

Тема 1. САПР как организационно-техническая система

Содержание:

1.1. История развития САПР.....	2
1.2. Системный подход к проектированию.....	5
1.2.1. Понятие инженерного проектирования.....	5
1.2.2. Принципы системного подхода.....	7
1.3. Структура процесса проектирования.....	10
1.3.1. Иерархическая структура проектных спецификаций и иерархические уровни проектирования.....	12
1.3.2. Стадии проектирования.....	14
1.3.3. Типовые проектные процедуры.....	14
1.4. Системы автоматизированного проектирования и их место среди других автоматизированных систем.....	16
1.4.1. Цели и задачи компьютеризации инженерной деятельности.....	16
1.4.2. Применение ЭВМ для автоматизации процесса проектирования.....	22
1.4.3. Структура САПР.....	27
1.4.4. Системная модель САПР.....	29
1.4.5. Разновидности САПР.....	32
1.4.6. Принципы построения САПР.....	34
1.4.7. Этапы создания САПР.....	36
1.5. Функции, характеристики и примеры CAD/CAM/CAE-систем.....	37
1.6. Современные проблемы развития программных средств.....	39
1.6.1. Пассивные и активные информационные ресурсы.....	40
1.6.2. Понятие о CALS-технологии.....	41
1.7. Особенности технологии автоматизированного проектирования.....	43
1.8. Концепции компьютеризации инженерной деятельности.....	46
1.8.1. Старая и новая информационные технологии разработки программных средств.....	50
1.9. Критерии развития САПР.....	54

Широкое внедрение компьютеризации в условиях научно-технического прогресса обеспечивает рост производительности труда в различных областях общественного производства. Главное внимание при этом обращается на те области, где рост производительности труда до применения ЭВМ проходил крайне медленно. Это, в первую очередь, области, связанные с приложением умственного труда человека, т.е. управление производством, проектирование и исследование объектов и процессов. Если производительность труда в сфере производства с начала века возросла в сотни раз, то в области проектирования только в 1.5 - 2 раза. Это обуславливает большие сроки проектирования новых объектов, что не отвечает потребностям развития экономики.

Очевидность того факта, что развитие новой техники в современных условиях замедляется не столько отсутствием научных достижений и инженерных идей, сколько сроками и не всегда удовлетворительным качеством их реализации при конструкторско-технологической разработке, ни у кого не вызывает сомнения. Одним из направлений решения этой проблемы является создание и развитие *систем автоматизированного проектирования (САПР)*.

Качество проектирования в значительной степени определяет темпы технического прогресса.

Прогресс производства в современных условиях связывают с достижениями в области автоматизации производства. Поскольку проектирование и разработка технологии являются ступенью производства (логическим уровнем), то прогресс на этой ступени также должен определяться автоматизацией.

При неавтоматизированном проектировании результаты во многом определяются инженерной подготовкой конструкторов, их производственным опытом, профессиональной интуицией и другими факторами. Автоматизированное проектирование позволяет значительно сократить субъективизм при принятии решений, повысить точность расчетов, выбрать наилучшие варианты для реализации на основе строгого математического анализа всех или большинства вариантов проекта с оценкой технических, технологических и экономических характеристик производства и эксплуатации проектируемого объекта, значительно повысить качество кон-

конструкторской документации, существенно сократить сроки проектирования и передачи конструкторской документации в производство, эффективнее использовать технологическое оборудование с программным управлением. Автоматизация проектирования способствует более полному использованию унифицированных изделий в качестве стандартных компонентов проектируемого объекта.

1.1. История развития САПР

Основной причиной, обусловившей возникновение потребности проведения работ по автоматизации проектирования, явилась низкая производительность инженерного труда в сфере обработки информации по сравнению с производительностью труда рабочих в материальном производстве. Так, в технически развитых странах с 1900-го по 1960-й годы производительность труда в производстве возросла в среднем на 1000% , а в информационной сфере, которой принадлежит проектирование, — на 20%. В 70-х годах эти показатели составляли соответственно 80 и 4%. Такое положение было непосредственно связано с инструментально-оснащенностью соответствующих работников. В стоимостном отношении до появления персональных компьютеров инструментально-оснащенность занятых обработкой информации была более чем в 10 раз меньше оснащенности рабочих, занятых производством материальных объектов.

На первых порах эта проблема решалась экстенсивным путем за счет перевода трудовых ресурсов из материального производства в сферу обработки информации. Однако это приводило к снижению общих темпов роста производительности труда в экономике промышленно развитых стран. В 90-х и последующих годах производительность труда в информационном секторе и, в частности, в области проектирования становится одним из ключевых факторов роста общественного производства промышленно развитых стран.

Научно-техническая революция, развивавшаяся в XX в., привела к изменению в геометрической прогрессии следующих показателей развития техники:

- число различных классов технических систем удваивалось в среднем через каждые 10 лет;
- сложность изделий по числу деталей и узлов возрастала в 2 раза через 15 лет;
- объем научно-технической информации удваивался через 8 лет;
- время создания новых изделий уменьшалось в 2 раза через 25 лет, одновременно сокращалось время морального старения изделий.

В результате совокупного действия перечисленных факторов объем конструирования должен был возрастать примерно в 10 раз через каждые 10 лет. При сохранении ручной технологии конструирования в такой же пропорции должно было бы увеличиваться число конструкторов. По этой причине были начаты работы по автоматизации проектирования.

Термин САПР (в английской нотации применительно к конструированию *CAD*) появился в конце 50-х годов, когда Д.Т.Росс начал работать над одноименным проектом в Массачусетском технологическом институте (MIT). Первые коммерческие *CAD*-системы появились на рынке 10 лет спустя.

За последние 25 лет *CAD*-системы как системы геометрического моделирования были значительно усовершенствованы: появились средства *3D* поверхностного и твердотельного моделирования, параметрического конструирования, был улучшен интерфейс (рис. 1.1). Несмотря

на все эти усовершенствования, касающиеся в основном геометрических функций, *CAD*-системы оказывают конструктору слабую помощь с точки зрения всего процесса конструирования. Они обеспечивают описание геометрических форм изделий и выполнение рутинных операций таких, как образмеривание, генерация спецификаций и т.п. Эти ограничения и чисто геометрический интерфейс оставляют методологию конструкторской работы такой же, какой она была при использовании чертежной доски. Применяемые средства значительно усовершенствовались, но конструкторы по-прежнему используют геометрические элементы низкого уровня (точки, прямые, дуги, поверхности и т.п.) при описании своих изделий. Некоторые *CAD*-системы сейчас поддерживают конструирование с помощью конструкторско-технологических элементов, но из-за их чисто геометрического характера эти элементы следует скорее отнести к макрогеометрическим.

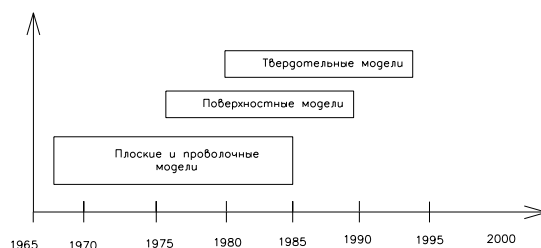


Рис. 1.1. Этапы развития геометрических моделей в САПР

Значительное развитие получили также системы автоматизации проектирования технологических процессов (*CAPP*) и программирования изготовления деталей на станках с ЧПУ (*CAM*). Однако, подобно *CAD*-системам, эти усовершенствования касались внутренних проблем. *CAPP*-системы могут генерировать технологические процессы автоматически, но только при условии специального описания изделия с помощью конструкторско-технологических элементов. Это же касается и *CAM*-систем. Однако, в последнем случае, может быть использована геометрическая база данных *CAD*-системы, но пользователь должен ввести все результаты *CAPP*-системы.

Помимо проектирования инженерная деятельность связана с инженерным бизнесом и менеджментом. Сюда, в частности, входят автоматизированные системы управления производством (АСУПр). Эти системы часто развиваются без какой-либо интеграции с САПР.

Итак, до последнего времени концепция автоматизации труда конструктора базировалась на принципах геометрического моделирования и компьютерной графики, что позволяет охватывать стадии технического и рабочего проектирования, но оставляет за рамками стадии концептуального проектирования изделий. Системы компьютеризации труда конструкторов, технологов, технологов-программистов, инженеров-менеджеров и производственных мастеров развивались автономно. Инженерные знания оставались вне компьютера.

Такое положение не удовлетворяет современным требованиям. Сейчас необходима комплексная компьютеризация инженерной деятельности на всех этапах жизненного цикла изделий, которая получила название *CALS* технологии. Традиционные САПР с их геометрическим ядром не могут послужить основой для создания таких систем.

Развитие САПР проходило на фоне общего процесса развития информационных технологий, этапы которого представлены в табл. 1.1. Появление компьютеров в НИИ и КБ относит-

ся к 1950-м годам, а на предприятиях — к 1960-м годам. Первоначально они использовались для выполнения сложных математических расчетов, что и определило их методическое и программное обеспечение. Разработчиками систем в тот период были прикладные программисты.

Таблица 1.1. Этапы развития информационных технологий

Годы	1950-1960гг.	1970-е гг.	1980-е гг.		1990-е гг.	2000-е гг.
Содержание этапа	Компьютеризация вычислений	Компьютеризация обработки данных	Компьютеризация обработки геометрической информации	Компьютеризация обработки знаний	Интегрированные интеллектуальные системы	Мульти-агентные системы распределённого интеллекта
Методическое обеспечение	Алгоритмы	Системы баз данных и СУБД	Вычислительная геометрия и интерактивная графика	Системы искусственного интеллекта	Системология и компьютеризация знаний	Теория мульти-агентных систем
Программное обеспечение	Алгоритмические языки и средства программирования	Языки описания и манипулирования данными	Языки геометрического моделирования	Языки представления знаний и экспертные системы	Мульти-инструментальные средства	
Технические средства	Ламповые и транзисторные компьютеры	Компьютеры на ИС, дисконные накопители	Компьютеры на БИС и графические дисплеи		Серверы, рабочие станции	
Разработчики	Программисты	Администраторы БД и программисты	Программисты	Инженеры по знаниям	Пользователи	

В 1970-е годы начался процесс широкого создания и внедрения АСУ. Специфика этих систем состояла в большом объеме и сложности структур обрабатываемых данных при относительной простоте процедур их обработки. Это привело к возникновению концепции баз данных, соответствующих языков и систем управления, а также новой категории разработчиков — администраторов баз данных.

Исследовательские работы в области компьютеризации обработки геометрической информации начались в 1950-е годы. В то время были разработаны языки геометрического моделирования. В 1960-е годы началось широкое внедрение систем автоматизации программирования обработки на станках с ЧПУ, в которых использовались языки описания геометрии деталей. Однако до появления в 1980-е годы графических дисплеев геометрические задачи решались в пакетном режиме. В 1980-х годах появились интерактивные конструкторские САПР. К этому времени относится разработка первых экспертных систем искусственного интеллекта. Отличительной особенностью систем искусственного интеллекта является непроцедурный, неалгоритмический язык представления знаний. На этом этапе возникла новая специальность разработчика систем — инженер по знаниям.

Важной особенностью САПР является их комплексный характер. В таких системах осуществляются и сложные вычисления, и обработка большого объема данных. Системы требуют мощных средств обработки геометрической информации и экспертных знаний. Это определяет направление их дальнейшего развития как интегрированных интеллектуальных систем с переходом к новейшим технологиям мультиагентных систем распределенного интеллекта. Развитие инструментальных средств разработки САПР должно обеспечить возможность пользователю самому, без дорогостоящей помощи программистов, создавать системы, основанные на его личных знаниях и опыте.

1.2. Системный подход к проектированию

1.2.1. Понятие инженерного проектирования

Содержание инженерной деятельности связано с обеспечением реализации жизненного цикла изделий. В соответствии со стандартом ISO 9004 жизненный цикл изделия складывается из следующих этапов:

- 1) маркетинг, поиск и изучение рынка;
- 2) проектирование и конструирование изделия;
- 3) материально-техническое снабжение;
- 4) технологическая подготовка производства;
- 5) производство, контроль и проведение испытаний;
- 6) упаковка и хранение;
- 7) реализация и/или распределение продукции;
- 8) монтаж и эксплуатация;
- 9) техническая помощь и обслуживание;
- 10) утилизация или переработка в конце полезного срока службы.

К инженерной деятельности в традиционном смысле слова относятся этапы 2, 4, 5, 8, 9. Этапы 1, 3, 6, 7, 10 относятся к инженерному бизнесу и менеджменту. В настоящей книге основное внимание будет уделено традиционным направлениям инженерной деятельности, хотя изложенная в этой книге методология и описанные средства пригодны для компьютеризации инженерной деятельности и на остальных этапах жизненного цикла изделия.

Техническая подготовка производства включает этапы 2, 3 и 4. Операции упаковки и хранения изделия входят в технологический процесс его производства.

Существуют два класса систем компьютеризации инженерной деятельности (КИД): системы автоматизации проектирования (САПР) и автоматизации управления (АСУ). Последние в свою очередь делятся на системы организационного управления, а именно АСУ предприятием (АСУП), АСУ производством (АСУПр) и на системы управления технологическими процессами (АСУТП). Помимо этого имеются системы управления качеством (АСУК).

На этапе 1 жизненного цикла изделий используются сетевые информационно-поисковые системы, включая программные средства Internet. САПР применяется на этапах 2 и 4 жизненного цикла изделия, подсистемы АСУП на этапе 3, АСУПр, АСУТП и АСУК — на этапах 5 и 6. Этапы 7—10 реализуются вне производственного предприятия. Техническая документация для этапов 8—10 может готовиться с помощью САПР. В процессе эксплуатации изделий возникает необходимость в его модернизации, что также выполняется в порядке сопровождения его с по-

мощью САПР.

Более детальная структура подсистем компьютеризации инженерной деятельности представлена на рис. 1.1, где подсистемы, относящиеся к категории САПР, выделены жирной рамкой.

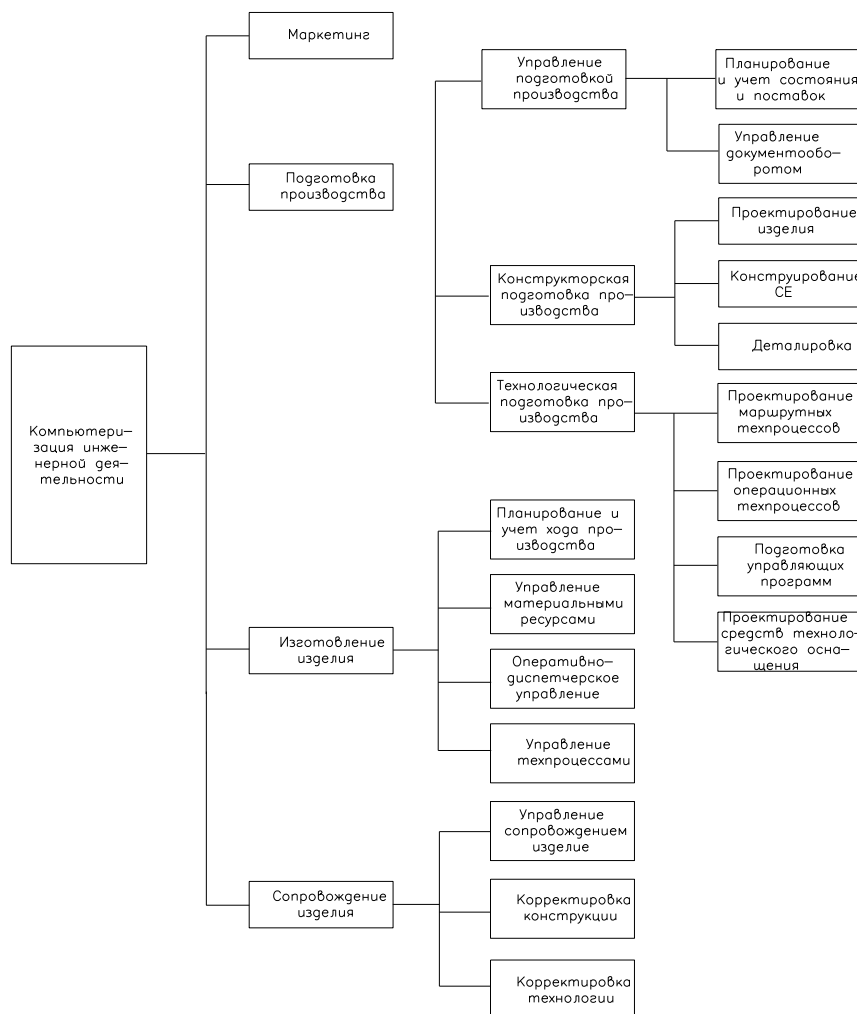


Рис 1.1 Содержание инженерной деятельности

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

Образ объекта или его составных частей может создаваться в воображении человека в результате творческого процесса или генерироваться в соответствии с некоторыми алгоритмами в процессе взаимодействия человека и ЭВМ. В любом случае инженерное проектирование начинается при наличии выраженной потребности общества в некоторых технических объектах, которыми могут быть объекты строительства, промышленные изделия или процессы. Проектирование включает в себя разработку технического предложения и (или) технического задания (ТЗ), отражающих эти потребности, и реализацию ТЗ в виде проектной документации.

Обычно ТЗ представляют в виде некоторых документов, и оно является *исходным (первичным) описанием объекта*. Результатом проектирования, как правило, служит полный комплект документации, содержащий достаточные сведения для изготовления объекта в заданных условиях. Эта документация и есть *проект*, точнее *окончательное описание* объекта. Более коротко, проектирование – процесс, заключающийся в получении и преобразовании исходного

описания объекта в окончательное описание на основе выполнения комплекса работ исследовательского, расчетного и конструкторского характера.

Преобразование исходного описания в окончательное порождает ряд промежуточных описаний, подводящих итоги решения некоторых задач и используемых для обсуждения и принятия проектных решений для окончания или продолжения проектирования.

Проектирование, при котором все проектные решения или их часть получают путем взаимодействия человека и ЭВМ, называют *автоматизированным*, в отличие от *ручного* (без использования ЭВМ) или *автоматического* (без участия человека на промежуточных этапах). Система, реализующая автоматизированное проектирование, представляет собой *систему автоматизированного проектирования* (в англоязычном написании *CAD System – Computer Aided Design System*).

Автоматическое проектирование возможно лишь в отдельных частных случаях для сравнительно несложных объектов. Превалирующим в настоящее время является автоматизированное проектирование.

Проектирование сложных объектов основано на применении идей и принципов, изложенных в ряде теорий и подходов. Наиболее общим подходом является системный подход, идеями которого пронизаны различные методики проектирования сложных систем.

1.2.2. Принципы системного подхода

Основные идеи и принципы проектирования сложных систем выражены в системном подходе. Для специалиста в области системотехники они являются очевидными и естественными, однако их соблюдение и реализация зачастую сопряжены с определенными трудностями, обусловливаемыми особенностями проектирования. Как и большинство взрослых образованных людей, правильно использующих родной язык без привлечения правил грамматики, инженеры применяют системный подход без обращения к пособиям по системному анализу. Однако интуитивный подход без применения правил системного анализа может оказаться недостаточным для решения все более усложняющихся задач инженерной деятельности.

Основной общий принцип системного подхода заключается в рассмотрении частей явления или сложной системы с учетом их взаимодействия. *Системный подход включает в себя:*

- *выявление структуры системы,*
- *типизацию связей,*
- *определение атрибутов,*
- *анализ влияния внешней среды.*

Системный подход рассматривают как направление научного познания и социальной политики. Он является базой для обобщающей дисциплины «*Теория систем*» (другое используемое название – «*Системный анализ*»). *Теория систем – дисциплина, в которой конкретизируются положения системного подхода; она посвящена исследованию и проектированию сложных экономических, социальных, технических систем, чаще всего слабоструктурированных.* Характерными примерами таких систем являются производственные системы. При проектировании систем цели достигаются в многошаговых процессах принятия решений. Методы принятия решений часто выделяют в самостоятельную дисциплину, называемую «*Теория принятия решений*».

В технике дисциплину, аналогичную теории систем, в которой исследуются сложные технические системы, их проектирование, чаще называют *системотехникой*. *Предметом системотехники являются, во-первых, организация процесса создания, использования и развития технических систем, во-вторых, методы, принципы их проектирования и исследования*. В системотехнике важно уметь сформулировать цели системы и организовать ее рассмотрение с позиций поставленных целей. Тогда можно отбросить лишние и малозначимые части при проектировании и моделировании, перейти к постановке оптимизационных задач.

Системы автоматизированного проектирования и управления относятся к числу наиболее сложных современных искусственных систем. Их проектирование и сопровождение невозможны без системного подхода. Поэтому идеи и положения системотехники входят составной частью в дисциплины, посвященные изучению современных автоматизированных систем и технологий их применения.

Интерпретация и конкретизация системного подхода имеют место в ряде известных подходов с другими названиями, которые также можно рассматривать как компоненты системотехники. Таковы структурный, блочно-иерархический, объектно-ориентированный подходы.

При *структурном подходе*, как разновидности системного, требуется синтезировать варианты системы из компонентов (блоков) и оценивать варианты при их частичном переборе с предварительным прогнозированием характеристик компонентов.

Блочно-иерархический подход к проектированию использует идеи декомпозиции сложных описаний объектов и соответственно средств их создания на иерархические уровни и аспекты, вводит понятие стиля проектирования (восходящее и нисходящее), устанавливает связь между параметрами соседних иерархических уровней.

Ряд важных структурных принципов, используемых при разработке информационных систем и, прежде всего их программного обеспечения (ПО), выражен в *объектно-ориентированном подходе* к проектированию (ООП). Такой подход имеет следующие преимущества в решении проблем управления сложностью и интеграции ПО:

- 1) вносит в модели приложений большую структурную определенность, распределяя данные и процедуры между классами объектов;
- 2) сокращает объем спецификаций благодаря введению в описания иерархии объектов и отношений наследования между свойствами объектов разных уровней иерархии;
- 3) уменьшает вероятность искажения данных вследствие ошибочных действий за счет ограничения доступа к определенным категориям данных в объектах. Описание в каждом классе объектов допустимых обращений к ним и принятых форматов сообщений облегчает согласование и интеграцию ПО.

Для всех подходов к проектированию сложных систем характерны также следующие особенности:

1. *Структуризация* процесса проектирования, выражаемая декомпозицией проектных задач и документации, выделением стадий, этапов, проектных процедур. Эта структуризация является сущностью блочно-иерархического подхода к проектированию.
2. *Итерационный* характер проектирования.
3. *Типизация и унификация* проектных решений и средств проектирования.

В теории систем и системотехнике введен ряд *терминов*, среди них к *базовым* нужно отнести следующие понятия.

Система – множество элементов, находящихся в отношениях и связях между собой.

Элемент – такая часть системы, представление о которой нецелесообразно подвергать дальнейшему членению при проектировании.

Сложная система – система, характеризуемая большим числом элементов и, что наиболее важно, большим числом взаимосвязей элементов. Сложность системы определяется также видом взаимосвязей элементов, свойствами *целенаправленности, целостности, членимости, иерархичности, многоаспектности*. Очевидно, что современные автоматизированные информационные системы и, в частности, системы автоматизированного проектирования, являются сложными в силу наличия у них перечисленных свойств и признаков.

Подсистема – часть системы (подмножество элементов и их взаимосвязей), которая имеет свойства системы.

Подсистема – система, по отношению к которой рассматриваемая система является подсистемой.

Структура – отображение совокупности элементов системы и их взаимосвязей; понятие структуры отличается от понятия самой системы также тем, что при описании структуры принимают во внимание лишь типы элементов и связей без конкретизации значений их параметров.

Параметр – величина, выражающая свойство или системы, или ее части, или влияющей на систему среды. Обычно в моделях систем в качестве параметров рассматривают величины, не изменяющиеся в процессе исследования системы. Параметры подразделяют на *внешние, внутренние* и *выходные*, выражающие свойства элементов системы, самой системы, внешней среды соответственно. Векторы внутренних, выходных и внешних параметров далее обозначены $\mathbf{X}=(x_1, x_2, \dots, x_n)$, $\mathbf{Y}=(y_1, y_2, \dots, y_m)$, $\mathbf{Q}=(q_1, q_2, \dots, q_k)$ соответственно.

Фазовая переменная – величина, характеризующая энергетическое или информационное наполнение элемента или подсистемы.

Состояние – совокупность значений фазовых переменных, зафиксированных в одной временной точке процесса функционирования.

Поведение (динамика) системы – изменение состояния системы в процессе функционирования.

Система без последствия – ее поведение при $t > t_0$ определяется заданием состояния в момент t_0 и вектором внешних воздействий $\mathbf{Q}(t)$. В системах с последствием, кроме того, нужно знать предысторию поведения, т. е. состояния системы в моменты, предшествующие t_0 .

Вектор переменных \mathbf{V} , характеризующих состояние (вектор переменных состояния), – избыточное множество фазовых переменных, задание значений которых в некоторый момент времени полностью определяет поведение системы в дальнейшем (в автономных системах без последствия).

Пространство состояний – множество возможных значений вектора переменных состояния.

Фазовая траектория – представление процесса (зависимости $\mathbf{V}(t)$) в виде последова-

тельности точек в пространстве состояний.

К *характеристикам сложных систем*, как сказано выше, часто относят следующие понятия.

Целенаправленность – свойство искусственной системы, выражающее назначение системы. Это свойство необходимо для оценки эффективности вариантов системы.

Целостность – свойство системы, характеризующее взаимосвязанность элементов и наличие зависимости выходных параметров от параметров элементов, при этом большинство выходных параметров не является простым повторением или суммой параметров элементов.

Иерархичность – свойство сложной системы, выражающее возможность и целесообразность ее иерархического описания, т. е. представления в виде нескольких уровней, между компонентами которых имеются отношения целое-часть.

Составными частями системотехники являются следующие основные разделы:

- иерархическая структура систем, организация их проектирования;
- анализ и моделирование систем;
- синтез и оптимизация систем.

Моделирование имеет две четко различимые задачи:

- 1) создание моделей сложных систем (в англоязычном написании – *modeling*);
- 2) анализ свойств систем на основе исследования их моделей (*simulation*).

Синтез также подразделяют на две задачи:

- 1) синтез структуры проектируемых систем (*структурный синтез*),
- 2) выбор численных значений параметров элементов систем (*параметрический синтез*).

Эти задачи относятся к области принятия проектных решений.

Моделирование и оптимизацию желательно выполнять с учетом статистической природы систем. Детерминированность – лишь частный случай. При проектировании характерны нехватка достоверных исходных данных, неопределенность условий принятия решений. Учет статистического характера данных при моделировании в значительной мере основан на методе статистических испытаний (методе Монте-Карло), а принятие решений – на использовании нечетких множеств, экспертных систем, эволюционных вычислений.

Примеры. 1. Система – компьютер является сложной системой в силу наличия у нее большого числа элементов, разнообразных связей между элементами и подсистемами, свойств целенаправленности, целостности, иерархичности. К подсистемам относятся процессор (процессоры), оперативная память, кэш-память, шины (системная, процессорная), устройства ввода-вывода. В качестве надсистемы могут выступать вычислительная сеть, автоматизированная и (или) организационная система, к которым принадлежит компьютер. Внутренние параметры – времена выполнения арифметических операций, чтения (записи) в накопителях, пропускная способность шин и др. Выходные параметры – производительность компьютера, емкость оперативной и внешней памяти, себестоимость, время наработки на отказ и др. Внешние параметры – напряжение питания сети и его стабильность, температура и др.

2. Для двигателя внутреннего сгорания подсистемами являются коленчатый вал, механизм газораспределения, поршневая группа, система смазки и охлаждения. Внутренние параметры – число цилиндров, объем камеры сгорания и др. Выходные параметры – мощность двигателя, КПД, расход топлива и др. Внешние параметры – характеристики топлива, температура воздуха, нагрузка на выходном валу.

1.3. Структура процесса проектирования

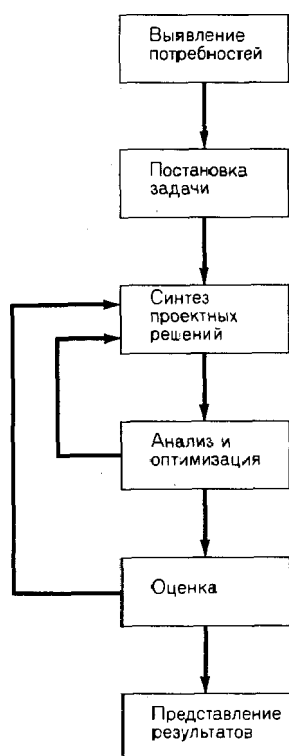
Прежде чем начать рассмотрение различных аспектов автоматизации проектирования,

целесообразно проанализировать процесс проектирования как таковой. Технология проектирования любого изделия характеризуется как итеративная процедура, имеющая шесть четко различимых этапов, или фаз:

1. Выявление потребностей.
2. Постановка задачи.
3. Синтез проектного решения.
4. Анализ и оптимизация.
5. Оценка.
6. Представление результатов.

Выявление потребностей предполагает установление кем-либо самого факта существования проблемы, в соответствии с которой должно быть предпринято то или иное корректирующее воздействие. Такой проблемой могло бы быть выявление некоторого дефекта в конструкции эксплуатируемой машины инженером или определение агентом по сбыту возможности выпуска на рынок нового изделия. Постановка задачи включает в себя детальное описание изделия, подлежащего проектированию. Это описание должно содержать информацию о физических и функциональных характеристиках объекта проектирования, его стоимости, качестве и рабочих параметрах.

Этапы синтеза и анализа тесно связаны друг с другом и многократно повторяются в процессе проектирования. Итеративный характер этих этапов проявляется в том, что вначале проектировщик определяет концептуальную основу конкретного компонента или узла создаваемой системы, затем эта концепция подвергается анализу, усовершенствованию по результатам анализа и повторному воплощению в проектное решение. Этот цикл повторяется до тех пор, пока не будет получено решение, оптимальное в условиях проектных ограничений, учитываемых разработчиком. Спроектированные компоненты и подсистемы синтезируются затем в рамках



окончательного проектного решения по всей системе в целом с использованием аналогичных итеративных методов.

Этап оценки связан с измерением проектных характеристик конкретного варианта и сопоставлением их с требованиями, установленными на этапе постановки задачи. Для проведения такой оценки часто бывает необходимо изготовить и испытать опытный образец-прототип в целях получения реальных рабочих характеристик, параметров качества, надежности и др. Заключительная фаза процесса проектирования - это представление результатов, которое предполагает документирование проекта с помощью чертежей, спецификаций материалов, сборочных листов и т.п. Естественно, что для подготовки такой документации необходимо иметь надлежащую базу данных. Основные этапы процесса проектирования отображены на рис. 1.2, где стрелки свидетельствуют об итеративном характере процедур.

Рис. 1.2. Типовая схема процесса проектирования

Традиционно конструкторские чертежи выполнялись на чертежных досках, а проектные решения документировались в форме детализированных чертежей. Проект любой механической конструкции требует разработки чертежей объекта в целом, его компонентов и сборочных узлов, а также инструмента и оснастки, необходимых для изготовления изделия. Проект электрического устройства предполагает подготовку электрических схем, спецификации электронных компонентов и т.п. Аналогичная документация, выполняемая в неавтоматизированных системах вручную, нужна и в других сферах конструкторской деятельности: в строительстве, при проектировании самолетов, при разработке химико-технологических объектов и т.п. В каждой такой инженерной дисциплине традиционный подход состоял в ручной разработке технического проекта изделия и последующем анализе проектных решений тем или иным способом. Для проведения анализа могут требоваться сложные инженерные расчеты, либо он может основываться на крайне субъективных суждениях об эстетических достоинствах конструкции. В результате анализа выявляются конкретные усовершенствования, которые можно внести в проектируемый объект. Как уже отмечалось выше, весь процесс проектирования носит итеративный характер, и на каждой итерации происходит улучшение первоначальных проектных решений, однако неудобство состоит в том, что при отсутствии автоматизации каждый цикл анализа занимает очень много времени и для завершения всего проекта необходим большой объем трудозатрат.

1.3.1. Иерархическая структура проектных спецификаций и иерархические уровни проектирования

При использовании блочно-иерархического подхода к проектированию представления о проектируемой системе расчленяют на *иерархические уровни*. На верхнем уровне используют наименее детализированное представление, отражающее только самые общие черты и особенности проектируемой системы. На следующих уровнях степень подробности описания возрастает, при этом рассматривают уже отдельные блоки системы, но с учетом воздействий на каждый из них его соседей. Такой подход позволяет на каждом иерархическом уровне формулировать задачи приемлемой сложности, поддающиеся решению с помощью имеющихся средств проектирования. Разбиение на уровни должно быть таким, чтобы документация на блок любого уровня была обозрима и воспринимается одним человеком.

Другими словами, блочно-иерархический подход есть декомпозиционный подход (его можно назвать также диакоптическим), который основан на разбиении сложной задачи большой размерности на последовательно и (или) параллельно решаемые группы задач малой размерности, что существенно сокращает требования к используемым вычислительным ресурсам или время решения задач.

Можно говорить не только об иерархических уровнях спецификаций, но и об *иерархических уровнях проектирования*, понимая под каждым из них совокупность спецификаций некоторого иерархического уровня совместно с постановками задач, методами получения описаний и решения возникающих проектных задач.

Список иерархических уровней в каждом приложении может быть специфичным, но для большинства приложений характерно следующее наиболее крупное выделение уровней:

- *системный* уровень, на котором решают наиболее общие задачи проектирования си-

стем, машин и процессов; результаты проектирования представляют в виде структурных схем, генеральных планов, схем размещения оборудования, диаграмм потоков данных и т. п.;

- *макроуровень*, на котором проектируют отдельные устройства, узлы машин и приборов; результаты представляют в виде функциональных, принципиальных и кинематических схем, сборочных чертежей и т. п.;

- *микроуровень*, на котором проектируют отдельные детали и элементы машин и приборов.

В каждом приложении число выделяемых уровней и их наименования могут быть различными.

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

Последовательность решения задач от нижних уровней к верхним характеризует *восходящее* проектирование, обратная последовательность приводит к *нисходящему* проектированию, в *смешанном* стиле имеются элементы как восходящего, так и нисходящего проектирования. В большинстве случаев для сложных систем предпочитают нисходящее проектирование. Отметим, однако, что при наличии заранее спроектированных составных блоков (устройств) можно говорить о смешанном проектировании.

Неопределенность и нечеткость исходных данных при нисходящем проектировании (так как еще не спроектированы компоненты) или исходных требований при восходящем проектировании (поскольку ТЗ 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 аспекты функциональный, информационный, структурный и поведенческий (процессный). *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 связы-

вают с подсистемами, функционирование которых основано на различных физических процессах.

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

1.3.2. Стадии проектирования

Стадии проектирования – наиболее крупные части проектирования как процесса, развивающегося во времени. В общем случае выделяют стадии научно-исследовательских работ (НИР), эскизного проекта или опытно-конструкторских работ (ОКР), 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, и рабочий проект уже 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 детализованных 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 построение сетки, 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*.

Иногда разработку ТЗ на проектирование называют *внешним* проектированием, а реализацию ТЗ – *внутренним* проектированием.

1.3.3. Типовые проектные процедуры

Создать проект объекта (изделия или процесса) означает выбрать структуру объекта, определить значения всех его параметров и представить результаты в установленной форме. Результаты (проектная документация) могут быть выражены в виде чертежей, схем, пояснительных записок, программ для программно-управляемого технологического оборудования и других документов на бумаге или на машинных носителях информации.

Разработка (или выбор) структуры объекта – проектная процедура, называемая *структурным синтезом*, а расчет (или выбор) значений параметров элементов **X** – процедура *пара-*

метрического синтеза.

Задача структурного синтеза формулируется в системотехнике как *задача принятия решений* (ЗПР). Ее суть заключается в определении цели, множества возможных решений и ограничивающих условий.

Классификацию ЗПР осуществляют по ряду признаков. По числу критериев различают задачи одно- и многокритериальные. По степени неопределенности различают ЗПР детерминированные, ЗПР в условиях риска – при наличии в формулировке задачи случайных параметров, ЗПР в условиях неопределенности, т.е. при неполной или недостоверной исходной информации.

Реальные задачи проектирования, как правило, являются многокритериальными. Одна из основных проблем постановки многокритериальных задач – установление правил предпочтения вариантов. Способы сведения многокритериальных задач к однокритериальным и последующие пути решения изучаются в дисциплинах, посвященных методам оптимизации и математическому программированию.

Наличие случайных факторов усложняет решение ЗПР. Основные подходы к решению ЗПР в условиях риска заключаются или в решении «для наихудшего случая», или в учете в целевой функции математического ожидания и дисперсии выходных параметров. В первом случае задачу решают как детерминированную при завышенных требованиях к качеству решения, что является главным недостатком подхода. Во втором случае достоверность результатов решения намного выше, но возникают трудности с оценкой целевой функции. Применение метода Монте-Карло в случае алгоритмических моделей становится единственной альтернативой и, следовательно, для решения требуются значительные вычислительные ресурсы.

Существуют две группы ЗПР в условиях неопределенности. Одна из них решается при наличии противодействия разумного противника. Такие задачи изучаются в *теории игр*, для задач проектирования в технике они не характерны. Во второй группе противодействие достижению цели оказывают силы природы. Для их решения полезно использовать теорию и методы *нечетких множеств*.

Например, при синтезе структуры автоматизированной системы постановка задачи должна включать в качестве исходных данных следующие сведения:

- множество выполняемых системой функций (другими словами, множество работ, каждая из которых может состоять из одной или более операций); возможно, что в этом множестве имеется частичная упорядоченность работ, что может быть представлено в виде ориентированного графа, в котором вершины соответствуют работам, а дуги – отношениям порядка;
- типы допустимых для использования серверов (машин), выполняющих функции системы;
- множество внешних источников и потребителей информации;
- во многих случаях задается также некоторая исходная структура системы в виде взаимосвязанной совокупности серверов определенных типов; эта структура может рассматриваться как обобщенная избыточная или как вариант первого приближения;
- различного рода ограничения, в частности, ограничения на затраты материальных ресурсов и (или) на времена выполнения функций системы.

Задача заключается в синтезе (или коррекции) структуры, определении типов серверов (программно-аппаратных средств), распределении функций по серверам таким образом, чтобы достигался экстремум целевой функции при выполнении заданных ограничений.

Конструирование, разработка технологических процессов, оформление проектной документации – частные случаи структурного синтеза.

Задачу параметрического синтеза называют *параметрической оптимизацией* (или оптимизацией), если ее решают как задачу математического программирования

$$\text{extr } F(\mathbf{X}), \quad \mathbf{X} \in \mathbf{D}_x,$$

где $F(\mathbf{X})$ – целевая функция; \mathbf{X} – вектор управляемых (называемых также проектными или варьируемыми) параметров; $\mathbf{D}_x == \{\mathbf{X} \mid \varphi(\mathbf{X}) < 0, \psi(\mathbf{X}) = 0\}$ – допустимая область; $\varphi(\mathbf{X})$ и $\psi(\mathbf{X})$ – функции-ограничения.

Следующая после синтеза группа проектных процедур – процедуры анализа. Цель *анализа* – получение информации о характере функционирования и значениях выходных параметров \mathbf{Y} при заданных структуре объекта, сведениях о внешних параметрах \mathbf{Q} и параметрах элементов \mathbf{X} . Если заданы фиксированные значения параметров \mathbf{X} и \mathbf{Q} , то имеет место процедура *одновариантного анализа*, которая сводится к решению уравнений математической модели, например, такой, как модель (1.1), и вычислению вектора выходных параметров \mathbf{Y} . Если заданы статистические сведения о параметрах \mathbf{X} и нужно получить оценки числовых характеристик распределений выходных параметров (например, оценки математических ожиданий и дисперсий), то это процедура *статистического анализа*. Если требуется рассчитать матрицы абсолютной \mathbf{A} и (или) относительной \mathbf{B} чувствительности, то имеет место задача *анализа чувствительности*.

В процедурах *многовариантного анализа* определяется влияние внешних параметров, разброса и неустойчивости параметров элементе на выходные параметры. Процедуры статистического анализа и анализ чувствительности – характерные примеры процедур многовариантного анализа.

1.4. Системы автоматизированного проектирования и их место среди других автоматизированных систем

1.4.1. Цели и задачи компьютеризации инженерной деятельности

Технические системы создают для удовлетворения личных или общественных потребностей. Эти потребности определяют цели, для достижения которых создается система. В качестве целей обычно выступает изменение таких характеристик, как трудоемкость, себестоимость, длительность цикла процесса, качество изделий и т.п. Целевое назначение системы реализуется посредством ее технических функций, которые характеризуют способность преобразовывать вход в выход. Цель и техническое средство ее реализации находятся в отношении «цель—средство».

При создании любой технической системы необходимо стремиться к экономии затрат трех категорий: прошлого, или овеществленного, труда; настоящего, или живого, труда; будущего труда, связанного с развитием системы.

Основной целью создания систем компьютеризации инженерной деятельности (СКИД) является экономия труда проектировщиков, конструкторов, технологов, инженеров-менеджеров

для повышения эффективности процесса проектирования и планирования, а также улучшения качества результатов этой деятельности.

Однако экономия живого труда инженеров должна достигаться не любой ценой, а с учетом необходимости экономии труда, вложенного в программные средства ее разработчиками. Кроме того, каждая система имеет определенный жизненный цикл возникновения, развития и снятия с эксплуатации. Поэтому необходимо учитывать трудозатраты и на последующее после создания внедрение и совершенствование системы.

Проводя аналогию с материальным производством, можно сказать, что в области автоматизации инженерного труда имеется основное производство, связанное с разработкой конструкторских и технологических проектов, а также планов управления, и вспомогательное производство, связанное с созданием и сопровождением собственно программных средств.

В этой связи цели компьютеризации инженерной деятельности следует разбить на две группы: основные и вспомогательные.

Основные цели связаны с улучшением качества, сокращением трудоемкости проектирования и планирования, а также их себестоимости, длительности цикла «проектирование-изготовление», а также затрат на натурное моделирование проектируемых объектов (рис. 1.3).

Трудоемкость измеряется чистым временем (в человеко-часах), затрачиваемым на разработку и корректировку технической документации, без учета ожиданий по организационно-техническим причинам.

Как следует из рис. 1.3, для достижения цели сокращения трудоемкости необходимо располагать средствами автоматизации оформления графической и текстовой документации, средствами информационной поддержки принятия решений, средствами автоматизации принятия решений, совмещенное (параллельное) проектирование, виртуальное бюро, использование специализированных рабочих мест.

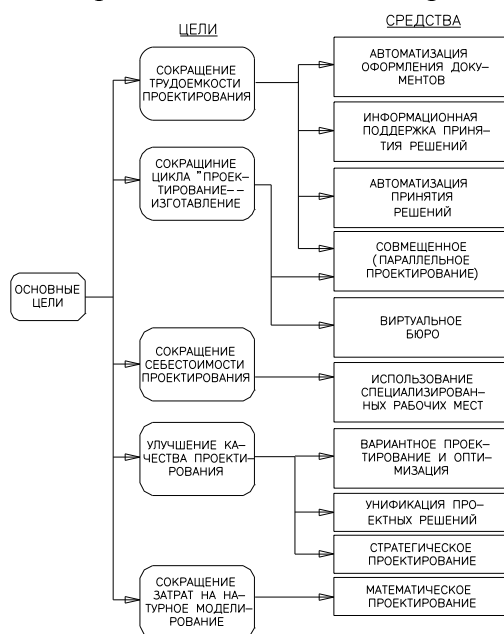


Рис. 1.3. Основные цели компьютеризации инженерной деятельности

Исторически САПР возникли как средство автоматизации оформления графической и текстовой документации. На этом пути были разработаны графические редакторы, а также специализированные текстовые редакторы для оформления технологической документации.

Операции процесса проектирования можно разбить на два класса: рутинные (нетворче-

ские) и творческие. К числу рутинных относятся расчеты по известным методикам, оформление технической документации, а также поиск информации, необходимой для выполнения процесса проектирования. Рутинные операции составляют не менее 70-75% общей трудоемкости проектирования. Поэтому САПР должны обеспечить, прежде всего, снижение трудоемкости именно этих операций путем использования наиболее характерных свойств информационно-вычислительных систем (хранение и быстрая обработка больших массивов данных), а также применения быстродействующих устройств вывода текстовой и графической информации.

Автоматизировать в полном объеме творческие операции не представляется возможным. Однако современные методы искусственного интеллекта, основанные на использовании баз знаний, позволяют оказывать инженеру существенную помощь в принятии решений, предлагая ему на выбор допустимые альтернативы в тех случаях, когда процесс проектирования не поддается формализации.

Длительность цикла «проектирование—изготовление» измеряется календарным временем от получения задания до его завершения с учетом всех ожиданий по организационно-техническим причинам. Сокращение этого цикла обеспечивается средствами совмещенного проектирования (*concurrent engineering*) и виртуальных бюро.

Совмещенное проектирование обеспечивает возможность максимального запараллеливания процессов проектирования: каждый специалист приступает к работе над проектом, как только появляются необходимые ему исходные данные.

Виртуальное бюро (ВБ) представляет собой организационно-техническую структуру, способную обеспечивать совместную работу бригад специалистов, разделенных в пространстве и во времени, чье объединение может носить временный характер. ВБ может быть распределено в нескольких местах, которые могут находиться в различных странах и даже континентах и включать участников из разных временных поясов. Бригады специалистов объединяются в ВБ в целях создания новых изделий. Члены бригады должны быть оснащены новейшими инструментальными программными средствами, системами виртуальной реальности, средствами для проведения видеоконференций и основанной на средствах Internet Web-технологией, объектно-ориентированными средствами поиска и логического вывода.

ВБ — это новая концепция, которая появилась в самое последнее время. Ее возникновение обусловлено потребностями развития современной глобальной рыночной экономики и новыми возможностями высокоэффективных информационных технологий. Здесь можно выделить несколько ключевых факторов:

- Необходимость резкого сокращения длительности цикла от замысла изделия до выпуска изделия на рынок приводит к созданию бригад инженеров, обеспечивающих реализацию всех этапов жизненного цикла изделия совместно. Поддержка работы таких междисциплинарных бригад требует новой информационной технологии.
- Обеспечение соответствия изделия всем требованиям потенциальных потребителей и сокращения до минимума времени подготовки производства требует подключения к процессу проектирования как потребителей, так и поставщиков комплектующих. При этом нецелесообразно собирать в одном месте конструкторов комплектующих изделий, системных интеграторов

ров и потребителей.

- Необходимость учета местных условий приводит к целесообразности привлечения проектировщиков, работающих в условиях рынка, для которого предназначается изделие. При этом нет причин перемещать их для работы над проектом в другое место.

- Не всегда можно найти высококвалифицированных специалистов разного профиля в одном месте.

Современные информационные технологии делают возможным техническое и экономическое решение изложенных выше проблем с помощью виртуальных бюро.

Сокращение себестоимости проектирования может быть достигнуто применением, где это возможно, персональных компьютеров вместо дорогостоящих рабочих станций.

К основным целям относится также улучшение качества результатов проектирования, что связано с необходимостью достижения уровня лучших образцов в классе проектируемых объектов. Улучшение качества проектов достигается использованием автоматизированного поискового и многовариантного проектирования, применением математических методов оптимизации параметров и структуры объектов и процессов.

Уровень качества изделий определяется их существенными признаками, свойствами, структурами или функциями как технических систем. Вариантное проектирование проводится за счет использования концептуальных И/ИЛИ графов. Наиболее современным методом оптимизации является применение генетических алгоритмов, позволяющих проводить как структурную, так и параметрическую оптимизацию изделий при произвольном виде критериальной функции.

Проектные решения унифицируются за счет использования адаптированных к условиям каждого предприятия баз данных и знаний.

Стратегическое проектирование — это метод создания и ведения долгосрочных проектных программ, начинающихся с разработки базового изделия, которое затем подвергается постепенным модификациям и усовершенствованиям в целях удовлетворения текущих и учета будущих требований пользователей в течение длительного периода времени (обычно 10 лет).

Существо стратегического проектирования заключается в постоянном отборе и оценке концепций, прежде всего определяющих архитектуру и технологии изготовления, для поиска решений, обеспечивающих наилучшее удовлетворение кратко- и долгосрочных требований потребителей. Основная цель — обойти коммерческие и (или) технологические тупики в процессе быстрых изменений условий и технологий на рынке.

Под затратами на натурное моделирование имеются в виду затраты на проектирование и изготовление макетных образцов изделий и их узлов. Сокращение этих затрат может быть достигнуто за счет замены натурального моделирования на математическое.

К числу вспомогательных целей автоматизации проектирования относятся сокращение трудоемкости разработки программных средств, адаптации их к условиям эксплуатации при внедрении, а также их сопровождения, т.е. ее модификации, обусловленной необходимостью устранения выявленных ошибок и (или) изменения функциональных возможностей (рис. 1.4).

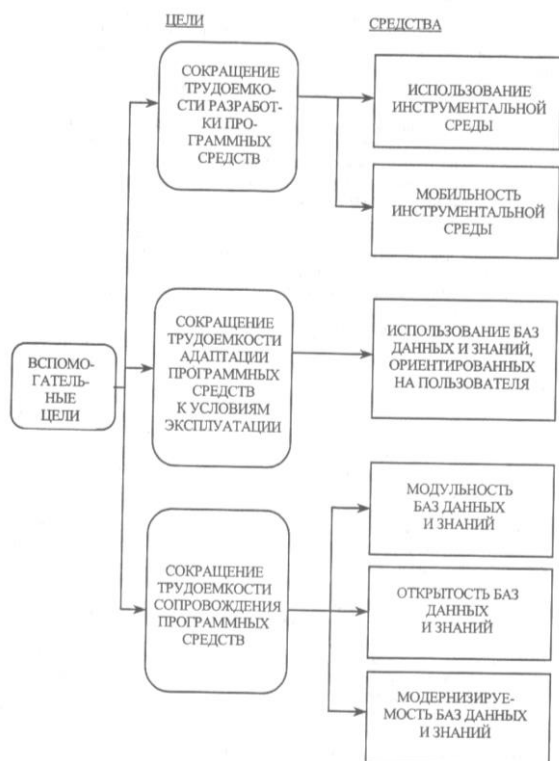


Рис.1.4. Вспомогательные цели компьютеризации инженерной деятельности

Средством сокращения трудоемкости адаптации систем к условиям эксплуатации на конкретном предприятии, т.е. с учетом стандартов этого предприятия, а также традиций и принципов принятия проектных решений, являются системы управления базами данных и знаний, ориентированные на конечного пользователя. Это означает, что упомянутые системы должны быть оснащены языками описания и манипулирования данными, доступными непрограммирующему пользователю.

Средством сокращения трудоемкости сопровождения СКИД является модульность, открытость и модернизируемость ее программных средств. Это обеспечивает простоту замены и дополнения процедур, данных и знаний.

Дадим формальное определение САПР, определяющее ее главные особенности: САПР — человеко-машинная система, использующая современные математические методы, средства электронно-вычислительной техники и связи, а также новые организационные принципы проектирования для нахождения и практической реализации наиболее эффективного проектного решения существующего объекта.

Процесс проектирования на базе САПР можно разделить на следующие укрупненные этапы:

1. Поиск принципиальных проектных решений.
2. Разработка эскизного варианта конструкции и его оптимизация.
3. Уточнение и доработка выбранного варианта конструкции, выполнение полного детального расчета.
4. Разработка полного комплекта чертежей.

Особенности этих этапов определяют эффективность применения ЭВМ на каждом из них. На первом этапе значительна роль эвристических действий. Полная автоматизация этого

этапа возможна лишь в некоторых специальных случаях. Применение ЭВМ здесь наиболее целесообразно и эффективно при организации диалога между конструктором и ЭВМ, где конструктору отводятся функции выбора и принятия решений, а ЭВМ — выполнение действий по заданным алгоритмам, прежде всего представлении необходимой информации и ее обработка в соответствии с заданием. На втором этапе, где рассматриваются различные конструктивные решения с выполнением большого количества операций расчета и оптимизации, целесообразно использование ЭВМ путем создания систем диалога с запрограммированным процессом конструирования и расчетной оптимизации, при этом сам конструктор направляет поиск оптимального варианта конструкции и принимает решения на основании выполненных расчетов. Поскольку третий и четвертый этапы требуют самых значительных затрат времени и средств (до 60%), причем расчетно-конструкторская деятельность на этих этапах достаточно просто алгоритмизируется, целесообразно применение на этих этапах ЭВМ в комплексе со средствами ввода-вывода графической информации.

Как правило, САПР предназначены для проектирования сложных объектов (в качестве такого объекта, в частности, можно рассматривать силовой трансформатор класса напряжения 35 - 100 кВ и выше).

Сложным объектом проектирования считается изделие или сооружение, которое характеризуется следующими признаками:

- состоит из большого количества элементов (деталей конструкции и комплектующих изделий);
- отличается противоречивостью требований, предъявляемых к его качествам;
- отличается неразработанностью формализованных зависимостей показателей его качеств от принимаемых решений или отсутствием однозначных критериев оценки этих решений;
- имеет совокупность свойств, определяемых не только свойствами элементов, но и характером взаимодействия между элементами;
- отличается новизной технических решений;
- предназначается для эксплуатации в составе многокомпонентной системы или в меняющихся (не вполне определенными образом) условиях;
- изготавливается с привлечением большого числа предприятий или с использованием индивидуальной технологии.

Очень высокие требования предъявляются и к конкретному проектировщику или группе проектировщиков сложного технического объекта. В настоящее время продолжительность проектирования большинства сложных объектов превышает разумные пределы, определяемые сроками морального износа, утратой конкурентоспособности изделий и др. Поскольку сложность объектов будет возрастать, а время проектирования должно сокращаться, можно сделать вывод, что единственной разумной альтернативой неавтоматизированному проектированию может быть широкое использование САПР.

Основываясь на рассмотрении процесса проектирования различных сложных объектов и существа решаемых при этом проектных и проектно-технологических задач, можно утверждать, что системы автоматизированного проектирования должны:

1. Автоматически выявлять наилучшие проектные и проектно-технологические решения

во всех случаях, когда оптимизационные задачи поддаются формализации.

2. Автоматически вводить в процессе работы системы информации во все взаимосвязанные программы, использующие соответствующую информацию в качестве исходной.

3. Автоматически проверять совместимость решений, принимаемых по разным частям и элементам проектируемого объекта, и осуществлять (когда это возможно) корректировку несовместимых решений без учета проектировщика.

4. Автоматически выдавать в привычной для проектировщика форме некоторые промежуточные результаты.

5. Выдавать любые промежуточные результаты по запросу проектировщика.

6. Предоставлять проектировщику возможность вносить произвольные коррективы в первоначально принятые системой решения.

7. Давать возможность изолированного решения отдельных задач по задаваемым проектировщиком исходным данным.

8. Накапливать опыт проектирования.

9. Выдавать по запросу любые сведения, хранящиеся в банке данных системы.

10. Обеспечивать возможность совершенствования и развития системы без ее коренной переработки.

Все эти требования могут быть сведены к двум важнейшим качествам системы: *информированность и адекватность*. Именно они практически полностью определяют успех внедрения и эксплуатации САПР.

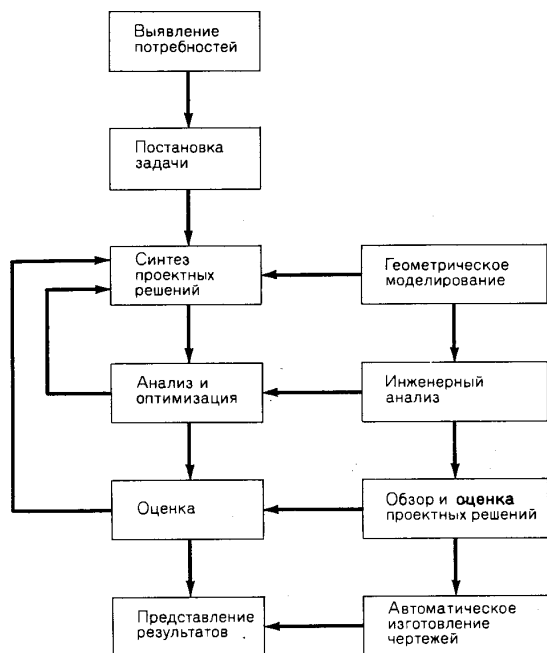
1.4.2. Применение ЭВМ для автоматизации процесса проектирования

Разнообразные задачи проектирования, решаемые в современных САПР, можно объединить в четыре группы функций:

1. Геометрическое моделирование.
2. Инженерный анализ.
3. Обзор и оценка проектных решений.
4. Автоматическое изготовление чертежей.

Эти четыре группы функций соответствуют четырем заключительным фазам общей схемы процесса проектирования (рис. 1.5). Геометрическое моделирование относится к фазе синтеза, в рамках которой проект физического объекта принимает конкретную форму в системе ИМГ. Инженерный анализ выполняется на четвертом по счету этапе, связанном с анализом и оптимизацией. Вслед за этим на пятом этапе осуществляются обзор и оценка проектных решений. Для автоматического изготовления чертежей требуется преобразование данных о будущем объекте, хранящихся в памяти ЭВМ, в документальную форму. Такое преобразование выполняется на шестом этапе и обеспечивает представление проектных решений в виде конструкторских чертежей. Ниже каждая "из четырех выделенных функций САПР рассматривается более подробно.

Геометрическое моделирование. Геометрическое моделирование в рамках САПР связано с получением понятного машине математического описания геометрических свойств объекта. При наличии такого описания образ проектируемого объекта можно воспроизвести на



экране графического терминала, а с ним можно манипулировать посредством различных сигналов, идущих от центрального процессора САПР. Программные средства, обеспечивающие геометрическое моделирование, должны быть удобны для эффективного использования их в вычислительном процессе.

Рис. 1.5. Области использования ЭВМ в процессе проектирования машинном взаимодействии пользователя-конструктора с системой

Для проведения геометрического моделирования разработчик конструирует графическое отображение нужного объекта на экране терминала системы ИМГ, вводя в машину команды трех типов. Команды первого типа обеспечивают формирование базовых геометрических элементов, таких, как точки, линии и окружности. По командам второго типа осуществляются масштабирование, повороты изображения и прочие преобразования базовых элементов. С помощью команд третьего типа производится компоновка различных элементов в целостное изображение проектируемого объекта желаемой формы. В ходе геометрического моделирования машина преобразует поступающие сигналы в компоненты математической модели, запоминает нужную информацию в файлах данных и отображает получаемую модель проектируемого объекта в наглядной форме на экране терминала. Впоследствии эта модель может извлекаться из машинных файлов в целях проведения обзора, анализа или изменения.

Известно несколько различных методов представления объекта при геометрическом моделировании. Основным является способ представления объекта в каркасной форме, когда он отображается совокупностью соединительных линий. *Каркасное геометрическое моделирование* существует в трех видах в зависимости от конкретных возможностей используемой системы ИМГ:

- Двумерное (типа 2D)-для плоских объектов.
- Двух- с- половиной- мерное (типа $2^{1/2}D$) - позволяющее воспроизводить на экране трехмерные объекты, не имеющие деталей с боковыми стенками.
- Трехмерное (типа 3D)-дающее возможность моделировать сложные геометрические объекты в трехмерном отображении.

Однако иногда даже трехмерного каркасного представления проектируемого объекта оказывается недостаточно для надлежащего отображения сложных форм. Поэтому существуют различные методы, расширяющие возможности каркасного моделирования. Возможно, например, отображение внутренних, невидимых снаружи ребер объекта штриховыми линиями или вообще полное «стирание» скрытых линий. В результате изображение стало более упорядоченным и более наглядным. В одних САПР удаление скрытых линий происходит автоматически, в других пользователь должен сам указывать линии, подлежащие стиранию. Каркасная модель

может приобрести еще более эстетичный вид, если воспользоваться при геометрическом моделировании средствами отображения поверхностей, позволяющими создать у наблюдателя ощущение монолитности представленного на экране объекта. Однако при этом в памяти ЭВМ модель по-прежнему хранится в каркасном отображении.

Наиболее совершенный метод геометрического моделирования - это объемное представление монолитных тел. При использовании этого метода проектируемый объект конструируется из монолитных геометрических тел, называемых *графическими примитивами*.

Еще одна возможность, имеющаяся в ряде САПР,- это цветная графика. С помощью цвета можно сделать изображение на экране графического дисплея гораздо более информативным. Цвет позволяет, например, выделять отдельные компоненты сборочных узлов, подчеркивать объемность или может использоваться для целого ряда других целей.

Инженерный анализ. При выполнении почти любого проекта технического назначения требуются в той или иной форме процедуры анализа. Этот анализ может включать расчеты механических напряжений и усилий, тепловых процессов или даже основываться на решении дифференциальных уравнений, описывающих динамическое поведение проектируемого объекта. Необходимые процедуры анализа могут быть автоматизированы за счет использования ЭВМ. Часто для этого бывает необходимо, чтобы группа инженерного анализа разработала специальные программы для решения конкретных задач проектирования. В целом ряде случаев для этого удастся использовать универсальные программы инженерного анализа, имеющиеся в продаже в виде коммерческих пакетов.

В готовых к непосредственному применению САПР такие средства либо часто предусматриваются в составе системного программного обеспечения, либо могут включаться потом в библиотеку программ и вызываться для использования в процессе работы с каждой конкретной моделью проектируемого объекта. Мы здесь остановимся лишь на двух характерных типах подобных программных средств: для решения задач анализа свойств масс и задач анализа методом конечных элементов.

Задачи первого типа получили в рамках САПР наибольшее распространение. Программные средства для решения этих задач позволяют исследовать такие свойства монолитных объектов, как площадь поверхности, масса, объем, центр тяжести и момент инерции. Применительно к плоским поверхностям (или поперечным сечениям твердых тел) соответствующие вычисления охватывают расчет периметра, площади и инерциальных свойств.

По всей вероятности, наиболее мощным инструментом анализа, имеющимся в САПР, является метод конечных элементов, в соответствии с которым объект разбивается на большое число элементов конечных размеров (обычно прямоугольников или треугольников), образующих связную сеть узлов концентрации напряжений. Используя затем богатые вычислительные возможности ЭВМ, можно проанализировать свойства целостного объекта в аспекте возникающих механических усилий, передачи тепла и других характеристик, исследуя поведение каждого отдельного элемента. Оценка поведения целостного объекта производится на основе определения взаимосвязанного поведения всех его узлов.

В некоторых САПР имеется возможность автоматического выделения узлов и получения сетевой структуры для данного объекта. Пользователь при этом должен лишь задать параметры

модели на основе метода конечных элементов, и система самостоятельно произведет все нужные вычисления.

Результат анализа по методу конечных элементов часто лучше всего отображается системой в графической форме на экране дисплея и легко воспринимается пользователем благодаря наглядности. Так, например, при исследовании развиваемых в объекте механических усилий конечный результат может быть отображен на экране в виде деформированной формы, совмещенной с изображением ненагруженного объекта. При этом объект до и после деформации может воспроизводиться разным цветом. Если полученные результаты анализа свидетельствуют о нежелательных свойствах поведения проектируемого объекта, конструктор имеет возможность изменить его форму и повторить анализ методом конечных элементов для пересмотренной конструкции.

Обзор и оценка проектных решений. Проверку точности проектирования можно легко выполнить с использованием графического терминала. Полуавтоматические стандартные программы определения размеров и допусков, привязывающие размерные характеристики к указываемым пользователем поверхностям, позволяют сократить число ошибок в определении размеров. При этом конструктор может получать изображения интересующих его деталей крупным планом и увеличивать соответствующие изображения в целях проведения более тщательного анализа.

Часто в процессе обзора проектных решений используется процедура, называемая разбиением на слои. Например, при умелом использовании этой процедуры возможно наложение геометрического образа контуров готовой детали после механической обработки на станке на изображение черновой заготовки. Такая операция гарантирует, что размеры заготовки удовлетворяют требованиям к размерным характеристикам детали после чистовой обработки. Указанная процедура может применяться поэтапно в целях контроля каждой отдельной стадии изготовления детали.

Еще одна процедура, реализуемая в анализе проектных решений, состоит в проверке взаимных наложений. Эта процедура связана с контролем местоположения элементов компоновочного узла, так как существует риск установки их на места, уже занятые другими компонентами. Подобный риск особенно реален при проектировании крупных химических заводов, холодильных установок и разного рода трубопроводов сложной конфигурации.

Одно из наиболее интересных средств оценки проектных решений, имеющееся в некоторых САПР, - это кинематические модели. Стандартные коммерческие пакеты кинематики обеспечивают возможность динамического воспроизведения движения простых проектируемых механизмов вроде шарниров и сочлененных звеньев. Наличие таких средств анализа расширяет возможности конструктора в части визуального наблюдения за работой нужного механизма и помогает гарантировать отсутствие столкновений с другими объектами. Если САПР не предоставляет пользователю графических средств воспроизведения кинематики механизмов, то конструктор зачастую вынужден прибегать к моделям, построенным с использованием булавоочных шпилек и картона. Программы такого рода могут быть чрезвычайно полезны при конструировании механизмов, предназначенных для выполнения определенных движений или приложения конкретных сил.

Автоматическое изготовление чертежей. Автоматическое черчение предполагает получение выполненных на бумаге конструкторских чертежей непосредственно на основе информации, хранящейся в базе данных САПР. В некоторых автоматизированных конструкторских бюро на первых порах возможность автоматического изготовления чертежей была определяющим фактором целесообразности затрат на приобретение САПР. Это неудивительно, так как производительность САПР на указанной операции по сравнению с чертежником возрастает примерно в пять раз.

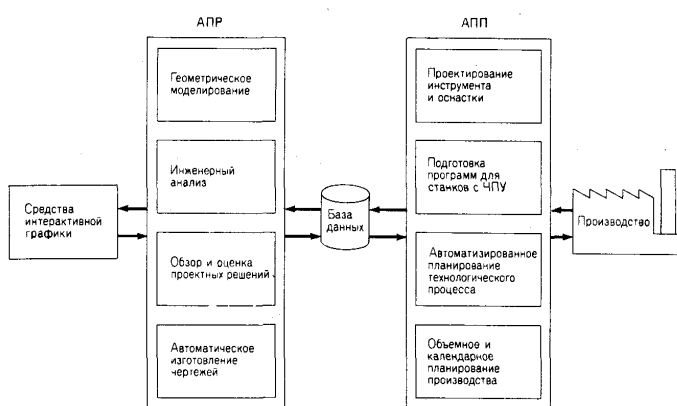
Целый ряд функциональных возможностей ИМГ как раз наилучшим образом проявляется именно в процедурах изготовления чертежей. Сюда относятся автоматическое определение размеров, штриховка нужных областей, масштабирование, а также построение разрезов и увеличенных изображений конкретных элементов деталей. Важную роль в черчении с использованием ЭВМ играет возможность вращения деталей или выполнения иных преобразований изображений (например, для получения косоугольных проекций, построения изометрии или перспективы). В большинстве САПР предусматривается возможность формирования шести проекций детали. Конструкторские чертежи могут приводиться в соответствие с принятой в конкретной фирме системой стандартов путем воплощения требований этих стандартов в конкретные машинные программы САПР.

Классификация и кодирование деталей. В дополнение к четырем описанным выше функциям САПР следует отметить еще одно достоинство САПР: ее база данных может использоваться для разработки системы классификации и кодирования деталей (СКК). Смысл этой системы состоит в том, что подобные детали группируются в классы, и свойство их подобия отображается в схеме кодирования. В результате конструкторы могут использовать систему классификации и кодирования в своей работе для отыскания уже существующих конструкций деталей вместо проектирования их каждый раз заново. Известен и целый ряд других применений СКК в технологических процессах.

Формирование производственной базы данных. Ранее были описаны различные способы увеличения производительности труда конструкторского отдела за счет автоматизации процесса проектирования с применением ЭВМ. Другая важная причина, по которой внедрение САПР особенно оправданно, это возможность создания базы данных, необходимых для последующего изготовления проектируемых изделий. В традиционном производственном цикле, испокон веков существовавшем в промышленности, конструкторские чертежи изготавливались конструктором-чертежником, а затем использовались инженерами-производственниками для разработки плана производства (например, для подготовки так называемых маршрутных карт). Таким образом, действия по проектированию изделия отделялись от функций планирования производства и налицо имелись два разных этапа. Такой подход связан с большими затратами времени и дублированием усилий конструкторов и производственников. Совсем иначе обстоит дело в интегрированной системе автоматизации проектирования и автоматизации производственных процессов (САПР/АПП), где устанавливается прямая связь между процессами проектирования и изготовления изделий. В такой системе не только ставится задача автоматизировать определенные этапы обоих этих процессов, но и преследуется цель автоматического выполнения перехода от процесса конструирования изделия к операциям по его изготовлению. В насто-

ящее время существуют автоматизированные системы, в которых на этапе проектирования создается львиная доля информации и документации, необходимой для планирования производственного процесса и управления технологическими операциями изготовления спроектированных изделий.

Производственная база данных представляет собой интегрированную базу данных, единую для САПР и автоматизированной системы управления производственными процессами. Она содержит всю информацию об изделии, сформированную в процессе его проектирования (геометрические размеры, ведомости материалов и деталей, спецификации материалов и др.), а



также некоторые дополнительные сведения, необходимые для производства и получаемые на основе проектных данных. На рис. 1.6 показана структура связей базы данных САПР/АПП с процессами проектирования и производства в типичной производственной фирме.

Рис. 1.6. Желательные взаимосвязи интегрированной базы данных САПР/АПП с процессами проектирования и произ-

водства

1.4.3. Структура САПР

Система автоматизированного проектирования представляет собой организационно-технический комплекс, состоящий из большого числа подсистем и компонентов. Подсистемы являются основными структурными звеньями САПР и различаются по назначению и по отношению к объекту проектирования.

Существующий отечественный и зарубежный опыт в области автоматизации проектирования свидетельствует о том, что разработка, внедрение и эффективное использование программных комплексов, предназначенных для автоматизации процесса проектирования и реализуемых на базе современных ЭВМ, требуют комплексного решения широкого спектра проблем: организационных, технических, математических, программных, лингвистических, информационных и др. Решение этих проблем базируется на соответствующих видах обеспечения.

Сложность разработок больших комплексов взаимосвязанных программ заключается в том, что эффективность решения каждой конкретной проблемы, как правило, определяется на завершающем этапе работы, когда вся или большая часть системы начинает функционировать. Это предопределяет сложность создания высокоэффективных программных комплексов при первоначальной разработке. Как правило, система становится эффективной в ходе сравнительно длительного процесса создания, испытаний, совершенствования и доводки.

Под проблемой синтеза структуры САПР понимаются:

- определение состава и взаимосвязей элементов системы;
- выбор принципов организации взаимодействия элементов;
- оптимальное распределение функций между человеком и ЭВМ;
- выбор организационной иерархии;
- решение вопросов организации информационного интерфейса между элементами си-

стемы.

Задачи синтеза структуры САПР взаимосвязаны с задачами оптимизации функционирования системы.

Ограничениями в процессе синтеза структуры САПР являются допустимые нагрузки элементов (объемы информации), перерабатываемые в единицу времени. Одним из таких элементов САПР является человек, который, как показывают исследования, нередко вынужден принимать решения в процессе работы в системе со скоростью во много раз большей, чем при традиционной работе. Естественно, он не может длительное время выдерживать такую нагрузку.

Среди разнообразных систем управления (к которым, в частности, принадлежат и системы проектирования) наиболее распространены системы с иерархической структурой. Их характерными особенностями являются:

- автономность отдельных подсистем;
- управление подсистемами при неполной информации;
- агрегирование информации при движении вверх по иерархическим ступеням;
- взаимовлияние подсистем из-за наличия общих ограничений.

Основы математической теории синтеза структуры сложных систем в настоящее время только закладываются. В качестве критерия эффективности их функционирования, как правило, принимается максимум информации, полученной в единицу времени.

Как и любая сложная система, САПР состоит из подсистем (рис. 1.7). Различают подсистемы проектирующие и обслуживающие.

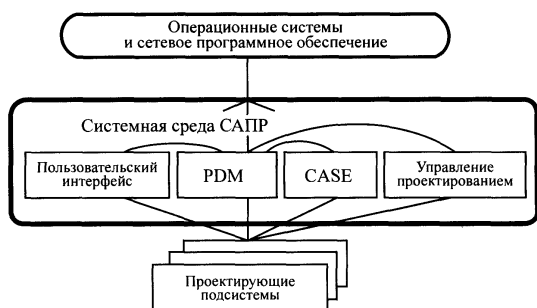


Рис 1.7. Структура программного обеспечения САПР

Проектирующие подсистемы непосредственно выполняют проектные процедуры. Примерами проектирующих подсистем могут служить подсистемы геометрического трехмерного моделирования механических объектов, изготовления конструкторской

документации, схмотехнического анализа, проектирования планировки механообрабатывающего цеха.

Обслуживающие подсистемы обеспечивают функционирование проектирующих подсистем, их совокупность часто называют системной средой (или оболочкой) САПР. Типичными обслуживающими подсистемами являются подсистемы управления проектными данными (PDM – Product Data Management), управления процессом проектирования (DesPM – Design Process Management), пользовательского интерфейса для связи разработчиков с ЭВМ, CASE (Computer Aided Software Engineering) для разработки и сопровождения программного обеспечения САПР, обучающие подсистемы для освоения пользователями технологий, реализованных в САПР.

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

1. *техническое* (ТО), включающее различные аппаратные средства (ЭВМ, периферий-

ные устройства, сетевое коммутационное оборудование, линии связи, измерительные средства);

2. *математическое* (МО), объединяющее математические методы, модели и алгоритмы для выполнения проектирования;

3. *программное* (ПО), представляемое компьютерными программами САПР;

4. *информационное* (ИО), состоящее из баз данных (БД), систем управления базами данных (СУБД), а также других данных, используемых при проектировании; отметим, что вся совокупность используемых при проектировании данных называется информационным фондом САПР, а БД вместе с СУБД носит название банка данных (БНД);

5. *лингвистическое* (ЛО), выражаемое языками общения меж проектировщиками и ЭВМ, языками программирования языками обмена данными между техническими средствами САПР;

6. *методическое* (МетО), включающее различные методики проектирования, иногда к МетО относят также математическое обеспечение;

7. *организационное* (ОО), представляемое штатными расписаниями должностными инструкциями и другими документами, регламентирующими работу проектного предприятия.

1.4.4. Системная модель САПР

Любая система, включая САПР, может быть представлена следующей шестеркой:

$$S = \{Ind, Prp, Atr, Inp, Out, Str\}.$$

Здесь *Ind* — обозначение и наименование системы; *Prp* — цели системы; *Atr* — общесистемные характеристики; *Inp* — вход системы; *Out* — выход системы; *Str* — структура системы, $Str = \{E, R\}$, где *E* — компонент системы, *R* — связи компонентов.

Рассмотрим эти компоненты применительно к САПР.

Обозначение системы. Каждая коммерческая система должна иметь зарегистрированный товарный знак, который в совокупности с обозначением версии и модификации системы представляет собой обозначение системы. Например, *AutoCAD v14.1*. Наименование системы содержит ее функциональное описание. Например, система автоматизации проектирования технологических процессов.

Вход и выход системы. Входы (*Inp*) и выходы (*Out*) системы определяются ее функциональным назначением. Функциональное назначение САПР состоит в разработке моделей данных проектируемых изделий и технологических процессов, а также соответствующей документации, если это необходимо.

Основная задача САПР заключается в преобразовании дескриптивного, т.е. косвенного определения проектируемого объекта или процесса посредством перечисления требуемых свойств его, в конструктивное, содержащее явное описание характеристик и структуры всех элементов соответствующего объекта или процесса с использованием имеющихся данных и знаний (рис. 1.8). Дескриптивное определение содержится в техническом задании (технических требованиях), а конструктивное — в моделях данных, а также в рабочей конструкторской и технологической документации.

Структура системы. Суммарное преобразование информации, представленное на рис.

1.8, осуществляется за ряд этапов, реализуемых взаимосвязанными подсистемами.

Функциональная структура (Str) САПР, построенной на базе этих подсистем, представлена на рис. 1.9.



Рис 1.8. Входы и выходы САПР

Исходные данные для проектирования изделия содержатся в техническом задании или технических требованиях. Первый этап проектирования предназначен для разработки проектных данных, которые включают чертежи общих видов и/или теоретические чертежи, схемы, расчеты, таблицы и т.п. На этапе проектирования изделие рассматривается как техническая система, состоящая из комплекса взаимосвязанных технических средств (элементов, подсистем). Проводятся оценка технических требований, выбор структуры изделия, расчет и оптимизация характеристик изделия в целом и его подсистем, формирование общего вида и предварительные конструкторские расчеты.

Второй этап проектирования изделия заключается в конструировании изделия и получении рабочей конструкторской документации на машинных носителях (сборочных чертежей, чертежей деталей, спецификаций и т.п.). На этом этапе выполняются уточненные расчеты конструкции. В процессе конструирования можно выделить два различных в методическом отношении подэтапа: конструирование сборочных единиц и детализовка.

Первый подэтап существенно связан с видом проектируемого изделия и поэтому является специализированным. Детализовка слабо связана со спецификой изделий и основывается на знании такой общеинженерной дисциплины, как «Детали машин».

Машинная модель детали, содержащая всю информацию, требуемую по стандартам ЕСКД, является фундаментом для построения сквозных конструкторско-технологических САПР.

Проектирование технологических процессов включает формирование данных маршрутных и операционных процессов по всем технологическим переделам, а также в формировании прочей технологической документации на машинных носителях в соответствии с требованиями ЕСТД. Одновременно формируются технические задания на конструирование необходимых средств технологического оснащения, которое выполняется соответствующими конструкторскими подсистемами. На основе информации, полученной на этом этапе, проводится подготовка управляющих программ для станков с ЧПУ для изготовления как средств технологического оснащения, так и деталей основного производства.

Данные, разработанные в результате функционирования САПР (спецификации, ведомости, карты технологических процессов и наладок, управляющие программы и т.п.), передаются в автоматизированные системы управления (АСУ).

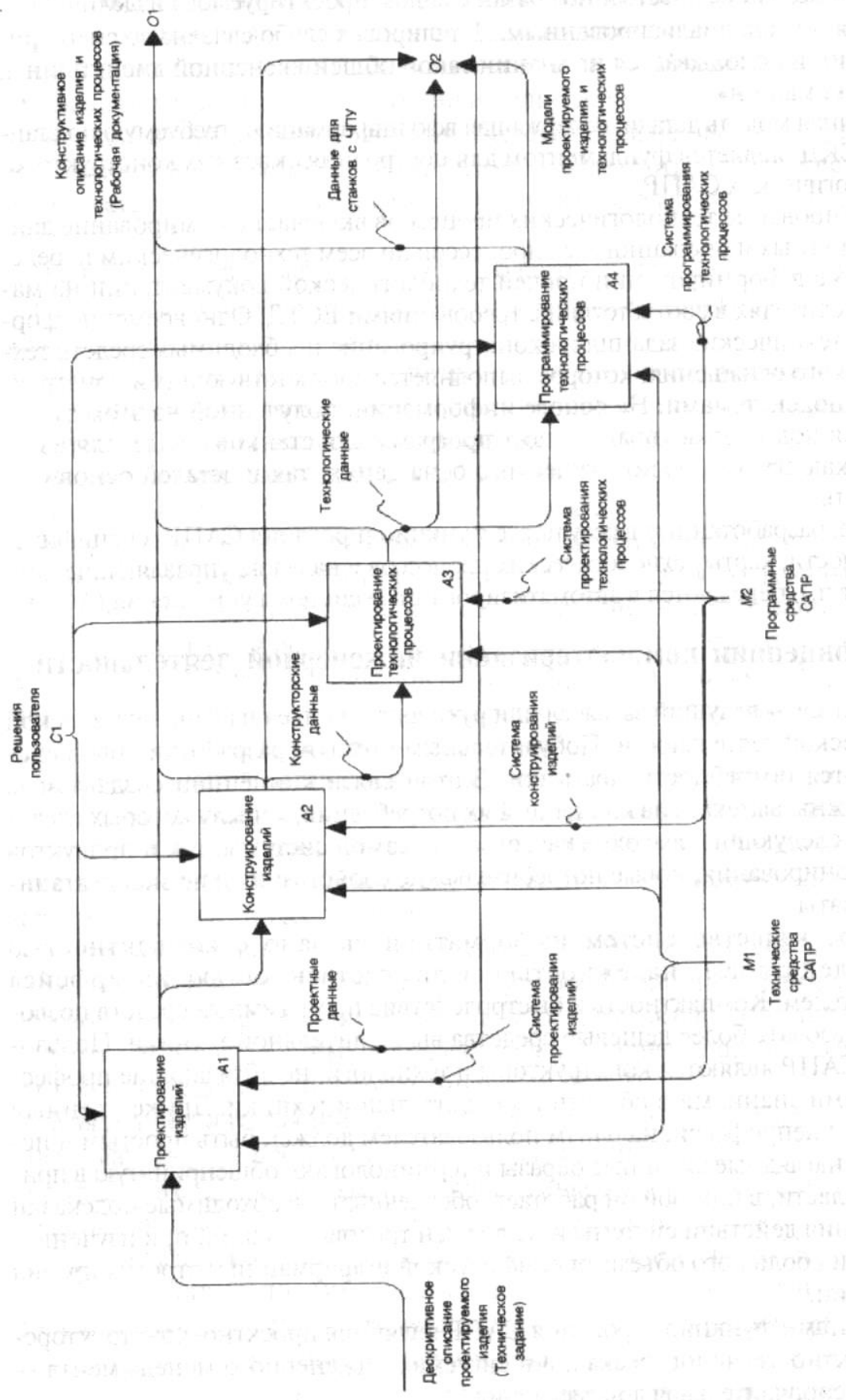


Рис. 1.9. Структура САПР: A1...A4—условные обозначения блоков; O1, O2—выходные параметры; C1—управляющая переменная; M1, M2—механизмы.

1.4.5. Разновидности САПР

Классификацию САПР осуществляют по ряду признаков, например, 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, часто называют машиностроительными САПР или MCAD (Mechanical CAD) системами.

2. САПР для радиоэлектроники. Их названия – ECAD (Electro CAD) или EDA (Electronic Design Automation) системы.

3. САПР в области архитектуры и строительства. Их названия – Arhi CAD.

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

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

1) САПР функционального проектирования, иначе САПР-Ф или CAE (Computer Aided Engineering) системы;

2) *конструкторские* САПР общего машиностроения – САПР-К, часто называемые просто CAD-системами;

3) *технологические* САПР общего машиностроения – САПР-Т, иначе называемые автоматизированными системами технологической подготовки производства АСТПП или системами CAM (Computer Aided Manufacturing).

По *сложности проектируемых объектов* для изделий машиностроения эта характеристика принимает следующие значения:

- простые изделия с числом составных частей до 100 (токарный патрон, редуктор и т.п.);
- изделия средней сложности с числом составных частей свыше 100 до 1000 (сверлильный станок, профилограф и т.п.);
- сложные изделия с числом составных частей свыше 1000 до 10000 (трактор, грузовой автомобиль и т.п.);
- очень сложные изделия с числом составных частей свыше 10000 до 1000000 (самолет-лайнр, теплоход и т.п.);
- изделия очень высокой сложности с числом составных частей свыше 1000000 (ракетно-космические и тому подобные комплексы).

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) обеспечений.

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. Поэтому к этой группе систем относится большинство графических ядер САПР в области машиностроения. В настоящее время появились унифицированные графические ядра, применяемые более чем в одной САПР (это ядра Parasolid фирмы EDS Unigraphics и ACIS фирмы Intergraph).

2. САПР на базе СУБД. Они ориентированы на приложения, в которых при сравнительно несложных математических расчетах перерабатывается большой объем данных. Такие САПР преимущественно встречаются в технико-экономических приложениях, например, при проектировании бизнес-планов, но имеют место также при проектировании объектов, подобных станочным системам.

3. САПР на базе конкретного прикладного пакета. Фактически это автономно используемые программно-методические комплексы, например, имитационного моделирования производственных процессов, расчета прочности по методу конечных элементов, синтеза и анализа систем автоматического управления и т.п. Часто такие САПР относятся к системам САЕ. 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 САЕ/CAD/CAM-системы в машиностроении. Для управления столь сложными системами применяют специализированные *системные среды*.

Интегрированные САПР должны:

- охватывать все этапы проектирования от ввода описания проектируемого объекта до получения проектно-технической документации (интеграция по глубине);
- иметь на отдельных этапах альтернативные алгоритмы и программы, позволяющие формировать наиболее экономичные и достаточно адекватные математические модели в соответствии с конкретными условиями проектирования, выбирать различные математические методы для решения заданной задачи (интеграция по ширине);
- иметь систему управления проектированием, а также интегрированную базу данных;
- быть приспособленными для тиражирования в различных проектных организациях.

Локальные автономные системы автоматизированного проектирования решают отдельные частные задачи: конкретные проектно-конструкторские расчеты, определенные виды чертежно-графических работ и др. По существу локальные САПР являются подсистемами и входят в системы более высокого уровня иерархии.

В зависимости от уровня автоматизации процесса проектирования различают системы:

- низкоавтоматизированные с количеством автоматизированных процедур до 25% общего количества процедур процесса проектирования;

- среднеавтоматизированные с количеством автоматизированных процедур свыше 25% до 50%;

- высокоавтоматизированные с количеством автоматизированных процедур свыше 50%.

Признак *комплексности автоматизации проектирования* характеризует САПР в зависимости от охвата этапов или стадий проектирования (техническое предложение, эскизный проект, технический проект, рабочая документация). По этому признаку различают системы:

- одноэтапные;
- многоэтапные;
- комплексные.

Важной характеристикой является *возможность работы в сети*. По этому признаку можно выделить системы, не имеющие возможности работы в сети, работающие в локальной сети и имеющие возможность выхода в Internet.

1.4.6. Принципы построения САПР

Проблема синтеза оптимальной структуры САПР решается в настоящее время как путем использования опыта создания автоматизированных систем управления, так и за счет накопления и использования опыта создания и эксплуатации крупных программных комплексов. Этот опыт концентрируется в ряде принципов, на которые целесообразно ориентироваться при разработке САПР.

САПР – человеко-машинная система. Коллектив разработчиков и пользователей системы является ее составной частью и, взаимодействуя с техническими средствами САПР, выполняет процесс проектирования. При этом часть проектных процедур не может быть автоматизирована и решается при участии человека. Об автоматическом проектировании можно говорить лишь в отношении отдельных задач.

Обеспечение интерактивного режима проектирования, что позволяет проектировщику активно вмешиваться в этот процесс, осуществлять контроль за ходом проектирования в режиме диалога. Организация интерактивного проектирования улучшается с уменьшением времени реакции ЭВМ.

Минимальность взаимодействия системы с внешней средой, что предполагает минимизацию различных видов взаимодействия системы с внешней средой за счет сокращения объемов выходной и особенно входной информации.

Принцип развития, позволяющий производить модернизацию системы и расширение ее возможностей за счет совершенствования компонентов САПР и упорядоченности связей между этими компонентами без перерыва или с минимальными перерывами в функционировании системы.

Единый принцип построения САПР для группы родственных по функциональным характеристикам объектов.

Принцип эволюционности в проектировании, т.е. максимальное использование имеющегося опыта и навыков проектирования, перенесения их в комплекс алгоритмов и программ, которые являются инструментом машинного проектирования. Совершенствование компонентов САПР в этом случае должно базироваться на основе использования методов эвристического

программирования.

Принцип максимальной независимости от технических средств, которые постоянно обновляются.

Принцип сквозного проектирования, обеспечивающий непрерывный характер проектирования объекта от элемента до изделия в целом и предполагающий автоматизацию на различных этапах проектирования от замысла до воплощения проекта “в металле”.

Системное единство САПР. Принцип системного единства состоит в том, что при создании, функционировании и развитии САПР связи между подсистемами должны обеспечивать целостность всей системы. Наибольший эффект от САПР достигается при комплексной (сквозной) автоматизации проектирования на всех уровнях. Последнее позволяет исключить многократное описание информации об объектах проектирования, обеспечив ее преемственность для различных подсистем.

Совместимость компонентов САПР. Принцип совместимости состоит в том, что языки, символы, коды, информационные и технические характеристики структурных связей между подсистемами, средствами обеспечения САПР должны обеспечивать совместное функционирование подсистем. Особенно важным является информационная и программная согласованность отдельных подсистем. Так, например, информационная совместимость обеспечивает работу различных подсистем с одной и той же базой данных и единым входным языком.

Независимость отдельных подсистем (программ) САПР. Принцип независимости определяет возможность для подсистем (программ) введения в действие и функционирования их независимо от других подсистем. Этот принцип называется также модульным принципом построения САПР.

Открытость САПР. Этот принцип определяет возможность внесения изменений в систему во время ее разработки и эксплуатации. Изменения могут заключаться в добавлении новых или замене старых элементов программного, информационного, технического и лингвистического обеспечения.

Согласованность неавтоматизированного (традиционного) проектирования и САПР – этот принцип должен учитываться при внедрении САПР на уже действующем предприятии со сложившейся структурой, взаимоотношениями, формами и способами использования проектной документации. При этом внедрение САПР не должно нарушать на длительный срок нормального функционирования предприятия.

Принцип иерархического построения системы, обуславливающий многоступенчатую пирамидальную структуру системы с подчинением низших звеньев высшим.

Принцип включения, предусматривающий согласование параметров и возможностей конкретной САПР с более сложной системой (АСУП, автоматизированной системой научных исследований АСНИ), стоящей выше на иерархическом уровне.

Принцип информационного единства, требующий использования во всех подсистемах САПР нормативно установленных в отрасли правил применения терминов, символов, способов представления информации и т.д.

Принцип моральной живучести, предполагающий наличие в САПР средств настройки на развивающийся класс объектов, который изменяется как количественно, так и качественно.

Принцип первого руководителя, согласно которому за процессы разработки, внедрения и развития САПР должен непосредственно отвечать руководитель соответствующего проектно-конструкторского подразделения. Попытки передоверить это управление второстепенным лицам, как правило, заканчиваются тем, что САПР или оказываются дискредитированы, или выполняют рутинные функции.

1.4.7. Этапы создания САПР

Созданию системы автоматизированного проектирования объекта, как правило, предшествует системное обследование объекта проектирования и используемых в инженерной практике неавтоматизированных методов и приемов проектирования, технической документации, разрабатываемой в процессе проектирования.

В результате обследования определяются необходимость и экономическая эффективность создания автоматизированной системы. При этом учитываются объем проектно-конструкторских работ, их периодичность, общие затраты инженерного труда, возможность создания адекватного математического описания и оптимизационных процедур, необходимость повышения технико-экономических показателей и т.д.

Целью создания САПР является повышение качества и технико-экономического уровня проектируемых объектов при их создании и применении, повышение производительности труда, сокращение сроков, уменьшение стоимости и трудоемкости проектирования. Очевидно, что создание САПР в первую очередь должно быть обусловлено технико-экономической целесообразностью.

При создании САПР и их подсистем выделяют следующие стадии:

- предпроектные исследования,
- техническое задание,
- технические предложения,
- эскизный проект,
- технический проект,
- рабочий проект,
- изготовление,
- отладка и испытания,
- ввод в действие.

Каждая стадия работ состоит из нескольких этапов (табл. 1.2).

Таблица 1.2. Основные этапы работ и стадии создания САПР

Этапы	Стадии
1. Обследование проектной организации 2. Оформление технического отчета 3. Согласование и утверждение технического отчета	Предпроектные исследования
4. Разработка технического задания 5. Согласование и утверждение технического задания	Техническое задание
6. Выбор и обоснование рационального варианта САПР 7. Разработка комплекта документации 8. Согласование и утверждение технического предложения	Техническое предложение
9. Разработка принципиальных решений по созданию САПР 9. Разработка документации 10. Согласование и утверждение эскизного проекта	Эскизный проект
11. Разработка окончательных решений по созданию САПР 12. Разработка документации	Технический проект

13. Согласование и утверждение технического проекта	
15. Разработка рабочей документации по САПР 16. Согласование и утверждение рабочего проекта	Рабочий проект
17. Изготовление (получение) и отладка компонентов САПР 18. Монтаж, наладка и испытание комплекса технических средств автоматизации проектирования 19. Подготовка организации к вводу в действие системы	Изготовление, отладка и испытание
20. Опытное функционирование САПР 21. Приемочные испытания САПР	Ввод в действие

Следует отметить, что при создании САПР для конкретных условий выполнение отдельных стадий может быть необязательным. Например, при создании САПР на базе типовых подсистем, разработанных другими организациями, стадии предпроектных исследований, эскизного и технического проектов не являются обязательными. В этом случае состав работ по привязке типовой подсистемы к условиям конкретной организации определяют на стадии рабочего проекта.

1.5. Функции, характеристики и примеры CAD/CAM/CAE-систем

Функции CAD-систем в машиностроении подразделяют на функции двухмерного (2D) и трехмерного (3D) проектирования. К функциям 2D относятся черчение, оформление конструкторской документации; к функциям 3D – получение трехмерных моделей, метрические расчеты, реалистичная визуализация, взаимное преобразование 2D и 3D моделей.

Среди CAD-систем различают «легкие» и «тяжелые» системы. Первые из них ориентированы преимущественно на 2D графику, сравнительно дешевы и менее требовательны в отношении вычислительных ресурсов. Вторые ориентированы на геометрическое моделирование (3D), более универсальны, дороги, оформление чертежной документации в них обычно осуществляется с помощью предварительной разработки трехмерных геометрических моделей.

Основные функции САМ-систем:

- разработка технологических процессов,
- синтез управляющих программ для технологического оборудования с числовым программным управлением (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 (NC – Numerical Control),
- расчет норм времени обработки.

Наиболее известны следующие CAE/CAD/CAM-системы в машиностроении. «Тяжелые» системы (в скобках указана фирма, разработавшая или распространяющая продукт):

Unigraphics (EDS Unigraphics);
Solid Edge (Intergraph);
Pro/Engineer (PTC – Parametric Technology Corp.),
CATIA (Dassault Systemes),
EUCLID (Matra Datavision),
CADD5.5 (Computervision, ныне входит в PTC) и др.

«Легкие» системы:

AutoCAD (Autodesk);
АДЕМ; bCAD (ПроПро Группа, Новосибирск);

Caddy (Ziegler Informatics);
 КОМПАС (Аскон, С.Петербург);
 СПРУТ (Sprut Technology, Москва-Набережные Челны);
 Кредо (НИВЦ АСК, Москва).

Системы, занимающие промежуточное положение (среднемасштабные):

Cimatron, Microstation (Bentley),
 Euclid Prelude (Matra Datavision),
 T-FlexCAD (Топ Системы, Москва) и др.

С ростом возможностей персональных ЭВМ грани между «тяжелыми» и «легкими» CAD/CAM-системами постепенно стираются.

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

- моделирование полей физических величин, в том числе анализ прочности, который чаще всего выполняется в соответствии с МКЭ;
- расчет состояний и переходных процессов на макроуровне;
- имитационное моделирование сложных производственных систем на основе моделей массового обслуживания и сетей Петри.

Примеры систем моделирования полей физических величин в соответствии с МКЭ:

Nastran, Ansys, Cosmos, Nisa, Moldflow.

Примеры систем моделирования динамических процессов на макроуровне: Adams и Dyna – в механических системах, Spice – в электронных схемах, ПА9 – для многоаспектного моделирования, т.е. для моделирования систем, принципы действия которых основаны на взаимовлиянии физических процессов различной природы.

Для удобства адаптации САПР к нуждам конкретных приложений, для ее развития целесообразно иметь в составе САПР инструментальные средства адаптации и развития. Эти средства представлены той или иной CASE-технологией, включая языки расширения. В некоторых САПР применяют оригинальные инструментальные среды.

Примерами могут служить объектно-ориентированная интерактивная среда CAS.CADE в системе EUCLID, содержащая библиотеку компонентов, в САПР T-Flex CAD 3D предусмотрена разработка дополнений в средах Visual C++ и Visual Basic.

Важное значение для обеспечения открытости САПР, ее интегрируемости с другими автоматизированными системами (АС) имеют интерфейсы, представляемые реализованными в системе форматами межпрограммных обменов. Очевидно, что, в первую очередь, необходимо обеспечить связи между CAE, CAD и CAM-подсистемами.

В качестве языков – форматов межпрограммных обменов – используются IGES, DXF, Express (стандарт ISO 10303-11, входит в совокупность стандартов STEP), SAT (формат ядра ACIS) и др.

Наиболее перспективными считаются диалекты языка Express, что объясняется общим характером стандартов STEP, их направленностью на различные приложения, а также на использование в современных распределенных проектных и производственных системах. Действительно, такие форматы, как IGES или DXF, описывают только геометрию объектов, в то время как в обменах между различными САПР и их подсистемами фигурируют данные о различных свойствах и атрибутах изделий.

1.6. Современные проблемы развития программных средств

Ведущие американские специалисты по разработке программного обеспечения считают, что в ближайшем будущем в этой области изменения неизбежны и что масштаб этих изменений будет соответствовать тому, насколько высоко расположен в иерархии программ целевой уровень программных средств. Целевой уровень средств компьютеризации инженерной деятельности в его прикладной области расположен на самых верхних этажах. Однако на пути кардинальных перемен в этой сфере лежат традиционные САПР с их геометрической ориентацией. Чтобы двинуться вперед, так называемые тяжелые и средние системы должны подвергнуться дезинтеграции, а легкие системы — исчезнуть.

Наиболее прогрессивные фирмы на Западе уже двинулись по такому пути, например фирма *Marta Datavision*, которая произвела декомпозицию системы *EUCLID*, превратив ее в *EUCLID QUANTUM*.

Разработчик языка *Visual Basic* А. Купер считает, что в настоящее время пользовательские интерфейсы программных систем получаются сложными, а у современных пользователей нет ни времени, ни желания учиться с ними работать. Если интерфейс слишком сложен, вся мощь программы пропадает втуне, поскольку остается без употребления. Вместо того чтобы просто дать возможность пользователю оговорить свои цели, программа требует, чтобы ей растолковывали, как их достичь. А. Купер не без основания полагает, что пользователи были бы совершенно счастливы, если бы промежуточные задачи решались невидимо для них, а программа вела прямо к достижению цели.

Обычно принадлежность традиционных САПР к категориям тяжелых, средних или легких измеряют деньгами. Однако с тем же успехом ее можно было бы определять по тяжести интерфейсов. Традиционные САПР принадлежат к категории пассивных информационных ресурсов. Их можно сравнить со станком с ручным управлением. Вся мощь этих систем должна быть отражена в их интерфейсе. В итоге даже квалифицированные специалисты способны освоить мощь "тяжелых" систем на 20-30 %, а рядовые конструкторы, у которых нет ни времени, ни желания копаться в них, используют эту мощь на 5-10 %. При этом традиционные САПР всех весовых категорий не могут сделать пользователей счастливыми, так как пассивное средство неспособно вести инженера прямо к цели: поставил задачу — и получил ее решение в виде компьютерной модели, по которой при необходимости можно автоматически сформировать полный комплект документации. В процессе решения задачи пользователю остается ответить компьютеру лишь на несколько вопросов, относящихся к категории инженерного творчества.

Для решения проблемы интерфейсов необходимо переходить от традиционных САПР к интеллектуальным специализированным системам КИД, наполненным знаниями потребителя, относящимся к категории активных информационных ресурсов и способным составить счастье пользователя. Разница между такими системами и традиционными САПР такая же, как между обрабатывающим центром с ЧПУ и станком с ручным управлением.

Когда функции человека и компьютера будут перераспределены в пользу последнего, тогда и интерфейсы станут легче легкого. Для широкого круга пользователей компьютер станет больше помощником, чем просто инструментом, приближаясь к идеалу машины, которая сама определяет, что вам нужно, и делает это для вас.

Отсюда следует вывод о необходимости перехода от пассивных САПР к активным интеллектуальным системам КИД.

Ведущие американские специалисты считают, что программирование постоянно упрощается и что уже сейчас есть огромное количество продуктов, которые дают возможность создавать программы без программирования. По их мнению, страна Утопия, в которой каждый пользователь мгновенно становился бы программистом, еще не существует, хотя это может стать реальностью скорее, чем мы думаем. Настоящая книга имеет своей целью приблизить инженеров к этой стране.

1.6.1. Пассивные и активные информационные ресурсы

В своем материальном развитии человечество прошло несколько фаз. Первая, аграрная, фаза была связана с обеспечением жизненно необходимых для существования продуктов питания и быта естественного происхождения. На этой фазе в условиях неразвитости товарно-денежных отношений наибольшую ценность представляли продукты. Вторая, индустриальная, фаза связана с промышленным производством расширенной номенклатуры товаров и услуг. В условиях рыночной экономики главную ценность на этой фазе представляет капитал.

В настоящее время человечество вступает в третью, информационную фазу развития. В условиях высокоразвитых гибких производственных систем с комплексной компьютеризованной автоматизацией на этой фазе наибольшую ценность приобретают знания. В информационном обществе в полной мере будет реализован сформулированный еще в 1597 г. Ф. Бэконом знаменитый тезис «знание — сила».

Совокупность данных и знаний формирует *информационные ресурсы*, объем и качество которых будут определять конкурентоспособность предприятий и физических лиц. Информационные ресурсы могут находиться в двух формах — *пассивной* и *активной*.

Носителями пассивных информационных ресурсов являются книги. Использование или неиспользование пассивных знаний зависит от человека. В настоящее время содержание книг в их традиционной или модернизированной с помощью средств мультимедиа форме переносится на машинные носители информации и с помощью глобальных информационных сетей *Internet* и технологии *WWW* («Всемирная паутина») становится доступным практически для всех обладателей компьютеров. При этом, однако, информационные ресурсы остаются в пассивной форме. В последнее время по этой же универсальной и не требующей больших затрат методологии ведется создание корпоративных сетей предприятий (*Intranet*).

Если для художественной литературы и средств массовой информации пассивная форма является, по всей видимости, единственно возможной, то для инженерных знаний, которые должны управлять процессом создания новых изделий, такую форму нельзя признать удовлетворительной.

Активные информационные ресурсы составляет информация, доступная для автоматизированного хранения, поиска и обеспечивающая обработку данных. Эти ресурсы представляют собой формализованные и зафиксированные на машинных носителях профессиональные базы графических и неграфических данных и знаний. Есть основание полагать, что отношение объема активных информационных ресурсов к общему объему национальных информационных ре-

сурсов станет одним из существенных экономических показателей, характеризующих эффективность использования этих важнейших национальных ресурсов.

Активные информационные ресурсы превращают компьютер из пассивного инструмента в руках инженера в активного партнера, предлагающего варианты решений стоящих перед ним задач с оценкой их эффективности по различным критериям. Такие ресурсы берут на себя выполнение всей рутинной расчетной, поисковой и оформительской работы, оставляя за инженером преимущественно творческие функции. Они делают индивидуальный инженерный опыт достоянием всего коллектива, включая молодых и малоопытных коллег, обеспечивая преемственность развития творческого потенциала фирмы и постоянное повышение этого потенциала за счет накопления и корректировки знаний.

Активные информационные ресурсы позволяют решить важнейшую в условиях рыночной экономики проблему резкого сокращения сроков, трудоемкости и стоимости конструкторско-технологической подготовки производства новых изделий.

Активные и пассивные информационные ресурсы существенно различаются по форме их представления. Активная форма наиболее приспособлена для машинной обработки, а пассивная — для человеческого восприятия. В этой связи возникает проблема отображения активных информационных ресурсов в доступном для неспециалиста в области информатики виде, максимально приближенном к традиционному инженерному, — в виде конструкторских и технологических справочников и методических пособий.

1.6.2. Понятие о CALS-технологии

CALS-технология — это технология комплексной компьютеризации сфер промышленного производства, цель которой — унификация и стандартизация спецификаций промышленной продукции на всех этапах ее жизненного цикла.

Основные спецификации представлены проектной, технологической, производственной, маркетинговой, эксплуатационной документацией. В CALS-системах предусмотрены хранение, обработка и передача информации в компьютерных средах, оперативный доступ к данным в нужное время и в нужном месте. Соответствующие системы автоматизации называли автоматизированными логистическими системами или CALS (Computer Aided Logistic Systems). Поскольку под логистикой обычно понимают дисциплину, посвященную вопросам снабжения и управления запасами, а функции CALS намного шире и связаны со всеми этапами жизненного цикла промышленных изделий, применяют и более соответствующую предмету расшифровку аббревиатуры CALS — Computer Acquisition and Life Cycle Support.

Применение CALS позволяет существенно сократить объемы проектных работ, так как описания многих составных частей оборудования, машин и систем, проектировавшихся ранее, хранятся в базах данных сетевых серверов, доступных любому пользователю технологии CALS. Существенно облегчается решение проблем ремонтпригодности, интеграции продукции в различного рода системы и среды, адаптации к меняющимся условиям эксплуатации, специализации проектных организаций и т.п. Ожидается, что успех на рынке сложной технической продукции будет немыслим вне технологии CALS.

Развитие CALS-технологии должно привести к появлению так называемых *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 студиями. Среди несомненных достижений CALS-технологии следует отметить легкость распространения передовых проектных решений, возможность многократного воспроизведения частей проекта в новых разработках и др.

Построение открытых распределенных автоматизированных систем для проектирования и управления в промышленности составляет основу современной CALS-технологии. Главная проблема их построения – обеспечение единообразного описания 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 использующих разные CAE/CAD/CAM-системы. 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.

Следовательно, информационная интеграция является неотъемлемым свойством CALS-систем. Поэтому в основу CALS-технологии положен ряд стандартов, обеспечивающих такую интеграцию.

Важные проблемы, требующие решения при создании комплексных САПР – управление сложностью проектов и интеграция ПО. Эти проблемы включают вопросы декомпозиции проектов, распараллеливания проектных работ, целостности данных, межпрограммных интерфейсов и др.

Известно, что частичная автоматизация зачастую не дает ожидаемого повышения эффективности функционирования предприятий. Поэтому предпочтительным является внедрение интегрированных САПР, автоматизирующих все основные этапы проектирования изделий. Дальнейшее повышение эффективности производства и конкурентоспособности выпускаемой продукции возможно за счет интеграции систем проектирования, управления и документооборота.

Такая интеграция лежит в основе создания *комплексных систем автоматизации*, в которых помимо функций собственно САПР реализуются средства для автоматизации функций управления проектированием, документооборота, планирования производства, учета и т.п.

В основу CALS-технологии положен ряд стандартов и прежде всего это стандарты STEP, а также EDIFACT (Electronic Data Interchange For Administration, Commerce, Transport), Parts Library, Mandate, SGML (Standard Generalized Markup Language) и др. Стандарт SGML устанавливает способы унифицированного оформления документов определенного назначения – отчетов, каталогов, бюллетеней и т.п., а стандарт EDIFACT – способы обмена подобными документами.

Одна из наиболее известных реализации CALS-технологии разработана фирмой Computervision. Эта технология названа EPD (Electronic Product Definition) и ориентирована на поддержку процессов проектирования и

эксплуатации изделий машиностроения.

В CALS-системах на всех этапах жизненного цикла изделий используется документация, полученная на этапе проектирования. Поэтому естественно, что составы подсистем в CALS и комплексных САПР в значительной мере совпадают. Технологию EPD реализуют:

CAD – система автоматизированного проектирования;

CAM – автоматизированная система технологической подготовки производства (АСТПП);

CAE – система моделирования и расчетов;

CAPE (Concurrent Art-to-Product Environment) – система поддержки параллельного проектирования (concurrent engineering);

PDM – система управления проектными данными, представляющая собой специализированную СУБД (DBMS – Data Base Management System);

3D Viewer –система трехмерной визуализации;

CADD – система документирования;

CASE – система разработки и сопровождения программного обеспечения;

методики обследования и анализа функционирования предприятий.

Основу EPD составляют системы CAD и PDM, в качестве которых используются CADD5 и Optegra соответственно. В системе Optegra связи между объектами задаются по протоколам стандартов STEP, внешний интерфейс осуществляется через базу данных SDAI.

1.7. Особенности технологии автоматизированного проектирования

Проектирование как инвариантная по отношению к конкретным объектам форма инженерной деятельности имеет ряд характерных особенностей:

1. Процесс имеет итерационный характер.

2. Решения принимаются на отдельных этапах в условиях неполной или недостаточной информации, которая в эти случаях поступает или из внешней среды, или вырабатывается проектировщиком в процессе творческой деятельности.

3. В процессе проектирования сочетаются процедуры алгоритмического и эвристического характера.

4. В проектной деятельности используются различные ресурсы, среди которых одним из наиболее важных являются знания проектировщика.

5. Цель проектирования устанавливается вне процесса проектирования и остается неизменной в течение этого процесса.

6. Процесс проектирования производит информацию, которая может быть использована в производстве.

САПР в процессе проектирования играет роль мощного средства, эффективное применение которого невозможно без разработки комплекса методических указаний и инструкций, регламентирующих последовательность этапов и используемых на каждом этапе. Поскольку на каждом этапе автоматизированного проектирования осуществляются различные операции с материальными и нематериальными (информационными) объектами, а также возникает проблема наиболее эффективного распределения этих операций во времени и оптимального соотношения в пространстве с целью экономии трудовых и материальных ресурсов, то представляется целе-

сообразной необходимостью разработки и отработки технологии автоматизированного проектирования. Чтобы разработать технологию автоматизированного проектирования, необходимо тщательно изучить сам процесс проектирования.

Целью любого процесса проектирования является синтез конструктивного варианта объекта, в наибольшей степени удовлетворяющего требованиям технического задания. Процесс проектирования обычно начинается со сбора информации о спроектированных разновидностях объекта, результатах выполненных научно-исследовательских работ, сбора данных об испытаниях аналогов, условиях снабжения материалами и т.д.

На основании анализа технических характеристик, условий изготовления и эксплуатации прототипов проектируемого объекта, выявления тенденций развития объектов рассматриваемого класса составляется и корректируется с учетом нормативных документов исходное техническое задание на проектирование. На начальных стадиях проектирования требования технического задания конкретизируются в виде системы ограничений, которым должны удовлетворять характеристики объекта, обеспечивающие успешное решение проектной задачи. Комплекс требований к объекту можно представить в виде множества $T = \{t_i, i = 1, 2, \dots, N\}$, где N — число требований.

По заданному вектору требований производятся формирование и сравнение альтернативных вариантов проектных решений.

Каждый вариант представляет множество характеристик $X = \{x_j, j = 1, 2, \dots, M\}$. Отдельные элементы этого множества могут совпадать с соответствующими элементами множества требований, другие могут быть связаны косвенно. В общем виде $M \neq N$.

На этапе формирования списка вариантов требуется варьирование характеристик проектируемого объекта в области $V = \{v_j, j = 1, 2, \dots, M\}$.

На данном этапе проектирования происходит отображение множества требований T к проектируемому объекту на множество его характеристик X . Варианты полученного списка сравниваются между собой с использованием целевой функции C , экстремум которой соответствует оптимальному решению задачи проектирования. В качестве целевой функции принимается характеристика, наиболее полно отражающая эффективность проектируемого объекта или некоторый обобщенный критерий, включающий несколько характеристик. Таким критерием при проектировании, например, трансформаторов могут быть народнохозяйственные затраты на трансформацию электроэнергии.

Анализ процесса неавтоматизированного проектирования позволяет обнаружить в нем ряд нерациональных сторон:

- необходимая для проектирования информация хранится на традиционных бумажных носителях в неупорядоченном для конкретной проектной задачи виде, что вызывает большие затраты времени на поиск и обработку этой информации;
- не обеспечивается сквозной характер проектирования, что требует дополнительных трудовых ресурсов на стыковку, согласование отдельных проектных подзадач, выполняемых различными исполнителями;
- область варьирования характеристик X объекта проектирования сильно сужена из-за ограниченности временных ресурсов, что, как правило, приводит к нахождению неоптимально-

го проектного решения;

- существует большой объем проектных операций нетворческого характера (расчеты, изготовление технической документации, эскизов, чертежей и т.д.).

Таким образом, можно констатировать, что неавтоматизированное проектирование — это процесс с высоким начальным уровнем энтропии, со случайно перемежающимися творческими и нетворческими операциями, с малой предсказуемостью конечного результата. Схематично представляя этот процесс как последовательность этапов $\{Z_r\}$ и подэтапов $\{z_p\}$, можно видеть, что на всех этапах единственными управляющими воздействиями являются действия проектировщика $\{Y_r\}$ и $\{y_p\}$, которые в сильной степени определяются субъективными факторами (опытом, интуицией, степенью ответственности за конечный результат, самочувствием, степенью утомления, эмоциональным настроением, психологической инерцией и т.д.).

Радикальные отличия автоматизированного проектирования от неавтоматизированного состоят в следующем:

1. Полная систематизация всей информации и представление ее в виде наборов данных требуемой степени дискретности (элемента, набора данных, записи, файла, базы данных). Обозначим эти порции информации как $\{i_l\}$.

2. Четкая предопределенность этапов проектирования $\{Z_r\}$ и перечислимая альтернативность подэтапов $\{z_p\}$.

3. Однозначность или малая степень неопределенности управляющих воздействий $\{Y_r\}$ и $\{y_p\}$ на каждом этапе проектирования.

4. Сквозной, последовательный характер процесса проектирования от первоначального замысла до получения окончательного проектного решения.

Формально процесс автоматизированного проектирования можно представить как последовательное преобразование некоторого первоначального информационного представления объекта $\{i_1, i_2, \dots, i_s\}$ посредством воздействий $\{Y_r\}$ и $\{y_p\}$ в конечное состояние $\{i_1^*, i_2^*, \dots, i_s^*\}$, однозначно отображаемое на следующем этапе проектирования в $\{x_j^*\}$, удовлетворяющее $\{t_i\}$.

В качестве примера такого преобразования, выполняемого однозначно, можно привести процедуру формирования графа вычислительного процесса, которая является одним из начальных этапов автоматизированного проектирования любых объектов, в том числе и трансформаторов. Здесь в качестве i_1 используется сжатая матрица инцидентности, устанавливающая информационные связи между всеми проблемными модулями, входящими в САПР, и всеми параметрами, описывающими трансформатор. Другой информационной конструкцией i_2 является набор данных, содержащий задание на проектирование. Обработка $\{i_1, i_2\}$ программными операторами сортировки $\{y_{li}\}$, расчленения $\{y_{2i}\}$ и упорядочения $\{y_{3i}\}$ массивов позволяет в качестве результата данного этапа получить граф вычислительного процесса i_1'' , содержащий последовательность проблемных модулей, реализуемых при проектном расчете трансформатора, а также массив i_2'' с номерами параметров, задаваемых на расчет в качестве исходных данных.

Таким образом, реализация технологии автоматизированного проектирования предъявляет к САПР комплекс следующих требований:

- возможность формулировать решаемые проектные задачи из предметной области на различных языках, понятных проектировщику;

- наличие средств для эффективной корректировки задания на проектирование с использованием простых форм входного языка (таблиц, бланков и т.п.);
- отсутствие жестких ограничений на структуру и объем входных данных и формы носителей информации, на которых они хранятся;
- возможность оперативного подключения к программному обеспечению системы новых модулей и исключение устаревших;
- представление возможностей проектировщику на основе промежуточных результатов принимать решение о выборе методов для продолжения проектной задачи, а также изменений значений отдельных параметров в используемом методе решения;
- возможность в ходе выполнения проектных операций проследить значения основных показателей процесса, свидетельствующих о его эффективности, и в зависимости от их значений корректировать вычислительный процесс;
- допустимость включения обучающих программ для повышения квалификации проектировщика;
- обеспечение совместимости автоматизированного и неавтоматизированного видов проектирования.

1.8. Концепции компьютеризации инженерной деятельности

Концепция — ведущий замысел или руководящая идея научно-технической и практической деятельности. Побудительным мотивом разработки новых систем являются потребности практики. В этой связи концепции создаваемых систем должны вытекать из концепций их потребления, к числу которых следует отнести следующие: высокое качество как самой системы, так и продуктов ее функционирования; новые потребительские свойства; низкие эксплуатационные затраты.

Высокое качество систем информатики связано с компактностью и быстродействием, надежностью и дружелюбностью интерфейса с пользователем. Компактность и быстродействие программных средств позволяет использовать более дешевые средства вычислительной техники. Пользователями САПР являются конструкторы и технологи, не обладающие профессиональными знаниями в области вычислительной техники. Дружелюбный интерфейс с непрофессиональным пользователем должен быть простым и использовать наглядные экранные образы и терминологию, общепринятую в прикладной области, в которой он работает, обеспечивать необходимые подсказки и разъяснения действий системы и не должен требовать усилий при изучении, запоминания большого объема специфической информации и строгих правил эксплуатации.

Результатами функционирования САПР являются проектно-конструкторская и проектно-технологическая, а в системах инженерного менеджмента — планово-распорядительная документация.

Высокое качество результатов проектирования может быть достигнуто, если система располагает прогрессивной нормативно-справочной базой, а также обеспечивает структурную и параметрическую рационализацию и оптимизацию проектных решений по конструкции изделий и процессам их изготовления.

Всякая вновь разрабатываемая система должна иметь в сравнении с действующими аналогами существенно новые потребительские свойства, привлекательность которых побуждала бы пользователей внедрять ее для замены уже освоенных.

Наконец, новая система должна обладать более низкими затратами на эксплуатацию, а также сопровождение и развитие, которые окупали бы расходы на ее приобретение и внедрение.

Из изложенных концепций потребления вытекают следующие основные концепции построения систем компьютеризации инженерного труда: интеллектуализация; интеграция; индивидуализация.

Концепция интеллектуализации. Эта концепция базируется на следующих основных моментах:

- использование системы понятий прикладной области;
- использование знаний в естественном виде; эксплуатация без программистов.

Реализация концепции интеллектуализации опирается на развитые методы работы со знаниями: их представление, хранение, использование и т.д. Под знаниями понимаются: система понятий прикладной области, а также связь с их представлениями в формальной модели; структура данных информационной модели прикладной области; математические модели, используемые при проектировании; правила принятия решений.

Система знаний организуется так, чтобы взаимодействие пользователя с компьютером проводилось в форме, принятой в данной прикладной области. Компьютер должен превратиться в удобного партнера, поскольку удобство программного продукта в общем случае является более важным качеством, чем характеристики технических средств.

Интеллектуальной системе достаточно задать постановку задачи в виде требуемого результата и условий его получения. Последовательность операций, необходимых для получения результата, определяется системой автоматически.

Разработку современных интеллектуальных систем способны осуществлять потребители без помощи программистов (рис. 1.10).



Рис. 1.10. Старая и новая информационные технологии разработки интеллектуальных программно-методических комплексов (ПМК)

Концепция интеграции. Концепция направлена на создание единого информационного пространства предприятия. Она определяет необходимость интеграции в следующих областях:

- в прикладной области;
- в области программных средств;
- в области технических средств информатики.

Конструкторско-технологическое проектирование включает следующие основные этапы:

проектирование изделий; конструирование изделий; проектирование технологических процессов изготовления изделий; конструирование технологической оснастки; проектирование технологических процессов изготовления оснастки; подготовку управляющих программ изготовления деталей на станках с ЧПУ. Наибольшие потери, обуславливающие увеличение трудоемкости и длительности цикла проектирования, возникают, как правило, на стыках между основными этапами. Как показывает опыт, решение этих проблем не может быть достигнуто путем совершенствования автономных САПР, используемых на различных этапах, или стыковкой таких систем, разработанных по различным идеологиям. Интеграция в прикладной области реализуется посредством создания комплексных конструкторско-технологических САПР.

Существующие конструкторские САПР имеют своей конечной целью выпуск конструкторской документации. Результатами их работы являются графические или геометрографические модели изделий, которые содержат информацию, необходимую для расчета управляющих программ изготовления, но не имеют всех данных, требуемых для проектирования технологических процессов. Реализация полномасштабных сквозных САПР, обеспечивающих автоматизацию всех этапов конструкторско-технологической подготовки производства, требует разработки как конструкторских, так и технологических подсистем по единой методологии. При этом автоматизация конструкторского проектирования приобретает ярко выраженную технологическую ориентацию.

Помимо интеграции в области конструкторско-технологической подготовки производства, носящей методологический характер, САПР должны быть интегрированы с АСУ производством. Поскольку АСУ используются в прикладной области, существенно отличной от проектирования, то здесь вполне достаточно интеграции на уровне данных.

Следующей областью интеграции являются программные средства. Для работы систем компьютеризации инженерной деятельности необходим широкий спектр программных средств, включая мониторы, средства управления текстовым диалогом и интерактивной машинной графики, экспертные системы и системы управления базами данных, средства геометрического моделирования, а также графического и текстового документирования. Как правило, эти средства создаются различными разработчиками по несогласованным между собой требованиям и принципам построения. Искусственное объединение этих средств не дает положительных результатов, ухудшая технические характеристики объединенной системы, осложняя их эксплуатацию и сопровождение, и не способствует формированию дружественного интерфейса с пользователем.

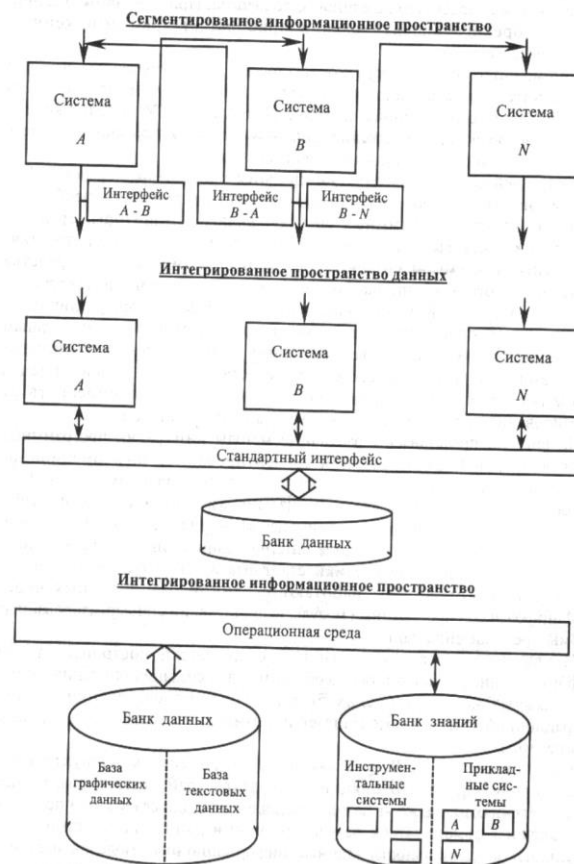
На рис. 1.11 представлены различные методы интеграции программных средств. Первый, формирующий сегментированное информационное пространство, представляет собой объединение независимых систем *A*, *B*, *N* с обменом информацией через специально разработанные интерфейсные блоки. Это — наиболее простой и наименее эффективный метод интеграции. Второй метод обеспечивает создание интегрированного пространства данных. По этому пути идут разработчики стандарта *STEP*. При таком подходе независимые подсистемы работают с единой базой данных через унифицированный программный модуль, использующий стандартизированные формы представления данных.

Наивысший уровень интеграции, позволяющий построить единое информационное про-

странство, необходимое для создания описанных ниже виртуальных конструкторских бюро, требует использования единой операционной среды и обеспечивает интеграцию не только данных, но и программных средств.

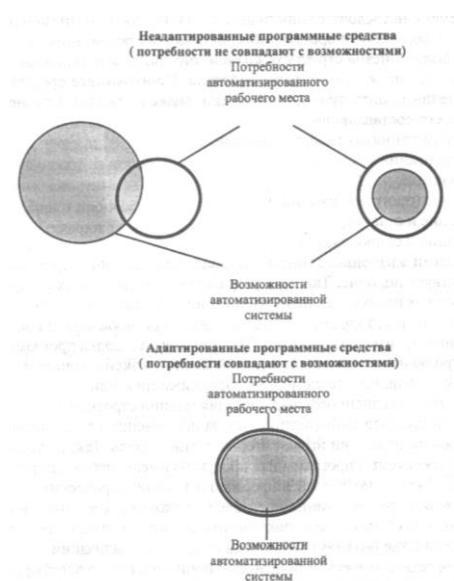
Пользователи САПР, участвующие в процессе конструкторско-технологической подготовки производства, работают в различных подразделениях или даже на разных предприятиях. Для реализации процесса они должны обмениваться результирующими данными. Помимо этого результаты их деятельности (данные информационных моделей изделий, технологических процессов и управляющие программы) должны передаваться в АСУ производством и технологическими процессами для управления материальным производством.

Рис. 1.11. Методы интеграции программных средств



Концепция индивидуализации. Эта концепция формируется из следующих составляющих: функциональная и личностная ориентация; автоформализация знаний; индивидуализированный сервис. Она направлена прежде всего на обеспечение дружественного интерфейса.

Автоформализация знаний обеспечивает для конструкторов и технологов возможность самостоятельно развивать прикладные системы без помощи программистов за счет использования знаний, представляемых в привычной для них форме.



Функциональная ориентация определяет уровень такого важного показателя, как отношение «эффективность/затраты». Возможности программных средств должны соответствовать потребностям данного рабочего места (рис. 1.12). Избыточность или недостаточность этих возможностей приводит к понижению значения упомянутого показателя.

Рис. 1.12. Концепция индивидуализации

Например, если данное рабочее место предназначено для конструирования типового режущего инструмента (сверла, резцы и т.п.), то применение системы со встроенным твердотельным моделированием будет избыточным. В то же время на рабочем месте конструктора литейной оснастки применение системы без твердотельного моделирования не даст необходимой эффективности. Более того на таком рабочем

месте необходимо, чтобы твердотельная модель отливки позволяла генерировать поверхности формообразующих деталей для программирования обработки этих деталей на станках с ЧПУ.

1.8.1. Старая и новая информационные технологии разработки программных средств

В широком смысле технология представляет собой совокупность упорядоченной во времени последовательности действий по преобразованию материи, энергии или информации и средств, обеспечивающих реализацию этих действий. Выше была описана структура жизненного цикла материальных изделий, которую формируют упомянутые действия. Программные средства, являющиеся изделиями индустрии информатики, также имеют свой жизненный цикл и этапы, его составляющие.

К этим этапам принято относить следующие:

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

Между этапами жизненного цикла материальных изделий и программных средств существует подобие. Так, при разработке универсальных («коробочных») программных продуктов анализ требований аналогичен маркетингу. Этапы проектирования и кодирования соответствуют проектированию и конструированию машиностроительных изделий. Тестирование и отладка программ аналогичны контролю и проведению испытаний машин, а эксплуатация и сопровождение — эксплуатации и техпомощи в обслуживании машин.

Остальные этапы жизненного цикла изделия машиностроения также имеют свои аналоги в индустрии информатики, но, за исключением технологической подготовки производства, они играют второстепенную роль. Так, в случае «коробочных», тиражируемых программных продуктов имеют место материально-техническое снабжение носителей информации и полиграфических изданий, производство в виде формирования носителей, упаковка и хранение, реализация, а в сложных системах и установка (монтаж) у пользователя. Для средств информатики единственно неактуальным является этап утилизации.

Что касается технологической подготовки производства, то в информатике она тесно связана с понятием средств *CASE (Computer-Aided Software/System Engineering)*.

CASE-технология в широком смысле представляет собой совокупность методологий анализа, проектирования, разработки и сопровождения сложных систем программного обеспечения (ПО), поддержанную комплексом взаимосвязанных средств автоматизации. *CASE*- это компьютеризированный инструментарий разработчиков программных продуктов. *CASE* является наиболее перспективным направлением в программотехнике, обеспечивающим достижение описанных выше вспомогательных целей создания САПР. Практически ни один серьезный зарубежный программный проект не осуществляется без использования *CASE*-средств. Например, при разработке ПО по заказу Министерства обороны США обязательно применение методологии и *CASE*-средств структурного анализа систем по международному стандарту *IDEF0*. Это средство было использовано выше при структурном анализе САПР (см. рис. 1.8, 1.9).

CASE-средства в информатике аналогичны технологической оснастке материального производства. Основная цель CASE состоит в том, чтобы отделить проектирование ПО от его кодирования и последующих этапов разработки, автоматизировав их в максимальной степени.

CASE обладают следующими основными достоинствами:

- улучшают качество создаваемого ПО за счет средств автоматического контроля проекта;
- позволяют за короткое время создавать прототип будущей системы, что дает возможность на ранних этапах оценить ожидаемый результат;
- ускоряют процесс проектирования и разработки;
- освобождают разработчика от рутинной работы, позволяя ему целиком сосредоточиться на творческой части разработки;
- поддерживают развитие и сопровождение разработки;
- поддерживают технологии повторного использования компонент разработки.

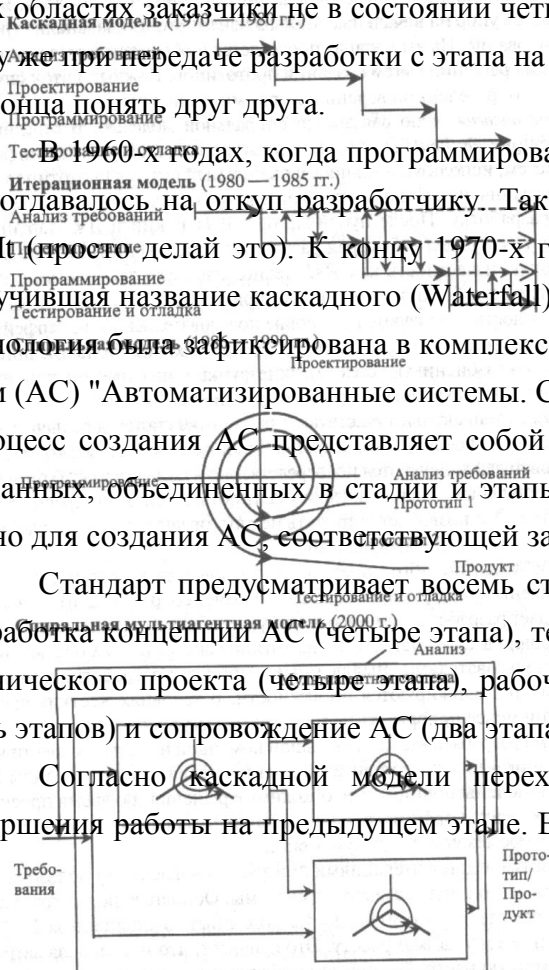
Большинство CASE-средств основано на парадигме методология/метод/нотация/средство. Методология определяет шаги работы и их последовательность, а также правила распределения и назначения методов. Метод - это систематическая процедура генерации описаний компонент ПО. Нотации предназначены для описания структур данных, порождающих систем и метасистем. Средства - инструментарий для поддержки методов с использованием принятой нотации. Эти инструменты поддерживают работу пользователей при создании и редактировании графического проекта в интерактивном режиме, они способствуют организации проекта в виде иерархии уровней абстракции, осуществляют генерацию ПО и используются при его тестировании.

Приложения из трудно формализуемых областей плохо вписываются в старую схему. В этих областях заказчики не в состоянии четко и полностью определить требования к системе. К тому же при передаче разработки с этапа на этап различные исполнители, как правило, не могут до конца понять друг друга.

В 1960-х годах, когда программирование для ЭВМ было скорее искусством, чем наукой, все отлавалось на откуп разработчику. Такая технология получила ироническое название Just Do It (просто делай это). К концу 1970-х годов была разработана промышленная технология, получившая название каскадного (Waterfall) или фазного метода (рис. 1.13). В нашей стране эта технология была зафиксирована в комплексе стандартов на разработку автоматизированных систем (АС) "Автоматизированные системы. Стадии создания". В соответствии с этим стандартом "процесс создания АС представляет собой совокупность упорядоченных во времени, взаимосвязанных, объединенных в стадии и этапы работ, выполнение которых необходимо и достаточно для создания АС, соответствующей заданным требованиям".

Стандарт предусматривает восемь стадий: формирование требований к АС (три этапа), разработка концепции АС (четыре этапа), технического задания, эскизного проекта (два этапа), технического проекта (четыре этапа), рабочей документации (два этапа), ввод в действие (восемь этапов) и сопровождение АС (два этапа).

Согласно каскадной модели переход на следующий этап возможен только после завершения работы на предыдущем этапе. Возвраты не предусматриваются. Результаты каждого



го этапа строго документируются и фиксируются на все время разработки проекта. Пользователи, как правило, после согласования технического задания в разработке не участвуют и приглашаются только на этапе тестирования. Критерием качества является точность выполнения технического задания.

Рис. 1.13. Модели жизненного цикла программного обеспечения

Такой подход хорош при разработке систем, позволяющих точно и полно сформулировать требования, например сложных расчетных систем, систем управления в реальном времени и других.

Однако приложения из областей автоматизации делопроизводства и проектирования плохо вписываются в эту схему. В этих областях заказчики, не зная возможностей информационных технологий, не в состоянии четко и полностью определить требования к системе. В результате пользователи, приглашенные на заключительном этапе работ, как правило, остаются неудовлетворенными ее результатами. При этом работа либо прекращается, либо начинается длительный и дорогостоящий процесс доработки и адаптации системы.

В начале 1980-х годов требования о недопустимости возвратов на предыдущие этапы были отменены, и возникла итерационная модель с циклами обратной связи между этапами - поэтапная модель с промежуточным контролем (см. рис. 1.13). Преимущество этой модели заключалось в том, что межэтапные корректировки обеспечивали меньшую трудоемкость по сравнению с трудоемкостью каскадной модели. При этом время каждого этапа растягивалось на весь период разработки.

Во второй половине 1980-х годов возникла спиральная модель. В этой модели делается упор на начальные этапы жизненного цикла: анализ требований и проектирование. На этих этапах проверяется и обосновывается реализуемость технических решений путем создания прототипов. Каждый виток спирали соответствует определенной версии программного продукта.

RAD-технология тесно связана со спиральной моделью. В середине 1980-х годов на фирме *Du Pont* был формализован подход к разработке информационных систем, использующий последовательный выпуск прототипов системы, жесткие ограничения по времени и вовлечение конечных пользователей системы в ее разработку. После публикации в 1991 г. книги Дж. Мартина "*Rapid Application Development*" (быстрая разработка приложений) этот подход получил широкую известность как *RAD*-технология. Эта технология более всего подходит для разработки интерактивных приложений, в которых функциональные возможности реализуются на уровне пользовательского интерфейса. Четко определяется группа пользователей такого приложения. Большие приложения подвергаются разбиению на более мелкие функциональные компоненты.

В основе *RAD*-технологии лежат следующие положения.

- Пользователи активно участвуют в разработке системы от начала обследования предметной области до внедрения приложения. Несколько представителей пользователей включаются непосредственно в команду разработчиков, представители остальных – периодически участвуют в сессиях по пересмотру результатов работы. Это позволяет устранять недопонима-

ние между разработчиками и будущими пользователями системы.

- Не требуется полного определения требований к системе, детали могут быть добавлены в ходе разработки. Это позволяет сократить длительность этапа анализа и дает разработчикам определенную свободу в определении требований низкого уровня в ходе построения прототипов системы и их обсуждения с конечными пользователями. Выявленные в процессе разработки дополнительные требования ранжируются по важности. В условиях жестких временных ограничений менее приоритетные требования могут быть опущены.
- Система разрабатывается небольшой командой из четырех-шести человек, включая одного-двух представителей пользователей. Члены команды должны быть уполномочены принимать необходимые решения. Во время проектирования состав команды практически не меняется, что позволяет уменьшить необходимость в промежуточной документации.
- Разработка ведется итерациями при тесном вовлечении пользователей на протяжении всего цикла разработки системы. Основную роль играет правило 80/20, которое гласит, что 80 % работы может быть выполнено за 20 % времени, затрачиваемого на всю работу. Это означает, что нет смысла затрачивать усилия на тонкую настройку системы, когда еще до конца не определены основные требования к ней. Каждый шаг должен быть закончен настолько, насколько это необходимо для выполнения следующей работы.
- На срок выпуска каждого прототипа накладываются жесткие ограничения по времени. По истечении установленного срока прототип предъявляется заказчику для обсуждения.
- Тестирование проводится постепенно на протяжении всего жизненного цикла системы.
- Разрабатываемая система разбивается на части, которые бригада из четырех-шести человек способна разработать за три-шесть месяцев. При наличии нескольких команд возможна параллельная разработка системы. В этом случае проводится более тщательный анализ прикладной области.

Одним из самых важных положений является необходимость сотрудничества между всеми участниками проекта. Заказчики должны понимать, что тесные временные рамки проекта могут не позволить разработчикам удовлетворить абсолютно все требования, предъявляемые пользователями к системе, и что-то может быть перенесено в следующий проект. Сильная сторона подхода *RAD* состоит в том, что он позволяет непосредственно в ходе разработки быстро выявить и уточнить, а затем реализовать необходимый набор функциональных возможностей системы, которая действительно будет удовлетворять всем требованиям заказчика на момент ее внедрения.

В настоящее время наиболее прогрессивной методологией создания САПР является методология мультиагентных систем распределенного интеллекта, представляющая собой дальнейшее развитие объектного подхода. Каждый агент рассматривается как активный объект-функция, наполненный данными и знаниями, которые позволяют преобразовать исходную информацию в значения свойств этого объекта. В качестве таких объектов выступают сборочные единицы, детали и их элементы, а также технологические процессы, операции и переходы. Разработка каждого агента ведется спиралевидно в три этапа: проектирование, генерация программных средств и тестирование (см. рис. 1.13). Агенты объединяются в комплексные САПР.

Это - модель *RAD*-технологии, посредством которой пользователи способны самостоятельно создавать системы, не прибегая к помощи программистов-разработчиков.

1.9. Критерии развития САПР

Любая техническая система (ТС), в том числе и САПР, обладает набором характеризующих ее общесистемных свойств. В их число входит группа свойств, рассматриваемых как мера совершенства и прогрессивности систем данного класса. Такие свойства (параметры) принято называть критериями развития. Эти критерии одновременно являются важнейшими показателями качества систем рассматриваемого класса, определяя уровень этих систем по отношению к лучшим отечественным и зарубежным образцам.

Критерии развития обуславливают магистральные направления совершенствования технических систем. Наборы критериев развития различных технических систем во многом совпадают. Причиной такого совпадения является тот факт, что все ТС представляют собой искусственные и, в своем большинстве, человеко-машинные системы. К числу искусственных принадлежат системы, не существующие в природе и создаваемые человеком для удовлетворения своих потребностей. Жизненный цикл любой искусственной системы, как было описано выше, состоит из стадий создания, эксплуатации и развития, а также ликвидации. Каждая из этих стадий характеризуется определенными трудовыми затратами, объем которых и составляет для любой ТС основу критериев развития. При рассмотрении трудовых затрат, связанных с функционированием ТС, различают труд овеществленный, живой и будущий. Под овеществленным понимают труд, затраченный на создание системы. Живой труд связан с эксплуатацией системы, а будущий - с ее развитием и ликвидацией.

На различных стадиях жизненного цикла любой ТС используются материалы, энергия, информация, разнообразные технические средства, связанные со всеми стадиями жизненного цикла ТС. Совокупный учет трудовых затрат, связанных с перечисленными и другими необходимыми элементами, приведенными к единому стоимостному эквиваленту, дает экономические критерии развития ТС.

Наконец, человеческий фактор учитывается комплексом антропологических критериев, связанных с эргономичностью, красотой, безопасностью и экологичностью ТС.

САПР принадлежит к классу ТС информатики, отличающихся от остальных тем, что преобразуемым операндом в них является информация. В связи со спецификой систем информатики ряд критериев развития ТС для них не является актуальным. К их числу относятся критерии, связанные с затратами материалов и энергии, экологичностью и т.д.

Совокупность критериев развития ТС можно разбить на четыре основные группы:

- функциональные;
- технологические;
- экономические;
- эргономические.

Рассмотрим в соответствии с этой классификацией критерии развития САПР.

Функциональные критерии. К числу основных функциональных критериев развития ТС принято относить:

- производительность;
- точность;
- надежность;
- специальные.

Функциональные критерии характеризуют ТС на стадии ее эксплуатации. В этой связи производительность определяет необходимые затраты живого труда. Применительно к САПР - это затраты труда использующих систему конструкторов и технологов. Критерий производительности рассматривается как интегральный показатель уровня развития ТС, который зависит от ряда показателей, являющихся частными функциональными критериями.

Применительно к САПР в их число входят:

- скорость обработки информации;
- параметры, влияющие на интенсивность обработки информации;
- степень автоматизации труда;
- непрерывность процесса проектирования.

Скорость обработки информации применительно к САПР целесообразно охарактеризовать следующими критериями.

Натуральный критерий производительности САПР. САПР предназначены для формирования текстовой и графической конструкторской и технологической документации. Любая документация оформляется на листах определенного формата. Эти форматы стандартизованы, и минимальным стандартным является формат А4 с размерами сторон 210х297 мм. Все остальные стандартные форматы кратны А4.

Таким образом, объем любой технической документации может быть формально измерен количеством форматов А4.

Конструкторские и технологические работы могут иметь различные категории сложности, для учета которых необходимо ввести коэффициент сложности K_c .

Натуральный критерий производительности может быть определен по формуле

$$K_{НП} = \left(\sum_{i=1}^N K_{c_i} N A4_i / T_{q_i} \right) / N,$$

где \sum - оператор сложения; K_{c_i} - безразмерный коэффициент сложности работы i -го проекта; $N A4_i$ - количество листов формата А4 (приведенное) i -го проекта; T_{q_i} - чистое время, затраченное на автоматизированный выпуск указанного количества листов i -го проекта, ч; N - количество проектов.

Натуральный коэффициент производительности измеряется количеством листов А4, выпускаемых в час (лист А4/ч).

Критерий $K_{НП}$ представляет собой положительно определенную величину, возрастающую по мере развития САПР. Актуальность этого критерия является и будет неизменно оставаться весьма высокой.

Информационный критерий производительности САПР. Натуральный критерий производительности прост для понимания и может быть относительно легко измерен. Однако он связан с традиционной методикой оформления документации на бумажных носителях, что в усло-

виях информационно развитого общества не является необходимым. В перспективе ставится цель перехода к безбумажным информационным технологиям. В этой связи натуральный критерий производительности может быть заменен на информационный критерий $K_{ип}$, в котором объем выполненной проектной работы измеряется не количеством листов формата А4, а количеством информации $I_{им}$ в информационной модели проектируемого технического объекта или технологического процесса:

$$K_{ип} = \left(\sum_{i=1}^N K_{ci} I_{имi} / T_{qi} \right) / N,$$

где $I_{имi}$ — количество информации в i -модели, байт.

Единицей информационного критерия производительности является байт в час (байт/ч).

От чего зависит рост производительности САПР? Производительность САПР при прочих равных условиях зависит прежде всего от объема знаний и необходимых данных, заложенных в систему. Под знаниями понимаются правила принятия проектных решений и методики расчета числовых параметров, под данными — данные нормативно-справочной информации и архивные данные разработанных ранее проектов.

К следующей группе частных функциональных критериев относятся параметры, влияющие на интенсивность обработки информации.

Информационный критерий эффективности САПР. Этот критерий является аналогом энергетического коэффициента полезного действия и представляет собой усредненное отношение объема выходной информации к суммарному объему входной и выходной информации:

$$K_{из} = \left(\sum_{i=1}^N I_{имi} / (I_{идi} + I_{имi}) \right) / N,$$

где N — количество проектов; $I_{имi}$ — объем результирующих данных i -го проекта, байт; $I_{идi}$ — объем исходных данных i -го проекта, байт.

Критерий безразмерный, изменяется в диапазоне $0 < K_{из} < 1$, имеет тенденцию к возрастанию. Роль критерия значительна и останется неизменной по мере развития САПР.

Очевидно, что система тем совершеннее, чем меньше, при прочих равных условиях, в нее нужно вводить данных, чтобы получить необходимый проект. Предельным минимумом $I_{ид}$ являются данные технического задания на проектирование изделия или технологического процесса. Рост этого коэффициента зависит от тех же факторов, что и рост производительности САПР.

Критерий совмещения функциональных операций. Критерий имеет смысл для интерактивных САПР и определяет допустимое число одновременно выполняемых на одной рабочей станции функциональных операций. Критерий представляет собой положительное целое число и имеет тенденцию к росту. Актуальность его возрастает. Чтобы этот критерий превысил единицу, необходимо использование многооконного текстового и графического интерфейса с пользователем.

Следующий частный функциональный критерий определяет степень автоматизации труда.

Критерий автоматизации. Критерий равен сумме удельных трудоемкостей проектных

операций, выполненных САПР:

$$K_a = \sum_{i=1}^{N_a} K_{\tau_i},$$

где N_a — количество автоматизированных проектных операций; K_{τ_i} — удельная трудоемкость i -й проектной операции в исходном, неавтоматизированном, процессе проектирования.

Сумма удельных трудоемкостей всех операций равна 1:

$$\sum_{i=1}^N K_{\tau_i} = 1,$$

где M — количество всех проектных операций.

Критерий безразмерный, изменяется в диапазоне $0 < K_a < 1$, имеет тенденцию к возрастанию. Актуальность этого критерия неизменно возрастает.

Для достижения высокого коэффициента автоматизации необходим охват в САПР максимально возможного количества проектных операций с первоочередным включением наиболее трудоемких.

Критерий непрерывности процесса проектирования. Сквозной процесс конструкторско-технологического проектирования прерывается по многочисленным организационно-техническим причинам. Это связано как с переходом от неавтоматизированных проектных процедур и операций к автоматизированным и наоборот, так и с продолжением проектного процесса в других подразделениях и даже предприятиях. В результате общий цикл разработки конструкторско-технологической документации на изделие существенно превышает чистую трудоемкость проектирования на всех этапах. В связи с необходимостью ускорения процессов проектирования и освоения новых изделий, а также нежелательностью омертвления труда, вложенного в незавершенные проекты, следует всемерно уменьшать простой в проектном процессе.

Критерий непрерывности процесса проектирования представляет собой усредненное отношение чистой трудоемкости проектирования к длительности разработки проекта от начала до конца:

$$K_{\Pi} = \left(\sum_{i=1}^N T_{TP_i} / T_{ЦИК_i} \right) / N,$$

где T_{TP_i} — чистая трудоемкость i -го проекта, человеко-час; $T_{ЦИК_i}$ — длительность календарного цикла i -го проекта без учета выходных и праздничных дней, ч; N — количество проектов.

Критерий представляет собой безразмерную положительную величину, имеющую тенденцию к росту. Актуальность этого критерия резко возрастает.

Помимо организационных приемов, связанных с повышением сменности работы проектировщиков, где это возможно, коэффициент резко возрастает при использовании методов сквозного конструкторско-технологического проектирования.

Технологические критерии. Мы рассмотрели функциональные критерии развития САПР. Следующая группа критериев технологические, связанные с характеристикой овеществленных и будущих трудозатрат на стадиях создания, а также развития и адаптации систем при-

менительно к конкретным производственным условиям.

Критерий трудоемкости разработки САПР. Критерий равен отношению суммарной трудоемкости T_C разработки и подготовки к эксплуатации системы к главному показателю ее эффективности, в качестве которого выступает натуральный или информационный показатель производительности:

$$K_{TH}=T_C/K_{HK} \quad \text{или} \quad K_{TH}=T_C/K_{ид}.$$

Критерий представляет собой удельную трудоемкость создания САПР на единицу получаемой эффективности и является положительно определенной и монотонно убывающей во времени величиной. Актуальность этого критерия была и остается весьма высокой и неизменной. Для уменьшения этого критерия необходимо стремиться:

- к инвариантности программных средств САПР вне зависимости от функционального назначения систем;
- к использованию при разработке в САПР и подготовке их к эксплуатации инструментальных средств автоматизации разработки программно-информационного обеспечения.

Критерий технологических возможностей. Критерий отражает простоту разработки САПР и подготовки ее к эксплуатации на конкретном предприятии. Он является безразмерной величиной и определяется по формуле:

$$K_{TB}=(K_C \cdot A_C + K_Y \cdot A_Y + K_{II} \cdot A_{II} + K_H \cdot A_H)/(A_C + A_Y + A_{II} + A_H)$$

Здесь A_C — объем стандартных и покупных блоков, Кбайт; A_Y — объем унифицированных блоков, Кбайт; A_{II} — объем настроечной информации, Кбайт; A_H — объем нестандартных блоков, подлежащих разработке, Кбайт; K_C, K_Y, K_{II}, K_H — весовые коэффициенты, причем $K_C = 1, K_C > K_Y > K_{II} > K_H$ (например, $K_Y = 0.8, K_{II} = 0.5, K_H = 0.05$).

Критерий технологических возможностей изменяется на отрезке $0 < K_{TB} < 1$, улучшение критерия связано с увеличением его значения.

В информатике принято различать старую и новую информационные технологии. Для старой технологии характерно доминирующее влияние наименее эффективной компоненты $A_H \gg A_C, A_Y, A_{II}$, что не позволяло добиться увеличения K_{TB} . Новая информационная технология (НИТ) характеризуется тем, что $A \rightarrow 0$. Доминирующее влияние при создании САПР приобретают компоненты A_Y и A_C , а при подготовке к эксплуатации в конкретных производственных условиях — A_i . Отсюда следует, что K_{TB} при использовании НИТ как минимум на порядок превышает соответствующий коэффициент при старой информационной технологии.

Экономический критерий. Экономический критерий развития САПР служит для комплексного стоимостного учета положительного эффекта автоматизации проектирования и основных затрат. В качестве экономического критерия принято использовать величину годового экономического эффекта от использования САПР, который измеряется в тысячах рублей в год (тыс.руб./год) и определяется по формуле

$$K_Э = D_C + Э_K - (D_K + K_{e2}) \cdot E_{нв}$$

где D_C — общее изменение себестоимости проектирования в расчетном году;

$Э_K$ — годовая экономия от повышения качества проектных решений; D_K — дополнительные капитальные затраты в проектировании, связанные с созданием и внедрением САПР; K_{e2} — предпроизводственные затраты на создание САПР;

E_H — нормативный коэффициент сравнительной экономической эффективности капитальных вложений.

Критерий может принимать как положительные, так и отрицательные значения и имеет тенденцию к возрастанию. Актуальность критерия растет.

Составляющая D_K критерия тесным образом связана с производительностью САПР, \mathcal{E}_K — с объемом передовой нормативно-справочной информации системы, K_{e2} — с трудоемкостью разработок САПР. Все эти аспекты были рассмотрены выше.

Новой является компонента D_K — дополнительные капитальные затраты на создание САПР. Здесь наиболее существенным фактором является стоимость комплекса средств вычислительной техники.

Критерий эргономичности. Критерий входит в группу антропологических критериев, обеспечивающих наибольшее приспособление систем к человеку, снижение дискомфорта и повышение положительных эмоций. Поскольку САПР является человеко-машинной системой, важность этого критерия возрастает. *Эргономичность* — это свойство системы человек—машина изменять свою эффективность в зависимости от степени использования возможностей человека-оператора.

Критерий эргономичности САПР равен отношению реализуемой эффективности системы человек—машина к максимально возможной эффективности этой системы [15]. Он представляет собой зависящую от времени монотонно возрастающую функцию, стремящуюся к единице. Критерий эргономичности можно интерпретировать как коэффициент полезного действия человека в системе человек—машина.