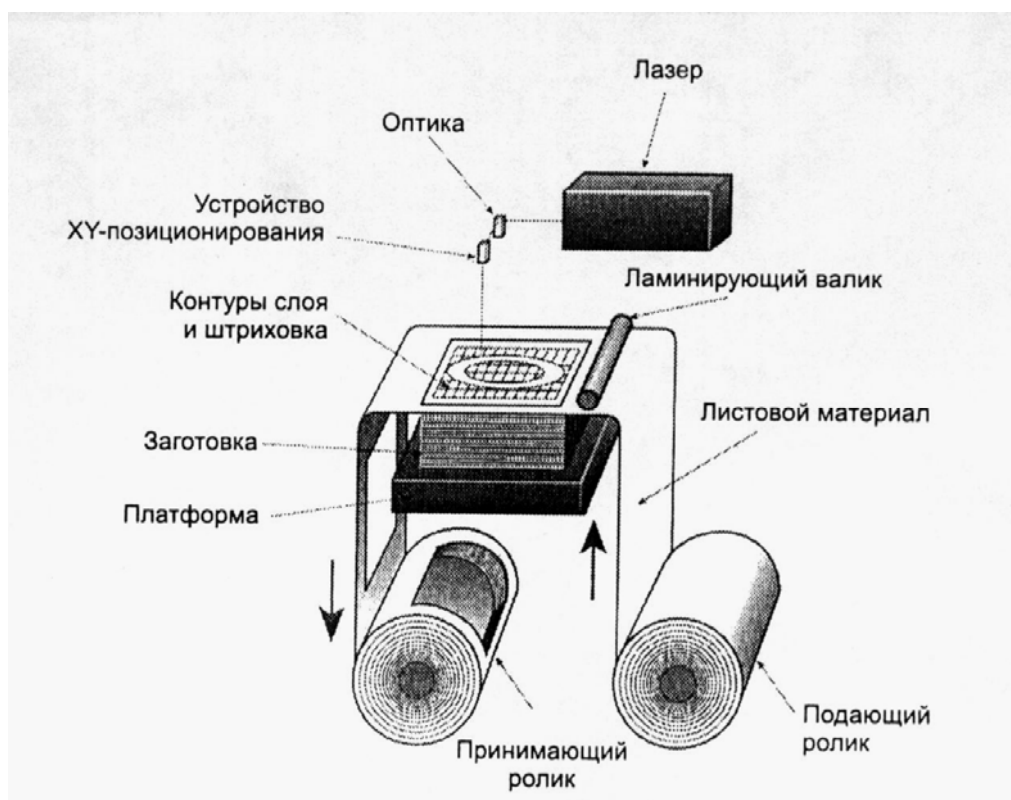


Рис. 4.6. Процесс ламинирования

- 2) После того как слой (лист) приклеен, он сканируется лазером вдоль контура текущего поперечного сечения. Обычно для этой цели используется лазер на углекислом газе мощностью 25 или 50 Вт. Как и в других процессах, этот шаг начинается с нижнего поперечного сечения. Обратите внимание, что здесь сканирование производится только по контурам. Это делает данный процесс более эффективным, чем процессы, требующие растрового сканирования.

- 3) Области слоя, выходящие за пределы контуров, штрихуются лазером, т. е. рассекаются на маленькие кусочки, называемые *черепичками* (*tiles*), для последующего удаления, когда деталь будет закончена.
- 4) Шаги 1–3 повторяются до тех пор, пока не будет наклеен и вырезан верхний слой детали.
- 5) После того как все слои будут готовы, внутри блока поддерживающего материала окажется готовая деталь. Этот материал затем разматывается на кусочки вдоль линий лазерной штриховки.
- 6) Готовую деталь можно покрыть герметиком, чтобы предохранить ее от влажности.

Наличие поддерживающего материала вокруг детали имеет свои преимущества и недостатки. Прежде всего, оно исключает необходимость во внешних поддерживающих структурах. При изготовлении детали внутри блока поддерживающего материала, имеющего определенную форму, геометрия всей структуры стабилизирована и соответственно ей не грозит перекося под собственным весом. Более того, нам не приходится беспокоиться об изолированных «островках», которые часто образуются, когда твердое тело, спроектированное в САД-системе, рассекается на слои.

Иными словами, ламинирование позволяет избежать создания специальных подпорок, которые точно фиксировали бы эти «островки» в пространстве, пока в процессе изготовления не будут созданы «мосты» к оставшимся частям детали. Однако удаление лишнего материала по окончании изготовления детали является непростой задачей.

Чтобы удалить только излишки, а хрупкие части детали при этом не сломать, необходимо бережно очистить ее вручную. Кроме того, полую структуру с замкнутыми поверхностями невозможно изготовить в виде единой части, поскольку в этом случае излишки материала невозможно будет извлечь изнутри. Сложность удаления ненужного материала характерна для любой части с узкими перемычками, внутренними полостями с ограниченным доступом, слепыми отверстиями и т. п. Далее большая часть материала, расходуемая при ламинировании, идет не на саму деталь, а остается неиспользованной в рулоне или образует поддерживающие структуры, которые будут удалены после изготовления. Это может быть весьма расточительно, если применяются более дорогостоящие материалы, чем бумага.

Помимо преимуществ и недостатков процесс ламинирования имеет следующие характеристики:

Это субтрактивный, а не аддитивный процесс, т. е. для создания слоя с требуемым поперечным сечением материал удаляется, а не добавляется. Во всех прочих процессах БПИ слои образуются путем добавления материала. Таким образом, потенциально ламинирование является самой быстрой технологией изготовления деталей с большим отношением объема к площади поверхности.

Детали образуются перемежающимися слоями материала и клейкого вещества. Соответственно многие из их физических свойств являются неоднородными и анизотропными.

Потенциальная точность процесса изготовления ламинированных объектов высока. В нем может использоваться сколь угодно тонкий листовой материал, что позволяет достичь хорошей разрешающей способности в направлении наращивания деталей. В действительности изготовить тонкий однородный листовой материал несложно, и усадка при ламинировании не представляет проблемы, поскольку контуры вырезаются после того, как происходит усадка.

Хотя процесс потенциально применим ко многим материалам, включая пластики, композиты и металлы, наиболее популярным на сегодняшний день является бумажное ламинирование.

6. Моделирование методом наплавления (*fused-deposition modeling – FDM*). В процессе наплавления коммерциализированной фирмой *Stratasys* каждый слой формируется путем выдавливания термопластичного материала, находящегося в жидком состоянии (рис. 4.7). Температура выдавливаемого материала незначительно превышает его температуру затвердевания (аналогичная ситуация при создании надписей на торте шоколадным кремом). Деталь изготавливается путем последовательного наплавления слоев. Этот процесс относительно прост, но его применение ограничено термопластичными материалами.

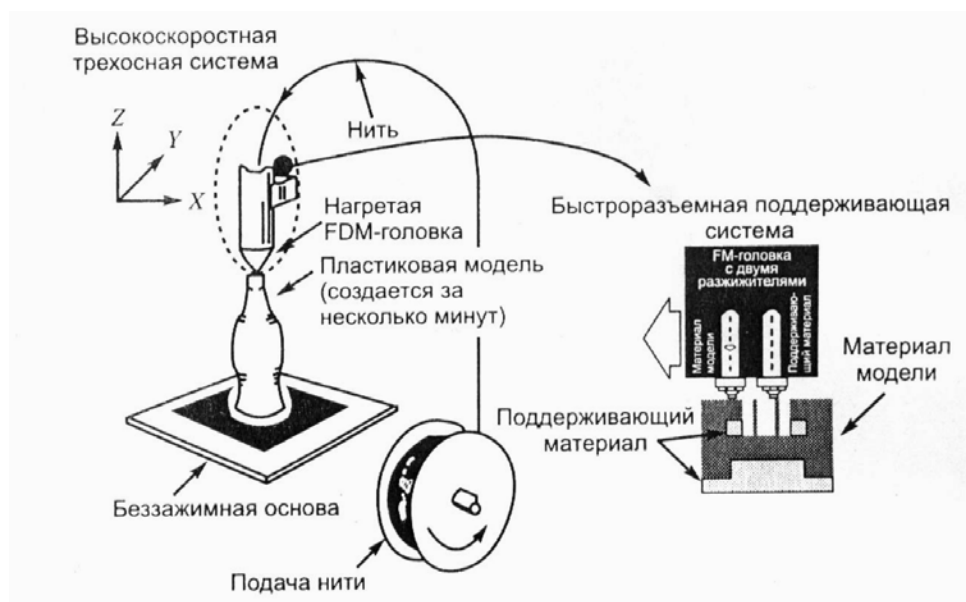


Рис. 4.7. Моделирование методом наплавления (с разрешения Stratasys, Inc.)

7. Недорогие станки для быстрого прототипирования и изготовления. Как было сказано выше, быстрое прототипирование и

изготовление позволяет сократить время и расходы, требуемые на доведение нового продукта от первоначальной идеи до производства. Использование быстрого прототипирования и изготовления на ранней стадии процесса проектирования позволит выявить фундаментальные ошибки, исправление которых может обойтись дорого, если они обнаружатся в тот момент, когда деталь уже готова к производству. Однако детали, изготовленные этим способом, недешевы и порой сложно определить, сколько деталей следует изготовить, чтобы получить от них максимальную отдачу.

Таблица 4.1

**Характеристики недорогих (настольных) станков
для быстрого прототипирования**

Модель	Actua 2100	Genesys	Model Maker II	JP System 5
Компания	<i>3D Systems</i>	<i>Stratasys, Inc.</i>	<i>Sanders Prototype, Inc.</i>	<i>Schroff Development Co</i>
Размеры рабочего пространства, мм	250x200x200	203x203x203	152x304x228	Стандартная версия: резец шириной 305 Расширенная версия: резец шириной 610
Технология	Печатающая головка с 96 соплами слой за слоем наносит термополимерный материал	Устройство трехмерной печати с подачей материала через экструзионную головку	Жидкостно-твердый струйный плоттер наносит два материала слой за слоем	Нарезка слоев резцом плоттера с ручным их наложением
Программный интерфейс	Программа Allegro и сокет TCP/IP	Программа AutoGen и сокет TCP/IP	Model Works (работает с файлами SLC, STL, AutoCad DXF, HPGL и OBJ)	Импортирует STL
Толщина слоя	—	—	0,013–0,13 мм	0,1–0,3 мм
Точность	–/300 DPI	0,356 мм – 0,33 мм	0,025 мм (x, y) 0,013 мм (z)	Не гарантируется какой-либо определенный уровень точности
Подача материала	Картридж с термополимерным материалом (хрупкий пластиковый полимер)	Кассеты с листами пластикового полимера (прочный пластиковый полимер)	Шарики термопластика и воска отдельно засыпаются в резервуар и расплавляются	Бумага
Размеры, мм	1370x760x1120	914x737x813	685x381x685	Площадь ~ 610x1220
Масса, кг	415	84	40,8	—

Кроме того, поскольку быстро изготовленные прототипы по-разному используются на различных стадиях процесса проектирования, физические требования к ним также будут варьироваться в зависимости от способа использования. И именно здесь может сыграть свою роль новый класс приборов – *офисные*, или *настольные, станки для моделирования*. С помощью таких приборов, как *Actua 2100 от 3D Systems*, *Genesys от Stratasys*, *Model Maker II от Sanders Prototype*, *Z402 от Z Corporation* и *JP System 5 от Schroff Development*, имеющих более низкую цену и меньшие эксплуатационные расходы, удобно изготавливать относительно грубые (за исключением *Model Maker II*), но недорогие прототипы для проверки реализуемости идеи и оценки проекта. Недорогие станки для быстрого прототипирования и изготовления от различных производителей сравниваются в табл. 4.1.

4.4. Виртуальная инженерия [3, с. 436–461]

Высокая трудоемкость построения дорогостоящих физических прототипов стимулировала создание новых методов разработки визуализации результатов компьютерного моделирования отдельных прототипов и целых производств.

Дело в том, что прогресс автоматизированной разработки привнес новую парадигму в проектирование и анализ. Прежде всего, системы геометрического моделирования настолько продвинулись вперед за последнее десятилетие, что современные CAD-системы способны обрабатывать модели деталей и агрегатов самой сложной геометрии и конструкции. Агрегат можно отображать, оценивать и модифицировать как единое целое, а его движение имитировать так же, как это делается с физическим прототипом.

Еще одно достижение – это анализ по методу конечных элементов. Он мог бы стать средством виртуальной оценки надежности и технических характеристик продукта, если бы его вычислительную эффективность можно было улучшить до такой степени, чтобы выводить результаты в реальном времени. С его помощью можно было бы предсказывать механические свойства и характеристики (напряжения, прогиб, вибрация, температура, давление в сложных деталях) так, как если бы они измерялись посредством различных экспериментов.

Более того, производители CAD-систем в настоящий момент пытаются объединить геометрическое моделирование с методом конечных элементов. Такая интеграция обеспечила бы непрерывное течение цикла проектирования и анализа. Метод конечных элементов использовался бы изначально в процессе проектирования для принятия конструкторских решений, что позволило бы сэкономить драгоценное время и затраты, связанные с перепроектированием.

Все эти тенденции привели к возникновению новой инженерной дисциплины – *виртуальная инженерия (virtual engineering)*.

Виртуальная инженерия – это имитационный метод, помогающий инженерам в принятии решений и управлении. Виртуальная среда представляет собой вычислительную структуру, позволяющую точно имитировать геометрические и физические свойства реальных систем. Виртуальная инженерия включает в себя имитацию различных видов инженерной деятельности, таких, как машинная обработка, сборка, управление производственными линиями, осмотр и оценка, а также процесс проектирования.

Таким образом, виртуальная инженерия может охватывать весь цикл разработки и производства продукта. После того как смоделирована деталь, имитируется ее машинная обработка и сборка. Затем, также с помощью имитации, собранный прототип тестируется, и в его конструкцию вносятся необходимые изменения. Когда прототип одобрен, имитируется производственная система и ее функционирование. Прогнозируется также себестоимость и график поставок. В результате этих имитаций получается оптимизированный конечный прототип и производственные процедуры, на основе которых затем реализуется физическая система.

Виртуальная инженерия дает совершенно новый подход к инженерным задачам. Использование имитации устранил необходимость в дорогостоящих физических прототипах и физических экспериментах. Время разработки коренным образом сократится, появится возможность проверить большее количество альтернативных вариантов конструкции, повысится качество конечного продукта. Виртуальная инженерия обеспечит также превосходный интерфейс для клиента, позволяя ему заранее увидеть трехмерную модель продукта и запросить конструктивные изменения. Можно будет построить прототип продукта, который недоступен, слишком опасен или слишком дорог для того, чтобы создавать его в реальности. Такая возможность будет неоценима в автомобильной и авиационной промышленности, где физические макеты стоят дорого, время разработки велико, продукты крайне сложны и требуется глубокая обратная связь от клиентов.

Основными компонентами виртуальной инженерии являются: *виртуальное проектирование, цифровая имитация, виртуальное прототипирование и виртуальный завод*. Виртуальное проектирование выполняется с помощью устройств виртуальной реальности. Цифровая имитация позволяет проверять и оценивать работу продукта без использования физических прототипов. В процессе виртуального прототипирования строится компьютерный прототип, имеющий ту же геометрию и физическое поведение, что и реальный продукт. Виртуальный завод – это имитация заводской производственной линии. Ниже следует описание каждой из этих составляющих.

Виртуальное проектирование выполняется в виртуальной среде с использованием технологий виртуальной реальности. Виртуальное проектирование сосредоточивается на альтернативном пользовательском интерфейсе для процесса проектирования. Используя технологии виртуальной реальности, конструкторы могут погрузиться в виртуальную среду, создавать компоненты, модифицировать их, управлять различными устройствами и взаимодействовать

с виртуальными объектами в процессе конструкторской деятельности. Конструкторы могут видеть стереоскопическое изображение виртуальных объектов и слышать пространственный реалистичный звук. Эти изображения и звук возникают, когда рука конструктора движет виртуальной рукой и пальцем. Прикосновение к виртуальному объекту ощущается конструктором в виде обратной связи. Тем самым замысел конструктора эффективно воплощается в проекте и проверяется функциональное поведение конструкции.

Основная цель виртуального проектирования – позволить конструктору действовать интуитивным и естественным образом. В системах геометрического моделирования, даже при том что современные CAD-системы предоставляют изощренные средства моделирования, взаимодействие конструктора с моделью неограничено. Возможности обзора ограничиваются изображением, спроектированным на монитор, а возможности ввода информации от конструктора – точечными манипуляциями с мышью.

Таким образом, в рамках CAD-технологии сегодняшнего дня конструктор является «одноглазым и однопалым». Более естественное взаимодействие, обеспечиваемое технологиями виртуальной реальности, дало бы конструктору большую свободу и позволило бы ему повысить креативность при создании модели. Вторая цель виртуального проектирования – на ранних стадиях проектирования учесть точку зрения потенциального пользователя продукции.

В процессе проектирования могут быть в полной мере оценены такие качества, как доступность и управляемость. Третья цель – учесть при проектировании опыт экспертов в сборке или манипулировании деталями. Этот опыт сложен и трудно формализуем, но система виртуального проектирования может пролить свет на положение пользователя, его взаимодействие с объектами и последовательность операций сборки.

Виртуальное проектирование потребует совершенно иного подхода к моделированию трехмерной геометрии. Например, меню и кнопки можно заменить технологией распознавания речи или жестов. Если конструктор захочет изменить размеры модели, то вместо того чтобы указать на нее, конструктор сможет взять ее в руки и растянуть. В связи с процессом виртуального проектирования непременно возникнут новые методы проектирования и схемы моделирования.

Цифровая имитация используется для проверки процессов, так как машинные операции необходимо тщательно проверить, прежде чем начинать реальную работу. Если в управляющем коде имеется ошибка, это может привести к серьезной поломке станка. Используя цифровую имитацию, пользователь перед началом работы имеет возможность проверить траекторию перемещения инструмента станка с ЧПУ, щупа координатно-измерительной машины или руки робота. Например, процессом машинной обработки можно управлять графически, как если бы это делалось на реальном станке: виртуальный станок с ЧПУ, читая стандартные инструкции, будет выполнять всю обработку в реальном времени, включая перемещение инструментов, принадлежностей, укладчиков и деталей. Непрерывный контроль за снятием

материала позволяет пользователю выявлять ситуации, приводящие к вибрации и поломке инструмента, появлению выбоин и зарубок. С помощью имитации пользователь может также спрогнозировать столкновения между инструментом и приспособлением или деталью.

Визуализация также помогает инженерам лучше понять систему. Она позволяет легко уяснить идею конструкции и заранее проверить ее эксплуатационные качества. В настоящее время для этой цели используется главным образом кинематическая имитация твердых тел. Имитация моделей более высокого уровня – жидкостей, человеческих существ и сложных сред – требует моделирования физических эффектов, включая эффекты динамики, вибрации, акустики и деформации. Однако сложные имитации с использованием виртуальных прототипов могут осуществить проверку рабочих характеристик системы быстрее и с меньшими затратами.

Виртуальным прототипированием (*virtual prototyping*) называют построение прототипа агрегата из геометрических моделей его отдельных частей. Виртуальный прототип называют иногда *цифровым макетом* (*digital mockup*) или *предварительной цифровой сборкой* (*digital preassembly*). Системы цифрового прототипирования позволяют визуализировать процесс сборки и проверять осуществимость предлагаемых агрегатов в рамках имеющихся производственных ограничений. Путем сборки виртуального прототипа можно выявить конструктивные просчеты и внести изменения в проект, чтобы реальную сборку можно было выполнить с первой попытки.

Основная функция виртуального прототипирования заключается в том, чтобы установить, осуществима ли операция сборки. Система проверяет сопряжение деталей в контексте сборочных ограничений и требований к допускам. Функции обнаружения столкновений указывают на мешающие друг другу детали. Проверяется также последовательность сборки и траектории движения деталей. Кроме того, можно определить оптимальные траектории сборки. Передовые системы позволяют также проводить структурный и функциональный анализ виртуального прототипа, используя встроенное аналитическое программное обеспечение. Часто выполняется кинематическая и динамическая имитация прототипа.

Инженеры смогут основывать конструкторские решения на виртуальных прототипах. Оптимизация конструкции будет достигаться путем последовательного уточнения виртуального прототипа. С увеличением степени детальности виртуального прототипирования станет возможной более точная структурная и функциональная имитация. Идеальной ситуацией станет тогда, когда виртуальный прототип будет иметь всю совокупность характеристик физического прототипа. Таким образом, со временем виртуальное прототипирование устранил необходимость в дорогих и трудоемких физических прототипах.

Виртуальный завод (*virtual factory*) – это смоделированная на компьютере полная производственная система. Виртуальный завод имитирует конструкции производственных участков, производственные процессы и

складские системы. Кроме того, для него можно программировать автоматизированное заводское оборудование – роботы, конвейеры и станки.

Система моделирует и имитирует такие компоненты, как конвейеры, накопители, доки, производственные участки и процессы. Кроме того, система моделирует процедуры – маршруты, последовательности и слияния. После этого модель производства анализируется в терминах затрат на рабочую силу, инвентаризации, эксплуатационных расходов, затрат на обработку и длительностей цикла.

Такие возможности позволяют использовать виртуальный завод для планирования производства, включая оценку проектов производственных систем и сравнение альтернативных способов производства. Когда эта технология достигнет зрелости, с помощью виртуального завода можно будет симитировать всю цепочку поставок, что позволит оценивать и оптимизировать весь процесс управления ресурсами и производством.

Итак, методы виртуальной инженерии предлагают совершенно новый подход к процессу проектирования, который позволяет оценить возможность производства различных вариантов конструкции (включая оценку качества сборки или эксплуатационную характеристику продукта) и оптимизировать производственный процесс (методом цифровой имитации), легко настроить продукт под требования заказчика, эффективно накопить обширную базу знаний, обеспечить основу для коллективной разработки проектов.

Рассмотрим аппаратуру, которая используется виртуальной инженерией. Виртуальная инженерия – чисто программная технология, и поэтому сама по себе не требует какого-либо специального оборудования. Однако для взаимодействия с пользователем необходимо оборудование виртуальной реальности. Это оборудование включает в себя устройства как ввода, так и вывода. Устройства вывода дают пользователю ощущения от виртуальной среды. Поскольку самый эффективный способ сенсорного восприятия – это зрение, главными компонентами систем виртуальной реальности являются устройства отображения. Эти устройства должны обеспечивать пользователю стереоскопический обзор.

Доступное в настоящий момент оборудование включает в себя головные дисплеи, бинокулярные всенаправленные мониторы, дисплеи пространственного погружения и специальные очки. Звук и осязание обогащают ощущения от виртуальной реальности, когда они используются в совокупности со зрительной системой. Типичным примером звуковой аппаратуры могут служить наушники с пространственно расширенной звуковой системой. Аппаратура осязания – это приборы с силовой обратной связью. Популярными устройствами ввода являются системы распознавания речи, следящие системы и информационные перчатки.

Головные дисплеи. Головной дисплей – это устройство отображения с полным погружением. Шлем полностью закрывает глаза и позволяет смотреть только прямо перед собой. Небольшой экран, смонтированный перед глазом пользователя, дает стереоскопическое изображение. Прибор имеет встроенную

следящую систему, благодаря которой изображение на дисплее меняется при изменении положения и ориентации головы пользователя. В настоящее время доступно более 40 моделей головных дисплеев. Среди них можно упомянуть FOHMD от CAE-Electronics и Looking Glass от Polhemus Lab.

Биноккулярные всенаправленные мониторы. Биноккулярный всенаправленный монитор – это механическая версия головного дисплея. Он состоит из дисплейной коробки, которая сбалансирована по весу на многозвенной стреле. Пользователь смотрит на дисплей, а движение его головы отслеживается через систему механических звеньев. Основным преимуществом биноккулярных всенаправленных мониторов перед головными дисплеями является быстрое и точное слежение. В продаже имеются биноккулярные всенаправленные мониторы BOOM-2C от Fake Space Labs (<http://www.fakespace.com>) и Cyberface3 от LEEP.

Дисплеи пространственного погружения. В дисплеях пространственного погружения используется панорамный видеоэкран, окружающий пользователя, так что пользователь чувствует себя погруженным в виртуальную среду. Дисплеи пространственного погружения обеспечивают большое поле зрения и свободу передвижения в виртуальной среде. В Университете штата Иллинойс (Чикаго) разработана четырехстенная системы пространственного погружения CAVE. Приобрести систему CAVE можно через фирму Pyramid System. Существуют большие куполообразные дисплеи пространственного погружения, такие, как Visionarium Graphics, имеющий 8 м в диаметре. Фирма Spitz Electrihorizen построила дисплей пространственного погружения диаметром 8,5 м.

Шторные очки. Шторные очки – это недорогое устройство отображения. Пользователь надевает устройство, напоминающее очки, которое попеременно закрывает обзор то одному, то другому глазу. Монитор или другое устройство отображения, синхронизированное с очками, имеет в два раза большую частоту обновления и попеременно показывает картинку для левого и для правого глаза. В результате на экране монитора пользователь видит стереоскопическое изображение. Данное устройство может использоваться вместе с выпускаемыми в настоящий момент дисплеями, поэтому оно экономически выгодно. Однако оно не обеспечивает достаточного погружения для того, чтобы пользователь увидел реальную среду, так как поле зрения ограничено размерами монитора. В продаже имеются шторные очки Crystal Eyes от Stereographics и SGS от Tektronix.

Устройства осязания. Устройство осязания дает ощущение физического прикосновения. Такое устройство позволяет пользователям почувствовать реальный объект через систему силовой обратной связи, создающую иллюзию работы с реальным материалом. Примером устройства осязания является джойстик с силовой обратной связью, через который пользователь ощущает силу реакции на рабочей руке. В продаже имеются джойстики Haptic Mater от Nissho Electronics и BSP Joystick от AEA Technologies.

Прибор *Phantom* фирмы *SensAble Technology* – это устройство осязания на базе карандаша, имеющее шесть степеней свободы. Более передовым типом устройства осязания является *экзоскелет* – сложная система механических звеньев, окружающая всю руку так, что каждый палец и сустав независимо получают силовую обратную связь. Он объединяет в себе информационную перчатку и устройство осязания. Примерами экзоскелетов являются *The Exoskeletal Hand Master* от *Sarcos* и *Force ArmMaster* от *Exos*.

Следящие системы. Следящие устройства используют электромагнитную, ультразвуковую, оптическую или механическую систему для определения положения и ориентации отслеживаемого объекта. Следящее устройство может быть встроено в головной дисплей для отслеживания направления взгляда и положения головы или в информационную перчатку – для отслеживания положения руки. Следящее устройство можно также прикрепить на любую часть тела. В продаже имеются такие следящие системы, как *Flock of Birds* от *Ascension* и *ISOTRAK II* от *Polhemus* (<http://www.polhemus.com>).

Типичным примером следящих устройств с использованием ультразвуковой технологии могут служить *Head-tracker* от *Logitech* (<http://www.logitech.com>) и *GAMS* от *Transition State Corporation*. Механическая система используется в устройствах *GyroEngine* от *Gyrations*, *ADL-1* от *Shooting Star Technology* и *Wrighttrack* от *Vidtronics*. Наконец, к устройствам с использованием оптической технологии относятся *GRD-1010* от *GEC Ferranti*, *DynaSight* от *Origin Instruments* и *RtPM* от *Spatial Positioning Systems*.

Информационные перчатки. Информационная перчатка имеет на каждом суставе пальцев руки датчики, измеряющие изгиб пальца. Положение руки в целом определяется следящей системой, прикрепленной к перчатке. Обычно информация, получаемая с перчатки, преобразуется в виртуальной среде снова в изображение, форма и положение которого динамически изменяются, следуя за движениями руки пользователя. В продаже имеются информационные перчатки *Dexterous Hand master* от *Exos*, *CyberGlove GG1801* от *Virex* и *DataGlove* от *Greenleaf Medical Systems*.

Примеры промышленного применения виртуальной инженерии

Самолет Boeing 777. *Boeing 777* – это первый коммерческий самолет, успешно спроектированный безбумажным методом. Для разработки модели 777 корпорация *Boeing* организовала 238 межфункциональных групп проектирования и изготовления, ответственных за конкретные продукты. Компания *Boeing* использовала CAD-систему *CATIA* от *Dassault/IBM* и разработала собственную систему предварительной компьютерной сборки *EPIC* (*Electronic Preassembly in Computer*). Перед сборкой первого самолета не было изготовлено ни одного физического прототипа, кроме макета носовой части (для проверки критической проводки). Виртуальное прототипирование позволило компании *Boeing* вовлечь в процесс проектирования самолета заказчиков и операторов (до линейных механиков). Виртуальное прототипирование

было настолько успешным, что несоосность при монтаже левого крыла составила всего 0,03 мм.

Виртуальный прототип локомотивного двигателя фирмы GM. Подразделение *Electro-Motive* фирмы *General Motors* разработало локомотивный двигатель *GM16V265H* мощностью 6 300 л. с. путем так называемой «виртуальной разработки продукта» в сотрудничестве с *Unigraphics Solutions*. Все детали были представлены в виде трехмерных моделей, и последующий анализ, оптимизация конструкции и программирование станков с ЧПУ и приспособлений проводились для этих моделей. Моделирование позволило обеспечить поставку продукта в сжатые сроки: первый двигатель был построен через 18 месяцев после начала программы, в то время как обычно подобный процесс занимает более 36 месяцев. Это позволило также гораздо быстрее провести тесты надежности, что дало *GM* возможность удовлетворить более жесткие требования к надежности.

Дизайн интерьера салона автомобиля фирмы Chrysler. Дизайн интерьера салона автомобиля *Dodge Durango* 1998 г. был разработан методом виртуального проектирования. Член дизайнерской группы сидит в упрощенном макете салона автомобиля, состоящем только из сиденья, руля и педалей. Дизайнер, на котором надеты головной дисплей системы виртуальной реальности, информационные перчатки и датчики движений, рассматривает виртуальный прототип интерьера автомобиля (приборная доска, органы управления радиоприемника, бардачок и окна) и взаимодействует с ним. Виртуальный прототип позволяет легко вносить изменения в дизайн и оценивать обзор, доступность и эстетику. Этот метод дает возможность быстро проверять различные варианты дизайна.

Поезд Metrocar 2000 в Стокгольме. *Metrocar 2000* – это новая система общественного транспорта в Стокгольме, разработанная компанией *Adtranz Sweden*. Используя программу *dVISE* от *Division*, *Adtranz* сконструировала виртуальные прототипы поездов, включая полностью оснащенные интерьеры с текстурными сиденьями, полами, рекламными плакатами и индикаторной панелью машиниста. Глядя на виртуальный прототип, зрители могут получить представление о масштабе, пространственных отношениях и эстетике дизайна. Это позволяет заказчику и инженеру на ранних стадиях проектирования знакомиться с дизайном продукта и вносить в него изменения.

Проектирование кораблей для Королевского военно-морского флота Великобритании. Морской директорат перспективных проектов Великобритании внедрил виртуальное проектирование в рамках своей новой программы разработки кораблей. С помощью программы *ENVISION* от *Deneb Robotics* методом имитации в интерактивном режиме был разработан кварталдек для нового корабля. Имитация включала движение корабля (с шестью степенями свободы) и его влияние на работающее оборудование, людей на борту и условия освещения в каютах. Это моделирование позволило инженерам оценить проект и внести в него необходимые изменения.

В заключение отметим, что виртуальная инженерия – зарождающаяся технология. Она обладает достаточным потенциалом для того, чтобы стать значительной составляющей деятельности инженера, однако на сегодняшний день функциональность и возможности применения систем виртуальной инженерии ограничены. Чтобы виртуальная инженерия превратилась в развитую технологию, необходимо получить возможность полностью отразить функциональное поведение физических систем посредством компьютерной имитации. Обсудим некоторые связанные с этим проблемы.

Новые средства проектирования. Виртуальное проектирование представляет принципиально новую среду для разработки. В ней зрение является стереоскопическим, а взаимодействие с моделью конструкции осуществляется с помощью нескольких органов чувств. Эта новая среда открывает возможности для появления новых методов проектирования и подходов к моделированию. В ближайшем будущем конструктор будет иметь возможность взять объект в руки и растянуть его или создать и изменить модель с помощью одного только голоса. Новый подход к моделированию обеспечит более естественные и интуитивные способы создания моделей.

Моделирование процессов и физических объектов. В настоящее время возможности имитации сводятся главным образом к кинематике. Моделирование динамических, деформируемых и жидких систем обычно требует анализа методом конечных элементов, отнимающего большое количество вычислительных ресурсов. Чтобы это имело какую-то ценность в качестве средства виртуального проектирования, данный анализ необходимо производить в реальном времени, а чтобы стала возможной имитация в реальном времени, необходимо компактное и точное моделирование. Более того, модели должны содержать в себе информацию о своих физических свойствах и экспериментальные данные, демонстрирующие их физическое поведение.

Мера возможности производства. Производственные процессы различны, каждый имеет свои собственные уникальные характеристики. Таким образом, найти какую-то общую методику, определяющую возможности производства различных продуктов, представляется трудной задачей. Необходимы исследования определений возможности производства и методологии ее оценки. Помимо простого решения типа «да/нет» необходимо определить количественную меру возможности производства. Кроме того, оценку возможности производства необходимо трансформировать в оценку продолжительности производственных процессов и затрат.

Быстродействие системы. В настоящий момент качество визуализации и имитации сильно ограничивается недостаточным быстродействием системы. Благодаря экспоненциальному росту скорости обработки и прогрессу технологии распределенных вычислений качество имитации улучшается. Однако быстродействие системы остается все еще слишком низким для полноценного виртуального проектирования. Для визуализации требуется детализированное трехмерное отображение и анимация с высокой частотой

кадров. Оценка проекта включает в себя анализ динамических систем и оптимизации, требующих больших вычислительных ресурсов. Кроме того, для обеспечения коллективной разработки необходимо повысить скорость работы сетей, расширить полосу пропускания и увеличить число каналов.

Стандарт интерфейса данных. Виртуальное проектирование включает в себя взаимодействие различных пакетов прикладных программ. Моделирование детали обычно производится в САД-системе, анализ – в программе анализа по методу конечных элементов, а компьютерная имитация – в интерактивной системе имитации производства. Для коллективной разработки необходимо, чтобы эти различные системы работали вместе. Стандартные интерфейсы баз данных и программного обеспечения являются ключом к виртуальному проектированию

Открытая архитектура. Открытая архитектура придает системе масштабируемость. Системы виртуального проектирования необходимо объединять с имеющимися в настоящий момент инженерными системами для получения дополнительной функциональности или решения разнотипных задач. Открытая архитектура позволяет системе задействовать большой резерв инженерных ресурсов и находить разнообразные формы применения.

Лекция 5

Системы автоматизированного проектирования в машиностроении

В состав развитых машиностроительных САПР входят в качестве составляющих системы CAD, CAM и CAE.

Определение CAD, CAM и CAE

CAD – автоматизированное проектирование – представляет собой компьютерную технологию для облегчения создания, изменения, анализа и оптимизации проектов. Наиболее важным компонентом CAD являются системы автоматизированной разработки рабочих чертежей и системы геометрического моделирования. Кроме того, CAD используется для оптимизации и анализа, имеет программы для анализа допусков, расчета масс-инерциальных свойств, моделирования методом конечных элементов и визуализации результатов анализа.

CAM – автоматизированное производство – это компьютерная технология для планирования, управления и контроля операций производства через прямой и косвенный интерфейс с производственными ресурсами предприятия. CAM используется для числового программирования управления станками с ЧПУ и роботами, работающими на гибких автоматизированных участках. В задачах планирования производства CAM стыкуется с автоматизированной системой *MRP* и *ERP* через систему *PDM* (*MRP* – *material requirement planning* – планирование технических требований к материалам).

CAE – автоматизированное конструирование – это компьютерная технология для анализа геометрии деталей, моделирования и изучения поведения изделий для усовершенствования и оптимизации их конструкций. Средства CAE могут осуществлять множество различных вариантов анализа (кинематические расчеты, динамический анализ, расчет напряжений методом конечных элементов – *FEM* – *finite-element method*). Метод FEM рассчитывает теплообмен, распределение магнитных полей, потоков жидкости и другие задачи с непрерывными средами. Для применения метода FEM необходима аналитическая модель объекта подходящего уровня.

CAE наиболее эффективно используется на стадии анализа и оптимизации конструкции

Функции CAD-систем в машиностроении подразделяют на функции двумерного и трехмерного проектирования. К функциям *2D* относят черчение, оформление конструкторской документации; к функциям *3D* – получение трехмерных геометрических моделей, метрические расчеты, реалистичную визуализацию, взаимное преобразование *2D*- и *3D*-моделей. В ряде систем предусмотрено также выполнение процедур, называемых процедурами

позиционирования. К ним относят компоновку и размещение оборудования, проведение соединительных трасс.

Среди САД-систем различают системы нижнего, среднего и верхнего уровней. Первые из них иногда называют «легкими» системами, они ориентированы преимущественно на 2D-графику, сравнительно дешевы, основной аппаратной платформой для их использования являются персональные ЭВМ. Системы верхнего уровня, называемые также «тяжелыми», дороги, более универсальны, ориентированы на геометрическое твердотельное и поверхностное 3D-моделирование, оформление чертежной документации в них обычно осуществляется с помощью предварительной разработки трехмерных геометрических моделей. Системы среднего уровня по своим возможностям занимают промежуточное положение между «легкими» и «тяжелыми».

К важным характеристикам САД-систем относятся параметризация и ассоциативность. Параметризация подразумевает использование геометрических моделей в параметрической форме, т. е. при представлении части или всех параметров объекта не константами, а переменными. Параметрическая модель, находящаяся в базе данных, легко адаптируется к разным конкретным реализациям и поэтому может использоваться во многих конкретных проектах. При этом появляется возможность включения параметрической модели детали в модель сборочного узла с автоматическим определением размеров детали, диктуемых пространственными ограничениями. Эти ограничения в виде математических зависимостей между частью параметров сборки отражают ассоциативность моделей.

Параметризация и ассоциативность играют важную роль при проектировании конструкций узлов и блоков, состоящих из большого числа деталей. Действительно, изменение размеров одних деталей оказывает влияние на размеры и расположение других. Благодаря параметризации и ассоциативности изменения, сделанные конструктором в одной части сборки, автоматически переносятся в другие части, вызывая изменения соответствующих геометрических параметров в этих частях.

Основные функции САМ-систем: разработка технологических процессов, синтез управляющих программ для технологического оборудования с ЧПУ, моделирование процессов обработки, в том числе построение траекторий относительного движения инструмента и заготовки в процессе обработки, генерация постпроцессоров для конкретных типов оборудования с ЧПУ, расчет норм времени обработки.

Функции САЕ-систем довольно разнообразны, так как связаны с проектными процедурами анализа, моделирования, оптимизации проектных решений. В состав машиностроительных САЕ-систем прежде всего включают программы для выполнения следующих процедур:

- моделирование полей физических величин, в том числе анализ прочности, который чаще всего выполняется в соответствии с МКЭ;
- расчет состояний моделируемых объектов и переходных процессов в них средствами макроуровня;

- имитационное моделирование сложных производственных систем на основе моделей массового обслуживания и сетей Петри.

Основными частями программ анализа с помощью МКЭ являются библиотеки конечных элементов, препроцессор, решатель и постпроцессор.

Библиотеки конечных элементов содержат их модели – матрицы жесткости. Очевидно, что модели конечных элементов будут различными для разных задач (анализ упругих или пластических деформаций, моделирование полей температур, электрических потенциалов и т. п.), разных форм конечных элементов (например, в двумерном случае – треугольные или четырехугольные элементы), разных наборов координатных функций.

Исходные данные для препроцессора – геометрическая модель объекта, чаще всего получаемая из подсистемы конструирования. Основная функция препроцессора – представление исследуемой среды (детали) в сеточном виде, т. е. в виде множества конечных элементов.

Решатель – программа, которая ассемблирует (собирает) модели отдельных конечных элементов в общую систему алгебраических уравнений и решает эту систему одним из методов разреженных матриц.

Постпроцессор служит для визуализации результатов решений в удобной для пользователя форме. В машиностроительных САПР это графическая форма. Пользователь может видеть исходную (до нагружения) и деформированную формы детали, в которых палитра цветов или интенсивность свечения характеризуют значения фазовой переменной.

5.1. Примеры программ

К числу мировых лидеров в области CAD/CAM/CAE-систем верхнего уровня относятся системы *Unigraphics* (компания *EDS*), *CATIA* (*Dessault Systems*), *Pro/Engineer* (*PTC*). Продолжают использоваться также системы *I-DEAS* (*EDS*), *CADD5* (*PTC*) и *EUCLID3* (*Matra Datavision*).

Вначале рассмотрим структуру ПО САПР и его функциональные возможности на примере комплекса программ *Pro/Engineer*.

Комплекс насчитывает несколько десятков программ (модулей), которые подразделены на группы программ конструкторского проектирования механических объектов, промышленного дизайна, функционального моделирования, технологического проектирования, обмена данными.

Базовые модули конструкторского проектирования (подсистема CAD) предназначены для твердотельного и поверхностного моделирования, синтеза конструкций из базовых элементов формы (БЭФ), поддержки параметризации и ассоциативности, проекционного черчения и разработки чертежей с простановкой размеров и допусков. Пользователь может пополнять библиотеку БЭФ оригинальными моделями. Синтез трехмерных модулей сложной формы возможен вытягиванием плоского контура по нормали к его плоскости, его протягиванием вдоль произвольной пространственной кривой, вращением

контура вокруг заданной оси, натягиванием между несколькими заданными сечениями. Синтез сборок выполняется вызовом или ссылкой на библиотечные элементы, их модификацией, разработкой новых деталей. Детали сборки можно нужным образом ориентировать в пространстве. Далее следует ввести ассоциативные (сопрягающие) связи. Дополнительные модели конструкторского проектирования имеют более конкретную, но узкую специализацию. Примерами таких модулей могут служить модули конструирования панелей из композиционных материалов, разработки штампов и литейных пресс-форм, трубопроводных систем, сварных конструкций, разводки электрических кабелей и жгутов.

Модули функционального моделирования (подсистема CAE) используются как препроцессоры и постпроцессоры в программах конечно-элементного анализа (нанесение сетки конечных элементов, визуализация результатов анализа), для анализа теплового состояния конструкций, оценки виброустойчивости и др.

Основные модули технологического проектирования (подсистема CAM) служат для моделирования технологических процессов фрезерной, токарной, электроэрозионной обработки и для разработки постпроцессоров для систем управления оборудованием с ЧПУ.

Модули обмена данными (конверторы форматов данных) должны обеспечивать возможности импорта и экспорта данных в другие CAE/CAD/CAM-системы.

Система Unigraphics – универсальная система геометрического моделирования и конструкторско-технологического проектирования, в том числе разработки больших сборок, прочностных расчетов и подготовки конструкторской документации. Система многомодульная.

В конструкторской части (подсистема CAD) имеются средства для твердотельного конструирования, геометрического моделирования на основе сплайновых моделей поверхностей, создания чертежей по 3D-модели, проектирования сборок (в том числе с сотнями и тысячами компонентов) с учетом ассоциативности, анализа допусков и др.

В технологической части (подсистема CAM) предусмотрены разработка управляющих программ для токарной и электроэрозионной обработки, синтез и анализ траекторий инструмента при фрезерной трех- и пятикоординатной обработке, при проектировании пресс-форм, штампов и др. Для инженерного анализа (подсистема CAE) в систему включены модели прочностного анализа с использованием МКЭ с соответствующими пре- и постпроцессорами, кинематического и динамического анализа механизмов с определением сил, скоростей и ускорений, анализа процессов литья пластических масс.

Другая система верхнего уровня CATIA позволяет заказчику генерировать собственный вариант САПР сквозного проектирования – от создания концепции изделия до технологической поддержки производства и планирования производственных ресурсов. В системе реализовано поверхностное и твердотельное 3D-моделирование и оптимизация характеристик

изделий. Возможны фотореалистичная визуализация, восстановление математической модели из материального макета. Система масштабируема. Предлагаются типовые конфигурации, в том числе варианты для полнофункционального сквозного проектирования сложных изделий и проектирования комплектующих на небольших и средних предприятиях. Аналогичные возможности реализованы и в других тяжелых САПР.

Значительно дешевле обходится приобретение САПР среднего уровня. В России получили распространение системы компаний *Autodesk*, *Solid Works Corporation*, *Топ Системы*, *Аскон*, *Интермех*, *Bee-Pitron* и некоторых других. Все эти системы ориентированы в первую очередь на платформу *Wintel*, как правило, имеют подсистемы: конструкторско-чертежную 2D, твердотельного 3D-моделирования, технологического проектирования, управления проектными данными, ряд подсистем инженерного анализа и расчета отдельных видов машиностроительных изделий, а также библиотеки типовых конструктивных решений. Широкое распространение в России и за рубежом получило ПО машиностроительных САПР компании *Autodesk*.

Линия современных программных систем конструкторского проектирования фирмы *Autodesk* включает ряд систем, среди которых наиболее развитыми следует считать системы *AutoCAD*, *Mechanical Desktop* и *Inventor*.

Система *Mechanical Desktop* (MDT) предназначена для параметрического 3D-моделирования, ассоциативного конструирования, распределенного проектирования в сети Интернет, оформления 2D-документации. Построена на графическом ядре *ACIS*. Имеется управляющая программа CAD-менеджер со средствами настройки, конфигурирования и управления рабочими группами.

Система *Inventor* предназначена для твердотельного параметрического проектирования, ориентирована на разработку больших сборок с сотнями и тысячами деталей, имеет развитую библиотеку стандартных элементов. В основе системы также лежит графическое ядро *ACIS*. Построение 3D-моделей возможно выдавливанием, вращением, по сечениям, по траекториям. Из 3D-модели можно получить 2D-чертежи и спецификации материалов. Поддерживается коллективная работа над проектом, в том числе в пределах одной и той же сборки. Предусмотрена автоматическая проверка кинематики, размеров детали с учетом положения соседних деталей в сборке. Значительные удобства работы конструкторов обусловлены тем, что ассоциативные связи задаются не путем описания операций с параметрами и уравнений, а непосредственно определением формы и положения компонентов.

В число продуктов *Autodesk* входит ряд других программ автоматизированного проектирования, в том числе *Autodesk Data Exchange* – набор конверторов для взаимного преобразования данных из форматов *DXF* и *SAT* (формат ядра *ACIS*) в такие форматы, как *STEP*, *IGES*, *VDA-FS*.

Ряд продуктов, интегрированных с программами проектирования компании *Autodesk*, создан компаниями, входящими в ассоциацию *Mechanical Applications Initiative* производителей прикладного ПО. Среди них следует отметить программу *Dynamic Designer Motion* (компания *Mechanical Dynamic*),

предназначенную для расчетов динамики и кинематики механизмов (в том числе трехмерных). Элементами являются модели шарниров, пружин, сухого трения, ударных нагрузок.

Программа *Dynamic Designer Motion* имеет связи с группой программ конечно-элементного анализа *Cosmos*. Например, можно использовать программу *Cosmos/DesignSTAR* как автономно, так и в связке с программами *Inventor Solid Edge*, а программу *Cosmos/Works* – с программой *Solid Works*. С помощью этих программ проводят анализ деформированного состояния деталей, стационарных и нестационарных тепловых процессов, динамики жидкостей и газов, низкочастотных электромагнитных полей, определяют собственные частоты колебания конструкций.

Система твердотельного параметрического моделирования механических конструкций *Solid Works* (компания *Solid Works Corporation*) построена на графическом ядре *Parasolid*, разработанном в *Unigraphics Solution*. Синтез конструкции начинается с построения опорного тела с помощью операций типа выдавливания, протягивания или вращения контура с последующим добавлением и (или) вычитанием тех или иных тел. Используется технология граничного моделирования (*B-representation*) с аналитическим или сплайновым описанием поверхностей. При проектировании сборок на основе БЭФ можно задавать различные условия взаимного расположения деталей, автоматически контролировать зазоры и отсутствие взаимопересечения деталей. Предусмотрены *IGES, DXF, DWG*-интерфейсы с другими системами.

Среди САПР среднего уровня наряду с продуктами зарубежных фирм неплохо зарекомендовали себя системы отечественных разработчиков – это, прежде всего, системы *Компас* (компания *Аскон*) и *T-Flex CAD* (*Топ Системы*).

В системе *Компас* для трехмерного твердотельного моделирования используется оригинальное графическое ядро. Синтез конструкций выполняется с помощью булевых операций над объемными примитивами, модели деталей формируются путем выдавливания или вращения контуров, построением по заданным сечениям. Возможно задание зависимостей между параметрами конструкции, расчет масс-инерционных характеристик. Разработка проектно-конструкторской документации, в том числе различных спецификаций, выполняется подсистемой *Компас-График*.

Имеются библиотеки с данными о типовых деталях и с графическими изображениями, а также программы специального назначения (проектирование тел вращения, пружин, металлоконструкций, трубопроводной арматуры, штамповой оснастки, выбора подшипников качения, раскроя листового материала и др.). Проектирование технологических процессов выполняется с помощью подсистемы *Компас-Автопроект*, программирование объемной обработки на станках с ЧПУ – с помощью подсистемы *ГЕММА-3D*. Ряд необходимых функций управления проектными данными возложено на подсистему *Компас-Менеджер*.

Подсистема трехмерного твердотельного моделирования *T-Flex CAD 3D* в САПР *T-Flex CAD* построена на базе ядра *Parasolid*. Реализована

двунаправленная ассоциативность, т. е. изменение параметров чертежа автоматически вызывает изменение параметров модели, и наоборот. При проектировании сборок изменение размеров или положения одной детали ведет к корректировке положения других. Модель 3D может быть получена непосредственно по имеющемуся чертежу, или с помощью булевых операций, или путем выталкивания, протягивания, вращения профиля, лофтинга и т. п. Предусмотрен расчет масс-инерционных параметров.

В то же время можно по видам и разрезам трехмерной модели получить чертеж, для чего используется подсистема *T-Flex CAD 3D SE*. Для параметрического проектирования и оформления конструкторско-технологической документации служит подсистема *T-Flex CAD 2D*, для управления проектами и документооборотом – подсистема *T-Flex DOCs*. В подсистеме технологического проектирования *T-Flex/ТехноПро* выполняются синтез технологических процессов, расчет технологических размеров, выбор режущего и вспомогательного инструмента, формирование технологической документации, в том числе операционных и маршрутных технологических карт, ведомостей оснастки и материалов, карт контроля. Подготовка программ для станков с ЧПУ осуществляется в подсистеме *T-Flex ЧПУ*. Кроме названных основных подсистем в состав *T-Flex CAD* включен ряд программ для инженерных расчетов деталей, проектирования штампов и пресс-форм.

В САПР *Cadmech 2000* белорусской компании *Интермех* входят программы *AVS* для выпуска конструкторской документации, *Techcard* для технологической подготовки производства, *LCAD* для планирования производственных цехов и участков и др. Для собственно конструкторского 3D-проектирования *Интермех* использует программы компании *Autodesk*.

Разработкой продуктов для САПР литейного производства занимается компания *Moldflow*, ее программы *Part Adviser* и *Mold Advisor* предназначены для моделирования процессов литья пластмасс.

Важное место в конструкторско-технологических САПР занимают программы технологической подготовки производства. Компания *Consistent Software* предлагает систему *TechnologiCS* для технологической подготовки дискретного производства. Эта система выполняет функции составления спецификаций, ведения дерева проекта и библиотеки чертежей, синтеза технологических процессов, выбора инструмента, расчета режимов резания, нормирования расхода материалов, ведения технологической документации. Система *SolidCAM (CADTech)*, построенная, как и *Mechanical Desktop*, на ядре *ACIS*, служит для получения управляющих программ для токарной, 2,5- и 3-осевой фрезерной обработки на станках с ЧПУ. Система *ТЕХТРАН (НИИ «Информатика»)* включает модули токарной, фрезерной, электроэрозионной обработки.

Мировыми лидерами среди программ конечно-элементного анализа являются программно-методические комплексы *Nastran* и *Patran* (компания *MSC Software Corporation*) и *Ansys* (компания *Ansys Inc.*). Как правило, эти комплексы включают в себя ряд программ, родственных по математическому

обеспечению, интерфейсам, общности некоторых используемых модулей. Эти программы различаются ориентацией на разные приложения, степенью специализации, ценой или выполняемой обслуживающей функцией. Например, в комплексе *Ansys* основные решающие модули позволяют выполнять анализ механической прочности, теплопроводности, динамики жидкостей и газов, акустических и электромагнитных полей. Во все варианты программ входят пре- и постпроцессоры, а также интерфейс с базой данных. Предусмотрен экспорт (импорт) данных между *Ansys* и ведущими комплексами геометрического моделирования и машинной графики.

Мировой лидер среди средств моделирования механических процессов на макроуровне путем решения СОДУ – программа *Adams*, а примером отечественных систем подобного назначения следует назвать программы *ПА7* и *ПА9*. В САПР крупных предприятий обычно используют программы разных уровней. Связано это с тем, что более 80 % всех процедур конструирования можно выполнить на CAD-системах нижнего и среднего уровней, кроме того, «тяжелые» системы дороги. Поэтому предприятие приобретает лишь ограниченное число экземпляров (лицензий) программы верхнего уровня, а большинство клиентских рабочих мест обеспечивается экземплярами программ нижнего или среднего уровней. При этом возникает проблема обмена информацией между разнотипными CAD-системами. Она решается путем использования языков и форматов, принятых в *CALS*-технологиях, хотя для неискаженной передачи геометрических данных с помощью промежуточных унифицированных языков приходится преодолевать определенные трудности.

5.2. Методы обмена данными технических требований

Когда две или более CAD/CAM/CAE-системы объединяются и связываются в единое приложение для совместного использования данных, часто возникает проблема обмена данными. Фактически всегда существует проблема (потребность) связать воедино несколько систем либо внутри одной организации, либо внешне, как в случае со смежниками (по проекту) или поставщиками компонентов. Для решения этой коммуникационной проблемы необходима возможность преобразовать данные технических требований одной системы в форму, понятную для других систем, и наоборот. Чтобы облегчить преобразование и не разрабатывать программы-конверторы для всех возможных пар САПР, было предложено несколько стандартных форматов для хранения данных технических требований. Вкратце рассмотрим типичные стандартные форматы.

Различные CAD/CAM/CAE-системы хранят данные технических требований в структурах разного вида, поэтому для переноса данных необходимо преобразовать данные технических требований одной системы в формат другой. Еще один конвертор (преобразователь) необходим для переноса данных между двумя системами в противоположном направлении. Следовательно,

для каждой пары систем необходимо иметь два конвертора. Двухнаправленные стрелки для каждой пары систем (рис. 5.1, а) предполагают наличие двух конверторов. Эти конверторы для каждой конкретной пары систем называются *прямыми конверторами (direct translators)*. Если у нас есть n различных систем, нам необходимо разработать $n(n - 1)$ конверторов, поскольку количество пар систем равно $n(n - 1)/2$. Например, для обмена данными между 10 системами придется разработать 90 конверторов. Таким образом, метод прямого конвертирования непрактичен, так как требует разработки слишком большого количества конверторов при необходимости работать с множеством систем. Более того, добавление одной системы к n уже имеющимся потребует написания $2n$ дополнительных конверторов.

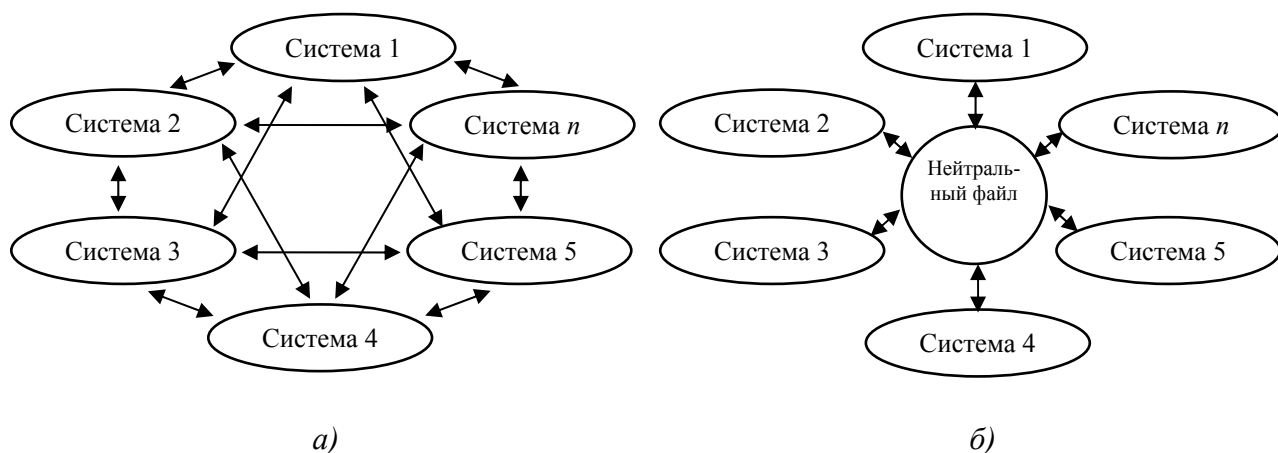


Рис. 5.1. Два метода обмена данными между двумя различными системами

Однако обмен данными можно обеспечить, введя нейтральную структуру базы данных, называемую *нейтральным файлом (neutral file)*, которая была бы независима от существующих САПР. Эта структура будет действовать как промежуточная точка коммуникации между различными структурами баз данных САПР (рис. 5.1, б).

Таким образом, в каждой системе будет своя пара конверторов для экспорта и импорта данных в этот нейтральный формат. Конвертор, преобразующий данные из собственного формата данной системы в нейтральный формат, называется *препроцессором (pre-processor)*, а конвертор, выполняющий обратное преобразование – *постпроцессором (post-processor)* (рис. 5.2). Соответственно в этом случае для обмена данными между n системами потребуется $2n$ конверторов и лишь два дополнительных конвертора необходимо будет добавить при введении новой системы.

Иными словами, этот косвенный метод свободен от присущего прямому методу недостатка, когда требовалось писать все возрастающее количество программ. Это основная причина, по которой косвенный метод принят в качестве главного метода обмена данными между различными системами, несмотря на то, что в сравнении с прямым методом у него имеются некоторые

недостатки. В частности, прямые конверторы работают быстрее косвенных и создаваемые ими файлы данных обычно имеют меньший размер, чем нейтральные файлы, генерируемые косвенными конверторами. Файл данных в собственном формате конкретной системы обычно также оказывается меньше нейтрального файла из-за обобщенной природы последнего. Когда мы переносим данные технических требований через нейтральный файл, некоторая информация, как правило, теряется, особенно информация о топологическом дереве и ограничениях в системах параметрического моделирования.

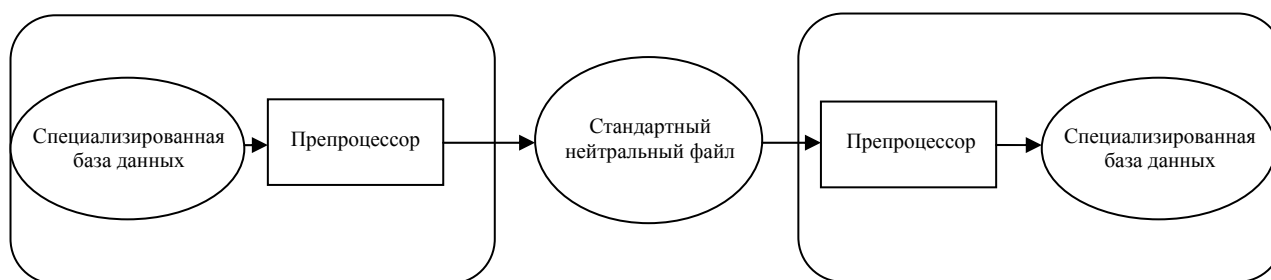


Рис. 5.2. Обмен данными с использованием нейтрального файла

Известны три типичных формата нейтрального файла: IGES (*Initial Graphics Exchange Specification* – первоначальная спецификация обмена графическими данными), DFX (*Drawing Interchange Format* – формат обмена чертежами) и STEP (*Standard for Exchange of Product model data* – стандарт обмена данными о модели продукта). В настоящее время IGES является самым популярным форматом нейтрального файла, а формат DFX используется главным образом для обмена данными чертежей. STEP – это стандартный формат данных, используемый для хранения полной информации обо всем жизненном цикле продукта, включая проектирование, анализ, производство, контроль качества, испытания и обслуживание помимо обычных данных технических требований. В настоящее время CAD-системы, поддерживавшие формат IGES, ориентированы на переход к формату STEP.

Особенности проектирование мехатронных систем

Известно, что отличительным признаком мехатронной системы является наличие у нее трех обязательных частей – электромеханической, электронной и компьютерной, связанных энергетическими и информационными потоками. Поэтому при проектировании мехатронных систем целесообразно использовать *совмещенное* (или *параллельное*) проектирование (*current design*). Суть этого метода состоит в совмещении по времени процедур конструкторского проектирования электромеханической части системы и проектирования аппаратных и программных компонентов электронной и компьютерной частей мехатронной системы. При этом необходимо, чтобы быстроедействие и устойчивость всех подсистем обеспечивали полную управляемость системы в целом.

Другая особенность проектирования мехатронных систем определяется синергетической интеграцией отдельных частей системы – основополагающий принцип построения мехатронных систем.

Более подробно особенности проектирования мехатронных систем будут рассмотрены в лекции 7 «Концепция проектирования мехатронных модулей и систем».

Лекция 6

Информационная поддержка проектирования мехатронных систем

Современное проектирование мехатронных систем базируется на использовании современных информационных технологий, в частности, CALS-технологий, обеспечивающих информационную поддержку на всех этапах жизненного цикла изделий.

6.1. CALS-технологии (основные понятия) [5]

В настоящее время термин CALS (*Continuous Acquisition and Life Cycle Support*) переводится как «*непрерывное сопровождение и информационная поддержка всех этапов жизненного цикла изделий (ЖЦ)*». Первая часть термина CALS (*Continuous Acquisition*) подчеркивает постоянное развитие, которое претерпевает как само изделие в течение своего ЖЦ, так и процесс взаимодействия между потребителем и поставщиком. Вторая часть (*Life Cycle Support*) означает оптимизацию затрат на создание и эксплуатацию изделия на протяжении всего ЖЦ. Это чаще всего выливается в увеличение затрат на стадии создания изделия и в их снижение на этапах эксплуатации, ремонта и обслуживания изделия (а в целом на всем ЖЦ приводит к снижению стоимости и повышению конкурентоспособности изделия).

Стратегия CALS предполагает создание единого информационного пространства (ЕИП) для всех участников ЖЦ изделия. ЕИП предполагает представление всей информации об изделии в электронном виде и организацию совместного использования информации для всех участников ЖЦ изделия (в соответствии с правилами доступа).

Основными свойствами ЕИП являются:

- информация предоставляется в электронном виде;
- охватывается вся информация об изделии, созданная всеми исполнителями на любом этапе ЖЦ;
- ЕИП выступает основным источником данных для исполнителей, предоставляя (в соответствии с правами доступа) нужную информацию в нужное время и в нужном виде;
- для интеграции информации в ЕИП используются только международные и отраслевые стандарты, поддерживаемые подавляющим большинством производителей прикладных систем;
- для создания ЕИП используются существующие на предприятиях программно-аппаратные средства; необходима адаптация этих систем к работе в рамках ЕИП.

Стратегия CALS предусматривает два этапа при переходе к ЕИП:

- автоматизация отдельных процессов (или этапов) ЖЦ изделия и представление данных на них в электронном виде;
- интеграция автоматизированных процессов и относящихся к ним данных, уже представленных в электронном виде, в рамках ЕИП.

CALS-технологии – это набор методов реализации стратегии CALS:

- технологии реинжиниринга бизнес-процессов – набор методов реструктуризации бизнес-процессов в целях повышения их эффективности;
- технологии представления данных об изделии в электронном виде – набор методов для представления в электронном виде данных об изделии, относящихся к отдельным процессам ЖЦ изделия. Эти данные являются информационными моделями, обеспечивающими автоматизацию отдельных процессов ЖЦ изделия. Технологии представления данных включают в себя также технологии перевода данных из бумажного в электронный вид (*E-commerce* – *E-бизнес*). Рассматриваемая группа CALS-технологий состоит из известных методов, реализованных в соответствующих автоматизированных системах;
- технологии интеграции данных об изделии в рамках ЕИП – набор методов для интеграции автоматизированных процессов ЖЦ и относящихся к ним данных, представленных в электронном виде, в рамках ЕИП; эти технологии реализуются с помощью класса автоматизированных систем, называемых системами управления данными об изделии (проектными данными) – PDM (*Product Data Management*). Для реализации технологии PDM существуют специализированные программные средства, называемые PDM-системами. Пользователями PDM-систем являются конструкторы, технологи, а также сотрудники, работающие в других сферах производства и обслуживания – продажи, маркетинга, снабжения, финансов, сервиса, эксплуатации и т. п.

Главная задача создания и внедрения CALS-технологий – обеспечение единообразных описаний и интерпретации данных независимо от места и времени их получения в общей системе, имеющей масштабы вплоть до глобальных. Структура проектной, технологической и эксплуатационной документации, языки ее представления должны быть стандартизованными. Тогда становится реальной успешная работа над общим проектом разных коллективов, разделенных во времени и пространстве и применяющих разные системы CAE/CAD/CAM. Одна и та же конструкторская документация может быть использована многократно в разных проектах, а одна и та же технологическая документация – адаптирована к разным производственным условиям, что позволяет существенно сократить и удешевить общий цикл проектирования и производства. Кроме того, упрощается эксплуатация систем.

CALS-технологии не отвергают существующие автоматизированные системы проектирования и управления, а являются средством их эффективного взаимодействия. Поэтому интеграция автоматизированных систем на современных предприятиях должна быть основана на CALS-технологиях. Внедрение их требует освоения имеющихся технологий и CALS-стандартов, развития моделей, методов и программ автоматизированного проектирования и управления. Важные проблемы, требующие решения при создании CALS-систем – управление сложностью проектов и интеграция программного обеспечения, включая вопросы декомпозиции проектов, распараллеливания проектных работ, целостности данных, межпрограммных интерфейсов и др.

CALS-технологии зародились в 1980-е гг. в недрах военно-промышленного комплекса США в связи с их планами в области стратегической оборонной инициативы (СОИ). Поэтому не удивительно, что среди имеющихся CALS-стандартов фигурирует большое число стандартов и рекомендаций DoD (Министерства обороны США). Для реализации планов СОИ требовались совместные усилия многих промышленных компаний и предприятий в проектировании, производстве и логистической поддержке сложных изделий, а это означало необходимость унификации представления данных об изделиях. Было осознано, что для взаимодействия авто-матизированных систем разных предприятий нужна унификация не только формы, но и содержания (семантики) проектной, технологической, эксплуатационной и другой информации о совместно производимой продукции. Другими словами, требовалось создание единой информационной среды взаимодействия всех крупнейших фирм американского военно-промышленного комплекса.

Оказалось, что это чрезвычайно сложная проблема, решение которой требует длительной и многосторонней проработки в масштабах, выходящих за пределы одной страны. Выяснилось также, что создание единой информационной среды требуется не только для уникальных программ типа СОИ, но и для производства любых сложных систем, в первую очередь военной техники, если ее производство основано на взаимодействии многих предприятий.

В связи с возникшими практическими потребностями рядом комиссий и комитетов в рамках международных организаций были начаты работы по созданию информационных технологий и взаимодействию предприятий и выражающих их международных стандартов. Например, в Международной организации стандартизации (*International Standard Organization* – ISO) этими вопросами ведает подкомитет SC4 комитета TC184. В SC4 имеется несколько рабочих групп, занимающихся конкретными сериями стандартов. В настоящее время в ведущих индустриальных странах мира созданы национальные органы, координирующие работу в области CALS-технологий. В международном масштабе развитием CALS помимо ISO занимаются и такие организации, как ICC (*International CALS-Congress*), EIA (*Electronics Industry Association*), IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) и др. В России в рамках Госстандарта создан технический комитет № 431 «CALS-технологии».

В 1990-х гг. разработан и к настоящему времени принят ряд серий международных стандартов, представляющих CALS-технологии, среди которых наиболее значимы стандарты ISO 10303 STEP (*Standard for Exchange of Product Data*). В контрактах, заключаемых на поставку зарубежным заказчикам военной техники, требования к изделиям и документации на них, как правило, формулируются с позиций международных CALS-стандартов и стандартов DoD (последние имеют префикс MIL).

Развитие CALS-технологий стимулирует образование виртуальных производств, при которых процесс создания спецификаций с информацией для программно управляемого технологического оборудования, достаточной для изготовления изделия, может быть распределен во времени и пространстве между многими организационно автономными проектными организациями.

Ожидается, что успех на рынках сложной технической продукции будет немислим вне CALS-технологий. Так, уже сегодня фирмы, предлагающие военную технику без электронной документации, выполненной в соответствии с CALS-стандартами, не имеют никаких шансов на успех в конкурентной борьбе.

Итак, CALS-технологии призваны, в конечном счете, повысить эффективность создания и использования сложной техники (в том числе мехатронных систем). В чем выражается повышение эффективности?

Во-первых, улучшается качество изделий за счет более полного учета имеющейся информации при проектировании и принятии управленческих решений. Так, обоснованность решений, принимаемых в автоматизированной системе управления предприятием (АСУП), будет выше, если лицо, принимающее решение, и соответствующие программы АСУП имеют оперативный доступ не только к базе данных АСУП, но и к базам данных других автоматизированных систем – системам автоматизированного проектирования (САПР), автоматизированной системе технологической подготовки производства (АСТПП) и автоматизированной системе управления технологическими процессами (АСУТП), и, следовательно, могут оптимизировать планы работ, содержание заявок, распределение исполнителей, выделение финансов и т. п. При этом под оперативным доступом необходимо понимать не просто возможность считывания данных из баз данных, но и легкость их правильной интерпретации, т. е. согласованность по синтаксису и семантике с протоколами, принятыми в АСУП. То же относится и к другим системам, например, технологические подсистемы должны с необходимостью воспринимать и правильно интерпретировать данные, поступающие от подсистем автоматизированного конструирования. Последнего не так легко добиться, если основное предприятие и организации-смежники работают с разными автоматизированными системами.

Во-вторых, сокращаются материальные и временные затраты на проектирование и изготовление изделий. Применение CALS-технологий позволяет существенно сократить объемы проектных работ, так как описания ранее выполненных удачных разработок компонентов и устройств, многих

составных частей оборудования, машин и систем, проектировавшихся ранее, хранятся в базах данных сетевых серверов, доступных любому пользователю CALS-технологий. Доступность опять же обеспечивается согласованностью форматов, способов, руководств в разных частях общей интегрированной системы. Кроме того, появляются более широкие возможности для специализации предприятий, вплоть до создания виртуальных предприятий, что также способствует снижению затрат.

В-третьих, значительно снижаются затраты на эксплуатацию благодаря реализации функций интегрированной логистической поддержки. Существенно облегчается решение проблем ремонтпригодности, интеграции продукции в различного рода системы и среды, адаптации к меняющимся условиям эксплуатации и т. п.

По аналогии с САПР для CALS-технологий разработаны различные виды обеспечения их применения: *лингвистическое, информационное, программное, математическое, методическое, техническое и организационное.*

К **лингвистическому обеспечению** относятся языки и форматы данных о промышленных изделиях и процессах, используемые для представления и обмена информацией на этапах жизненного цикла изделий.

Информационное обеспечение составляют базы данных, в которых имеются сведения о промышленных изделиях, используемые разными системами в процессе проектирования, производства, эксплуатации и утилизации продукции. В состав информационного обеспечения входят также серии международных и национальных CALS-стандартов и спецификаций.

Программное обеспечение CALS представлено программными комплексами, предназначенными для поддержки единого информационного пространства этапов жизненного цикла изделий. Это прежде всего системы управления документами и документооборотом, управления проектными данными (PDM), взаимодействия предприятий в совместном электронном бизнесе (CPC), подготовки интерактивных электронных технических руководств и некоторые другие.

Математическое обеспечение CALS включает методы и алгоритмы создания и использования моделей взаимодействия различных систем в CALS-технологиях. Среди этих методов в первую очередь следует назвать методы имитационного моделирования сложных систем, методы планирования процессов и распределения ресурсов.

Методическое обеспечение CALS представлено методиками выполнения таких процессов, как параллельное (совмещенное) проектирование и производство, структурирование сложных объектов, их функциональное и информационное моделирование, объектно-ориентированное проектирование, создание антологий приложений.

К **техническому обеспечению** CALS относят аппаратные средства получения, хранения, обработки и визуализации данных при информационном сопровождении изделий. Взаимодействие частей виртуальных предприятий, систем, поддерживающих разные этапы жизненного цикла изделий, происходит

через линии передачи данных и сетевое коммутирующее оборудование. Однако используемые технические средства не являются специфическими для CALS, и поэтому вопросы технического обеспечения не рассматриваются.

Наконец, **организационное обеспечение** CALS представлено различного рода документами, совокупностью соглашений и инструкций, регламентирующих роли и обязанности участников жизненного цикла промышленных изделий.

За последний год появился целый ряд предприятий, которые активно занимаются изучением и применением CALS-технологий для решения конкретных производственных задач повышения качества и конкурентоспособности выпускаемой продукции. К таким организациям относятся АВПК «Сухой», АНТК им. Туполева, ОАО «Туламашзавод», Конструкторское бюро приборостроения (г. Тула), корпорация «Компомаш», корпорация «Метран» и др. Разработкой конкретных применений CALS-технологий для ряда областей промышленности занимается МГТУ «Станкин». Решением координационного совета РАН по техническим наукам от 12 февраля 2002 г. Институту конструкторско-технологической информатики РАН поручена координация работ по CALS (ИПИ)-технологиям.

6.2. STEP-стандарты [5]

Выше было отмечено, что для реализации CALS-технологий необходимо обеспечить единообразное описание и интерпретацию данных, независимо от места и времени их получения в общей системе, имеющей масштабы вплоть до глобальных. Это единообразие достигается за счет разработки системы CALS-стандартов, созданных под эгидой ISO (*International Standard Organization*) – международной организации стандартизации.

Центральное место в системе CALS-стандартов занимает ISO 10303 под названием STEP (*Standard for Exchange of Product Data* – стандарт для обмена данными о промышленных изделиях), определяющий средства описания (моделирования) промышленных изделий на всех стадиях их ЖЦ. Для этого был разработан инвариантный к приложениям язык Express, введенный в STEP. Совокупность стандартов STEP составляет основу CALS-технологий.

В STEP используются следующие важные понятия:

AAM – *Application Activity Model* – функциональная модель IDEF0 для определенного приложения;

ARM – *Application Requirements Model* – модель, представляющая данные с точки зрения пользователя. В частности, в этой модели данные могут быть выражены как средствами, типичными для приложения, так и с использованием синтаксиса языка Express;

AIM – *Application Interpreted Model* – ARM-модель, переведенная в STEP-представление с использованием ряда унифицированных в STEP-понятий, закрепленных в интегрированных ресурсах;

AP – *Application Protocol* – STEP-стандарт, отражающий специфику конкретного приложения;

SDAI – *Standard Data Access Interface* – программный интерфейс к источникам данных (репозиториям) прикладных систем (в том числе к библиотекам моделей систем CAD/CAM) с переводом моделей в STEP-файлы; используется в STEP-средах для организации обменов между приложениями через общую базу данных STEP.

STEP – это совокупность стандартов, состоящих из нескольких томов. Тома имеют свои номера № и обозначаются как «часть №» или ISO 10303-№. К настоящему времени разработано более сотни томов. Стандарты ISO 10303 определяют средства описания (моделирования) промышленных изделий на всех этапах их ЖЦ.

Том 1 (ISO 10303-1) – вводный стандарт, выполняющий роль аннотаций всей совокупности томов. В этом стандарте вводится ряд терминов, используемых в других стандартах, например, таких как продукт (*product*), приложение (*application*), проектные данные (*product data*), модель (*model*), модели AAM, AIM, ARM, прикладной протокол (AP), интегрированный ресурс (*integrated resource*), элемент функциональности (*unit of functionality* – UoF).

Тома 11–14 – методы описания (*description methods*).

Тома 21–29 – методы реализации (*implementation methods*).

Тома 31–35 – основы тестирования моделей (*conformance testing methodology and framework*).

Тома 41–50 – интегрированные основные ресурсы (*integrated generic resources*).

Тома 101–108 – интегрированные прикладные ресурсы (*integrated application resources*).

Тома 201–236 – прикладные протоколы (*application protocols*).

Тома 301–332 – абстрактные тестовые наборы (*abstract test suites*).

Тома 501–520 – прикладные компоненты (*application interpreted constructs*).

Ряд томов переведен на русский язык и представлен в виде национальных стандартов России. Это, например, ГОСТ Р ИСО 10303-1-99, посвященный обзору и основополагающим принципам STEP, ГОСТ Р ИСО 10303-11-99 – справочное руководство по языку Express, ГОСТ Р ИСО 10303-21-99 – то же по обменному файлу, ГОСТ Р ИСО 10303-41-99 – описание интегрированных родовых ресурсов. Перечисленные документы соответствуют стандартам ISO 10303-1, ISO 10303-11, ISO 10303-21, ISO 10303-41. Подготовлены к утверждению ГОСТы, соответствующие томам 43, 44, 203 стандарта ISO 10303.

Таким образом, в томах STEP описаны основные принципы обмена данными, изложены правила языка Express, даны методы его реализации. Модели, методы тестирования моделей, ресурсы как общие для приложений, так и некоторые специальные (например, геометрические и топологические

модели, описание материалов, процедуры черчения, конечно-элементного анализа и т. п.), введены прикладные протоколы, отражающие специфику моделей в конкретных предметных областях. Вопросам взаимодействия АС в STEP уделяется основное внимание – выделена подгруппа томов, посвященных способам обмена данными между разными системами, созданными в рамках STEP-технологий.

Развитие CALS-технологий находит выражение также в разработке серий стандартов ISO13584 *Parts Library* (сокращенно *P_Lib*), ISO 14959 *Parametrics*, ISO15531 *Manufacturing Management Data (Mandate)*, ISO 18876 *Integration of Industrial Data for Exchange, Access, and Sharing (IIDEAS)*, ISO 8879 *Standard Generalized Markup Language (SGML)* (см. т. 107, 108).

Более подробно со структурой STEP-стандартов (методами описания диалектов языка Express № 11–19, методами реализации межпрограммного информационного обмена между прикладными системами в STEP-среде № 21–29, прикладными протоколами № 201–236, интегрированными ресурсами и прикладными компонентами № 41–50 и № 101–108, № 501–520) можно познакомиться в работе [5, с. 166–180].

6.3. Организация в STEP информационных обменов [5]

Возможны обмены через обменный файл, описанный выше, и через базу данных SDAI (Standard Data Access Interface) – интерфейс к данным, представленным в соответствии с CALS-стандартами.

Обменный файл используется при связи моделей *A* и *B*, имеющих общие данные с различными обозначениями. Пользователь должен написать перекодировщик (например, на языке Express-X), с помощью которого отождествляются идентификаторы одних и тех же сущностей, имевших разные обозначения в моделях *A* и *B* (рис. 6.1).

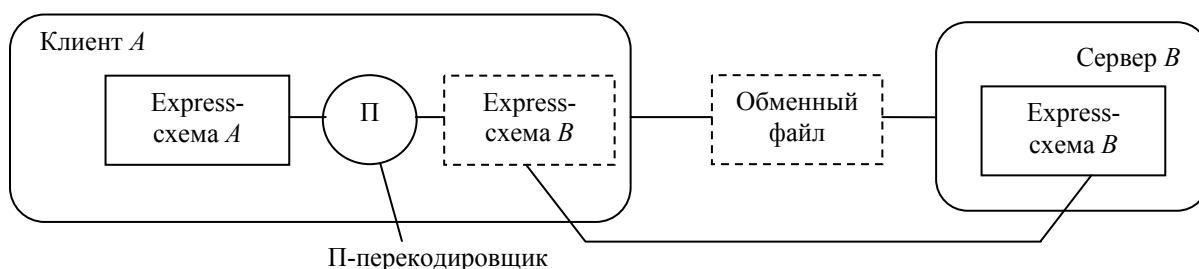


Рис. 6.1. Взаимодействие Express-приложений через обменный файл

Связь через интерфейс SDAI отличается от предыдущего способа обмена тем, что в SDAI имеет место не просто обмен, а разделение данных многими

пользователями и SDAI фактически выступает в роли метамодели для разных САПР. Другими словами, SDAI представляет собой интерфейс, содержащий набор функций на языках C++ и C, для доступа к разделяемым моделям, которые могут быть представлены в виде обменного файла (рис. 6.2).

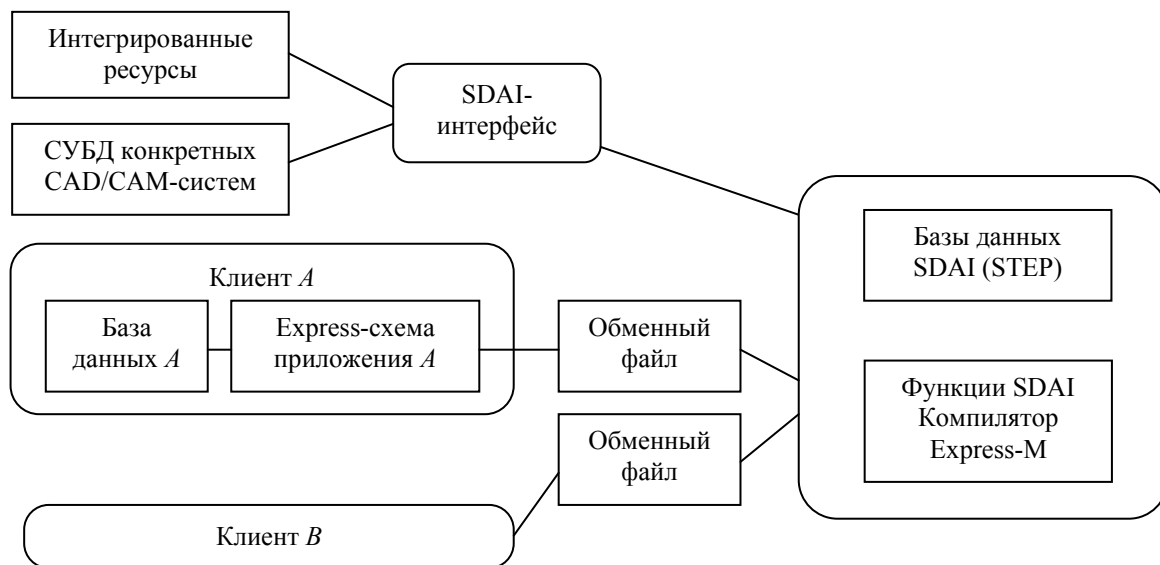


Рис. 6.2. Взаимодействие Express-приложений через базу данных SDAI

В CALS-технологиях рассматриваются не только вопросы представления данных и организации информационных обменов, но и вопросы моделирования приложений и проектирования сложных систем на базе концептуального проектирования.

Эти вопросы будут рассмотрены далее в лекции 8 «Концепция проектирования мехатронных модулей и систем».

В заключение данной лекции рассмотрим проблемы практического использования CALS-технологий.

6.4. Проблемы практического использования CALS-технологий

Проблема внедрения CALS-технологий в практику работы промышленных предприятий имеет организационный, технологический, кадровый аспекты.

В организационном плане прежде всего необходима убежденность руководителей предприятий в целесообразности (а в ряде случаев и в неизбежности) перехода к CALS-технологиям, что позволит сконцентрировать усилия на разработке и реализации планов реинжиниринга предприятий с постепенным внедрением элементов CALS-технологий. Эти планы направлены на создание корпоративной автоматизированной системы (КАС), интегрирующей системы автоматизации проектирования, управления и технологической

подготовки производства. Особую важность вопросы создания КАС на базе CALS-технологий имеют для производственных объединений, включающих несколько предприятий.

Автономно функционирующие системы САПР, АСУП, АСУТП уже имеются на многих предприятиях. Очевидно, что при их интеграции на основе CALS-технологий собственно задача замены уже используемых систем какими-либо другими не ставится, поскольку замена – процедура дорогостоящая, длительная и болезненная, требующая переучивания специалистов. Замена может быть вызвана не особенностями CALS, а лишь выявленной недостаточной функциональностью используемых систем (например, невозможностью проектирования сборок с тысячами компонентов).

Что в этом случае подразумевается под «единой электронной моделью изделия»? Ответ заключается в следующем: единая электронная модель изделия имеет место, если любая подсистема или пользователь КАС (с соответствующими полномочиями) может, обратившись к базе данных системы, получить нужное подмножество данных об изделии, причем это подмножество будет согласовано с подмножествами, запрашиваемыми другими подсистемами или пользователями. Очевидно, что подмножества данных (профили), запрашиваемые конструкторскими, технологическими, управленческими и другими подсистемами и службами, включают как специфические, так и общие атрибуты, причем общие атрибуты будут иметь одинаковые значения в каждом подмножестве.

Если на предприятии автоматизация была развита слабо, то создание на нем КАС нужно начинать с обследования деятельности предприятия. Перед обследованием формируются и в процессе его проведения уточняются цели обследования – определение возможностей и ресурсов для повышения эффективности функционирования предприятия на основе автоматизации процессов управления, проектирования, документооборота и т. п. Содержание обследования – выявление структуры предприятия, выполняемых функций, информационных потоков, имеющихся опыта и средств автоматизации. Обследование проводят системные аналитики (системные интеграторы) совместно с представителями организации-заказчика.

На основе анализа результатов обследования строят модель, отражающую деятельность предприятия на данный момент. Такую модель называют *As Is* – «как есть». Далее разрабатывают исходную концепцию КАС. Эта концепция включает в себя предложения по изменению структуры предприятия, взаимодействию подразделений, информационным потокам, что выражается в модели *To Be* – «как должно быть».

Результаты анализа конкретизируются в техническом задании на создание КАС. В нем указывают потоки входной информации, типы выходных документов и предоставляемых услуг, уровень защиты информации, требования к производительности (пропускной способности) и т. п. Техническое задание направляют заказчику для обсуждения и окончательного согласования.

Перевод документов в электронную форму – одна из первых задач внедрения CALS-технологий. Для создаваемого электронного архива документов нужно в соответствии со спецификациями MIL-PRF-2800х выбрать единые форматы представления чертежной и текстовой информации. Далее необходимы разработка проекта корпоративной вычислительной сети и его реализация, выбор, приобретение и установка системы PDM, обучение сотрудников предприятия работе в КАС.

Для успешного внедрения и использования CALS-технологий предприятие должно располагать инженерными кадрами, знающими методы и умеющими использовать средства автоматизированного проектирования, поскольку CALS-технологии развиваются прежде всего на базе САПР. В настоящее время в технических вузах страны студенты изучают такие разделы САПР, как геометрическое моделирование и машинная графика, математическое моделирование, оптимизация проектных решений. Целесообразно дополнить учебные программы соответствующих курсов, включив в них изучение вопросов CALS-технологий.

Так, вопросы геометрического моделирования, изучаемые в курсах инженерной графики, основ САПР или в специальном курсе «Вычислительная геометрия», полезно дополнить фрагментами соответствующих прикладных протоколов STEP. В разделах, посвященных математическому моделированию, нужно знакомить студентов с возможностями многоаспектного моделирования, в том числе на базе языка VHDL-AMS. Студенты должны быть знакомы с методиками концептуального проектирования IDEF0, IDEF1X и объектно-ориентированного проектирования на базе языка UML. Эти вопросы, так же как структура стандартов STEP и основы языка Express, могут быть предметом изучения в отдельном курсе «CALS-технологии» или в курсе «Основы автоматизированного проектирования». В раздел оптимизации проектных решений нужно включить методы оптимального планирования и распределения ресурсов. Наконец, следует предусмотреть знакомство студентов с основами Internet-технологий, в том числе с представлением документов с помощью языков разметки.

Естественно, что преподавание вопросов CALS-технологий требует развития лабораторной базы. В составе программного обеспечения, поддерживающего лабораторные циклы по САПР и CALS, необходимо иметь по крайней мере один из пакетов MCAD (с модулями CAD и CAM), программы моделирования (например, типа ПА9), пакеты поддержки методик функционального и информационного моделирования (например, BPWin и ERWin), XML-редактор, желательно приобретение PDM. Циклы дисциплин радиоэлектронного профиля должны поддерживаться программным обеспечением сквозного проектирования радиоэлектронной аппаратуры и в первую очередь программами разработки схем на базе ПЛИС и проектирования печатных плат.

Лекция 7

Концепция проектирования мехатронных модулей и систем

7.1. Методика концептуального проектирования

Естественной базой проектирования и управления сложными системами является объектно-ориентированный подход (ООП) к созданию и реализации таких систем. Идеи ООП воплощены в основных языках, составляющих лингвистическое обеспечение CALS, таких, как Express и UML (*Unified Modeling Language*), который занял господствующее положение на стадии концептуального проектирования. Он поддерживается международным консорциумом OMG (*Object Management Group*). Язык UML предназначен для описания, визуализации и документирования объектно-ориентированных систем в процессе их разработки, в первую очередь их программного обеспечения.

В данном курсе лекций языки Express и UML не рассматриваются.

Инструментальные средства концептуального проектирования

CASE-системы [5]

Аббревиатура CASE имеет двоякое толкование, соответствующее двум направлениям CASE-систем. Первое из них – *Computer Aided System Engineering* – подчеркивает направленность на поддержку концептуального проектирования сложных систем (плохо структурированных). Далее CASE-системы этого направления будем называть **системами CASE для концептуального проектирования**.

Второе направление называют *Computer Aided Software Engineering*, что переводится как «автоматизированное проектирование программного обеспечения». Соответствующие CASE-системы называют **инструментальными CASE** или **инструментальными средами разработки программного обеспечения (ПО)**.

Среди систем CASE для концептуального проектирования различают системы *функционального, информационного* или *поведенческого* проектирования. Наиболее известной методикой функционального проектирования сложных систем является методика SADT (*Structured Analysis and Design Technique*), предложенная в 1973 г. Р. Россом и впоследствии ставшая основой стандарта IDEF0 (*Integrated DEFinition 0*) – язык функционально проектирования.

Системы *информационного* проектирования реализуют методики инфологического проектирования баз данных. Широко используются язык и методика создания информационных моделей приложений, закрепленные в методике IDEF1X (язык информационного проектирования). Кроме того, развитые коммерческие СУБД, как правило, имеют в своем составе совокупность CASE-средств проектирования приложений.

Основные положения стандартов IDEF0 и IDEF1X использованы также при создании комплекса стандартов ISO 10303, лежащих в основе технологии STEP для представления в компьютерных средах информации, относящейся к проектированию и производству в промышленности.

Поведенческое моделирование сложных систем используют для определения динамики функционирования сложных систем. В его основе лежат модели и методы имитационного моделирования систем массового обслуживания, сети Петри, возможно применение конечно-автоматных моделей, описывающих поведение системы как последовательность смены состояний.

Применение инструментальных CASE-систем ведет к сокращению затрат на разработку ПО за счет уменьшения числа итераций и числа ошибок, к улучшению качества продукта вследствие лучшего взаимопонимания разработчика и заказчика, к облегчению сопровождения готового ПО.

Среди инструментальных CASE-систем различают интегрированные комплексы инструментальных средств для автоматизации всех этапов жизненного цикла ПО (такие системы называют *Workbench*) и специализированные средства для выполнения отдельных функций (*Tools*). Средства CASE-систем по своему функциональному назначению принадлежат к одной из следующих групп:

- 1) средства программирования;
- 2) средства управления программным проектом;
- 3) средства верификации (анализа) программ;
- 4) средства документирования.

К средствам программирования относятся:

- компиляторы с алгоритмических языков;
- построители диаграмм потоков данных;
- планировщики для построения высокоуровневых спецификаций и планов ПО (возможно, на основе баз знаний, реализованных в экспертных системах);
- интерпретаторы языков спецификаций и языков четвертого поколения;
- прототайпер для разработки внешних интерфейсов – экранов, форм выходных документов, сценариев диалога;
- генераторы программ определенных классов (например, конверторы заданных языков, драйверы устройств программного управления, постпроцессоры);
- кросс-средства;
- отладчики программ.

При этом под языками спецификаций понимают средства укрупненного описания разрабатываемых алгоритмов и программ, к языкам 4GL относят языки для компиляции программ из набора готовых модулей, реализующих типовые функции достаточно общих приложений (чаще всего это функции технико-экономических систем).

Управление программным проектом называют также управлением конфигурациями ПО. Этому понятию соответствуют корректное внесение изменений в программную систему при ее проектировании и сопровождении, контроль целостных проектных данных, управление версиями проекта, организация параллельной работы членов коллектива разработчиков. Использование средств управления конфигурациями позволяет создавать программные системы из сотен и тысяч модулей, значительно сокращать сроки разработки, успешно модернизировать уже поставленные заказчикам системы.

Основой средств управления программным проектом является *репозиторий* – база данных проекта. Именно в репозитории отражена история развития программного проекта, содержатся все созданные версии (исходный программный код, исполняемые программы, библиотеки, сопроводительная документация и т. п.), с помощью репозитория осуществляется контроль и отслеживание вносимых изменений.

Средства верификации служат для оценки эффективности исполнения разрабатываемых программ и определения наличия в них ошибок и противоречий. Различают статические и динамические анализаторы. В статических анализаторах ПО исследуется на наличие неопределенных данных, бесконечных циклов, недопустимых передач управления и т. п. Динамический анализатор функционирует в процессе исполнения проверяемой программы; при этом исследуются трассы, измеряются частоты обращений к модулям и т. п. Используемый математический аппарат – сети Петри, теория массового обслуживания.

В последнюю из перечисленных групп входят документаторы для оформления программной документации, например отчетов по данным репозитория; различные редакторы для объединения, разделения, замены, поиска фрагментов программ и других операций редактирования.

Проектирование ПО с помощью CASE-систем включает в себя несколько этапов. Начальный этап – предварительное изучение проблемы. Результат представляют в виде исходной диаграммы потоков данных и согласуют с заказчиком. На следующем этапе выполняют детализацию ограничений и функций программной системы и полученную логическую модель вновь согласуют с заказчиком. Далее разрабатывают физическую модель, т. е. определяют модульную структуру программы, выполняют инфологическое проектирование баз данных, детализируют граф-схемы программной системы и ее модулей.

Подсистема CASE в составе системной среды САПР предназначена для адаптации САПР к нуждам конкретных пользователей, разработки и сопровождения прикладного ПО. Ее можно рассматривать как специализированную

САПР, в которой объектом проектирования являются новые версии подсистем САПР, в частности, версии, адаптированные к требованиям конкретного заказчика. Другими словами, такие CASE-подсистемы позволяют пользователям формировать сравнительно с малыми затратами усилий варианты прикладных ПМК из имеющегося базового набора модулей под заданный узкий диапазон конкретных условий проектирования.

Методики IDEF [5]

Рассмотрим кратко методологию SADT. Подход SADT относится к классу формальных методов, используемых при анализе и разработке системы. Несмотря на то, что вполне допустима независимая разработка функциональных моделей, методология SADT предполагает ведение структурированного проекта анализа, в процессе которого происходит их создание. В дополнение к функциональному моделированию SADT системный анализ предполагает построение информационных моделей данных и диаграмм состояний (*State-Transition Diagrams* – STD), которые моделируют поведение системы во времени.

Основной принцип SADT состоит в том, что тщательный анализ системы обуславливает получение возможного оптимального решения. Использование SADT автоматически приводит к необходимости сбора и обработки значительного количества информации о системе. Традиционно такая информация собирается аналитиком посредством формализованного опроса экспертов предметной области – людей, владеющих информацией о механизме функционирования системы в целом или ее частей. С течением времени некоторые эксперты освоили технологию моделирования, что привело к появлению IDEF3-технологии получения знаний от экспертов. Однако роль системного аналитика в проектах SADT оставалась ключевой.

Часто разработка моделей применяется для документирования ситуации, сложившейся к определенному моменту (модели «как есть» – «*as is*»). Впоследствии они применяются при создании новых моделей функционирования системы (модели «как должно быть» – «*to be*»), а также для проверки моделей «*to be*»), с тем чтобы удостовериться, что предлагаемые изменения действительно повлекут за собой улучшение функционирования системы.

В дополнение к алгоритмизации процесса построения предлагаемой системы модели «*to be*» используются для планирования загрузки частей системы; калькуляции бюджета и распределения ресурсов; при построении плана реорганизации системы, определяющего действия по переводу системы из состояния «*as is*» в состояние «*to be*».

Преимущества, получаемые от разработки моделей «*as is*», должны быть сопоставлены с затратами средств и времени, которые для этого необходимы. В литературе без труда можно найти многочисленные примеры систем, изначально построенных для решения не соответствующих их истинному

назначению задач. «As is»-моделирование позволяет обойти подобные трудности. С другой стороны, если имеется определенный уровень понимания задачи в целом (как это часто случается при разработке информационных систем), затраты средств на разработку «as is»-моделей могут быть неоправданными.

IDEF0 – это более строгая реализация ранее предложенной методики SADT (*Structured Analysis and Design Technique*). Начиная с момента создания первой версии методика успешно применялась для проектирования телефонных сетей, систем управления воздушными перевозками, производственных предприятий и др.

Описание объектов и процессов в IDEF0 выполняется в виде совокупности взаимосвязанных блоков (рис. 7.1), называемых блоками ICOM (*Input – Control – Output – Mechanism*), где *I* – вход, *C* – управление, *O* – выход, *M* – механизм.

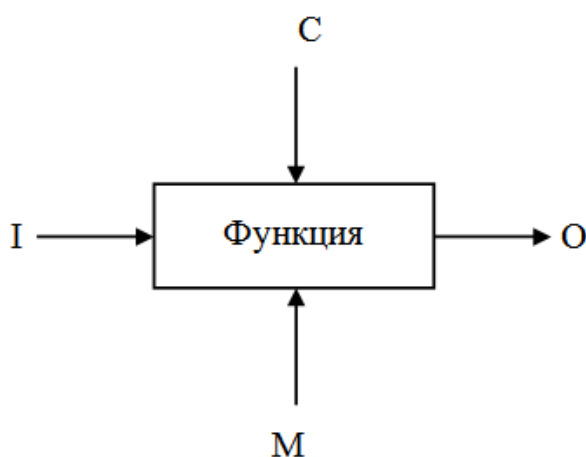


Рис. 7.1. Блок ICOM

Блоки представляют функции (работы), их названия выражаются глаголами или отглагольными существительными. Типичные примеры функций: планировать, разработать, классифицировать, измерить, изготовить, отредактировать, рассчитать, продать (или планирование, разработка, классификация, измерение, изготовление, редактирование, расчет, продажа). Число блоков на одном уровне иерархии – не более 6, иначе восприятие диаграмм будет затруднено. Число уровней иерархии не ограничено, но обычно – не более 5. Блоки в диаграммах IDEF0 связаны дугами (стрелками), которые отображают множества объектов (данных). Управление (*control*) определяет условия выполнения. Примеры управления: требования, чертеж, стандарт, указания, план. Механизм (*mechanism*) выражает используемые средства, например: компьютер, САПР, оснастка, заказчик, фирма. Входы и выходы могут быть любыми объектами.

Пример диаграммы IDEF0 показан на рис. 7.2, где представлены функции, выполняемые на начальных этапах процесса реинжиниринга предприятия. На диаграмме показаны четыре этапа подготовки к реинжинирингу.

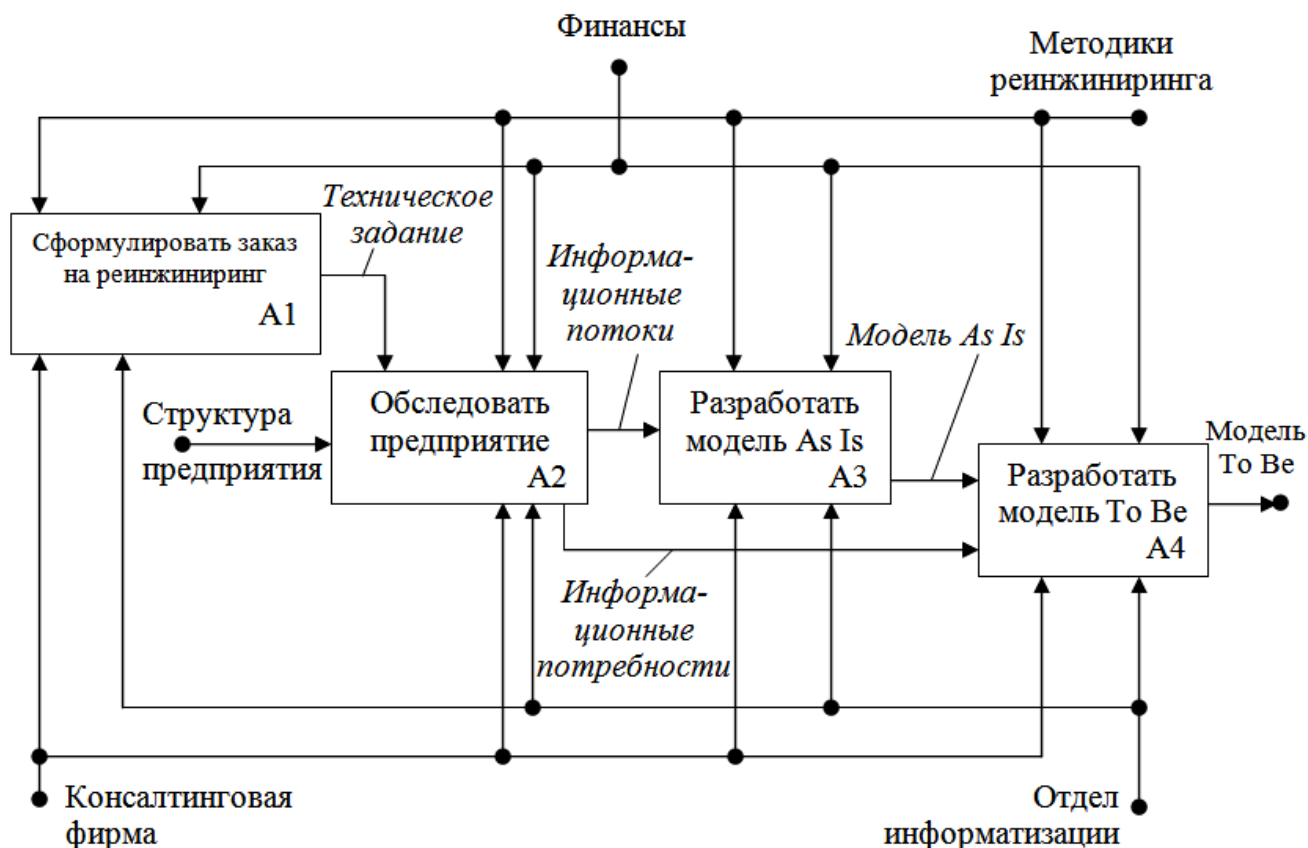


Рис. 7.2. Пример IDEF0-диаграммы

После формулировки заказа на перестройку процессов функционирования на базе информатизации управления производится обследование предприятия, выявляются его структура, информационные потоки между подразделениями, внешние информационные связи, степень компьютеризации, наличие вычислительной сети и т. п. На основании полученных данных составляется функциональная модель *As Is* и разрабатывается модель *To Be*. Эта модель верхнего уровня далее конкретизируется, каждая из функций раскрывается более подробно на диаграммах следующих уровней.

Методика информационного проектирования приложений IDEF1X основана на построении информационных моделей приложений в виде диаграмм «сущность – связь». Для описания сущностей и отношений используется язык диаграмм.

Сущности в IDEF1X-диаграммах изображаются в виде прямоугольников, отношения – в виде стрелок. Отношения между сущностями в IDEF1X являются бинарными. Выделяют *идентифицирующие отношения* – связи типа «родитель – потомок», в которых потомок (зависимая сущность) однозначно

определяется своей связью с родителем, и *неидентифицирующие отношения*, означающие, что у связанного этим отношением экземпляра одной сущности может быть (а может и не быть) соответствующий экземпляр второй сущности. Идентифицирующее отношение изображают на диаграмме сплошной линией между прямоугольниками связанных сущностей, неидентифицирующее – пунктирной линией. На дочернем конце линии должно быть утолщение (жирная точка). Мощность k связи – число экземпляров зависимой сущности, соответствующее одному экземпляру родительской сущности. Известное значение мощности может быть указано около утолщенного конца линии связи. При этом символ p означает $k \geq 1$, а символу z соответствует $k = 0$ или 1 . Отсутствие символа интерпретируется как $k \geq 0$.

Различают также специфические и неспецифические отношения. *Неспецифические отношения* – это связи типа «многие ко многим», они обозначаются сплошной линией с утолщениями на обоих концах.

В отношениях «родитель – потомок» возможно наличие у потомка единственного родителя или нескольких родителей (ассоциативная связь). Выделяют также отношения категоризации (наследования), отражающие связи между некоторой общей сущностью и вариантами ее реализации (категориями). Примером категориальной связи является отношение «тип прибора – альтернативные варианты этого прибора».

Среди атрибутов различают ключевые и неключевые. Значение *ключевого атрибута (ключа)* однозначно идентифицирует экземпляр сущности. *Внешний ключ* – это атрибут (или атрибуты), входящий в ключ родителя и наследуемый потомком. На IDEF1X-диаграммах ключи записываются в верхней части прямоугольника сущности, причем внешние ключи помечают меткой FK (*Foreign Key*), неключевые атрибуты помещают в нижнюю часть прямоугольников. В идентифицирующих отношениях все ключи родителя входят и в ключи потомка, в неидентифицирующих – ключи родителя относятся к неключевым атрибутам потомка.

Между IDEF0 и IDEF1X-моделями одного и того же приложения существуют определенные связи. Так, стрелкам на IDEF0-диаграммах соответствуют атрибуты некоторых сущностей в IDEF1X-моделях, что нужно учитывать при построении информационных моделей.

Методика IDEF0 принята в CALS-технологиях как методика начальных этапов моделирования сложных слабоструктурированных приложений. Методика IDEF1X послужила основой для разработки языка Expre-G для стандартов STEP.

Методы оптимизации в задачах концептуального проектирования описаны в работе [5]. В этой же работе описаны и другие аспекты применения CALS-технологий: STEP-технологии; математическое, лингвистическое и программное обеспечение CALS-технологий.

В заключение этого раздела кратко рассмотрим все семейство стандартов IDEF [5].

Применяемые в CASE-средствах разные методики и модели описывают различные свойства систем, важные, например, с точки зрения их автоматизации, а также позволяющие количественно оценить параметры проектов. Следует отметить, что спектр свойств систем различного назначения очень широк, и не все они к настоящему времени отражены в адекватных моделях. В то же время для класса информационных систем организационного типа (*Management Information Systems – MIS*) адекватные модели разработаны и поддерживаются соответствующими средствами автоматизации.

Взаимная совокупность методик и моделей концептуального проектирования IDEF (*Integrated DEFinition*) разработана в США по программе *Integrated Computer Aided Manufacturing*. В настоящее время имеются методики функционального, информационного и поведенческого моделирования и проектирования, в которые входят IDEF-модели, приведенные ниже.

Название	Назначение
IDEF0	Функциональное моделирование <i>Function Modeling Method</i>
IDEF1 и IDEF1X	Информационное моделирование <i>Information and Data Modeling Method</i>
IDEF2	Поведенческое моделирование <i>Simulation Modeling Method</i>
IDEF3	Моделирование деятельности <i>Process Flow and Object State Description Capture Method</i>
IDEF4	Объектно-ориентированное проектирование <i>Object-oriented Design Method</i>
IDEF5	Систематизация объектов приложения <i>Ontology Description Capture Method</i>
IDEF6	Использование рационального опыта проектирования <i>Design Rational Capture Method</i>
IDEF8	Взаимодействие человека и системы <i>Human-System Interaction Design</i>
IDEF9	Учет условий и ограничений <i>Business Constraint Discovery</i>
IDEF14	Моделирование вычислительных сетей <i>Network Design</i>

IDEF0 реализует методику функционального моделирования сложных систем. Наиболее известной реализацией IDEF0 является методология SADT (*Structured Analysis and Design Technique*), предложенная в 1973 г. Д. Россом и впоследствии ставшая основой стандарта IDEF0. Эта методика рекомендуется для начальных стадий проектирования.

IDEF1X и **IDEF1** реализуют методики инфологического проектирования баз данных. В IDEF1X имеется ясный графический язык для описания объектов и отношений в приложениях, так называемый язык диаграмм «сущность – связь» (ERD – *Entry-Relations Diagrams*). Разработка информационной модели по IDEF1X выполняется в несколько этапов:

- выясняются цели проекта, составляется план сбора информации, при этом обычно исходные положения для информационной модели следуют из IDEF0-модели;
- выявляются и определяются основные сущности – элементы базы данных, в которых будут храниться эти системы;
- выявляются и определяются основные отношения, результаты представляются графически в виде так называемых ER-диаграмм;
- детализируются нестандартные отношения, определяются ключевые атрибуты сущностей; детализация отношений заключается в замене связей «многие ко многим» на связи «многие к одному» и «один ко многим»;
- определяются атрибуты сущностей.

IDEF2 и **IDEF3** реализуют поведенческое моделирование. Если методика IDEF0 связана с функциональными аспектами и позволяет отвечать на вопрос «Что делает система?», то в этих методиках детализируется ответ «Как система это делает». В основе поведенческого моделирования лежат модели и методы имитационного моделирования систем массового обслуживания, сети Петри, возможно применение модели конечного автомата, описывающей поведение системы как последовательности смен состояний.

Перечисленные методики относятся к так называемым структурным методам.

IDEF4 реализует объектно-ориентированный анализ больших систем. Он предоставляет пользователю графический язык для изображения классов, диаграмм наследования, таксономии методов.

IDEF5 направлен на представление онтологической информации приложения в удобном для пользователя виде. Для этого используются символические обозначения (дескрипторы) объектов, их ассоциаций, ситуаций и схемный язык описания отношений классификации, «часть-целое», перехода и т. п. В методике имеются правила связывания объектов (термов) в предложения и аксиомы интерпретации термов.

IDEF6 направлен на сохранение рационального опыта проектирования информационных систем, что способствует предотвращению структурных ошибок.

IDEF8 предназначен для проектирования диалогов человека и технической системы.

IDEF9 используется для анализа имеющихся условий и ограничений (в том числе физических, юридических, политических) и их влияния на принимаемые решения в процессе реинжиниринга.

IDEF14 предназначен для представления и анализа данных при проектировании вычислительных сетей на графическом языке с описанием конфигураций, очередей, сетевых компонентов, требований к надежности и т. п.

7.2. Концепция проектирования мехатронных модулей и систем

Общие положения

Описанный выше системный подход к проектированию на базе систем автоматизированного проектирования с использованием CALS-технологий (объектно-ориентированное проектирование) является концептуальной основой проектирования мехатронных модулей и систем.

Необходимо учесть, что построение мехатронных систем с качественно новыми характеристиками диктует необходимость принципиально нового подхода к их проектированию и конструированию. Техника такого подхода частично была описана в подразделе 7.1 «Методика концептуального проектирования». Но там речь шла в основном о лингвистическом обеспечении процесса проектирования. Концептуальной же основой проектирования мехатронных систем являются следующие положения:

1. Основой разработки мехатронных систем служат методы *совмещенного (параллельного)* проектирования, предполагающие совмещение во времени некоторых этапов проектирования, выполняемых последовательно при традиционном проектировании (например, последовательно выполняется разработка механической, электронной, сенсорной и компьютерной частей системы с последующей разработкой интерфейсных блоков).

2. Синергетический характер мехатронных систем проявляется в том, что составные части системы не просто дополняют друг друга, но объединяются таким образом, что образованная ими система начинает обладать новыми свойствами. При этом мехатронные системы, в отличие от традиционных, обладают меньшей структурной избыточностью и большей степенью интеграции. В результате повышается конструктивная компактность системы (вплоть до миниатюризации в микромашинах), улучшаются массогабаритные и динамические характеристики машин, упрощаются кинематические цепи. Возникают дополнительные возможности при проектировании мехатронных систем, наилучшим образом отвечающие требованиям заказчика.

3. Интегрированные мехатронные элементы выбираются разработчиком уже на стадии проектирования машины, а затем обеспечивается необходимая

инженерная и технологическая поддержка при производстве и эксплуатации машины. В этом радикальное отличие мехатронных машин от традиционных, когда зачастую пользователь был вынужден самостоятельно объединять в систему разнородные механические, электронные и информационно-управляющие устройства различных изготовителей. Именно поэтому многие сложные комплексы (например, некоторые гибкие производственные системы в отечественном машиностроении) показали на практике низкую надежность и невысокую технико-экономическую эффективность.

4. Проектирование мехатронных систем базируется на идеях модульного конструирования, при котором из отдельных многофункциональных модулей (механической, электронной, компьютерной частей системы) komponуются гибкие сложные системы модульной архитектуры.

5. В мехатронных системах наблюдается перераспределение функциональной нагрузки от аппаратных (например, электромеханических) модулей к информационным (компьютерным) модулям. При этом исключается многоступенчатое преобразование энергии и информации.

6. При проектировании мехатронных систем широко применяются методы *визуализации динамических процессов*, протекающих в системах, вплоть до использования систем *виртуальной реальности* при проектировании сложных технических систем.

7. Высокий уровень интеллектуализации мехатронных систем диктует необходимость проектирования интеллектуальных систем управления (для борьбы с неопределенностями, сопутствующими функционированию сложных динамических систем). При этом необходим обоснованный выбор интеллектуальных технологий при проектировании многоуровневых иерархических систем управления.

8. Использование концепции АКУ (аппарат конфигурируемого управления), у которой маневренность является приоритетной функцией. Ранее при создании машины сначала выполняли базовое проектирование (с точки зрения физики и механики), а затем в качестве подсистемы разрабатывали систему управления. Но оказалось, что можно спроектировать более эффективную машину, если еще на этапе базового проектирования заложить основы системы управления, используя принципы АКУ. При этом машина может реализовать свои функции только благодаря существованию системы управления. Таким способом можно добиться максимальной динамичности системы (машины). Устойчивость достигается благодаря наличию контуров управления. Концепция АКУ широко используется в самолетостроении.

Практическое воплощение данных принципов требует привлечения всех современных методов и средств проектирования сложных систем (включая средства концептуального проектирования), часть из которых была описана выше.

Необходимо отметить, что *проектирование* является одним из самых ответственных этапов жизненного цикла промышленных изделий, от которого в значительной степени зависит успех выполнения (реализации) всех остальных

этапов жизненного цикла, так как именно на этапе проектирования определяются все параметры системы, технологичность ее производства (изготовления), требования к организации производства, эксплуатационные характеристики и возможность утилизации.

В качестве примера неудачного проекта можно привести создание атомных подводных лодок (а возможно, и всей атомной энергетики), когда вопросу утилизации отработавших атомных установок не было уделено должного внимания. И сейчас этап утилизации этих установок породил огромные проблемы и опасность для окружающей среды.

Алгоритм проектирования [2]

Проектирование мехатронных модулей (ММ) основано на совместном анализе их функциональной, структурной и конструктивной моделей. Целью проектирования мехатронного модуля является преобразование исходных требований в конструкторскую реализацию и соответствующую документацию, по которой может быть изготовлена эта система, удовлетворяющая сформулированным показателям качества. Ограничимся рассмотрением только технических показателей, но при выборе структуры и конструкции мехатронных модулей следует также учитывать экономические и эксплуатационные оценки качества.

Общий алгоритм проектирования мехатронного модуля (рис. 7.3) предусматривает три основных этапа проектирования – это последовательно выполняемые функциональный, структурный и конструктивный анализ и синтез мехатронных модулей. Применяя процедуры функционально-структурного и структурно-конструктивного анализа, разработчик оценивает принимаемые решения, стремясь добиться высокого уровня синергетической интеграции элементов. Для использования методов автоматизированного проектирования формируют взаимосвязанные функциональную (*F*-модель), структурную (*S*-модель) и конструктивную (*C*-модель) модели мехатронного модуля.

Определение функции ММ является проблемой концептуального проектирования (см. раздел 7.1 «Методика концептуального проектирования»).

Задача проектирования мехатронного модуля включает в себя три основных этапа:

- выбор вариантов структурных решений модуля по его заданной функции и их функционально-структурный анализ. Входной информацией для этого этапа проектирования является *F*-модель, а на выходе формируется *S*-модель мехатронного модуля;
- структурно-конструктивный анализ конструкторских решений и построение *C*-модели мехатронного модуля;
- конструкторская реализация выбранного варианта модуля с разработкой конструкторской документации.

Таким образом, задача проектирования мехатронного модуля заключается в нахождении наилучшего соответствия между заданной функцией и конструктивным исполнением.

Ключевой методологической идеей данного подхода является приоритет функции модуля над ее структурной организацией и конструктивным решением. В мехатронном модуле заданные функциональные преобразования могут быть реализованы несколькими наборами структурных блоков, а эти блоки, в свою очередь, могут иметь различное конструкторское исполнение. Таким образом, при проектировании модуля его структура и конструктивное решение являются подчиненными по отношению к заданной функции.

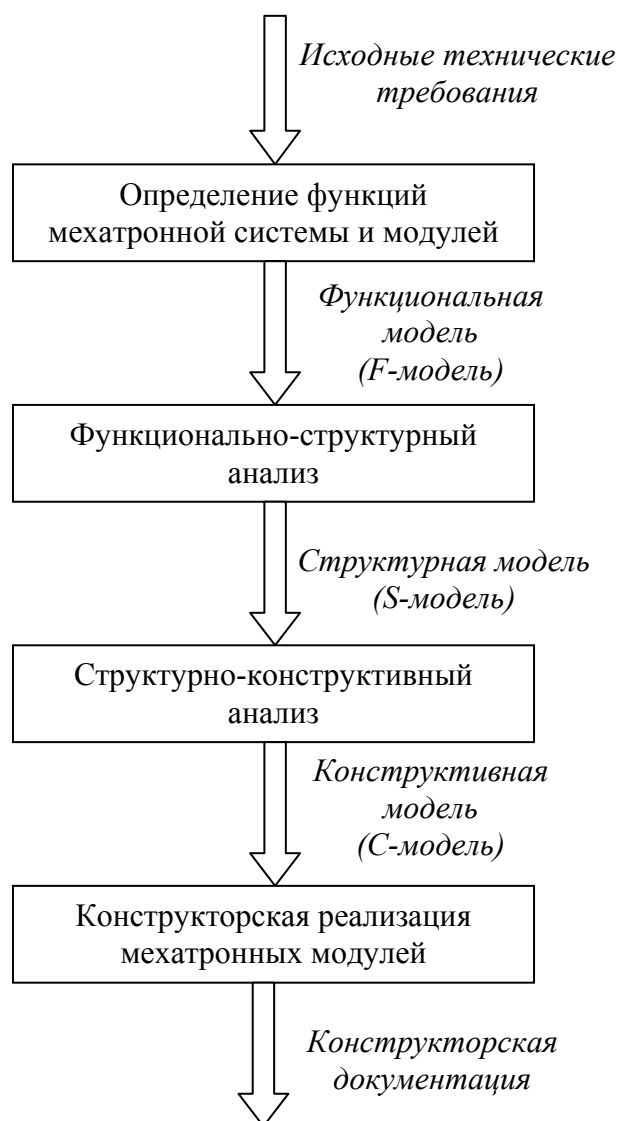


Рис. 7.3. Общий алгоритм проектирования мехатронного модуля

Ключевой методологической идеей данного подхода является приоритет функции модуля над его структурной организацией и конструктивным решением. В мехатронном модуле заданные функциональные преобразования

могут быть реализованы несколькими наборами структурных блоков, а эти блоки, в свою очередь, могут иметь различное конструкторское исполнение. Таким образом, при проектировании модуля его структура и конструктивное решение являются подчиненными по отношению к заданной функции.

На рис. 7.3 функционально-структурный подход объединен со структурно-конструктивным анализом в общую методику разработки мехатронных модулей и систем.

Таким образом, существуют два основных этапа построения моделей сложных технических систем.

Первый этап заключается в функциональном определении рассматриваемой системы через ее поведение по отношению к внешним объектам и внешней среде. *Функция* – основа проектирования и конструирования. Цель проектирования – наиболее полное решение поставленной функциональной задачи. Поэтому всегда нужно начинать с классификации функций и соответствующих им структур и конструктивных решений, а не наоборот.

Приступать к разработке проекта можно, только поняв функцию будущего изделия и представив в пространстве возможное решение или его путь. Здесь идет речь не только о геометрическом пространстве, но и о многомерном – время, тенденции развития, материалы, технологии. Поэтому необходимо развивать в себе способность многомерного понимания искусственного мира.

Для успешного решения функциональной задачи одинаково важны *конструкция, материалы и технология*. Все три составляющие мехатронных систем – МС (*механическая, информационно-измерительная и компьютерно-управляющая*) всегда равноценны, хотя вторая и третья в настоящее время развиваются более интенсивно.

Необходимо соблюдать *принцип функциональной целесообразности* – соответствие выбранного решения поставленной задаче. Иными словами, задача должна быть решена без превышения необходимых затрат. Но функцию в данном случае надо понимать в широком смысле, например, водопроводный кран должен не только перекрывать воду без подтечек, но и быть удобным в обслуживании, «вписываться» в интерьер помещения, быть красивым и простым. Значит, надо изготовить его из качественных, но недорогих материалов, обеспечить высокую точность сопряжения деталей, ремонтоспособность и т. д.

В отношении механизмов и машин функциональная целесообразность предусматривает в частности:

- обеспечение минимальной допустимой для заданной функции прочности, минимальной жесткости и других характеристик, если их повышение сопряжено с увеличением массы, удорожанием изготовления и эксплуатации устройства;
- выполнение защитных конструкций тонкостенными (в виде кожухов) в отличие от несущих конструкций;

- обеспечение высокой точности и центрирования деталей только в случаях, когда это влияет на работоспособность устройства;
- исключение лишних опор для деталей, которые могут самоустанавливаться;
- обеспечение высокого качества только трущихся, посадочных, а также открытых для обозрения и контакта поверхностей.

Второй этап определяет *структурное* описание состава системы и связей между ее элементами. Исследование и оптимизация взаимосвязи между функцией и структурой системы лежит в основе функционально-структурного подхода, который соответствует первым двум этапам проектирования мехатронных систем и модулей (см. рис. 7.3).

Выше было сказано, что на первом этапе проводят функциональный анализ мехатронной системы или мехатронного модуля, результатом которого является построение функциональной модели.

Функциональное представление МС и ММ с определенными входными и выходными переменными (модель типа «черный ящик») показано на рис. 7.4.

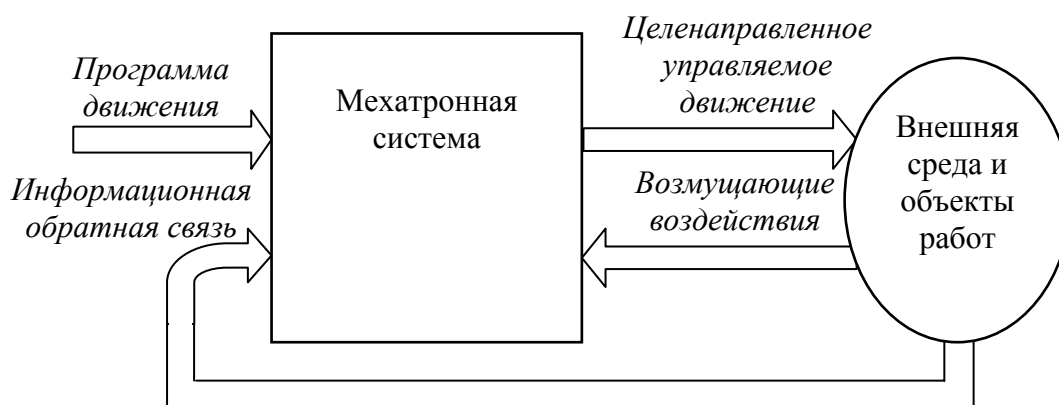


Рис. 7.4. Мехатронный модуль в виде «черного ящика»

Таким образом, основная функциональная задача мехатронной системы или мехатронного модуля заключается в преобразовании информации о программе движения в целенаправленное управляемое движение выходного звена.

Программа движения может быть задана управляющим компьютером как набор команд высокого уровня или, в случае дистанционного управления, человеком-оператором с помощью человеко-машинного интерфейса. Управляемое движение осуществляется механической подсистемой ММ, и его конечное звено взаимодействует с объектами внешней среды. Внешние воздействия, например силы резания при шлифовальных и фрезерных операциях, контактные силы и моменты при роботизированной сборке, должны эффективно отражаться мехатронным модулем в процессе движения.

Информационная обратная связь необходима для оценки текущего состояния ММ как объекта управления и внешней среды в режиме реального времени.

Обозначенная основная функция не является единственной для мехатронных систем. Некоторые дополнительные функции, такие, как реконфигурация системы, обмен сигналами и информацией с другим технологическим оборудованием, самодиагностика, также должны быть реализованы для эффективной и надежной работы МС. Но именно выполнение функционального движения является основной мехатронной функцией, так как механическая подсистема взаимодействует с объектами работ и таким образом определяет поведение МС во внешней среде.

Рассмотренное представление мехатронного модуля в форме «черного ящика» (см. рис. 7.4) имеет два информационных входа (программа движения и информационная обратная связь), энергетический вход (реакция внешней среды) и механический выход (целенаправленное управляемое движение). Следовательно, в общем случае функциональная модель мехатронного модуля может быть определена как *информационно-механический преобразователь*.

Для физической реализации мехатронного информационно-механического преобразования необходим внешний энергетический источник. На современной стадии развития мехатроники для этой цели в основном используют электрические источники энергии. Введя соответствующие электроэнергетические преобразования, получаем следующую функциональную модель (*F-модель*) мехатронного модуля (рис. 7.5):

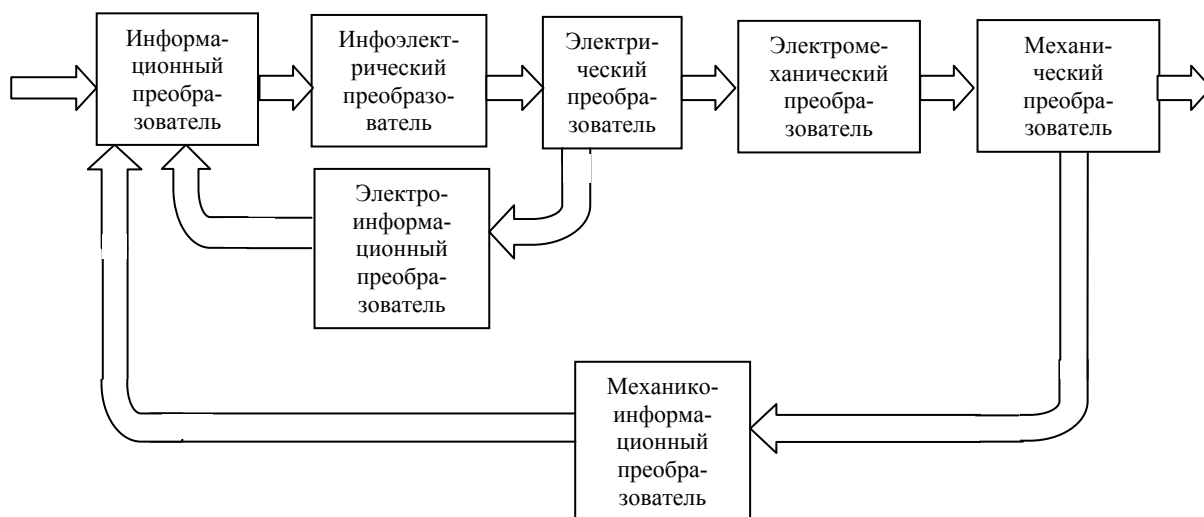


Рис. 7.5. Функциональная модель мехатронного модуля

Полученная *F-модель* ММ в общем случае содержит семь базовых функциональных преобразователей, связанных энергетическими и информационными потоками.

Отметим, что электрическая энергия является только промежуточной энергетической формой между входной информацией и выходным механическим движением. Следовательно, электрическая подсистема отнюдь не является единственно возможной для выполнения мехатронной функции, как это постулировано в приведенном определении мехатроники. Безусловно, и другие виды энергетических процессов могут быть использованы в мехатронных системах для промежуточных преобразований и должны рассматриваться как альтернативные варианты на этапе концептуального проектирования. Выбор разработчиком ММ физической природы промежуточного преобразователя определяется возможностями технической реализации, исходными требованиями и особенностями его применения. В современной инженерной практике широко применяются гидравлические, пневматические, химические и другие виды энергетических преобразователей.

Итак, в любом мехатронном модуле необходимо реализовать семь функциональных преобразований (см. рис. 7.5). Три из них назовем *моноэнергетическими* (информационный, электрический и механический преобразователи), где входные и выходные переменные имеют одну и ту же физическую природу. Остальные четыре являются *дуальными* (двойственными), так как в них входные и выходные переменные принадлежат различным физическим видам. К этой группе относят информационно-электрический и электромеханический преобразователи, расположенные в прямой цепи функциональной модели, и параллельные электроинформационный и механико-информационный преобразователи в цепи обратной связи.

Структурная модель мехатронного модуля должна отражать состав его элементов и связи между ними. В теории автоматического управления и электромеханике принято структурные модели графически представлять в виде блок-схем. Звенья обычно обозначают в виде прямоугольника с указанием входной и выходной переменных, а уравнения или характеристики записывают внутри него.

В качестве исходной структуры ММ рассмотрим традиционный электропривод с компьютерным управлением (*S*-модель – рис. 7.6). Для дальнейшего анализа в представленной структурной схеме выделим управляющую и электромеханическую подсистемы. При конструировании мехатронных модулей особый интерес представляет исполнительная часть, входящая в состав электромеханической подсистемы.

Структурная модель электропривода (см. рис. 7.6) включает в себя следующие основные элементы:

- устройство компьютерного управления движением, функциональной задачей которого является информационное преобразование (обработка цифровых сигналов, цифровое регулирование, расчет управляющих воздействий, обмен данными с периферийными устройствами);

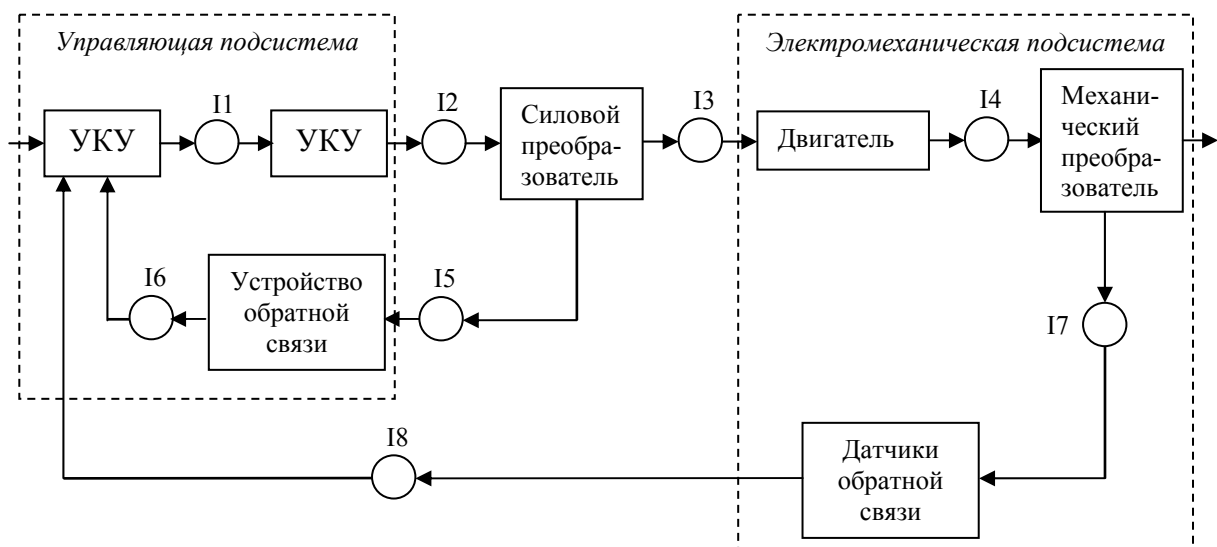


Рис. 7.6. Структурная модель электропривода с компьютерным управлением

- цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), реализующий функцию информационно-электрического преобразования;
- силовой преобразователь, обычно состоящий из усилителя мощности, широтно-импульсного модулятора (ШИМ) и трехфазного инвертора (для асинхронных двигателей);
- управляемый электродвигатель (переменного или постоянного тока), который является электротехническим элементов привода;
- механический преобразователь, который реализует заданное управляемое движение и взаимодействует с внешними объектами; в приводных модулях в качестве таких устройств применяют редукторы, вариаторы, либо непосредственно используют рабочий орган (например, в мехатронных модулях типа «мотор–шпиндель»);
- устройство обратной связи, которое используют для контроля текущих напряжений и токов в силовом преобразователе, а также управляющих функций (например, для организации контура регулирования момента, развиваемого приводом);
- датчики обратной связи по положению и скорости движения выходного звена механического устройства, выполняющие функции механико-информационного преобразования;
- интерфейсные устройства, обозначенные на блок-схеме как 11–18.

В зависимости от физической природы входных и выходных переменных интерфейсные блоки могут быть как механическими преобразователями движения, так и содержать электронные аппаратно-программные компоненты. Примерами механических интерфейсов являются передачи и трансмиссии,

связывающие выходное механическое устройство с двигателем (интерфейс 14) и датчиками обратной связи (интерфейсы 17, 18).

Интерфейсные электронные устройства расположены на входах и выходах устройства компьютерного управления (УКУ) и предназначены для его сопряжения со следующими структурными элементами:

- с цифро-аналоговым преобразователем (встроенный интерфейс 11) и далее с силовым преобразователем модуля (интерфейс 12);
- с датчиками обратной связи (интерфейс 17), который в случае применения сенсоров с аналоговым выходным сигналом строится на основе аналого-цифрового преобразователя (АЦП);
- с устройствами обратной связи для контроля уровня электрических токов и напряжений в силовом преобразователе (для традиционного привода интерфейс 16 также использует стандартный АЦП).

В традиционной приводной технике интерфейсы являются сепаратными устройствами. Поэтому их проектирование, изготовление и наладка становятся серьезной проблемой для разработчика привода, особенно когда требуется надежно соединять нестандартные и специализированные элементы различных производителей. Мехатронные структуры отличаются высокой степенью интегрированности элементов, причем эти решения закладываются уже на стадии проектирования модулей и машин.

Синергетическая интеграция в мехатронных модулях

Сравнивая функциональную модель мехатронного модуля (см. рис. 7.5) и структурную модель традиционного электропривода (см. рис. 7.6), можно сделать вывод о том, что суммарное количество основных и интерфейсных блоков в структуре электропривода значительно превышает число необходимых функциональных преобразователей. Другими словами, можно говорить о структурной избыточности традиционного электропривода. Наличие избыточных блоков приводит к снижению надежности и точности технической системы, ухудшению ее массогабаритных и стоимостных показателей. Поэтому целесообразно стремиться к сокращению количества сепаратных структурных элементов (как основных, так и интерфейсных блоков) в системе. В идеальном для пользователя варианте мехатронный модуль (см. рис. 7.4), приняв на информационный вход программу движения, должен выполнить целенаправленное управляемое движение с заданными показателями качества. При этом все проблемы интеграции в модуле механических, электронных и управляющих устройств должны быть решены разработчиком для каждой стадии жизненного цикла – от проектирования системы до ее эксплуатации у конечного потребителя.

Суть синергетической интеграции состоит в объединении в единый модуль элементов различной физической природы при сохранении функционального преобразования, выполняемого данным модулем.

Синергетическая интеграция элементов при проектировании мехатронных модулей основана на трех базовых принципах:

- реализация заданных функциональных преобразований минимально возможным числом структурных и конструктивных блоков путем объединения двух и более элементов в единые многофункциональные модули;
- выбор интерфейсов в качестве локальных точек интеграции и исключение избыточных структурных блоков и интерфейсов как сепаратных элементов;
- перераспределение функциональной нагрузки в мехатронной системе от аппаратных блоков к интеллектуальным (электронным и компьютерным) компонентам.

Практическая реализация принципов синергетической интеграции при проектировании позволяет обеспечить основные преимущества мехатронных систем по сравнению с традиционными машинами и добиться качественно новых показателей, в первую очередь по компактности конструкции, скорости и точности движений. Снятие с аппаратной («железной») части системы функциональной нагрузки (прежде всего, через упрощение механического узла) и ее перенос на управляющую и электронную подсистемы придает системе гибкость, делает ее способной к легкой реконфигурации под новые технологические задачи. Следует заметить, что интеграция предполагает не только аппаратное объединение элементов, но и организацию интегрированных информационных процессов в интеллектуальных модулях.

Синергетическую интеграцию в мехатронике осуществляют при проектировании двумя основными способами – функционально-структурной интеграцией (ФС-интеграция) и структурно-конструктивной интеграцией (СК-интеграция), которые объединяют в общий алгоритм проектирования мехатронных систем (см. рис. 7.3).

Функционально-структурная интеграция. Задачей этапа функционально-структурной интеграции является поиск мехатронных структур, реализующих заданные функциональные преобразования с помощью минимального количества структурных блоков. ФС-интеграция направлена на выбор проектных решений, которые обеспечивают исключение некоторых основных блоков, а значит, и смежных с ними интерфейсов из структуры системы.

Примеры мехатронных проектных решений, основанные на способе ФС-интеграции элементов, приведены в табл. 7.1. Представленные решения основаны на совместном анализе функциональной модели мехатронного модуля (см. рис. 7.5) и структуры традиционного электропривода (см. рис. 7.6).

Первые два мехатронных решения относятся к электромеханической подсистеме модуля, следующие варианты интеграции можно реализовать в его управляющей подсистеме (см. рис. 7.6). При конструировании мехатронных модулей наибольшее внимание уделяют решениям, направленным на упрощение механической части модулей и связанных с ней блоков и

интерфейсов, которые реализуют электромеханическое и механико-информационные функциональные преобразования.

Рассмотрим подробнее мехатронные решения по ФС-интеграции элементов из табл. 7.1.

Первый вариант предусматривает использование в обратной связи вместо двух отдельных датчиков положения и скорости только одного элемента – фотоимпульсного датчика (ФИД), который позволяет получать информацию и о угле поворота вала, и о скорости его вращения. При этом также важно, что ФИД выдает выходной сигнал в кодовой форме, что дает возможность вводить информацию в УКУ без дополнительного аналого-цифрового преобразователя (АЦП), что было необходимо для традиционных датчиков с аналоговым выходным сигналом (тахогенераторов, потенциометров и т. п.).

Различают два основных вида фотоимпульсных датчиков – *абсолютные* и *инкрементальные*. Абсолютные ФИД (*encoder*) дают информацию о величине перемещения (линейного или углового) подвижного элемента относительно фиксированного нулевого положения. Преимуществами абсолютного ФИД являются надежность измерения (даже при временном отключении питания информация датчиком не будет потеряна), высокая точность при больших скоростях движения, запоминание нулевого положения (это важно при необходимости управления реверсивными и аварийными движениями машин). Инкрементальный датчик дает информацию о направлении и величине перемещения в приращениях относительно исходного положения, которое он занимал до начала движения.

Таблица 7.1

ФС-интеграция элементов в мехатронном модуле

№ п/п	Мехатронное решение	Функциональное преобразование	Исключаемые сепаратные элементы	
			Основные блоки	Интерфейсы
1	Фотоимпульсный датчик обратной связи	Механико-информационное	Один датчик обратной связи	17, 18
2	Вентильный высокомоментный двигатель	Электромеханическое и механико-информационное	Механическое устройство, сепаратные датчики обратной связи	14, 17, 18
3	Интеллектуальный силовой преобразователь	Информационно-электрическое	Избыточное устройство обратной связи	15, 16
4	Управляющие контроллеры на базе блоков FPGA	Электро-информационное	Цифро-аналоговый преобразователь	11, 12

Интеллектуализацию ФИД обеспечивают встроенными микропроцессорами, которые выполняют следующие основные функции: кодирование

информации датчика, обнаружение ошибок измерения, масштабирование сигнала и передачи текущего кода в контроллер движения по стандартному протоколу. Современная тенденция в создании ФИД заключается в объединении в одном сенсорном модуле конструктивных элементов (валов, подшипников), кодировочных дисков, фотоэлементов и микропроцессора.

Таким образом, использование ФИД позволяет исключить из структуры традиционного привода один датчик обратной связи с его интерфейсом (17), а также АЦП на входе УКУ (интерфейс 18).

Применение высокомоментного двигателя (ВМД) позволяет (второе решение в табл. 7.1) заменить исполнительную пару «двигатель + преобразователь движения» на один приводной элемент «двигатель». Этот способ ФС-интеграции означает исключение механического устройства и избыточного интерфейса 14 из структуры привода.

Ниже перечислены основные преимущества мехатронных модулей с ВМД:

- снижение материалоемкости, компактность и модульность конструкции;
- повышенные точностные характеристики привода благодаря отсутствию зазоров, кинематических погрешностей, упругих деформаций звеньев и т. д.;
- исключение трения в механической трансмиссии, что позволяет избежать нелинейных динамических эффектов, особенно на ползучих скоростях.

Для определения положения полюсов на роторе двигателя в конструкцию вентильного ВМД встраивают датчик положения. В исполнительных приводах информацию с этого датчика могут использовать и как сигнал обратной связи. Следовательно, применение вентильных ВМД со встроенными ФИД позволяет упростить не только механическую часть модуля, но и цепь обратной связи, так как разработчику не требуется вводить в конструкцию модуля отдельные датчики положения и скорости.

ВМД могут быть как углового, так и линейного типа. До появления линейных двигателей традиционные электроприводы линейных перемещений включали в себя двигатель углового движения и механическую передачу для преобразования вращательного движения в поступательное (шарики-винтовую передачу, зубчатую рейку, ленточную передачу и т. п.). Основные преимущества мехатронных модулей на базе линейных двигателей по сравнению с традиционными приводами обусловлены исключением многоступенчатого преобразования движения, отсутствием характерных недостатков механических преобразователей (люфт, упругость, силы трения, высокая инерция). Это позволяет добиться повышения в несколько раз линейной скорости и ускорения, высокой точности реализации движения, повышенной статической и динамической жесткости привода.

В табл. 7.1 приведены также два примера применения способа ФС-интеграции к элементам управляющей подсистемы модуля.

В состав мехатронных модулей могут входить интеллектуальные силовые преобразователи (ИСП). Их строят на базе полупроводниковых приборов нового поколения. Типичными представителями этих приборов являются силовые полевые транзисторы (*MOSFET*), биполярные транзисторы с изолированным затвором (*IGBT*), запираемые тиристоры с полевым управлением (*MCT*). Новое поколение приборов отличается высоким быстродействием (например, для транзисторов *MOSFET* – 100 000 Гц), высокими значениями коммутируемых токов и напряжений (для *IGBT* предельная сила коммутируемого тока – до 1200 А, предельное коммутируемое напряжение – до 3 500 В). Особенность ИСП состоит в том, что они содержат встроенные блоки микроэлектроники, предназначенные для выполнения интеллектуальных функций – управление движением, защита в аварийных режимах и диагностика неисправностей. Использование ИСП в составе мехатронных модулей позволяет существенно снизить массогабаритные показатели силовых преобразователей, повысить их надежность при эксплуатации, улучшить технико-экономические показатели.

Использование контроллеров движения с блоками FPGA (*Field Programmable Gate Arrays*) позволяет исключить цифро-аналоговое преобразование сигналов при компьютерном управлении двигателем. На выходе блоков FPGA сразу формируется широтно-модулированный сигнал, который имеет цифровое представление. При этом они обладают уникальным сочетанием очень высокой производительности (скорость вычислений соизмерима с аппаратными компонентами) с возможностью программирования как обычные микропроцессорные устройства.

Обобщая рассмотренные примеры, интересно обратить внимание на то, что точками для ФС-интеграции являются структурные блоки, реализующие функциональные преобразования только дуального типа (см. третий столбец табл. 7.1). К этой группе относят информационно-электрический и электро-механический преобразователи, расположенные в прямой цепи функциональной модели мехатронного модуля (см. рис. 7.5) и электроинформационный и механико-информационный преобразователи в цепи обратной связи.

Структурно-конструктивная интеграция (СК-интеграция) основана на анализе структурной модели мехатронного модуля, которая сформирована на этапе ФС-интеграции. Заданная структура модуля может быть реализована различными конструктивными решениями. СК-интеграция нацеливает разработчика мехатронных модулей на выбор проектных решений, которые обеспечивают исключение интерфейсов как сепаратных блоков путем встраивания их в отдельный корпус. При автоматизированном проектировании принятые решения представляют в виде конструктивной модели (см. рис. 7.3).

Методическим ключом при поиске вариантов СК-интеграции является рассмотрение интерфейсных блоков 11–18 в качестве локальных точек, где потенциально возможна СК-интеграция. Можно рекомендовать при проектировании опираться сразу на несколько точек интеграции.

Таблица 7.2

СК-интеграция элементов в мехатронном модуле

№ п/п	Мехатронные модули	Функциональные преобразования	Встраиваемые элементы	
			Основные блоки	Интерфейсы
1	Модуль движения	Электромеханическое и механическое	Двигатель, механическое устройство	14
2	Мехатронный модуль движения	Электромеханическое, механическое и механико- информационное	Двигатели, механическое устройство, датчик обратной связи	14, 17, 18
3	Интеллектуальный мехатронный модуль	Информационное, информационно- электрическое, электрическое, электромеханическое	Управляющий контроллер, силовой преобразователь, двигатель	11, 12, 13, 15, 16

Примеры мехатронных модулей, основанных на способе СК-интеграции элементов, приведены в табл. 7.2. Представленные решения базируются на анализе структурных моделей мехатронных модулей, разработанных на этапе функционально-структурной интеграции (см. рис. 7.6).

Интеграция элементов в мехатронных модулях является ведущей тенденцией при создании современных машин и систем, так как позволяет добиться качественно нового уровня по основным техническим показателям – скорости и точности движения, компактности конструкции и способности машины к быстрой реконфигурации. Практическое воплощение этой тенденции в машинах сегодняшнего дня зависит от эффективности взаимодействия конструктора, который выдвигает новые интеграционные идеи, и технолога, реализующего предложенные проектные решения в автоматизированных технологических процессах.

Специфика и сложность мехатронных модулей и систем заключается еще и в том, что их составляющие части (механическая, электронная и компьютерная) имеют различную физическую природу, а основные структурные элементы выпускаются зачастую предприятиями различных отраслей промышленности.

Более подробно все этапы проектирования и конструирования различных модулей мехатронных систем будут рассмотрены в соответствующих разделах курса «Проектирование рабочих органов и механизмов мехатронных машин и систем», «Проектирование приводов», «Проектирование информационно-измерительных систем», «Проектирование модулей управления мехатронных устройств и систем».

Рассмотрим кратко принципы проектирования интеллектуальных систем управления.

Фундаментальную основу концепции построения интеллектуальных систем управления сложными динамическими объектами составляют три ключевых положения:

- принцип ситуационного управления, когда каждому классу возможных состояний ставится в соответствие определенный класс допустимых решений;
- принцип иерархической организации интеллектуальной системы управления, включающей в свой состав стратегический уровень планирования поведения, тактический уровень планирования действий, исполнительный (приводной) уровень и комплекс информационно-измерительных средств;
- принцип обоснованного выбора интеллектуальных технологий, используемых для решения задач отдельных уровней иерархии управления.

К этим трем положениям следует добавить четвертое, связанное с использованием концепции модульного конструирования систем управления.

Детально проектирование интеллектуальных систем управления будет рассмотрено в разделе «Проектирование модулей управления мехатронных устройств и систем» дисциплины «Проектирование мехатронных систем».

Заключение

Изложенный в курсе лекций материал позволяет оценить роль информационного обеспечения при современном подходе к проектированию любых сложных технических систем. Этап концептуального проектирования в значительной степени определяет качество проекта. Он обычно доверяется самым квалифицированным исполнителям.

Данный курс лекций является неотъемлемой частью полного курса «Проектирование мехатронных систем», посвященного проектированию модулей движения и управления.

Литература

1. *Теория механизмов и механика машин: Учеб. для втузов / К. В. Фролов, С. А. Попов, А. К. Мусатов и др.; Под ред. К. В. Фролова. – 4-е изд., испр. – М.: Высш. школа, 2003. – 496 с.*
2. *Егоров О. Д., Подураев Ю. В. Мехатронные модули. Расчет и конструирование: Учеб. пособие. – М.: МГТУ «СТАНКИН», 2004. – 360 с.*
3. *Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE). – СПб.: Питер, 2004. – 560 с.*
4. *Норенков И. П., Кузьмик П. К. Информационная поддержка наукоемких изделий. CALS-технологии. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 320 с.*
5. *Норенков И. П. Основы автоматизированного проектирования: Учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 336*

Борис Михайлович Готлиб

Проектирование мехатронных систем

Часть 1. Информационная поддержка
процесса проектирования мехатронных систем

Курс лекций для студентов
специальности 220401.65 – Мехатроника

Редактор В. П. Вовчек

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66, УрГУПС
Редакционно-издательский отдел

Бумага писчая № 1	Подписано в печать	Усл. печ. л. 7,3
Тираж 70 экз.	Формат 60x84 1/16	Заказ
