

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН  
ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
**Авиакосмический факультет**  
**Кафедра: «Конструкция и проектирование летательных аппаратов»**



**А.Х. Султанов**

## **К О Н С П Е К Т Л Е К Ц И Й**

**По курсу**  
**«Системы автоматизированного проектирования самолетов»**

для направления образования: 520804 «Конструкция и проектирование летательных аппаратов» магистратуры

ТАШКЕНТ – 2002 г.

*УДК 629.7.01*

*Составитель: Зав. каф. «КиПЛА» ТГАИ, к.т.н., доц. Султанов А.Х.*

*Рецензент: Зам. начальника ОКО ГАО ТАПОиЧ,  
конструктор I-<sup>ой</sup> категории Литвинов Б.А.*

Конспект лекций по курсу «САПР самолетов», предназначен для студентов-магистрантов, обучающихся по специальности образования 5А520804 «Конструкция и проектирование летательных аппаратов».

Содержание конспекта лекций состоит из 5-ти тем. Первая тема знакомит студентов с задачами САПР, требованиями и принципами её разработки, комплексом средств автоматизации проектирования. Методологии автоматизированного проектирования современных самолетов посвящена тема – II, а содержание темы – III, составляет методология разработки САПР. Далее достаточно глубоко рассматриваются вопросы автоматизированного формирования облика пассажирского самолета в САПР (тема - IV) и вопросы оптимизации системы магистральных самолетов на этапе формирования технического задания (тема – V).

*Конспект лекций обсужден и одобрен методическим советом  
Авиакосмического факультета ТГАИ.*

*Протокол №10<sup>а</sup> от 5 июля 2003 г.*

## СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
<b>ТЕМА I. САПР НОВАЯ ФОРМА ОРГАНИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ</b> .....	<b>4</b>
Лекция №1. Определение и задачи САПР. Структура САПР. ....	4
Лекция №2. Требования к САПР и принципы ее разработки. ....	8
Лекция №3. Комплекс средств автоматизированного проектирования. Классификация САПР. ....	11
<b>ТЕМА II. МЕТОДОЛОГИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ</b> .....	<b>21</b>
Лекция №4. Этапы и процедуры процесса проектирования, особенности автоматизированного проектирования, проблемы декомпозиции самолета. ....	21
Лекция №5. Проблемы моделирования, типы проектных моделей. ....	31
Лекция №6. Постановка задачи оптимального проектирования. Методы оптимизации проектных решений. ....	42
<b>ТЕМА III. МЕТОДОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ САПР</b> .....	<b>48</b>
Лекция №7. Основные положения технологии автоматизации проектирования. ....	48
Лекция №8. Анализ структуры и схемы функционирования САПР при выполнении расчетных задач синтеза проектного решения. ....	63
Лекция №9. Разработка альтернативных вариантов САПР. ....	72
Лекция №10. Техничко-экономическая оценка и планирование процесса создания САПР. ....	85
<b>ТЕМА IV. АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ОБЛИКА ПАССАЖИРСКОГО САМОЛЕТА В САПР</b> .....	<b>105</b>
Лекция №11. Постановка задачи проектирования. Описание алгоритма формирования облика самолета. ....	105
Лекция №12. Описание структуры программ формирования облика самолёта в САПР. ....	116
Лекция №13. Описание структуры блоков, предназначенных для расчёта характеристик самолёта. ....	123
Лекция №14. Оптимизация параметров ближнего магистрального пассажирского самолета. ....	129
<b>ТЕМА V. ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ МАГИСТРАЛЬНЫХ САМОЛЕТОВ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ</b> .....	<b>134</b>
Лекция №15. Особенности оптимизации самолетов ГА на этапах формирования ТЗ. Математическая модель системы. ....	134
Лекция №16. Анализ решения модельных задач оптимизации систем самолетов ГА. ....	151
Лекция №17. Анализ численного решения задачи оптимизации парка магистральных самолетов ГА. ....	161
Лекция №18. Влияния показателя эффективности на оптимальный облик самолетов ГА. ....	173
Литература .....	179

# **ТЕМА I. САПР НОВАЯ ФОРМА ОРГАНИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

## **ЛЕКЦИЯ №1**

**Тема: ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ЗАДАЧИ САПР. СТРУКТУРА САПР.**

### **План лекции:**

- 1. САПР - новая форма организация процесса проектирования.**
- 2. Задачи САПР.**
- 3. Структура САПР.**

В настоящее время достигнуты значительные результаты в решении таких сложных комплексных задач, как автоматизация проектно-конструкторских работ. В НИИ и ОКБ созданы, развиваются и совершенствуются САПР. Их появление стало возможным благодаря разработки теоретических основ проектирования, успехом в области вычислительной математики, программирование и собственно вычислительной техники. Именно в САПР удастся наиболее полно реализовывать следующие важнейшие для проектирования возможности ЭВМ:

1. быстрое и эффективное выполнение большого числа математических операции;
2. хранение и передачу большого объема информации;
3. визуализацию результатов проектирования с помощью средств машинной графики;
4. общение проектировщика с ЭВМ в режиме диалога, что обеспечивают свойственную проектированию непрерывность творческого процесса.

Автоматизация проектирования относится к основным направлениям научно-технического прогресса и призвано обеспечить выполнение возрастающего объема проектно-конструкторских работ в приемлемые сроки с помощью ограниченных людских и материальных ресурсов.

Применение САПР позволяет в 3...5 раз сократить время проектирования ЛА и в 4...6 раз - время подготовки их производства. Применение САПР обеспечивает существенное повышение качества и технико-экономического уровня проектируемых изделий.

### **САПР - новая форма организация процесса проектирования.**

Современный этап развития авиационной техники характеризуется значительным усложнением всех типов самолетов и соответственно большими абсолютными затратами времени и ресурсов на их создание. Так, длительность процесса создания современных самолетов, от замысла до первого полета, составляет 3...4 года, а при разработке принципиально новых самолетов - достигает 6...8 лет. Значительно возросла и стоимость самолетов (600...1000 дол/(кг  $m_{пуст}$ )). В таких условиях, возросла и цена возможных ошибок

проектирования (создания), особенно на предварительных этапах - при формировании технического задания и предэскизного проектировании (аванпроект). [Примеры необоснованных затрат на проектирование и создание: Ту-144, Ан-124].

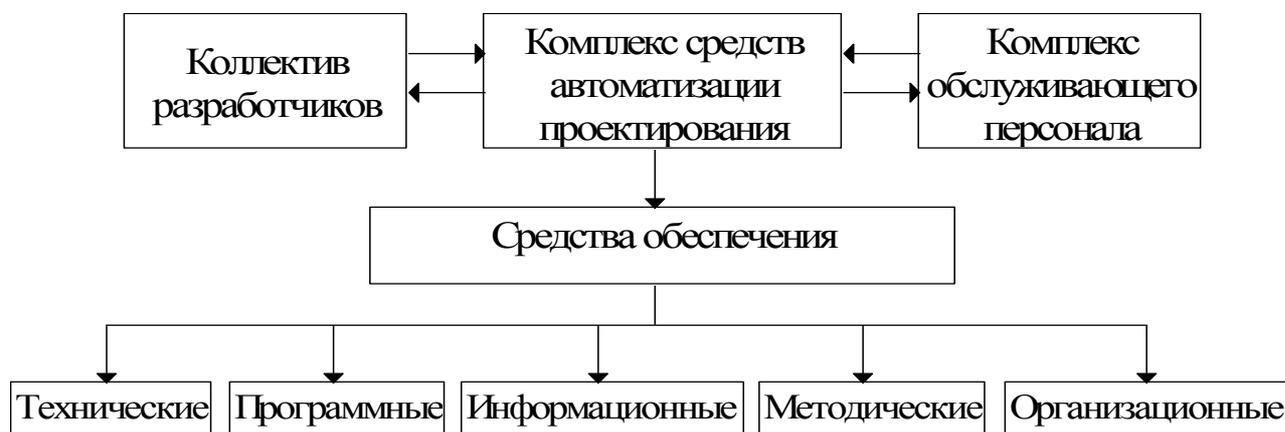
Еще одним важным фактором является то, что в условиях острой конкуренции, постоянно сокращается время морального устаревания самолетов, и следовательно требуется постоянное обновление парка самолетов новыми. Стремление достигнут и превзойти уровень лучших мировых образцов диктует необходимость увеличения объема и повышения качества проектно-конструкторских работ (ПКР).

По данным специалистов, для обеспечения конкурентно способности на мировом рынке объем ПКР должен возрастет примерно в 10 раз, каждые 10 лет. По этому, возникла настоятельная необходимость поиска путей и средств существенного повышения производительности труда конструкторов при одновременном улучшении качества ПКР.

За последние 15-20 лет интенсивное использование вычислительной техники, разработка эффективных методов математического моделирования привели к созданию формализованных моделей элементов процесса проектирования.

В настоящее время совершается переход от математического моделирования и автоматизации отдельных элементов процесса проектирования к созданию интегрированных систем автоматизированного проектирования (САПР) ЛА.

В соответствии с ГОСТ 23501.0-79 САПР представляет собой организационно-техническую систему, состоящую из комплекса средств автоматизации проектирования, взаимосвязанного с подразделениями проектной организации, выполняющую автоматизированное проектирование (АП).



**Рис. 1.1. Укрупненная структура САПР.**

Основу САПР составляет комплекс средств АП. Функционирование системы осуществляется в процессе взаимодействия комплекса с коллективом разработчиков, а также обслуживающего персонала.

Основная функция САПР - осуществление АП на всех стадиях проектирования объектов и их составных частей на основе применения моделей, автоматизированных проектных процедур и средств вычислительной техники.

*Автоматизированным* называется проектирование, при котором отдельные преобразования описаний объекта и (или) алгоритмы его функционирования, а также представление описаний на различных языках осуществляются путем взаимодействия человека с ЭВМ.

САПР, в которых информационно и организационно объединены все стадии разработки проекта от ввода первичного описания объекта до выдачи проекта с необходимым комплектом документации, называются *интегрированными*. Как правило, при создании таких САПР должна предусматриваться возможность их взаимосвязи с другими автоматизированными системами, используемыми при создании новых образцов техники. К таким системам относятся автоматизированные системы научных исследований (АСНИ), автоматизированные системы управления (АСУ), автоматизированные системы технологической подготовки производства (АСТПП) и др. Именно при таком комплексном подходе достигается наибольший эффект от внедрения автоматизации.

Задачей САПР является максимально возможная автоматизация значительной части процессов, реализующих проектирование сложных технических объектов; не только вычислительных процессов, но и таких как:

накопление и обработка информации о проектируемом изделии и его подсистемах;

разработка вариантов проектных решений;

отбор рациональных вариантов для дальнейшей проработки;

оформление решений и передача их на нижние уровни для дальнейшей детализации и на верхние уровни осуществления контроля принятия решений;

выпуск технической документации; управление ходом процесса разработки проектируемого изделия.

Целью создания САПР является повышение качества и технико-экономического уровня проектируемых объектов, повышение производительности труда проектировщиков, сокращение сроков, уменьшение стоимости и трудоемкости проектирования.

Перспективы повышения качества разрабатываемых с помощью САПР проектов основываются на:

совершенствовании методов проектирования, а частности использовании методов многовариантного проектирования и оптимизации для поиска рациональных вариантов и принятия решений;

повышении доли творческого труда проектировщиков путем освобождения их от рутинных, не требующих высокой квалификации работ;

повышении качества проектной документации;

совершенствовании управления процессом разработки проектов.

Повышение производительности труда достигается путем:

значительно ускорения выполнения расчетных операций и операций по обработке графической информации;

увеличения скорости передачи информации между подразделениями проектной организации и сокращения сроков ее согласования;

ускорения процесса подготовки проектной документации;

частичной замены натуральных экспериментов и макетирования моделированием на аналого-цифровых вычислительных комплексах;

совершенствования организации труда специалистов, занятых рутинной работой (вычисление, обработка текстовой и графической информации), а также специалистов информационно-справочных служб;

уменьшения объема испытаний и доводки опытных образцов авиационной техники вследствие повышения качества проектирования и уровня прогнозирования ожидаемых результатов проектирования.

При определении эффективности применения САПР следует, однако учитывать и неизбежные затраты на создание, эксплуатацию и развитие САПР. Эти затраты особенно велики на начальных этапах внедрения САПР. Однако их можно снизить, например, путем концентрации усилий для создания типовой САПР отрасли и ее дальнейшего распространения на всех ее предприятиях. Значительная экономия достигается благодаря созданию централизованного обслуживания комплекса технических средств, отраслевых и межотраслевых фондов алгоритмов и программ, а в перспективе - отраслевого банка данных.

### **Контрольные вопросы**

1. Применение САПР.
2. Что представляет собой САПР?
3. Цели и задачи САПР.
4. На чем основывается повышения качества проектов разрабатываемых с помощью САПР?

ЛИТЕРАТУРА: [1].

## ЛЕКЦИЯ №2

### Тема: ТРЕБОВАНИЯ К САПР И ПРИНЦИПЫ ЕЕ РАЗРАБОТКИ.

#### План лекции:

#### 4. Требования к САПР.

#### 5. Принципы разработки САПР.

1. Одним из важнейших требований, предъявляемых и вновь создаваемым (интегрированным) САПР, заключается в возможности их использования на всех стадиях разработки проекта, начиная с анализа и разработки ТЗ, кончая выпуском комплекса технической документации, необходимой для изготовления самолета. Однако, это весьма сложная задача. Анализ иерархической структуры проектирующей системы указывает на возможность разделения общей САПР самолетов на отдельные подсистемы, соответствующие этапам проектирования. Процесс проектирования самолета может быть представлен в виде многоуровневой совокупности операций, укрупненно изображенных на рис. 1.2.

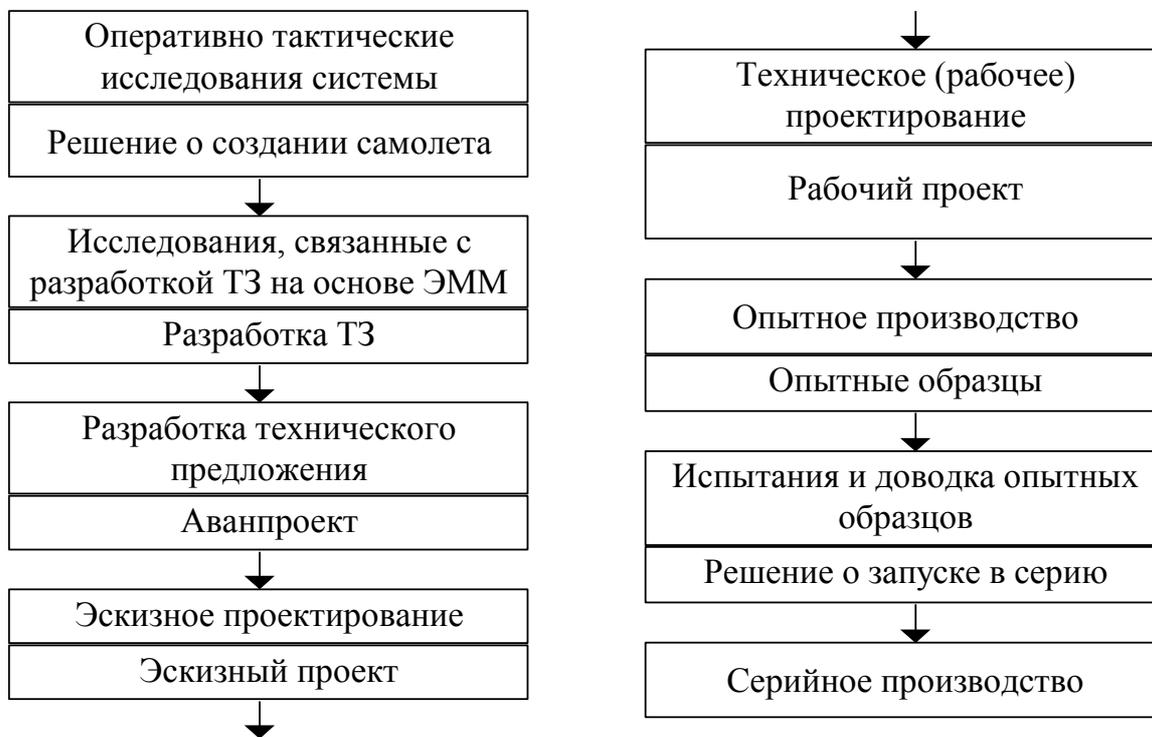
По мере накопления опыта решения задач на отдельных этапах проектирования, развития теоретических основ построения проектирующих систем, совершенствования программного и аппаратного оснащения появляется возможность к созданию интегрированных САПР самолетов.

2. Разрабатывая отдельные подсистемы, следует с самого начала обеспечивать их аппаратную, программную и информационную совместимость для всех этапов проектирования.

3. Очень важным требованием является создание комфортных условий работы пользователя в системе. Для этого работу человека с системой необходимо осуществлять в диалоговом режиме с тем, чтобы проектировщик оперативно получал результаты решения, обеспечивая непрерывность процесса проектирования.

4. Язык общения с системой обязан быть привычным для проектировщика. В системе должна быть предусмотрена возможность обеспечения пользователей всей необходимой для проектирования информацией: справочной, архивной, оперативной и т.д.

5. Процесс проектирования является коллективным, поэтому следующим важным требованием, предъявляемым к САПР является обеспечение возможности параллельного ведения нескольких проектных задач с автоматическим распределением ресурсов системы между заданиями, а также совместного решения одной задачи несколькими исполнителями.



**Рис. 2.2. Укрупненная схема этапов проектирования.**

6. Кроме того, САПР должна обеспечивать возможность реализации различных стратегий процесса проектирования и процедур принятия решений, высокую надежность и возможность обучения пользователей в режимах системы.

Сформулируем основные принципы разработки САПР:

1. Принцип включения предусматривает возможность включения САПР в более сложную систему - проектную организацию, которая и определяет требования и ее созданию, функционированию и развитию.
2. Принцип системного единства заключается в том, что связи между входящими в нее подсистемами обеспечивают целостность системы.
3. Принцип развития состоит в том, что САПР разрабатывают с учетом возможности ее постоянного развития путем расширения, совершенствования и обновления компонентов (подсистем, модулей) САПР.
4. Принцип комплексности предполагает обеспечение согласования и связанности отдельных элементов и всего объекта в целом на всех стадиях проектирования с помощью соответствующих компонентов САПР.
5. Принцип совместимости заключается в обеспечении совместного функционирования всех подсистем САПР и сохранении открытой структуры системы в целом.
6. Принцип информационного единства состоит в том, что в подсистемах и компонентах САПР необходимо использовать единую систему терминов, символов, условных обозначений, проблемно-ориентированных языков программирования и способов представления информации, установленных в отрасли соответствующими нормативными документами.

7. Принцип стандартизации заключается в проведении унификации, типизации и стандартизации подсистем и компонентов а также в установлении правил с целью упорядочения деятельности в области создания и развития САПР.
8. Весьма важным принципом разработки САПР является обеспечение ее эргатичности, т.е возможности для человека-проектировщика играть активную роль в системе: в режиме оперативного диалога изменять входные данные и получать ответы на интересующие его вопросы, принимать решение по ходу выполнения задачи САПР.

Процесс разработки проекта самолета - творческий процесс и он никогда не может быть до конца формализован. Поэтому, успех проектирования в огромной степени зависит от таких интеллектуальных качеств человека, как интуиция, изобретательность, исследовательские и познавательные способности, умение принимать решения в неформальных ситуациях.

### **Контрольные вопросы**

5. Требования к САПР.
6. Основные принципы разработки САПР.
7. Процесс разработки проекта самолета.

ЛИТЕРАТУРА: [1].

### ЛЕКЦИЯ №3

## Тема: КОМПЛЕКС СРЕДСТВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ. КЛАССИФИКАЦИЯ САПР.

### План лекции:

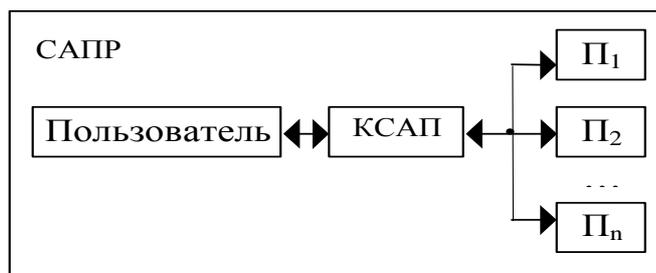
#### 6. Виды обеспечения САПР.

#### 7. Классификация САПР.

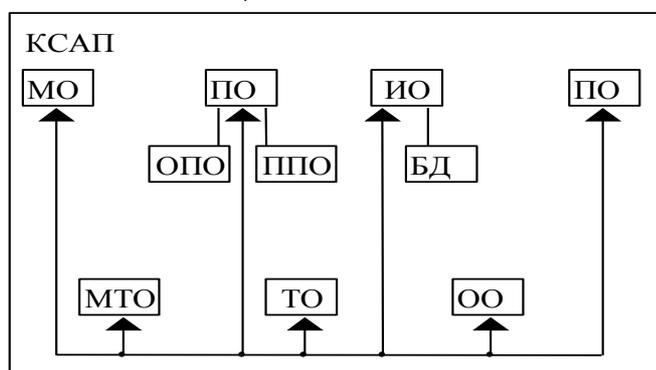
*Система автоматизированного проектирования (САПР)* - организационно-техническая система, состоящая из комплекса средств автоматизации проектирования (КСАП), взаимосвязанного с необходимыми подразделениями проектной организации  $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_n$  или коллективом специалистов (пользователей системы) и выполняющая автоматизированное проектирование (рис. 3.1, а). Соответственно *система автоматического проектирования* выполняет автоматическое проектирование без участия человека.

**Виды обеспечения САПР.** Комплекс средств автоматизации проектирования (КСАП)—это совокупность различных видов обеспечения автоматизированного (автоматического) проектирования (АП), необходимых для выполнения АП (рис. 3.1, б).

*Математическое обеспечение (МО)* АП — это совокупность математических методов (ММет), математических моделей (ММ) и алгоритмов проектирования (АлП), необходимых для выполнения АП, представленных в заданной форме (рис. 3.2, а).



а)



б)

**Рис. 3.1. Система автоматизированного (автоматического) проектирования (а) и комплекс средств автоматизированного (автоматического) проектирования (б)**

*Техническое обеспечение (ТО) АП* — это совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих технических средств, предназначенных для выполнения АП. Пример ТО АП ЭВА показан на рис. 3.2, б. Технические средства (ТС) выполняют определенную функцию в САПР и представляют собой компоненты ТО. Вообще говоря, компонент САПР—это элемент средства обеспечения, выполняющий определенную функцию. К ТС относятся устройства вычислительной и организационной техники, средства передачи данных, измерительные и другие устройства.

Различают следующие группы ТС:

*подготовка и ввод данных.* Группа предназначена для автоматизации подготовки и редактирования данных при вводе в ЭВМ алфавитно-цифровой и графической информации. Группа дает возможность кодирования информации, нанесения данных на машинные носители, ввода данных в ЭВМ, визуального контроля и редактирования данных при вводе информации;

*передача данных.* Группа предназначена для обеспечения дистанционной связи технических средств по телефонным, телеграфным и специальным каналам связи;

*программная обработка данных.* Группа включает в себя универсальные или специализированные ЭВМ, обеспечивающие прием цифровых данных с устройства ввода или каналов связи, их программной обработки, накопления и вывода на машинные носители, устройства отображения и каналы связи. Позволяет изменить производительность путем наращивания ЭВМ, использовать мультипрограммный и диалоговый режимы работы;

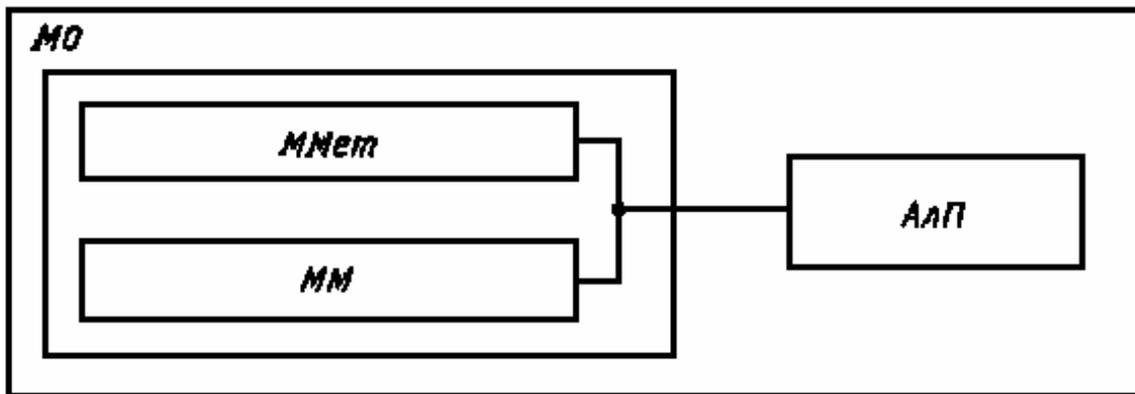
*отображение и документирование данных.* Группа предназначена для оперативного представления и документирования проектных решений. Здесь используют печатающие устройства и графопостроители, микрофильмы, микрофиши и устройства отображения визуальной информации;

*архив проектных решений.* Группа предназначена для обеспечения хранения, контроля, восстановления и размножения данных о проектных решениях и справочных данных.

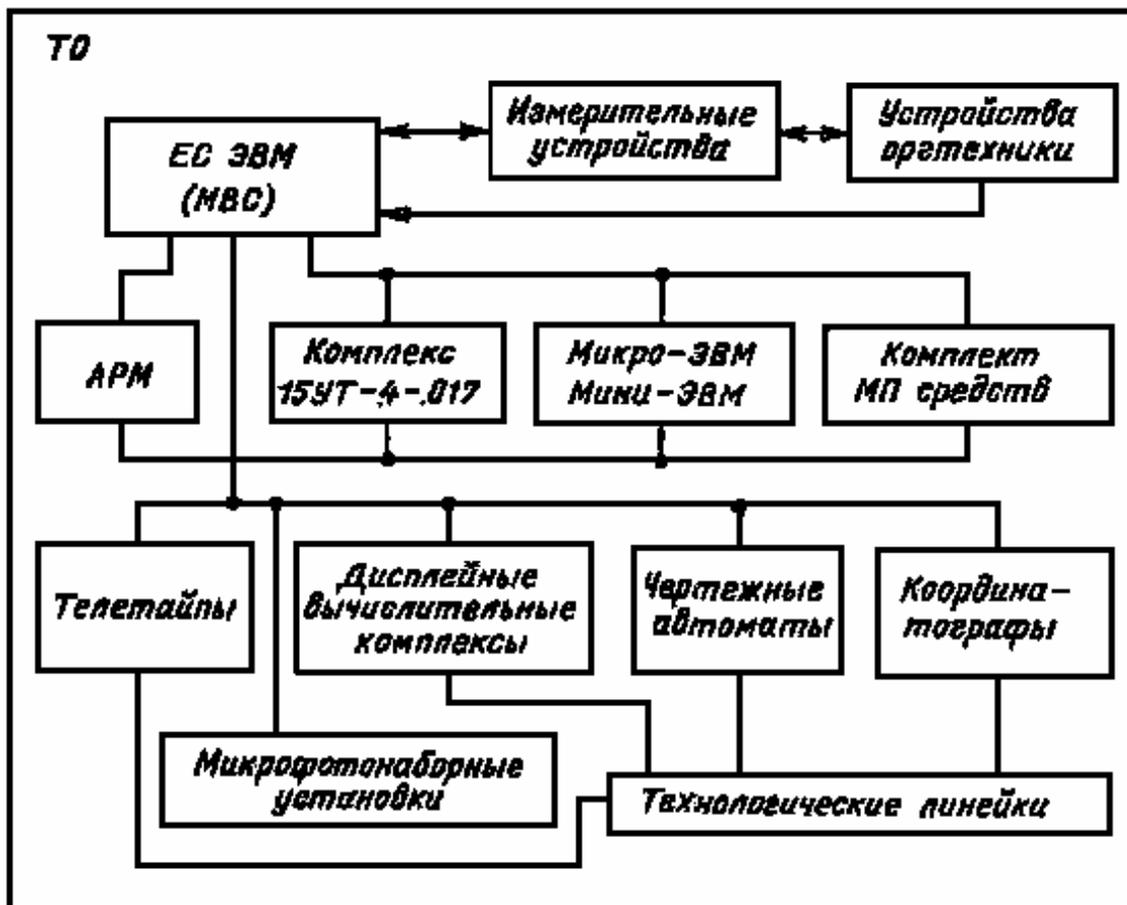
Компоненты ТО создаются на базе серийных средств вычислительной техники общего назначения и специализированных технических средств. В настоящее время преимущественно используют двухуровневую иерархическую структуру комплекса ТС САПР. Структура включает в себя компоненты центрального вычислительного комплекса (ЦВК) и компоненты терминального комплекса (ТК). Центральный ВК строят на основе ЭВМ, вычислительных систем и сетей ЭВМ коллективного пользования. Терминальный комплекс САПР строят на основе автоматизированных рабочих мест (АРМ) терминальных станций с использованием микропроцессоров, мини- и микро-ЭВМ.

*Программное обеспечение (ПО) АП* — совокупность машинных программ, необходимых для выполнения АП, представленных в заданной

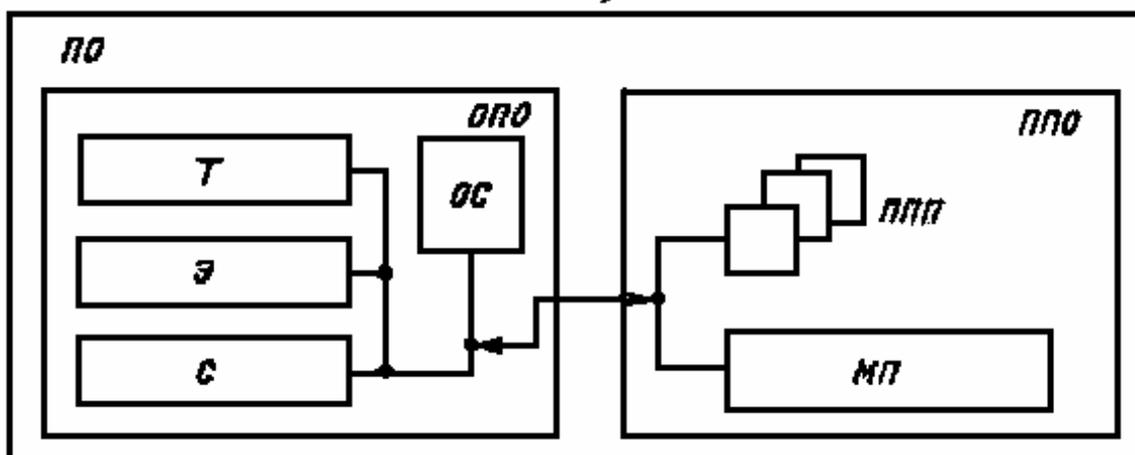
форме. Часть ПО АП, предназначенную для управления проектированием, называют *операционной системой (ОС) АП*.



а)



б)





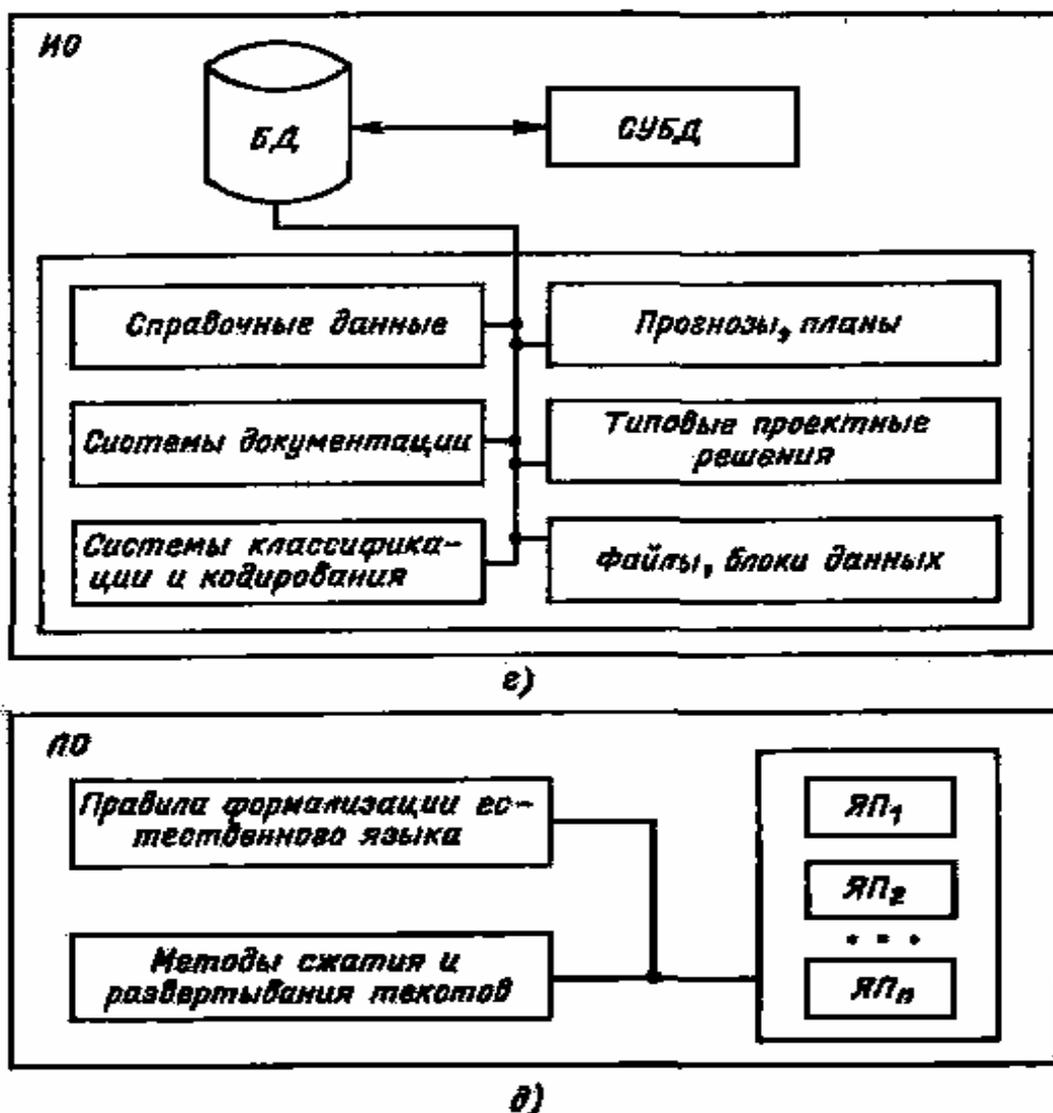


Рис. 3.2. Математическое (а), техническое (б), программное (в), информационное (г) и лингвистическое (д) обеспечения

Совокупность машинных программ (МП), необходимых для выполнения какой-либо проектной процедуры и представленных в заданной форме, называют *пакетом прикладных программ* (ППП).

Компонентами ПО являются документы с текстами программ, программы на всех видах носителей, эксплуатационные документы. Программное обеспечение разделяют на общесистемное (ОПО) и прикладное (ППО). Компонентами ОПО являются трансляторы (Т) с алгоритмических языков, эмуляторы (Э), супервизоры (С) и др. Компонентами ППО являются программы (МП) и пакеты прикладных программ для АП (рис. 3.2, в).

*Информационное обеспечение* (ИО) АП — совокупность сведений, необходимых для выполнения АП, представленных в заданной форме. Основной частью ИО являются *автоматизированные банки данных*, которые состоят из баз данных (БД) САПР и систем управления базами данных (СУБД). В ИО входят нормативно-справочные документы, задания государственных планов, прогнозы технического развития, типовые проектные решения, системы классификации и кодирования технико-экономической информации,

системы документации типа ЕСКД, ЕСТД, файлы и блоки данных на машинных носителях, фонды нормативные, плановые, прогнозные, типовых решений, алгоритмов и программ и т. п. (рис. 3.2, з).

Управление автоматизированным банком данных осуществляют проектировщики, при этом необходимо обеспечить целостность, правильность данных, эффективность и функциональные возможности СУБД. Проектировщик организует и формирует БД, определяет вопросы использования и реорганизации. База данных составляется с учетом характеристик объектов проектирования, процесса проектирования, действующих нормативов и справочных данных. При создании автоматизированных банков данных одним из основных является принцип информационного единства, заключающийся в использовании единой терминологии, условных обозначений, символов, единых проблемно-ориентированных языков, способов представления информации, единой размерности данных физических величин, хранящихся в БД. Автоматизированные банки данных должны обладать гибкостью, надежностью, наглядностью и экономичностью. Гибкость заключается в возможности адаптации, наращивания и изменения средств СУБД и структуры БД. Реорганизация БД не должна приводить к изменению прикладных программ. Для одновременного обслуживания пользователей должен быть организован параллельный доступ к данным. При использовании интерактивных методов проектирования необходимо использовать режим диалога. Все версии СУБД должны генерироваться в соответствии с имеющимся комплексом ТС САПР. Доступ к информации БД должен обеспечиваться пользователями различных уровней.

Для надежности необходимо иметь возможность восстановления информации и ПО в случае разрушения, обеспечивать стандартные реакции на ошибочный запрос. Для наглядности информация должна представляться в обычной и удобной для пользователя форме. Для обеспечения экономичности необходимо исключить неоправданное дублирование данных, обеспечить автоматизацию сбора статистических данных о содержании и использовании информации банка для организации эффективного распределения памяти, обеспечить наличие средств для тиражирования баз данных.

*Лингвистическое обеспечение (ЛО) АП* — совокупность языков проектирования (ЯП), включая термины и определения, правила формализации естественного языка и методы сжатия и развертывания текстов, необходимых для выполнения АП, представленных в заданной форме (рис. 3.2, д).

*Методическое обеспечение (МТО)* — совокупность документов, устанавливающих состав и правила отбора и эксплуатации средств обеспечения АП, необходимых для выполнения АП. Отметим, что в некоторых работах и документах методическое обеспечение понимается более широко:

в качестве компонентов включает МО и ЛО.

*Организационное обеспечение (ОО) АП*—совокупность документов, устанавливающих состав проектной организации и ее подразделений, связи между ними, их функции, а также форму представления результата

проектирования и порядок рассмотрения проектных документов, необходимых для выполнения АП. Компонентами ОО САПР являются методические и руководящие материалы, положения, инструкции, приказы и другие документы, обеспечивающие взаимодействие подразделений проектной организации при создании и эксплуатации САПР.

В настоящее время при создании ЭВМ пятого поколения с перестраиваемой архитектурой и коммутацией, способных принимать решения в условиях расплывчатости и неопределенности, перспективными являются САПР, позволяющие адаптироваться к внешним условиям проектирования и имеющие возможность настраиваться на заданный класс создаваемых объектов.

*Интегрированной называют САПР, имеющую альтернативное ПО и ОС АП и позволяющую выбирать совокупность машинных программ применительно к заданному объекту или классу объектов проектирования.*

*Функционирование САПР* — выполнение проектирования в САПР в соответствии с заданным алгоритмом проектирования. Функционирование САПР должно обеспечивать получение проектных решений, т. е. промежуточных или конечных описаний объекта проектирования, необходимых для его окончания. Результатом проектирования в САПР считают совокупность законченных проектных решений, удовлетворяющих ТЗ и необходимых для создания объекта проектирования.

*Алгоритм функционирования САПР* — совокупность предписаний, необходимых для функционирования САПР.

*Управление САПР* — совокупность воздействий извне, предусмотренных алгоритмом функционирования САПР.

**Классификация САПР.** В общем смысле классификация — система соподчиненных понятий, часто представляемая в виде различных схем, таблиц и используемая как средство для установления связей между этими понятиями или классами объектов, а также для точной ориентировки в многообразии понятий или соответствующих объектов. Классификация фиксирует место объекта в системе, которая указывает на его свойства. В связи с этим она служит средством хранения и поиска информации, содержащейся в ней самой. Классификация создает условия для разработки технически обоснованных норм обеспечения процесса создания, функционирования и стандартизации в области САПР.

Системы автоматизированного проектирования классифицируются по типу, разновидности и сложности объекта проектирования; уровню и комплектности автоматизации проектирования; характеру и числу выпускаемых проектных документов; числу уровней в структуре технического обеспечения (рис. 3.3). На этом классификация первого уровня закончена. Рассмотрим классификацию второго иерархического уровня.

По типу объекта проектирования различают САПР, (рис. 3.4, а): изделий машиностроения и приборостроения; технологических процессов в машиностроении и приборостроении; объектов строительства; организационных систем.

Под *организационной системой* понимают совокупность, состоящую из коллектива специалистов и комплекса средств, взаимодействий и взаимосвязей между ними и с внешней средой и алгоритма процесса проектирования, необходимого для выполнения АП.

По разновидности объекта проектирования можно различать САПР ЭВА, САПР РЭА, САПР атомной станции, САПР ракетной системы и т. п.

По сложности объекта проектирования различают САПР (рис. 3.4,6): простых объектов, содержащих до  $10^2$  составных частей; объектов средней сложности, содержащих от  $10^2$  до  $10^3$  составных частей; сложных объектов, содержащих от  $10^3$  до  $10^4$  составных частей; очень сложных объектов, содержащих от  $10^4$  до  $10^6$  составных частей; объектов очень высокой сложности, содержащих  $10^6$  и более составных частей.

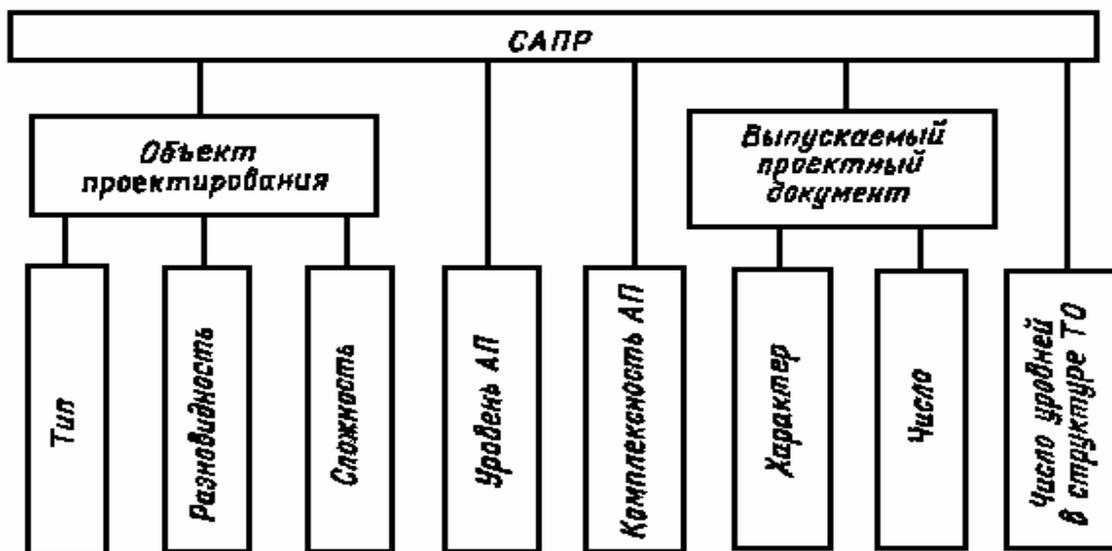


Рис. 3.3. Классификация САПР

Следовательно, САПР ТЭЗ современных ЕС ЭВМ относится к САПР простых объектов, а САПР многопроцессорных вычислительных систем на сверхбольших интегральных микросхемах — к САПР очень сложных объектов.

По уровню автоматизации проектирования различают САПР (рис. 3.5, а) низкоавтоматизированные, в которых число автоматизированных проектных процедур (АПП) составляет 25 % общего числа проектных процедур; среднеавтоматизированные,—от 25 до 50% общего числа проектных процедур, высокоавтоматизированные от 50 до 75 %. В этих системах применяют методы многовариантного оптимального проектирования. Например, в гибких автоматизированных производствах (ГАП) для эффективности результатов необходимо использовать САПР средне- и высокоавтоматизированного проектирования.

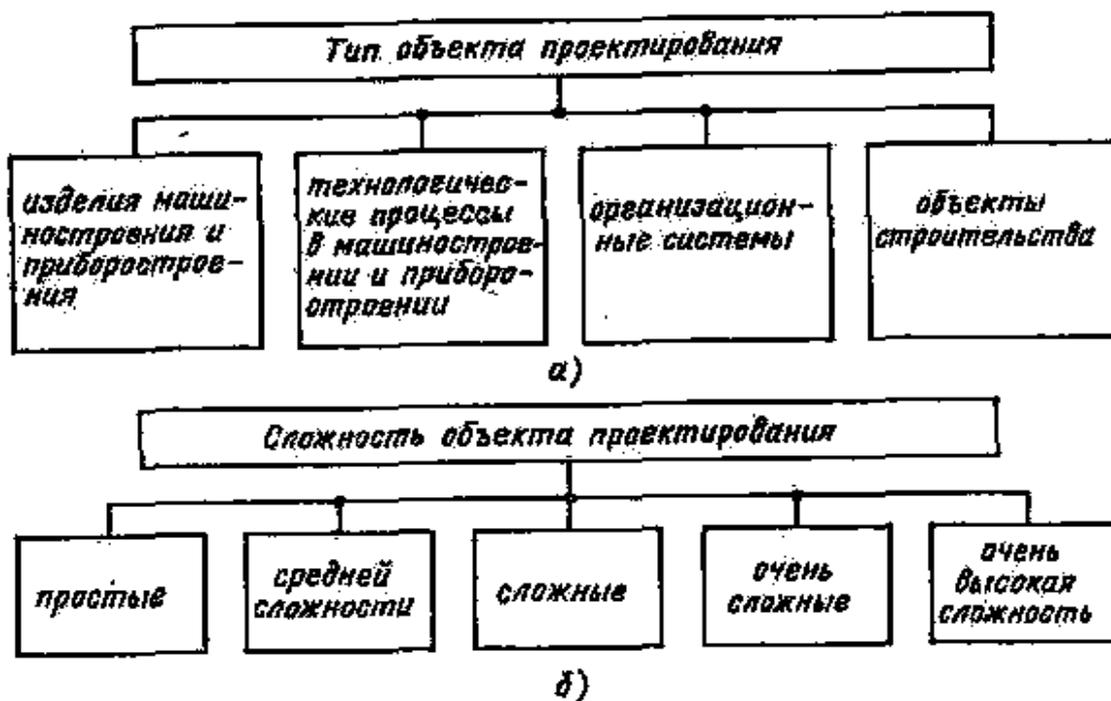


Рис. 3.4. Классификация САПР по типу (а) и сложности (б) объекта проектирования

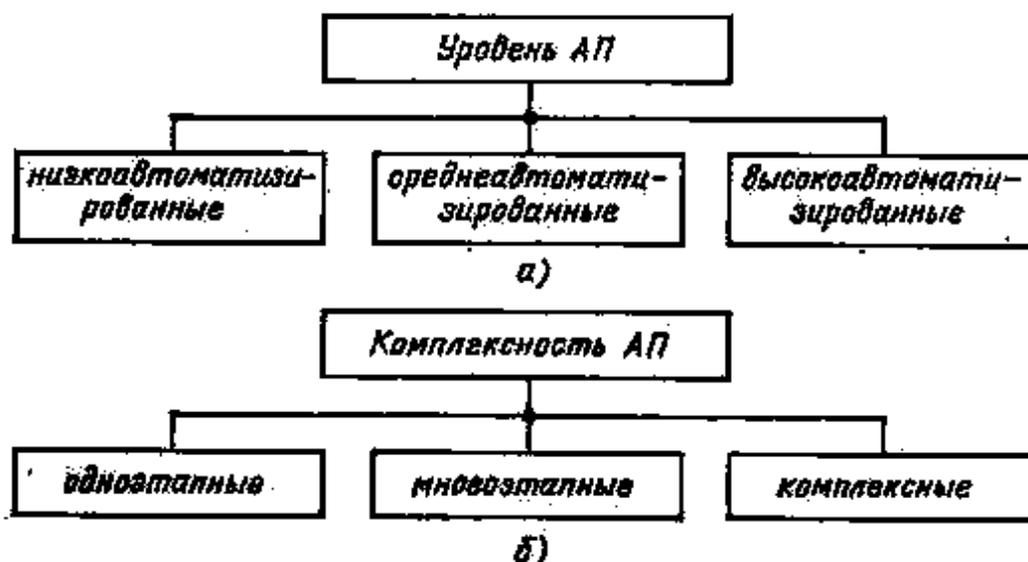


Рис. 3.5. Классификация САПР по уровню (а) и сложности (б) автоматизации проектирования

По сложности САПР классифицируют так (рис. 3.5, б): одноэтапные, выполняющие один этап проектирования из всех установленных для объекта; многоэтапные, выполняющие несколько этапов проектирования из всех установленных для объекта; комплексные, выполняющие все этапы проектирования, установленные для объекта.

По характеру выпускаемых проектных документов различают САПР (рис. 3.6, а): текстовые, выполняющие только текстовые, документы на бумажной ленте или листе; текстовые и графические, выполняющие текстовые и графические документы на бумажной ленте или листе; на машинных носителях, выполняющих документы на перфоносителях (перфокарты, перфоленты) и на магнитных носителях (магнитных лентах, дисках и барабанах); на

фотоносителях, выполняющих документы на микрофильмах, микрофишах, фотошаблонах и т. п.; на двух типах носителей; на всех типах носителей.

По количеству выпускаемых проектных документов различают САПР (рис. 3.6, б): малой производительности, выпускающих до  $10^5$  проектных документов в пересчете на формат 2 за год; средней производительности, выпускающих от  $10^5$  до  $10^6$  проектных документов; высокой производительности, выпускающих свыше  $10^6$  проектных документов.



а)



б)

**Рис. 3.6. Классификация САПР по характеру (а) и числу (б) выпускаемых проектных документов**

В различных отраслях вводятся различные количественные характеристики информации, определяющие производительность САПР.

По числу уровней в структуре технического обеспечения различают САПР (рис. 3.7): одноуровневые, построенные на основе ЭВМ среднего или высокого класса со штатным набором периферийных устройств, который может быть дополнен средствами обработки графической информации; двухуровневые, построенные на основе ЭВМ среднего или высокого класса и одного или нескольких АРМ, включающих мини-ЭВМ; трехуровневые, построенные на основе ЭВМ высокого класса, АРМ и периферийного программно-управляемого оборудования.

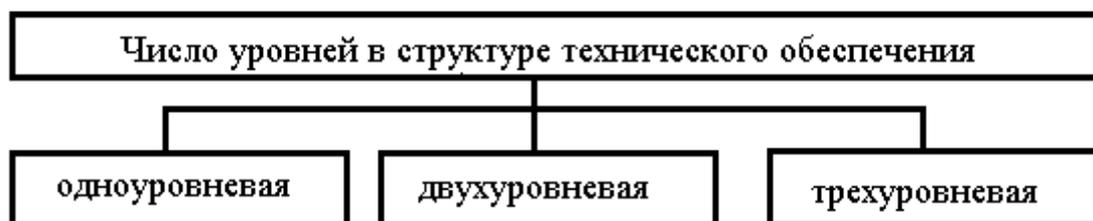


Рис. 3.7. Классификация САПР по числу уровней в структуре технического обеспечения

Данная классификация - не догма. Теория автоматизации проектирования непрерывно развивается. Появляются новые технические и программные средства ЭВМ, комплексные САПР, поэтому существующие схемы классификации САПР будут видоизменяться и совершенствоваться.

### Контрольные вопросы

8. Назовите основные виды обеспечения САПР.
9. Группы технических средств.
10. Функционирование САПР и его обеспечение.
11. Классификация САПР по уровню и комплексности автоматизации проектирования.
12. Классификация САПР по характеру и числу выпускаемых проектных документов.

ЛИТЕРАТУРА: [1].

## **ТЕМА II. МЕТОДОЛОГИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛЕКЦИЯ №4**

**Тема: ЭТАПЫ И ПРОЦЕДУРЫ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ,  
ОСОБЕННОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ,  
ПРОБЛЕМЫ ДЕКОМПОЗИЦИИ САМОЛЕТА.**

### **План лекции:**

- 8. Этапы и процедуры проектирования. Возможности их автоматизации.**
- 9. Развитие методов проектирования. Особенности автоматизированного проектирования.**
- 10. Проблемы декомпозиции самолета и процесса его проектирования.**

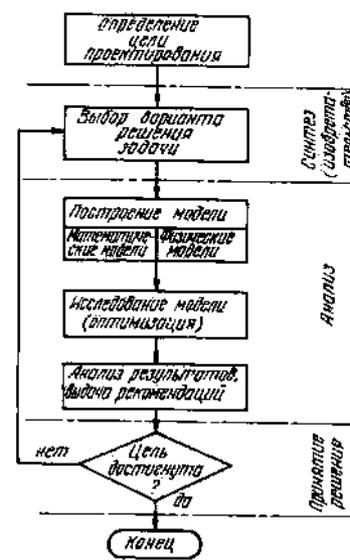
#### **1. Этапы и процедуры проектирования. Возможности их автоматизации**

За сравнительно короткий исторический период, насчитывающий немногим более 80 лет, самолет из экспериментального летательного аппарата, демонстрировавшего перед изумленной публикой свои довольно скромные по современному представлению возможности, превратился в надежный и незаменимый элемент многих отраслей народного хозяйства. За этот период сменилось много поколений самолетов, неизмеримо вырос их технико-экономический уровень. Этот уровень отражает не только возросшие технические возможности, но и, в не меньшей степени, богатый опыт, накопленный в процессе создания самолетов. Однако, несмотря на опыт, задача создания нового самолета не стала тривиальной, поскольку для ее решения всегда требуется сделать шаг вперед за пределы прошлого опыта. Необходимость в разработке нового ЛА возникает по двум причинам. Во-первых, происходит постепенное моральное устаревание существующих типов самолетов, а также появляются новые технические возможности, реализация которых обещает повышение технико-экономических показателей самолета и транспортной системы в целом.

Во-вторых, народное хозяйство ставит перед авиацией задачи, решение которых с помощью существующих типов ЛА невозможно или экономически нецелесообразно. Так, например, может оказаться, что существующие типы самолетов не удовлетворяют новым требованиям по размерам перевозимых грузов либо по условиям базирования на предполагаемых взлетно-посадочных полосах и т.д.

В обоих случаях для достижения цели требуется поиск новых путей и возможностей.

Ключевым элементом процесса создания самолета является разработка его проекта — процесс проектирования. Спроектировать самолет — это значит разработать комплект технической документации, позволяющий осуществить его постройку и эксплуатацию. Техническая документация представляет собой знаковую модель самолета, представленную в графическом, числовом либо ином виде. Но техническая документация — это лишь конечный результат сложного и длительного процесса человеческой деятельности, направленного на разработку проекта ранее не существовавшего объекта, системы, процесса и т.д. Хотя эта цель иногда может быть достигнута путем использования известных элементов либо принципов, однако в любом случае требуется творческий поиск сочетания этих элементов и процессов новым, оригинальным способом, который бы приводил к достижению количественных или качественных результатов, оправдывающих затраты на разработку новых образцов техники. Таким образом, можно констатировать, что проектирование — творческий процесс. Понятно, что степень его автоматизации во многом будет определяться не столько возможностями вычислительной и другой техники, сколько возможностью формализации той или иной проектной задачи, т.е. умением проектировщика дать достаточно строгую постановку задачи проектирования и заверченный алгоритм ее решения. В связи с этим возникает вопрос: в какой мере отдельные составляющие процесса проектирования могут быть формализованы. В настоящее время неизвестны алгоритмы прямого синтеза сложных технических объектов. Их проектирование осуществляется многократным повторением анализа различных вариантов проектных альтернатив. Схема алгоритма процесса проектирования сложного технического объекта представлена на рис. 4.1.



**Рис.4.1. Схема алгоритма процесса проектирования**

После определения цели проектирования проектировщик, опираясь на свои творческие способности, формирует основную идею, замысел (концепцию) будущего объекта, намечая возможные варианты (альтернативы) решения проектной задачи. Зачастую в основе этого процесса лежит изобретательство, т.е. способность человека синтезировать новые, полезные идеи и принципы для решения инженерных задач. Именно благодаря изобретательству удастся добиваться принципиально новых технических решений, скачкообразно улучшающих характеристики проектируемого объекта. Вместе с тем опыт авиастроения свидетельствует, что только очень немногие проекты самолетов могут быть признаны совершенно новыми. При этом даже в них значительное число технических решений принимается на основе прошлого опыта. Иными словами, прогресс авиации осуществляется как на основе ее эволюционного развития, так и на основе принципиально новых технических решений, используемых в проектах новых самолетов. С целью

уменьшения степени технического риска от внедрения новых технических решений, получаемых в результате изобретательской деятельности либо из научно-технического задела, каждое такое решение подвергается тщательной апробации на стендах, макетах, экспериментальных образцах и т.д.

Следующий этап процесса проектирования - инженерный анализ - направлен на детализацию намеченных вариантов решения задачи (определение структуры и размерных параметров проектируемого объекта) и проверку его соответствия физическим законам и другим ограничениям, вытекающим из специфических требований к проектируемому объекту.

В основе инженерного анализа лежит моделирование, т.е. исследование объекта проектирования с помощью модели, которая, отображая или воспроизводя объект исследования, способна дать необходимую информацию о нем. При проектировании самолетов широко используются как физические (материально реализованные), так и математические (абстрактные) модели. Физическими моделями являются макет самолета, его продувочные модели, различные стенды и т.д. Физическое моделирование дает наиболее полное и достоверное представление об исследуемых явлениях, однако оно зачастую связано со значительными затратами времени и материальных ресурсов. Тем не менее физическое моделирование является практически единственно возможным при исследовании новых закономерностей либо непредсказуемых теоретически, либо требующих экспериментальной проверки и подтверждения каких-то гипотез. Понятно, что роль физического моделирования возрастает при создании принципиально новых самолетов, основывающихся на новых технических концепциях.

Математическое моделирование базируется на известных закономерностях прикладных авиационных наук, используемых при проектировании и расчете самолета. Математическое моделирование, в свою очередь, можно разделить на аналитическое и численное. Аналитическое моделирование позволяет провести исследования в наиболее общем виде и получить результаты в наглядном, удобном для анализа виде. Однако построение аналитических моделей часто связано с необходимостью существенно упрощать рассматриваемое явление, что снижает достоверность получаемых результатов. Примерами удачных аналитических моделей могут служить балочная модель крыла и др. Численное моделирование с помощью ЭВМ в настоящее время становится одним из основных методов исследования сложных объектов и процессов, обеспечивая высокую точность и достоверность получаемых результатов. Так, на основе конечноэлементных моделей разработаны высокоэффективные численные методы расчета аэродинамических характеристик самолета, а также методы анализа напряженно-деформированного состояния конструкции самолета и синтеза рациональных конструктивно-силовых схем.

Информация, полученная в результате анализа, позволяет перейти к третьему этапу процесса проектирования — принятию решения. Это весьма ответственный этап, целью которого является выбор единственного среди возможных варианта решения задачи. Такой выбор, как правило, носит

компромиссный характер, поскольку каждому варианту присущи определенные достоинства и недостатки. Иными словами, проектировщик сталкивается с необходимостью поиска условного оптимума. Принятие решения — это многошаговый процесс, в котором каждый последующий шаг сужает область поиска, ограничивает как число альтернатив, так и число факторов, которые следует при этом учитывать.

Краткий анализ процесса проектирования позволяет выявить возможности формализации отдельных составляющих этого процесса. В наименьшей степени поддается формализации первый этап проектирования — генерация вариантов решения задачи. В настоящее время предпринимаются попытки решить эту проблему с помощью специальных эвристических методов поиска рациональных технических решений. Однако возможности применения таких методов при проектировании сложных технических объектов весьма ограничены. Вместе с тем, если решение базируется на известных элементах, принципам, то задача поиска рационального сочетания этих элементов (комбинаторная задача) может быть формализована. Так, с помощью матрицы признаков компоновочных схем можно формализовать процесс генерации вариантов схем самолета, что позволяет автоматизировать этот процесс и на этой основе значительно увеличить область поиска рационального варианта. Пополнение же матрицы признаков компоновочных схем благодаря принципиально новым техническим решениям на базе изобретательства — процесс пока неформализуемый.

Соотношение математического и физического моделирования определяет в значительной степени возможности формализации этапа анализа. При этом, когда разрабатывается принципиально новый самолет, базирующийся на новых технических концепциях, роль и объем физического моделирования возрастают, а следовательно, уменьшается возможность формализации и, как следствие, автоматизации этого этапа.

Формализация процесса принятия решения базируется на аппарате развивающейся технической дисциплины "Теория принятия решений", в основе которой лежат методы математического программирования. Так, например, если цель проектирования удастся количественно выразить через определенный показатель-критерий, являющийся функцией проектных параметров, то задачу принятия решения о конкретных значениях этих параметров можно свести к задаче отыскания такого сочетания параметров, при котором критерий достигает экстремального значения.

Таким образом, в общем процессе проектирования имеется значительная доля проектных процедур, которые могут быть формализованы, а, следовательно, процесс их выполнения — автоматизирован.

## **2. Развитие методов проектирования. Особенности автоматизированного проектирования**

Автоматизация проектирования самолетов стимулировала развитие теоретических основ и совершенствование методологии проектирования, под которой понимается совокупность принципов и методов, а также математический аппарат, с помощью которого решаются проектно-конструкторские задачи.

За период развития авиации претерпели существенное изменение и принципы, и методы, и математический аппарат проектирования. Так, до конца 50-х годов целью проектирования было создание самолета, способного летать как можно выше и дальше, нести большую целевую нагрузку, более маневренного и т.д. Однако уже в 60-х годах стало ясно, что в условиях чрезвычайного удорожания авиационных систем принцип "делай то, что позволяет современный научно-технический уровень" должен быть заменен на принцип "делай то, что нужно сделать" или "то, что можно себе позволить". Это существенно изменило цели и задачи проектирования, а следовательно, и его критерии.

Методы проектирования прошли эволюционный путь развития от метода "проб и ошибок" к статистическому методу и далее к аналитическому методу, на базе которого стал возможен переход к методу оптимального проектирования.

Практическое применение метода оптимального проектирования в самолетостроении началось с решения частных задач оптимизации отдельных агрегатов самолета и участков траектории его полета. По мере накопления опыта решения таких сравнительно простых задач стали предприниматься попытки решения более сложных задач многопараметрической оптимизации. Однако при практической реализации таких задач проектировщики сталкивались с чисто вычислительными трудностями. Применение же последовательной оптимизации по отдельным параметрам не давало ощутимых результатов. Лишь с появлением ЭВМ и численных методов оптимальное проектирование становится на реальную основу. К этому же периоду относится развитие общей теории технических систем (системотехники). Названные выше предпосылки, а также дальнейшее развитие прикладных авиационных наук, успехи в области вычислительной математики, совершенствование ЭВМ создали условия для становления методологии и методов автоматизированного проектирования. Включая в себя как составную часть метод оптимального проектирования, метод автоматизированного проектирования отличается от широко распространенных процедур оптимизации отдельных устройств и характеристик объектов применением обобщенных критериев оптимальности, использованием математических моделей, описывающих существенные черты системы в целом, математическим аппаратом оптимизации и широким применением ЭВМ.

Методология автоматизированного проектирования органически соединяет достижения в развитии общей теории проектирования систем с возможностями современных технических средств проектирования. В основе этой методологии лежат принципы системного подхода, методы математического моделирования проектно-конструкторских задач и

математический аппарат теории оптимизации сложных систем. Практическая реализация ее возможна лишь в рамках САПР.

Системный подход предполагает изучение системы как единого объекта, выполняющего определенные функции в конкретных условиях. В то же время при системном подходе возможно расчленение сложных систем и процессов на составляющие их относительно самостоятельные подсистемы (подпроцессы) с целью облегчения их изучения. Каждая из этих подсистем также может быть расчленена на подсистемы более низкого порядка. Подсистемами самого низкого порядка являются элементы, внутренняя структура которых не представляет интереса для решения задач определенного уровня, однако свойства которых влияют на свойства других подсистем и свойства системы. Так, например, при проектировании самолета элементами являются крыло, оперение и т.д. При проектировании крыла такими элементами являются элементы силового продольного и поперечного набора.

В свете сказанного обоснованное расчленение (декомпозиция) системы на подсистемы, а процесса проектирования на подпроцессы (этапы) и определение существенных структурно-функциональных связей — одна из главных задач методологии автоматизированного проектирования. При выборе объекта системного исследования необходимо руководствоваться следующими положениями:

объект должен обладать достаточной масштабностью, чтобы результаты его исследования давали значительный эффект по сравнению с рассмотрением системы по частям;

объект должен допускать описание (хотя бы приближенное) его структуры и функционирования математическими методами;

степень детализации исследуемого объекта должна соответствовать вычислительным возможностям современных ЭВМ.

Отметим как положительную тенденцию укрупнение объектов системного исследования при проектировании самолетов. Она основывается на достижениях прикладных авиационных наук, все более глубоко раскрывающих многосторонние связи между параметрами и характеристиками авиационных систем, а также на постоянном совершенствовании вычислительных комплексов.

Формирование облика самолета с учетом параметров системы управления является наглядным примером положительного эффекта от использования этой тенденции.

Поскольку автоматизированное проектирование основано на экономико-математическом моделировании на ЭВМ, следующей важной задачей методологии автоматизированного проектирования является разработка приемлемых математических моделей исследуемых систем и процессов.

Построить модель системы — это значит дать ее количественное описание с помощью системы уравнений, связывающих параметры (аргументы) и характеристики (функции) системы. При этом следует иметь в виду, что в иерархических системах понятия "параметр" и "характеристика" имеют относительный характер, поскольку параметры верхнего уровня при

переходе к низшему уровню превращаются в характеристики. Например, такие параметры, как грузоподъемность самолета, дальность его полета, определяемые при исследовании перспективной транспортной системы, на этапе формирования облика самолета - элемента этой системы — превращаются в характеристики.

Построение модели начинается с определения перечня параметров, которые могут оказать заметное влияние на результаты моделирования. При этом число параметров на каждом этапе проектирования должно быть таким, чтобы набор их конкретных значений давал достаточную информацию для принятия необходимых на рассматриваемом уровне разработки проекта решений.

Следующий этап построения модели — установление отношений (связей) между параметрами, а также между параметрами и характеристиками. При этом из всего многообразия таких отношений необходимо выделить наиболее существенные. Определение "существенности" зависит от стадии проектирования, типа решаемой задачи, а также от опыта проектировщика и наличия априорных сведений о проектируемом объекте. Если на рассматриваемом этапе некоторые параметры не удастся связать отношениями с характеристиками и другими параметрами, их исключают из формализованного описания модели, оставляя для рассмотрения на последующих этапах. Имея модель, с определенной степенью достоверности отображающую реальный процесс или объект, можно приступать к решению проектной задачи. С этой целью необходимо разработать метод (алгоритм) решения, специфичный для каждой конкретной постановки задачи проектирования. При этом следует иметь в виду, что проектирование всегда направлено на поиск наивыгоднейших (оптимальных) параметров системы. При проектировании необходимо руководствоваться следующими основными положениями об оптимальности систем.

1. В общем случае система, состоящая из оптимальных элементов (подсистем), не обязательно будет оптимальной. Она должна оптимизироваться в целом, как единый объект с заданным целевым назначением. Это, однако, не означает, что оптимизация по частям вообще не имеет смысла.

2. Система должна оптимизироваться по количественно определенному и единственному критерию, отражающему в математической форме цель проектирования. Отсутствие такого критерия свидетельствует о недоопределенности задачи.

3. Поскольку система, как правило, оптимизируется в условиях количественно определенных ограничений на оптимизируемые параметры, то ее оптимальность всегда относительна, условна.

Определение взаимосвязанного комплекса критериев, позволяющих на каждом иерархическом уровне расчленения системы объективно оценить результаты проектирования, находить для каждого элемента подсистемы такие параметры, которые бы обеспечивали высокую эффективность системы в целом, является также важной задачей методологии автоматизированного

проектирования. Выбранный критерий и его связи с параметрами объекта являются составной частью модели.

Последующие этапы решения проектной задачи включают в себя разработку программы для ЭВМ; ее отладку; проведение тестовых расчетов, позволяющих проверить работоспособность программы; выполнение программы; анализ результатов расчета и подготовку материалов для принятия решения.

Рассмотрим перечисленные выше задачи методологии автоматизированного проектирования применительно к самолету.

### **3. Проблемы декомпозиции самолета и процесса его проектирования**

Самолет, как объект проектирования, представляет собой сложную техническую систему, обладающую развитой иерархической структурой. В соответствии с системным подходом при решении задач определенного иерархического уровня нет необходимости строить всю иерархию системы. Обычно бывает достаточно рассмотреть системы и подсистемы на два порядка выше и ниже рассматриваемого. Тогда при проектировании самолета необходимо рассматривать более высокие иерархические уровни, например транспортную систему и ее подсистему - авиационный комплекс. В свою очередь, если рассматривать самолет как исходную подсистему, то в нем можно выделить такие подсистемы, как планер, силовая установка, снаряжение, оборудование и т.д. Каждая из этих подсистем при проектировании также расчленяется на ряд подсистем, элементов, агрегатов и узлов. Графически иерархическая структура самолета с указанием возможных иерархических уровней представлена на рис. 4.2 в виде ориентированного графа.

Иерархические уровни связаны между собой двумя типами отношений. Первый тип характеризует структуру системы, упорядочивая состав ее элементов, блоков, агрегатов и связь частей между собой. На графе эти отношения представлены сплошными линиями.

Вместе с тем всякая структура создается для выполнения определенных полезных функций. Так, например, определенная конструкция крыла выполняет такие функции, как передача нагрузок, создание подъемной силы, размещение топлива и т.д. Таким образом, элементы подсистемы и ее отдельные иерархические уровни связаны между собой функциональными отношениями, которые на рис. 4.2 изображены пунктирными линиями. Каждому иерархическому уровню соответствует свой перечень задач, решение которых необходимо для принятия соответствующих этому уровню проектных решений. Так, на иерархических уровнях 1 и 2 необходимо принять решения о необходимых типах и желательных технико-экономических характеристиках самолетов рассматриваемой транспортной системы; числе (парке) каждого типа самолетов и их распределении по авиалиниям; характеристиках аэродромов базирования и их оборудования, способах обслуживания самолетов и составе экипажей и т.д.

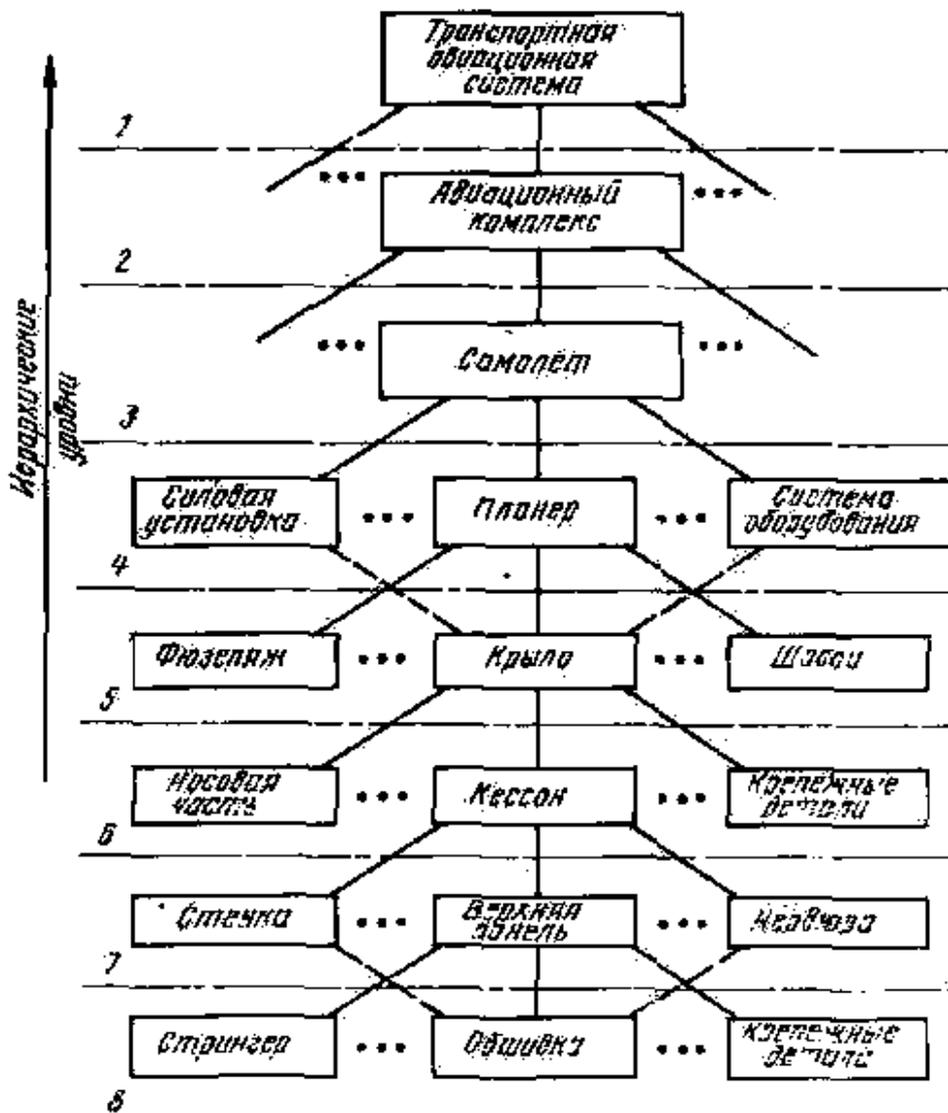


Рис. 4.2. Графическая модель иерархической структуры самолета (фрагмент)

Решение этих задач позволяет ответить на важнейший вопрос: "что проектировать?", т.е. в каких условиях будет эксплуатироваться вновь создаваемый самолет и какими технико-экономическими характеристиками он должен обладать, чтобы его разработка оправдывала затрачиваемые на это средства. Ответы на эти вопросы оформляют в виде документов, называемых техническим заданием (ТЗ) на новые самолеты. Разработка ТЗ завершает один из этапов процесса проектирования, который по отношению к последующим является внешним.

На следующих трех уровнях определяют форму, размеры самолета, структуру и состав основных его агрегатов и систем, удовлетворяющих заданным требованиям. Эти задачи решают в конструкторском бюро и оформляют в виде технического предложения и эскизного проекта.

Последующие иерархические уровни включают в себя проектно-конструкторские задачи по разработке узлов и деталей всех агрегатов и систем самолета. Результаты этой работы, соответствующей этапу рабочего

проектирования, оформляют в виде технической документации для производства и эксплуатации самолета.

Решение перечисленных выше задач позволяет принимать проектные решения, обеспечивая по мере перехода на более низкие иерархические уровни все большую степень детализации проектируемого объекта. При сравнении иерархических уровней и этапов проектирования видно, что усложнение самолета как объекта проектирования еще до формирования концепций системного подхода привело к расчленению самолета на определенные элементы, а процесса его проектирования — на отдельные этапы.

Итак, важным с точки зрения формализации аспектом проектирования самолета является его иерархическая структура и вытекающая из нее многоэтапность проектирования.

### **Контрольные вопросы**

13. Этапы и процедуры проектирования.
14. Методология автоматизированного проектирования.
15. Модель системы – это...?
16. Какими типами отношений связаны между собой иерархические уровни?

ЛИТЕРАТУРА: [1].

## ЛЕКЦИЯ №5

### Тема: ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ, ТИПЫ ПРОЕКТНЫХ МОДЕЛЕЙ.

#### План лекции:

11. Моделирование и его применение в практике разработки ЛА.
12. Проблемы моделирования.
13. Типы проектных моделей.

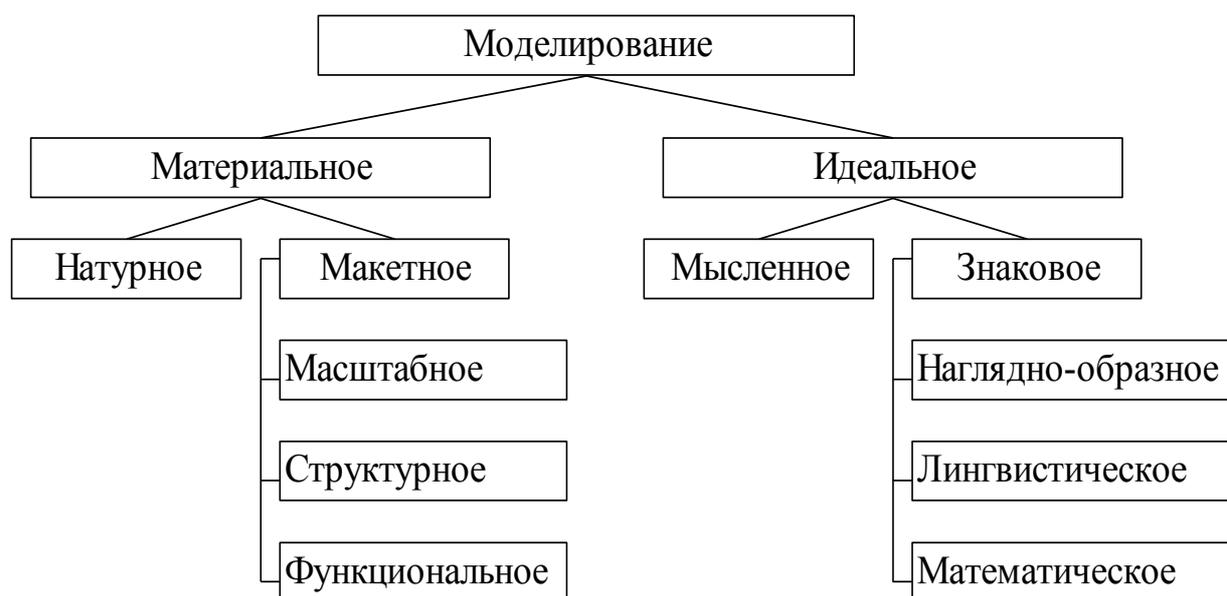
Под моделью понимается такая мысленно представляемая или материально реализованная система, которая, отображая или воспроизводя объект исследования, способна замещать его таким образом, что ее изучение дает нам новую информацию об этом объекте.

Моделирование - это исследование каких-либо явлений, процессов или систем объектов путем построения и изучения их моделей, а также использование моделей для определения или уточнения характеристик и рационализации способов построения вновь конструируемых объектов.

Моделирование является одним из методов научного исследования, в результате которого получают новые знания об объектах.

Моделирование подразделяется на материальное (физическое) и идеальное.

При материальном моделировании обеспечивается подобие между физической природой, геометрией объекта и модели. Идеальное моделирование осуществляется на уровне самых общих представлений и на уровне детализированных знаковых систем.



При материальном моделировании объект исследования замещается другим материальным объектом, причем должно обеспечиваться подобие между их физической природой, геометрией и другими свойствами.

Натурное моделирование характеризуется тем, что моделью служит реальный объект, по результатам исследований (испытаний) которого судят о свойствах всей совокупности аналогичных объектов (например, испытание опытных самолетов).

При макетном моделировании обеспечивается подобие ряда свойств объекта и модели, существенных для задач исследования.

Масштабное моделирование предполагает подобие геометрии объекта и модели (аэродинамическая продувочная модель).

При структурном моделировании обеспечивается подобие структуры объекта и модели - структурного макета, состав и функциональные связи элементов которого соответствуют составу и связям элементов моделируемого объекта (например: лабораторный макет топливной или радиосистемы).

Функциональное моделирование имеет место в том случае, когда некоторый физический объект функционирует таким образом, что его поведение адекватно поведению исследуемого объекта. Функциональная модель может быть далеки от оригинала по внешней форме, геометрии и внутренней структуре (электрические стенды системы управления, системы запуска двигателей и т.п.).

Идеи зародившиеся у конструктора, сформированные в его сознании первые представления о возможном облике нового объекта являются «мысленной концептуальной моделью» этого объекта.

Наглядно-образное моделирование реализуется путем создания графических образов, отображающих в наглядной форме внешний вид, структуру и поведение объекта. К таким моделям относятся, например, чертежи (общие виды, сборочные чертежи, чертежи отдельных конструктивных элементов) блок схемы систем, монтажные схемы, графики изображающие траектории движения и т.д.

Лингвистическое моделирование - это составление описания объекта моделирования на естественном языке, например: техническое задание, описание конструкции...

В последние десятилетия исключительно важное значение приобрело математическое моделирование.

Под математическим моделированием подразумевается использование математического описания некоторого объекта для проведения исследований и изучения его свойств (пример - все вычислительные алгоритмы).

В сложном процессе разработки ЛА применяются практически все перечисленные методы моделирования. В целом создание ЛА есть процесс построения различных моделей разрабатываемого ЛА.

При этом «удельный вес» отдельных методов моделирования со временем меняется. Так, например, в настоящее время разработаны сертифицированные программы аэродинамических и прочностных расчетов,

которые могут существенно уменьшить удельный вес аэродинамических продувок и прочностных испытаний.

## ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ. ТИПЫ ПРОЕКТНЫХ МОДЕЛЕЙ

Понятие формализации проектирования включает в себя описание, объекта и процесса его проектирования с помощью графического языка, чисел, букв и других символов. Естественно, что каждому иерархическому уровню соответствуют своя степень детализации описания и свой набор символов, знаков, с помощью которого осуществляется это описание. Структуру самолета, его форму, размеры можно описать с помощью конечного числа таких символов, которые называются *параметрами*. Свойства же самолета (или любой его подсистемы) можно описать с помощью другого набора символов, называемого *характеристиками*. Характеристики являются функцией параметров, а в общем случае и других характеристик. Например, коэффициент лобового сопротивления крыла  $c_{Ха}$  является функцией его геометрических параметров, однако для одних и тех же параметров крыла он будет изменяться с ростом такой характеристики самолета, как скорость полета. Мы уже отмечали, что в иерархических системах понятия "параметр" и "характеристика" относительны.

Расчленение системы на иерархические уровни облегчает решение отдельной задачи, но в то же время требует учета всех существенных связей между расчлененными уровнями. Эти связи делятся на прямые и обратные. Рассмотрим характер связей для этапов разработки ТЗ, разработки технического предложения и эскизного проекта (рис. 5.1). Прямые связи (они обозначены сплошными линиями) являются выходной информацией (результатом проектирования) для верхнего уровня и входной информацией — для нижнего уровня. Обратные связи (пунктирные линии) — наоборот. Для верхнего уровня прямые связи представляют собой искомые переменные (оптимизируемые параметры), для нижнего — дисциплинирующие условия. Они являются основой для формулирования критериев и ограничений при решении задачи данного уровня. Так, прямые связи между уровнями разработки ТЗ и технического предложения — это переменные, характеризующие потребные летно-технические и другие характеристики, регламентируемые ТЗ. Прямые связи между уровнем разработки технического предложения и уровнем разработки эскизного проекта отражают те решения по проекту, которые следует принять, прежде чем приступить к эскизному проекту. Они включают в себя числовое, графическое и словесное описание проекта, подтверждающее возможность или степень выполнения технического задания. Это описание, например для пассажирского самолета, должно включать общий вид самолета в трех проекциях, компоновку пассажирской кабины, размеры, площади и объемы багажно-грузовых помещений; массовые и центровочные характеристики, включая полную весовую сводку самолета, диапазон эксплуатационных центровок; аэродинамические характеристики и характеристики устойчивости и управляемости, результаты предварительных

расчетов на прочность, аэроупругость и акустическую выносливость; летно-технические характеристики; общие сведения о конструкции, системах и агрегатах самолета, силовой установке и оборудовании самолета и др.

Обратные связи для уровня разработки ТЗ отражают прогнозируемые технико-экономические характеристики перспективных самолетов, выражаемые через обобщенные показатели, например массу пустого снаряженного самолета (весовое совершенство), полетное аэродинамическое качество (аэродинамическое совершенство), удельный расход топлива (совершенство силовой установки). Для уровня разработки технического предложения — аэродинамические характеристики различных схем самолета, характеристики двигателей, оборудования и систем, физико-механические свойства конструкционных материалов, полуфабрикатов и др.

Поскольку проектирование, как правило, ведется сверху вниз, то естественно, что информация, соответствующая обратным связям, носит прогнозный характер. Проектирование же на каждом уровне направлено на подтверждение заявленных на более высоком уровне характеристик. Прогнозный характер информации требует наличия итерационных циклов между различными уровнями. Это определяет второй важный с точки зрения формализации аспект процесса проектирования — его итерационный характер. Такой характер проектирования сопряжен с опасностью принятия не вполне обоснованных и даже ошибочных решений в случае игнорирования некоторых

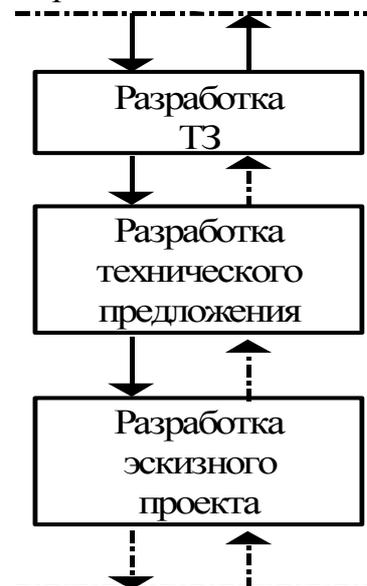
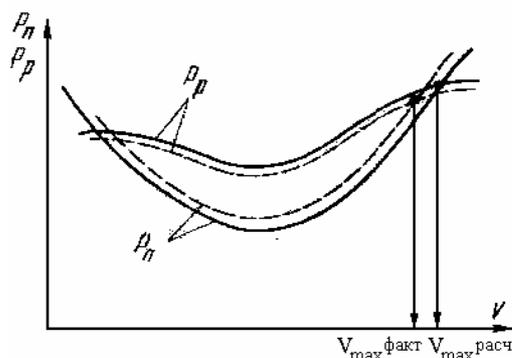


Рис. 5.1. Прямые и обратные связи между этапами проектирования (фрагмент)

структурных или функциональных связей. Это игнорирование может быть следствием как субъективных причин, когда, например, проектировщик считает данную связь несущественной, так и объективных причин, связанных с невозможностью учета тех или иных факторов из-за отсутствия достоверной информации на рассматриваемом этапе проектирования. Так, в процессе формирования облика самолета на этапе разработки технических предложений приходится принимать решения о форме, размерах и взаимном расположении основных элементов планера самолета и его силовой установки исходя из заданных летно-технических характеристик. Эти характеристики являются функцией весовых характеристик, характеристик силовой установки и аэродинамических характеристик, определяемых на рассматриваемом этапе с довольно невысокой точностью. Например, масса полезной нагрузки самолета определяется как разность взлетной массы и массы пустого снаряженного самолета. Вследствие того, что указанные массы определены с невысокой точностью, возникает опасность серьезных просчетов в оценке возможностей проектируемого самолета. Эти просчеты обычно выясняются на этапах рабочего

проектирования или даже испытаний, когда внесение изменений в проект сопряжено со значительными трудностями.

К чему могут привести такие ошибки, видно из следующих примеров [19]. Для сверхзвукового самолета с расчетной взлетной массой 272 т. при среднестатистическом значении относительной массы конструкции  $\bar{m}_k = 0,25$  ее абсолютная величина составит 68 т. Возможная ошибка в определении этой величины может достигать 30 %, т.е. приблизительно 20 т, что соответствует расчетному значению всей платной нагрузки.



**Рис. 5.2. Графики расчетного и фактического избытка тяги**

Даже если ошибка составит всего 3 %, что считается вполне допустимым на начальных этапах проектирования, то это означает уменьшение платной нагрузки на 10 %.

Понятно, что такое уменьшение приведет к существенному ухудшению экономических показателей самолета. Опыт разработки в США сверхзвукового пассажирского самолета Боинг -2707 является убедительным подтверждением приведенного выше примера.

Значительные ошибки могут быть допущены при определении характеристик силовой установки, даже при использовании готового двигателя. Это объясняется тем, что потери, обусловленные особенностями конструкции воздухозаборников и сопел, а также отбором воздуха и мощности от двигателей для нужд различных систем самолета, на рассматриваемом этапе обычно определяются весьма приближенно. А поскольку летные характеристики в значительной степени являются функциями разности тяги и лобового сопротивления, то становится очевидной цена ошибок в определении потребной ( $P_n$ ) и располагаемой ( $P_p$ ) тяг (рис. 5.2). Не менее сложной является проблема достаточно точного определения на ранних стадиях разработки проекта самолета его аэродинамических характеристик. При этом цена ошибок здесь также достаточно велика. Расчеты показывают, что, например, для пассажирского самолета с расчетной взлетной массой  $m_0 = 180$  т. ошибка в определении  $c_{y\max}$  всего на 10 % при сохранении платной нагрузки и дальности полета ведет к увеличению потребной длины взлетно-посадочной полосы (ВПП) на 10 %. При сохранении же длины ВПП без изменений уменьшается на

25 % дальность полета, что, разумеется, существенно изменяет возможности самолета.

Субъективные причины ошибок можно исключить путем повышения квалификации проектировщика. Устранению объективных причин способствуют следующие две тенденции, наметившиеся в настоящее время в разработке новых ЛА. Первая из них связана с расширением роли и объема научно-исследовательских и экспериментальных исследований, направленных на создание научно-технического задела по перспективным направлениям авиастроения. Такой задел позволяет отработать и проверить путем натурального и полунатурного моделирования новые технические решения, предполагаемые к использованию на перспективных самолетах, что существенно снижает риск из-за принятия необоснованных решений.

Вторая, дополняющая первую, тенденция связана с появлением и использованием ЭВМ, а также развитием численных методов анализа и принятия решений. Она направлена на применение в проектировании численных моделей, адекватно отображающих исследуемые объекты или процессы. К таким моделям, например, относятся конечноэлементные модели, используемые при расчете аэродинамических характеристик самолета и анализе напряженно-деформированного состояния его конструкции.

Итерационный характер проектирования ведет к увеличению сроков разработки проекта и его стоимости. В этой связи сокращение итерационных циклов является одной из задач методологии проектирования. В методологии автоматизированного проектирования предусмотрена возможность решения этой задачи. Она заключается в использовании при проектировании самолетов более сложных математических моделей, отличающихся более высокой степенью адекватности. Можно предположить, что развитие методологии автоматизированного проектирования приведет к изменению технологии разработки проекта, в частности к объединению некоторых этапов проектирования.

Усложнение моделей связано с увеличением затрат машинного времени, однако оно не всегда приводит к повышению качества принимаемых проектных решений, т.е. дополнительные затраты на проектирование не окупаются качеством проектных разработок. Поэтому необходим разумный компромисс между точностью, временем и стоимостью проведения расчета.

В соответствии с принципами системного подхода каждому этапу проектирования свойственны свои модели, отличающиеся степенью детализации, т.е. числом учитываемых в модели факторов и связей между ними. Иными словами, модели, используемые при проектировании самолета, иерархичны. С другой стороны, нельзя говорить о некоторой универсальной модели, пригодной для решения всех типов задач, связанных с разработкой проекта самолета. На каждом иерархическом уровне модель представляет собой набор субмоделей, отражающий те или иные стороны структуры и функционирования самолета и его подсистем. Каждая субмодель представляет собой блок, включающий в себя группы связей (уравнений), описывающих, например, геометрию самолета, его аэродинамические и весовые

характеристики, стоимостные и эффективностные показатели. Такой подход к построению модели имеет ряд преимуществ. В частности, появляется возможность разработки и совершенствования субмодели специалистами, компетентными в определенной области знаний. Достигается определенная гибкость при построении расчетных моделей при различных постановках задач проектирования, а также некоторые преимущества при программной реализации этих моделей.

Состав и структура субмоделей, используемых на различных этапах проектирования, различны. Так, например, на этапах внешнего проектирования транспортного самолета исследуются экономико-математические модели воздушной транспортной системы. Они включают в себя ряд субмоделей. Одни из них — это субмодели существующего и прогнозируемого грузооборота, учитывающие распределение грузов по отдельным авиалиниям, номенклатуру грузов, сезонные изменения объема перевозок и другие факторы. Другие — это субмодели существующей и перспективной сети аэродромов, которые учитывают технические характеристики аэродромов (число, размеры и параметры ВПП), возможности служб управления воздушным движением и ремонтно-эксплуатационной базы и т.д.

Самолет, как элемент транспортной системы, представлен своей субмоделью. Она отражает связи технико-экономических характеристик самолета с его обобщенными параметрами, характеризующими уровень технического совершенства самолета. Так, функционирование самолета на авиалинии моделируется зависимостями величины коммерческой нагрузки и рейсовой скорости от дальности полета. Экономические характеристики самолета моделируются зависимостью себестоимости тонно-километра от дальности полета. Топливная эффективность — расходом топлива на пассажиро-километр (тонно-километр) в зависимости от дальности.

Чтобы принять оговоренные выше решения по проекту на этапе разработки технического предложения нужна модель самолета, отличающаяся гораздо большей степенью детализации и полнотой учета факторов. Ее основное назначение — получение надежной информации о возможности реализации тех или иных проектно-конструкторских решений для достижения поставленных целей проектирования, а также оценка сравнительной эффективности этих решений. В основе модели самолета лежат различные методы весового и аэродинамического расчета, прочностных расчетов и расчетов устойчивости и управляемости, определения высотно-скоростных и дроссельных характеристик двигателя и др. Эти методы, отличающиеся для различных этапов разработки проекта, в соответствии с блочным принципом моделирования при разработке модели объединяются в отдельные блоки. Они представляют собой субмодели модели самолета. Опыт проектирования позволяет установить примерный состав модели самолета для ранних этапов разработки проекта. Назовем основные субмодели, некоторые из них затем более детально будут рассмотрены в последующих главах.

Одной из важнейших является *геометрическая модель*. Важность ее определяется и тем, что с ее помощью формируется зримый образ

проектируемого объекта, и тем, что для самолета внешние формы и размеры во многом определяют его летные свойства, и тем, что эта модель является мостиком между проектом и его конкретной реализацией. Эта модель описывает отношения между параметрами самолета и характеристиками его формы и размеров. С ее помощью определяют обводы, площади, объемы, поперечные сечения самолета и его агрегатов. Данные этой модели используют для весовых, аэродинамических и прочностных расчетов, компоновки самолета, графического отображения результатов проектирования, а также разработки технологической оснастки и программ для станков с числовым программным управлением.

*Весовая модель* обеспечивает расчет массы самолета и ее составляющих в соответствии с весовой сводкой, степень детализации которой определяется этапом разработки проекта. В ее основу положены связи между геометрией самолета, действующими на него нагрузками, особенностями конструктивно-силовой схемы, величиной целевой нагрузки, составом и размещением оборудования и снаряжения, с одной стороны, и массой самолета и его составляющих, с другой.

*Аэродинамическая модель* служит для расчета аэродинамических характеристик самолета в полетной и взлетно-посадочной конфигурациях. В основе ее — связи между параметрами формы и размеров самолета, а также режимом полета и характером действующих на самолет сил и моментов (их величиной и законами изменения).

*Модель силовой установки* делает возможным расчет высотно-скоростных и расходных характеристик двигателей. Она основана на связях между геометрическими и газодинамическими параметрами двигателей разного типа и их тягой и расходом топлива на различных режимах полета.

Весовая, аэродинамическая модели и модель силовой установки обеспечивают расчет силовых факторов, действующих на самолет. Это позволяет решать важные при проектировании самолета задачи по определению общих показателей маневренности самолета, траекторий полета, взлетно-посадочных характеристик, а также характеристик его устойчивости и управляемости. Эти задачи решаются с помощью *динамической модели*. Она описывает сложный комплекс связей между названными выше характеристиками и силовыми факторами.

При формировании облика самолета важную роль играет *модель компоновки и центровки*, обеспечивающая взаимную пространственную увязку основных компонентов самолета с учетом удовлетворения противоречивых требований аэродинамики и прочности, устойчивости и управляемости, эксплуатационной и производственной технологичности и др. Следует отметить, что задачи компоновки, особенно внутренней, пока формализованы в малой степени и поэтому их решение требует активного участия проектировщика.

Для оценки вариантов проектно-конструкторских решений применяются различные показатели технико-экономического совершенства. Для их расчета используются *эффективные модели*. Они позволяют рассчитывать

показатели эффективности (весовой, топливной, экономической) самолета (или его отдельных подсистем) в зависимости от его параметров. Так, *экономические модели* транспортного самолета отражают связи между транспортной производительностью самолета, определяемой уровнем его технического совершенства, и затратами на проектирование, изготовление и эксплуатацию самолета.

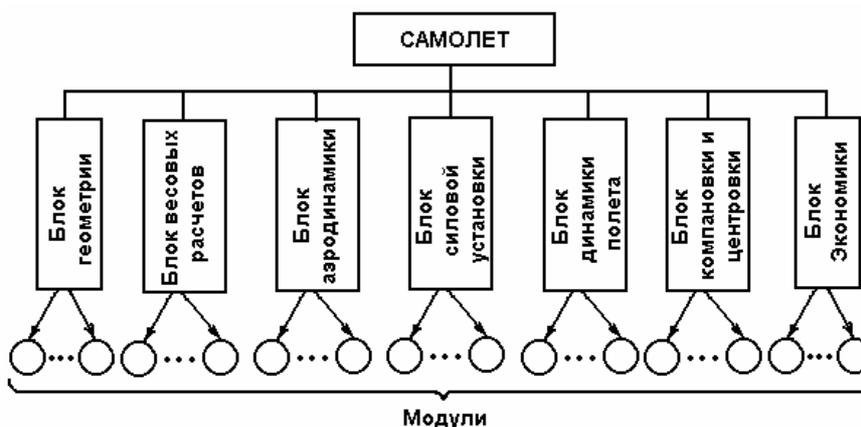


Рис. 5.3. Структурная схема модели «самолет»

Укрупненная структурная схема модели «самолет» представлена на рис. 5.3. показанные на ней блоки — это описанные выше субмодели. Каждый из блоков, в свою очередь, состоит из ряда расчетных модулей. Расчленение блока на модули определяется перечнем задач рассматриваемого этапа. В зависимости от стадии разработки проекта и типа проектируемого самолета состав и структура модели может изменяться.

### РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Следующая стадия решения задачи — ее алгоритмизация — представляет собой разложение вычислительного процесса на составные части, определение последовательности их выполнения, составление описания содержания каждой из выделенной частей в определенной форме и проверку соответствия алгоритма выбранному методу. Назначение алгоритмизации — точное и детальное описание процесса обработки исходных данных для получения требуемого результата в соответствии с выбранным методом решения задачи.

Многообразие задач, способов их решения не позволяют формализовать процесс разработки алгоритмов. Однако по способу организации управления порядком выполнения действий все алгоритмы можно разделить на три группы: линейные, разветвляющиеся и циклические [30]. В *линейных* алгоритмах получение результата достигается путем однократного выполнения одной и той же последовательности действий при любых значениях исходных данных. В *разветвляющихся* алгоритмах в зависимости от значений исходных данных или промежуточных результатов предусматривается выбор одной из нескольких возможных последовательностей действий (ветвей алгоритма). Такие алгоритмы в отличие от линейных содержат по крайней мере по одному

логическому блоку. В *циклических* алгоритмах, наиболее сложных по структуре, результат получают путем многократного повторения некоторой последовательности действий. Различают циклические алгоритмы с заданным числом повторений и итерационные, в которых выход из цикла зависит от выполнения определенного условия, связанного с проверкой значения монотонно изменяющейся в цикле величины.

Наиболее распространенной при решении задач общего проектирования самолета является циклическая структура алгоритма.

Общая схема алгоритма решения проектных задач представлена на рис. 5.4, где вектор искомых параметров обозначен  $X$ , вектор характеристик -  $Y$ , а  $F(X)$  - целевая функция,  $X_0$  - параметры начального приближения. Изменяя входы в модель, проектировщик, который выполняет функции обратной связи в модели, добивается получения требуемых характеристик объекта проектирования. Если при этом дополнительно ставится задача достижения экстремума целевой функции  $F(X)$ , то решается оптимизационная задача. В рассматриваемом случае оптимальный проект ищут путем перебора параметров по логике, определяемой проектировщиком. В литературе методы решений проектных задач по описанной схеме называются методами прямого перебора, сканирования, «слепого» поиска и т.д.

Другая схема реализации процесса, изображенного на рис. 5.4, характеризуется включением в обратную связь модели специальной формализованной стратегии управления, осуществляющей поиск «лучшего» проекта. Логический процесс формирования последовательности улучшаемых проектов осуществляется автоматически на основе информации о результатах предыдущих итераций. Это, однако, не означает, что проектировщик не принимает участия в интерпретации результатов расчетов. Такой подход реализуется с помощью упорядоченных методов поиска экстремума. Он положен в основу автоматизированного проектирования.

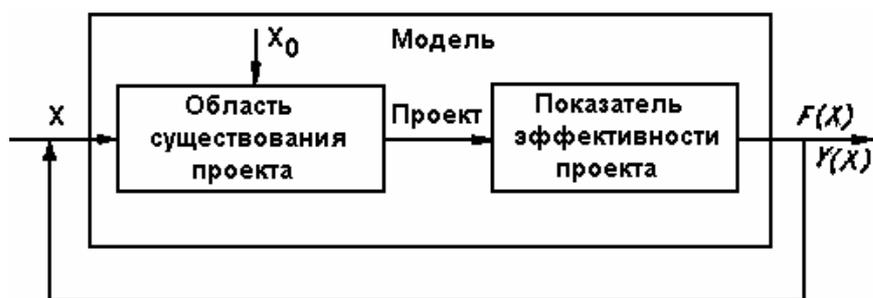


Рис. 5.4. Общая схема алгоритма решения проектных задач

Названные подходы к решению задач оптимального проектирования имеют много общего. Оба они имеют общую цель — поиск «лучшего» проекта, оба используют интуицию проектировщика для выбора исходного варианта. В основе обоих подходов лежит итерационный процесс улучшения исходного варианта. Каждому из этих подходов присущи определенные достоинства и недостатки. Так, методы прямого перебора (параметрического анализа) обладают следующими достоинствами: не требуют предварительного задания

целевой функции и ограничений; чувствительность проекта к изменению переменных очевидна из результатов анализа. К тому же, решая задачу, проектировщик все время находится в центре событий, контролирует вычислительный процесс. Однако такой подход малоэффективен при исследовании многомерных областей. Вследствие естественных ограничений на число варьируемых параметров, неадаптивности параметров он не обеспечивает получение действительно оптимальных решений. Подход требует выбора хорошей номинальной точки (начального приближения проектных параметров).

Достоинством упорядоченных методов оптимизации является то, что они потенциально более эффективны в отыскании оптимума, особенно при большой размерности задачи. Они применимы для решения широкого класса задач, включая такие, в которых человеческая интуиция недостаточно разработана. Более того, они минимизируют человеческие предубеждения. Основным недостатком этих методов заключается в том, что они требуют строгого количественного определения области исследований. Этот процесс принижает роль опыта и интуиции проектировщика, а также часто связан с искажениями реальной проблемы.

Следует подчеркнуть, что в основе обоих подходов лежит количественная абстракция реальной действительности (математическая модель), которая лишь приближенно отображает эту действительность. Это обстоятельство требует зачастую корректировки модели в процессе проектирования, например, на основе физического моделирования. К тому же при втором подходе всегда есть опасность отыскать точку локального оптимума, поэтому всегда требуется экспертиза оптимального решения опытным специалистом-проектировщиком.

### **Контрольные вопросы**

17. Моделирование – это...?
18. Материальное (физическое) моделирование.
19. Идеальное моделирование.
20. Прямые и обратные связи между этапами проектирования.
21. Назовите основные субмодели самолета.
22. На какие группы делятся алгоритмы?

ЛИТЕРАТУРА: [1].

## ЛЕКЦИЯ №6

### Тема: ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ. МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ.

#### План лекции:

1. Постановка задачи.
2. Оптимальное проектное решение.
3. Методы оптимизации.

Постановка задачи («оптимум» - «optimus» - «наилучший»).

Оптимизация - это процесс нахождения экстремума количественной характеристики проектируемого объекта. Изучением и количественным определением минимумов и максимумов функций (функционалов) занимается специальный раздел математики - теория оптимизации, включающий в себя методы оптимизации различных классов функций.

Такое проектное решение, которое является наилучшим из рациональных допустимых решений, называется «оптимальное проектное решение» (оптимальный проект). Термин «допустимое проектное решение» означает, что это решение удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к проектному объекту. В случаях, когда допустимых решений несколько, возникает проблема выбора наилучшего (оптимального) решения. Это можно сделать лишь при условии, если проектное решение поддается количественной оценке, позволяющей осуществлять сравнение вариантов по показателям эффективности.

Пример: Представим, что конструктор стоит перед проблемой выбора параметров крыла, максимизирующих аэродинамическое качество:  $F=f(x_1; x_2)$  ( $F$  - аэродинамическое качество;  $x_1$  - удлинение;  $x_2$  - нагрузка на  $1 \text{ м}^2$ )

Максимум критерия достигается в точке А, являющейся вершиной холма, при значениях параметров  $x_{1\text{opt}}$  и  $x_{2\text{opt}}$ . Точка А соответствует строгому математическому оптимуму. Однако, результат может получиться иным, если математический оптимум находится за пределами допустимой области изменения проектных параметров, определяемой ограничениями на величины этих параметров (например:

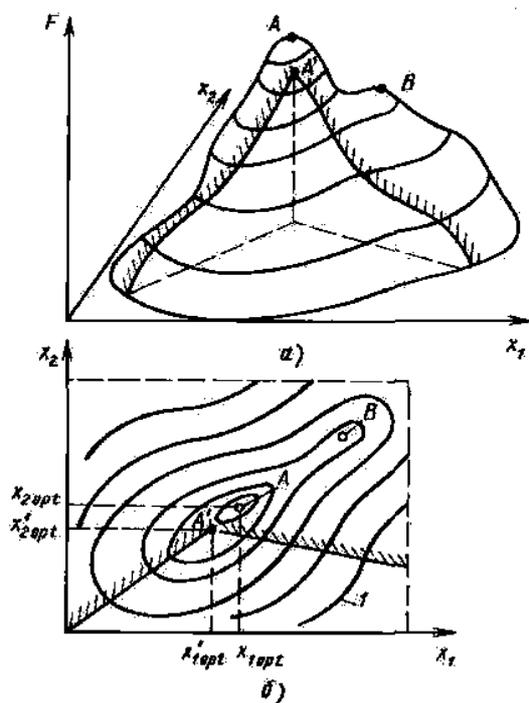


Рис. 6.1. Графическая интерпретация поиска оптимального решения

$\lambda_{\max} \leq$  из условия стоянки;  $P_0 \leq$  из условия обеспечения  $V_{3п}$ ).

В этом случае оптимальное значение критерия достигается в точке  $A'$ , лежащий на границе допустимой области. Точка  $A'$  определяет оптимальное техническое решение, соответствующее значениям параметров  $x'_{1opt}$  и  $x'_{2opt}$ . Точку  $A'$  называют условным оптимумом функции  $F$ . Именно с отысканием таких оптимумов чаще всего приходится сталкиваться проектировщику. Однако это не единственная сложность при решении практических задач оптимального проектирования. Прежде всего целевая функция может иметь несколько экстремальных значений. Это обстоятельство приводит к опасности нахождения локального оптимума (точки  $B$ ) вместо глобального ( $A$ ). Таким образом, оптимизация проектных решений является важнейшим элементом процесса проектирования и включение их в процесс, превращает его в оптимальное проектирование.

При проектировании самолетов значительное число задач относится к оптимизационному классу. При этом можно выделить два основных их типа:

**Первый тип** представляет собой случаи, в которых цель процесса оптимизации может быть выражена как функция  $F$  определенного числа переменных (проектных параметров)

$$F = f(x_i), \quad i = \overline{1, n}$$

$F$  - целевая функция,  $x_i$  - параметры или управления.

Можно предположить, что  $n$  параметров принадлежат  $n$  - мерному евклидову пространству, в котором расстояние  $\rho$  между двумя точками  $X' = (x_1', x_2', \dots, x_n')$  и  $X'' = (x_1'', \dots, x_n'')$  определяется уравнением:

$$\rho(X', X'') = \left[ \sum_{i=1}^n (x_i' - x_i'')^2 \right]^{1/2}$$

Переменные  $x_i$  могут быть интерпретированы как компоненты вектора  $X$  в  $n$  - мерной поверхности управления. В этом смысле вектор  $X$  называют вектором управления. Задачей оптимизации является выбор значений  $x_i$ , с учетом ограничений, минимизирующих или максимизирующих целевую функцию.

**Второй тип** связан с процессами, которые описываются системой обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(x_i, u_j), \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, j}$$

где  $x_i$  — переменные состояния или фазовые переменные;

$u_j$  — переменные управления или параметры управления.

Цель оптимизации обычно выражается как требование найти изменение управления по времени  $t$   $u_j(t)$ , которое обеспечивает экстремум функционала  $F$ , связанную с переходом объекта от заданного начального фазового состояния  $x_i(t_0) = x_{i0}$  к предписанному конечному фазовому состоянию  $x_i(t_1) = x_{i1}$ :

$$F = \int_{t_0}^{t_1} f_0(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r) dt = \text{opt.}$$

Большинство задач оптимального проектирования самолета и его частей относится к первому типу. Например, задачи минимизации  $m_0$  или себестоимости перевозок, путем выбора оптимальных проектных параметров:  $\rho_0, \lambda_{кр}, c, \lambda_f$  и т.д.

Примером задач второго типа является нахождение оптимальной траектории самолета, обеспечивающей минимальное время набора высоты или минимальный расход топлива.

Для постановки оптимизационной задачи необходимо:

1) определить цель оптимизации (выбрать целевую функцию  $F$ );  
 2) выбрать параметры, наиболее существенно влияющие на целевую функцию ( $x_i, i = 1, n$ );

3) выразить целевую функцию через параметры оптимизации  $F=f(x_i)$  в такой математической форме, которая, с одной стороны, отражала бы наиболее близко истинное влияние каждого параметра, а с другой, обеспечивала бы наибольшую простоту предстоящего процесса оптимизации;

4) математически описать все ограничения на отдельные параметры.

Ограничения определяют допустимую область изменения проектных параметров  $X$ . Эта область в сокращенной записи определяется следующим образом:

$$X_{\text{доп}} = \{X/g_j(X) \leq 0, j = \overline{1, m}\} (*)$$

Здесь  $g_j(X)$  — ограничения.

Любой вектор  $X$ , принадлежащий допустимой области, определяет допустимый вариант проекта, а совокупность таких векторов образует допустимую область изменения проектных параметров.

Тогда задача оптимального проектирования формулируется следующим образом: найти вектор проектных параметров  $X^* = (X_1, x_2, \dots, .x_n)$ , соответствующий минимуму величины критерия оптимальности при выполнении системы неравенств (\*). Краткая запись:

$$\begin{aligned} & \min F(X); \\ & X \in X_{\text{доп}} \\ X_{\text{доп}} & = \{X/g_j(X) \leq 0, j = \overline{1, m}\} \end{aligned}$$

## МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ

Методы оптимизации можно разделить на аналитические и численные. Аналитические методы включают в себя дифференциальное и вариационное исчисления, метод множителей Лагранжа. Применение этих методов накладывает на решаемую оптимизационную задачу существенное ограничение, - целевая функция должна быть выражена аналитически, по крайней мере один раз дифференцируема и иметь конечное число разрывов.

Обязательно также отсутствие ограничений на искомые параметры.

Методы дифференциального исчисления применяют при решении задач частной оптимизации при исследовании сравнительно несложных моделей с одним-тремя переменными, границы допустимых значений которых не проходят через экстремум целевой функции.

Если целевая функция представлена в виде функционалов, используют методы вариационного исчисления. Эти методы находят применение при решении задач оптимизации параметров траектории полета и режима изменения тяги двигателя по времени.

Появление ЭВМ и связанное с этим развитие численных методов оптимизации открыли новые возможности практической реализации методов оптимального проектирования.

Первые, наиболее значительные, результаты использования математического программирования были достигнуты при решении задач линейного программирования, т.е. задачи, в которых целевая функция, и ограничения являются линейными функциями параметров. К этому классу удается свести большой круг практических задач, таких как организация и планирование производственной деятельности, распределение и использование различных ресурсов, транспортные задачи и др.

Методы решения задач линейного программирования можно разделить на общие и специальные. Среди общих методов наибольшее распространение получили *симплекс-метод* и его разновидности.

К специальным методам принадлежат метод линейных ветвлений, распределительный метод и др.

Особый класс задач математического программирования составляют задачи, в которых переменные являются целыми числами (например: число двигателей, окон, число элементов продольного и поперечного набора и т.д.). Такие задачи получили название задач целочисленного (дискретного) программирования. Для решения таких задач разработаны специальные методы: «метод отсечения» (*метод Гомори*), «метод ветвей и границ» (комбинаторные методы).

Эти методы являются достаточно общими и позволяют решить как линейные, так и нелинейные задачи дискретного программирования.

Достаточно общий метод решения задач математического программирования, известный под названием «*динамического программирования*» разработан Р.Беллманом. Согласно принципу оптимальности принятие решений по управлению сложной системой разбивают на ряд последовательных шагов, на каждом из которых решают свою оптимизационную задачу. При этом задача минимизации функции многих переменных сводится к последовательному решению задач минимизации функции одной переменной:

$$\min_{x_1, x_2, \dots, x_n} F(x_1, x_2, \dots, x_n) = \min_{x_1} \left\{ \min_{x_2} \left[ \dots \min_{x_n} F(x_1, x_2, \dots, x_n) \right] \right\}$$

Работы Л.С. Понтрягана по дальнейшему развитию вариационного исчисления привели к формулировке «*принципа максимума*». Это позволило поставить на строгую математическую основу теорию оптимального управления и открыло возможность для решения ряда чрезвычайно сложных проблем по созданию систем автоматического управления космическими летательными аппаратами. В то же время был разработан ряд алгоритмов поиска локальных оптимумов многопараметрических функций при наличии и отсутствии ограничений на параметры.

В тех случаях, когда вычисление градиентов сложной функции численными методами либо невозможно, либо может потребовать большого машинного времени, практический интерес представляют прямые методы безусловной оптимизации. Характерной особенностью прямых методов является их эвристический характер, отсутствие строгого обоснования.

Наиболее известные методы этой группы:

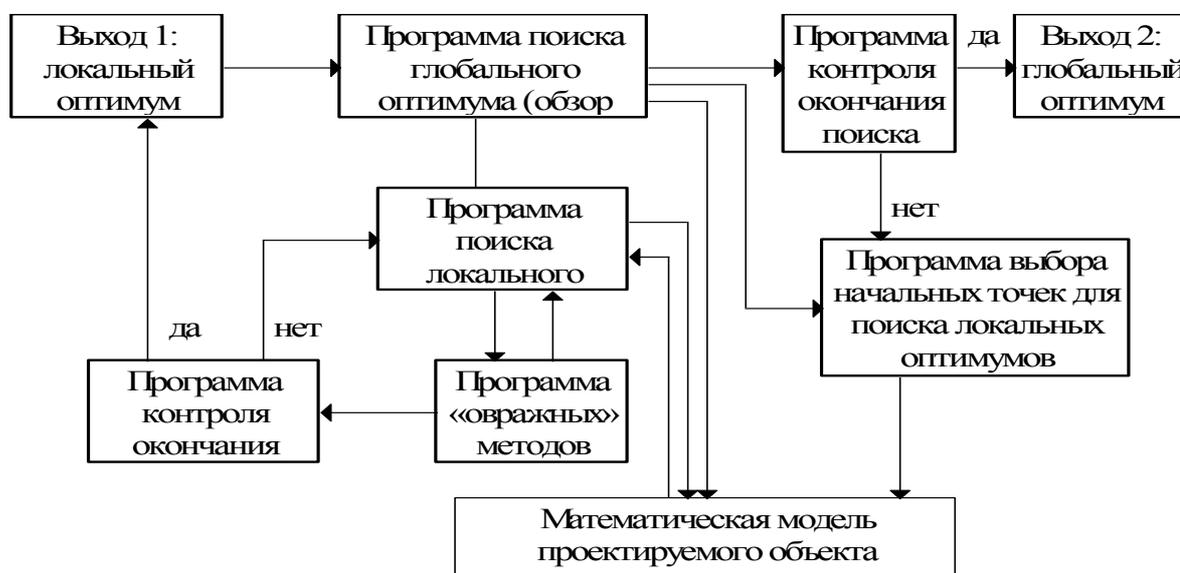
- метод покоординатного спуска (метод Гаусса-Зейделя);
- метод конфигураций (метод Хука и Дживса);
- метод деформируемого многогранника (метод Нелдера и Мида);
- метод Розенброка;
- метод Пауэла.

Особую группу среди прямых методов занимают «*методы случайного поиска*».

Наибольший интерес для проектировщика представляет решения задач нелинейного программирования с ограничениями.

Возможные методы решения:

- метод возможных направлений;
- метод проективного градиента;
- метод аппроксимирующего линейного программирования;
- метод штрафных функций.



### **Рис. 6.2. Структура программного комплекса оптимального проектирования**

Опыт показывает, что не существует универсального метода, который можно успешно применить к широкому кругу практических задач оптимизации облика самолета и его конструктивно-силовой схемы. В развитых системах автоматизированного проектирования имеется специальная подсистема оптимизации, представляющая собой сложный программный комплекс. Он включает в себя комбинацию различных методов поиска экстремума, объединенных специальной управляющей программой, осуществляющей переход к различным методам в зависимости от поведения целевой функции на различных шагах итерации.

### **Контрольные вопросы**

23. Оптимизация – это...?
24. Оптимальное проектное решение – это...?
25. Методы оптимизации.
26. Структура программного комплекса оптимального проектирования.

ЛИТЕРАТУРА: [1, 2].

## ТЕМА III. МЕТОДОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ САПР ЛЕКЦИЯ №7

### Тема: ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

#### План лекции:

4. Основные понятия и положения общей технологии автоматизации проектирования.
5. Основные положения общей методики разработки структуры и схемы функционирования САПР.
6. Описание и анализ структуры и схемы функционирования САПР на общесистемном уровне.

#### 1. Основные понятия и положения общей технологии автоматизации проектирования

Согласно ГОСТ 235010-79 «Системы автоматизированного проектирования Основные положения» САПР представляет собой организационно-техническую систему, выполняющую автоматизированное проектирование и состоящую из комплекса средств автоматизации проектирования и взаимосвязанного с ним коллектива специалистов проектной организации. В общем случае под ОТС понимается взаимодействующая совокупность коллектива людей в рамках административно-организационных структур и технических средств, объединенных общностью решаемой задачи. Таким образом, САПР является частным случаем ОТС, который характеризуется своим типом решаемых задач (задачи проектирования), технических устройств (электронно-вычислительная техника и обеспечивающее оборудование) и административно-организационных структур (структуры проектной организации).

Для обеспечения однозначности понимания излагаемых далее вопросов, связанных с описанием структуры и схемы функционирования САПР, остановимся на некоторых положениях и понятиях, используемых в практике автоматизированного проектирования.

Ряд положений, рассмотренных выше, допускает их обобщение в виде формализованного представления САПР. И неслучайно, что формализация представления САПР как единой системы стала одним из вопросов общей методологии автоматизации проектирования.

Общим для этого является отражение понимания САПР как организационно-технической системы. Возможный вид такого представления показан на рис 7.1. Структура КСАП соответствует наличию в составе САПР собственной СУБД, условно обозначенной ОПС I, и подсистемы документирования, обозначенной ОПС M. В связи с этим, в число специалистов, взаимосвязанных с КСАП, помимо специалистов по

проектированию (3) входят оформители проектной документации (5) и администраторы базы данных (4). Кроме них в организационную систему входят также лица, принимающие решения (1), руководитель САПР (2), также наделенный полномочиями принятия решений, и специалисты по эксплуатации и сопровождению КСАП (6).

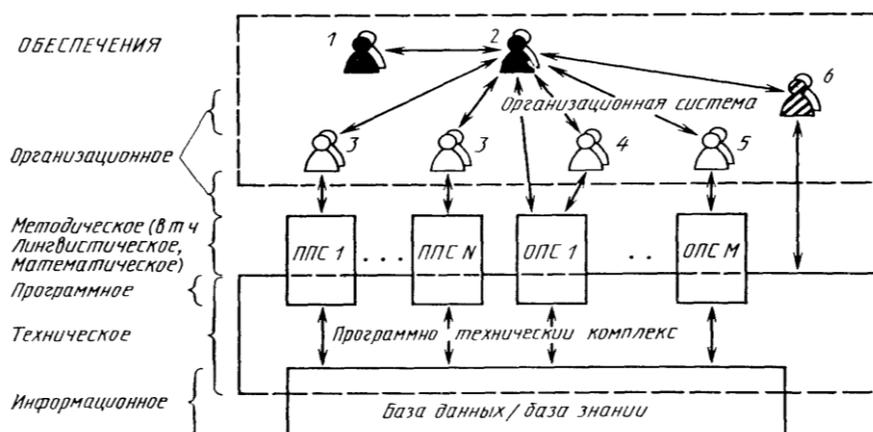


Рис 7.1. Формализованное представление САПР как организационно-технической системы:  
 1-ЛПР; 2-руководитель САПР; 3-пользователи САПР; 4-администраторы базы данных; 5-оформители проектной документации; 6-специалисты по эксплуатации и сопровождению КСАП.

Исходя из понятия САПР как ОТС, можно различать системы минимальной и максимальной структуры. САПР минимальной структуры соответствуют тем единичным административно-организационным составляющим проектной организации, автоматизация проектной деятельности которых характеризуется выполнением требования системного единства как одного из принципов ее создания. Такие единичные составляющие обеспечивают выполнение достаточно масштабных и замкнутых частей процесса проектирования, обозначенных выше как проектные работы.

Конкретная САПР максимальной структуры образуется комплексом САПР проектных работ при условии, что они разработаны с учетом принципа включения. Такая комплексная система ограничивается, как правило, административно-организационными рамками проектной организации. Простая совокупность САПР проектных работ, не взаимосвязанных между собой выполнением общих программ проектных разработок, не образует единую комплексную САПР. Поэтому в рамках проектной организации могут существовать несколько независимых друг от друга комплексных САПР или просто САПР проектных работ.

Формализованное представление САПР (см. рис. 7.1.) является удобным средством наглядного отображения общих результатов разработки САПР. Оно не является, однако, средством проведения самой этой разработки. Этой цели служит методика разработки структуры и схемы функционирования САПР.

## 2. Основные положения общей методики разработки структуры и схемы функционирования САПР

Разработка структуры и схемы функционирования САПР невозможна без их формализованного описания. Такое описание создает необходимые условия для систематизированного анализа уже имеющихся и разработки новых решений в части практической реализации автоматизированного проектирования.

Методической основой описания структуры и схемы функционирования САПР является технология структурного программирования, которая позволяет ввести в выполнение данной работы определенный аппарат формирования и формализованного описания принимаемых здесь решений, сделать эту работу управляемой и контролируемой со стороны руководителя разработки

Представляют интерес два методических средства структурного программирования, получившие применительно к разработке САПР наименования структурной диаграммы и диаграммы состояний. Оба средства основаны на поэлементном анализе описываемых процессов. *Структурная диаграмма* описывает декомпозицию сложных процессов (состояний системы) на более простые. *Диаграмма состояний* описывает взаимосвязь процессов в пределах того комплексного процесса, в который они входят. Эта взаимосвязь характеризует последовательность простых состояний, которые может принимать выполняемая системой работа.

При использовании данных средств применительно к описанию структуры и схемы функционирования САПР узлы диаграмм соответствуют отдельным проектным процессам, реализуемым соответствующими структурными компонентами. Поэтому уровни детализации структурной диаграммы можно рассматривать как уровни структурной детализации САПР и самого автоматизированного процесса проектирования. Следует подчеркнуть, что эти уровни не являются аналогией тем, которые используются в системном, организационном и системно-организационном макроописаниях проектирования. Понижение уровня в этих макроописаниях означает переход от одних проектных процессов к другим. Здесь же понижение уровня - переход к более общему рассмотрению процесса проектирования в целом.

Иллюстрация рассматриваемых средств структурного программирования при их использовании для описания структуры и схемы функционирования САПР представлена на рис. 7.2., где ППС - проектирующая подсистема (или реализуемая ею частная задача проектирования); ОПС - обслуживающая подсистема (или реализуемая ею частная задача проектирования); СК - структурный компонент подсистемы (или реализуемый им компонент частной задачи проектирования). Принятые уровни структурной детализации САПР предполагают следующее соответствие: 0—проектный процесс, реализуемый в рамках отдельной САПР минимальной структуры (т. е. проектная работа); 1—проектный процесс, реализуемый в рамках отдельной подсистемы (т. е. частная задача проектирования, в том числе проектная

процедура); 2—отдельный компонент частной задачи проектирования (в частном случае—проектная операция). Стрелками на диаграмме состояний обозначены возможные переходы от одного состояния к другому, в том числе входы и выходы диаграммы состояний.

Дальнейшими уровнями структурной детализации САПР (или автоматизированного проектирования), не показанными на рис. 5.2., являются: 3—отдельный алгоритм проектной деятельности в составе компонента частной задачи проектирования; 4—элементарное взаимодействие между отдельными исполнителями алгоритма проектной деятельности; 5—составляющая элементарного взаимодействия, выполняемая отдельным компонентом.

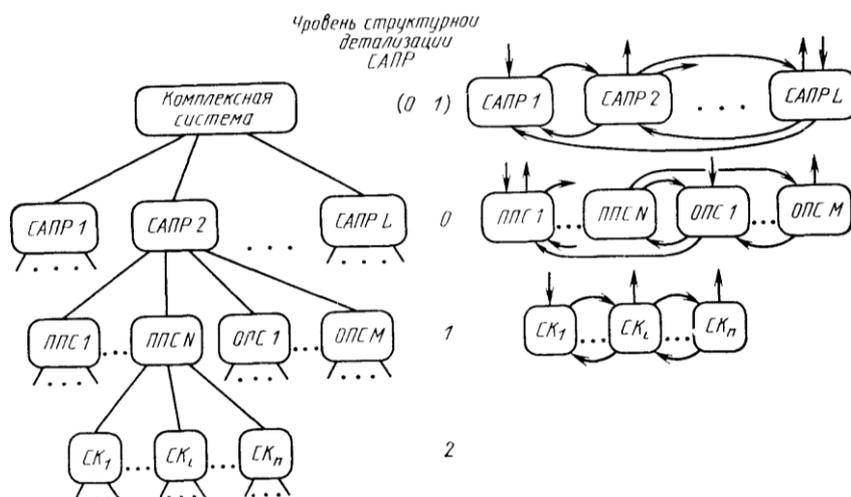


Рис. 7.2.. Структурная диаграмма и диаграмма состояний как средство описания структуры и схемы функционирования САПР

Структурная диаграмма представляет собой граф типа дерева, так как узлы каждого уровня структурной детализации САПР могут принадлежать только одному из вышестоящих узлов. Диаграмма состояний описывает автоматизированное проектирование в рамках процесса, соответствующего отдельному узлу структурной диаграммы. В связи с этим одной структурной диаграмме соответствует определенный набор (по числу узлов структурной детализации САПР) диаграмм состояний.

Переход от одного узла диаграммы состояний к другому предполагает выполнение определенных условий по состоянию процесса проектирования и следует определенным правилам функционирования САПР. Выяснение этих условий и правил представляет собой один из вопросов рассматриваемого подхода к описанию структуры и схемы функционирования САПР. Его решение связано с выявлением и формализацией типовых закономерностей функционирования САПР на разных уровнях структурной детализации автоматизированного процесса проектирования.

Учитывая целевую направленность функционирования САПР и ее компонентов в процессе автоматизированного проектирования, можно считать конечным множеством как состояния различных уровней детализации этого процесса, так и те входные и выходные воздействия, с которыми связаны эти

состояния. В этом случае функционирование САПР на всех уровнях ее структурной детализации интерпретируется конечным автоматом (КА)

$$A = A(\{S\}, \{Z\}, \{Y\}, F_s, F_u),$$

где  $\{S\}$ —множество состояний КА;  $\{Z\}$ —множество входных воздействий КА,  $\{Y\}$  — множество выходных воздействий КА;  $F_s, F_u$ —функции, определяющие отображения;

$$F_s \{S\} \times \{Z\} \rightarrow \{S\}, \quad (7.2.)$$

$$F_u \{S\} \times \{Z\} \rightarrow \{Y\} \quad (7.3.)$$

Функции (5.2.), (5.3.) являются общим видом формализованного представления типовых закономерностей функционирования САПР на всех уровнях ее структурной детализации

Моделирование или анализ этого функционирования во времени описывается при этом уравнениями вида

$$S_{t+1} = F_s(Z_t, S_t), \quad (7.4.)$$

$$Y_t = F_u(Z_t, S_t). \quad (7.5.)$$

Как динамический процесс, описываемый этими уравнениями, функционирование САПР характеризуется определенными показателями, относящимися соответственно к отдельным состояниям самого процесса, и переходам из одного состояния в другое

*Характеристиками состояний автоматизированного проектирования* (или компонентов САПР) являются сами функции этих состояний в процессе реализации автоматизированного проектирования на соответствующем уровне структурной детализации САПР. Они могут быть выражены простым названием или обозначением этих состояний, раскрывающими их функции. Характеристиками состояний являются также способы, режимы и методы автоматизированного решения проектных задач, используемые в соответствующих компонентах САПР, а также затраты (в том числе времени), связанные с реализацией этих состояний.

*Характеристиками переходов между отдельными состояниями* являются, в частности, показатели информационной взаимосвязи основных структурных составляющих САПР. Необходимость их анализа при описании структуры и схемы функционирования САПР обусловлена требованиями совместимости как одного из основных принципов ее создания

В качестве показателей информационной взаимосвязи структурных составляющих САПР могут использоваться объем, время и интенсивность обменов проектной информацией автоматизированного проектирования. Формой их представления, удобной для проведения анализа, является информационная матрица смежности. Общий вид такой матрицы дан в табл. 7.1., где коэффициенты  $K_A^B$  служат для обозначения объемов, времени или интенсивности передачи информации из состояния автоматизированного проектирования А в состояние В одного и того же уровня структурной детализации САПР. Обозначения состояний, принятые в табл., соответствуют обозначениям САПР, использованным на рис 7.1 и 7.2.

В общей структуре информационного взаимодействия не все компоненты САПР (или состояния автоматизированного проектирования) являются источниками проектной информации. Это относится к компоненту ОПС *M* (см табл. 7.1.), символизирующему подсистему документирования. Наличие свойства передачи проектной информации также не является показателем идентичности компонентов САПР в отношении информационной взаимосвязи. Объем и интенсивность информационного обмена для разных компонентов САПР могут быть весьма различны. Более того, показатели информационной взаимосвязи компонентов САПР определяются не только их функциональным назначением, но и той структурой функционирования, которая может быть различной

Таблица 7.1

<i>A</i>	<i>B</i>					
	<i>ППС 1</i>	...	<i>ППС N</i>	<i>ОПС 1</i>	...	<i>ОПС M</i>
<i>ППС 1</i>			<i>К ППС N</i> <i>ППС 1</i>	<i>К ОПС 1</i> <i>ППС 1</i>		<i>К ОПС M</i> <i>ППС 1</i>
⋮						
<i>ППС N</i>	<i>К ППС 1</i> <i>ППС N</i>			<i>К ОПС 1</i> <i>ППС N</i>		<i>К ОПС M</i> <i>ППС N</i>
<i>ОПС 1</i>	<i>К ППС 1</i> <i>ОПС 1</i>		<i>К ППС N</i> <i>ОПС 1</i>			<i>К ОПС M</i> <i>ОПС 1</i>
⋮						
<i>ОПС M</i>	—		—	—		

Согласно подходу, принятому в настоящей работе, основными составляющими описания структуры и схемы функционирования САПР являются:

структурная диаграмма автоматизированного проектирования определенного уровня детализации САПР;

диаграммы состояний процессов автоматизированного проектирования соответствующих уровней структурной детализации САПР;

типичные закономерности функционирования САПР на соответствующих уровнях ее структурной детализации и их формализованные представления в виде функций (7.2.), (7.3.) и учитываемых ими множеств состояний, входных и выходных воздействий КА;

функции, способы, режимы и методы реализации отдельных состояний автоматизированного проектирования как характеристики этих состояний;

показатели информационной взаимосвязи структурных составляющих САПР как характеристики переходов между отдельными состояниями автоматизированного проектирования.

Ниже представлены некоторые примеры практического использования данного подхода при описании и анализе особенностей различных процессов,

определяющих функционирование САПР ЛА на различных уровнях структурной детализации. Рассмотрены процессы, относящиеся к общесистемному уровню (т.е. функционирование САПР проектных работ и комплексная САПР) и уровню структурных компонентов САПР (т.е. реализация автоматизированного решения проектных задач, компонентов этих задач и отдельных алгоритмов проектной деятельности). Дополнительно рассмотрено описание и анализ особенностей интерактивного взаимодействия в процессах решения проектных задач.

Вопросы описания структуры и схемы функционирования на уровне компонентов САПР рассмотрены на примерах частных задач проектирования, классифицируемых как проектные процедуры и образующих в совокупности процесс разработки ПР. Являясь типовой задачей проектирования, каждая из них допускает определенную типизацию своего общего описания. Такие типовые описания будем именовать далее описаниями проектных процедур (ОПП).

### **3. Описание и анализ структуры и схемы функционирования САПР на общесистемном уровне**

#### **Характеристики состояний автоматизированного проектирования.**

Для стадий разработки ТЗ, аванпроектирования и эскизного проектирования ЛА примерами характеристик состояний автоматизированного процесса проектирования ( $0-1$ ) уровня структурной детализации САПР могут быть функции следующих типовых САПР проектных работ:

- система определения технической концепции ЛА соответствующего целевого назначения (система ОТК);

- система проектной разработки облика ЛА соответствующего целевого назначения (система ПРО);

- система проектирования силовой конструкции ЛА (система ПСК);

- система проектирования кабины экипажа ЛА (система ПКЭ);

- система уточненного анализа летно-технических и специфических по целевому назначению характеристик ЛА (система АЛТСХ);

- система комплексного операционного моделирования ЛА соответствующего целевого назначения (система КОМ) и т.д.

Последние две системы обеспечивают выполнение тех этапов проектирования, которые связаны в основном с анализом, а не с синтезом ПР. По используемой в отечественной практике терминологии они могут именоваться автоматизированными системами научных исследований (АСНИ). Это не меняет, однако, существа рассматриваемого вопроса, поскольку АСНИ, так же как и САПР,—один из видов ОТС.

Применительно к системно-организационному макроописанию проектирования система КОМ, по выполняемым ею функциям в процессе проектирования, относится к этапу 2 процесса проектирования ( $0-1$ ) уровня детализации ЛА, система ОТК—к этапам 1 и 2 процесса проектирования  $0$ -го уровня, система АЛТСХ—к этапу 2 процесса проектирования  $0$ -го и  $1$ -го уровней, система ПРО—к этапу 1 процесса проектирования  $7$ -го уровня,

системы ПСК, ПКЭ—к этапам 1 процесса проектирования 2-го уровня детализации ЛА В то же время применительно к структурной детализации САПР (см. рис. 7.2.) все указанные системы соответствуют элементам 0-го уровня структурной детализации САПР.

Помимо указанных систем в процессе автоматизированного проектирования ЛА находит применение еще одна система минимальной структуры, которую будем именовать системой управления проектной разработкой (УПР). По характеру решаемых задач она относится к классу АСУ, которые идентичны САПР, так как тоже являются одним из видов ОТС.

Элементы 1-го уровня структурной детализации САПР (см. рис. 7.2.) представляют отдельные подсистемы. Для рассмотренных выше САПР проектных работ типичными структурными компонентами, определяющими характеристики их состояний при решении отдельных частных задач проектирования, являются:

*проектирующие подсистемы:*

синтеза проектного решения по облику ЛА соответствующего целевого назначения (п/с СПРО);

анализа весовых характеристик ЛА соответствующего целевого назначения (п/с АВХ);

анализа аэродинамических характеристик ЛА (п/с ААХ);

анализа характеристик силовой установки (п/с АХСУ);

анализа общих летно-технических (т. е. транспортных, взлетно-посадочных) характеристик ЛА (п/с АОЛТХ);

анализа специальных летно-технических (т.е. маневренных, разгонно-скоростных и т. д.) характеристик ЛАСН (п/с АСЛТХ),

анализа технико-экономических показателей (п/с ТЭП);

синтеза ПР по компоновке ЛА соответствующего целевого назначения (п/с СПРК);

объемно-габаритного анализа компоновки ЛА (п/с ОГАК);

анализа информационных признаков ЛА (п/с АИП);

анализа специальных режимов функционирования ЛАСН соответствующего целевого назначения (п/с АСРФ);

синтеза ПР по конструкции планера ЛА (п/с СПРКП);

анализа напряженно-деформированного состояния конструкции ЛА (п/с АНДС);

оценки эффективности органов управления ЛА (п/с ОЭОУ).

*Обслуживающие подсистемы,:*

мониторная система САПР (п/с монитор);

автоматизированный банк данных САПР (п/с АБД);

автоматизированная база знаний САПР (п/с АБЗ);

подсистема документирования проектной информации (п/с ДПИ);

Конкретный структурный состав подсистем САПР определяется в первую очередь двумя факторами: назначением и областью применения САПР и предусмотренной в САПР степенью инвариантности ее структурных компонентов в отношении типа проектируемых ЛА.

Если первый из этих факторов в основном определяется общими требованиями, то второй в значительной степени является результатом тех решений, которые принимаются при разработке САПР в отношении ее структуры и схемы функционирования.

**Диаграммы состояний и типовые закономерности функционирования САПР.** Конкретный вид диаграмм состояний и содержание закономерностей функционирования САПР рассмотрим на примере описания автоматизированной технологии проектирования, реализованной на фирме Мак Доннелл-Дуглас в середине 70-х годов. Масштабность этой технологии, получившей обозначение «САТ Ргојет», обеспечивала почти сквозную автоматизацию проектирования ЛАСН от стадии разработки технического задания до стадии эскизного проектирования.

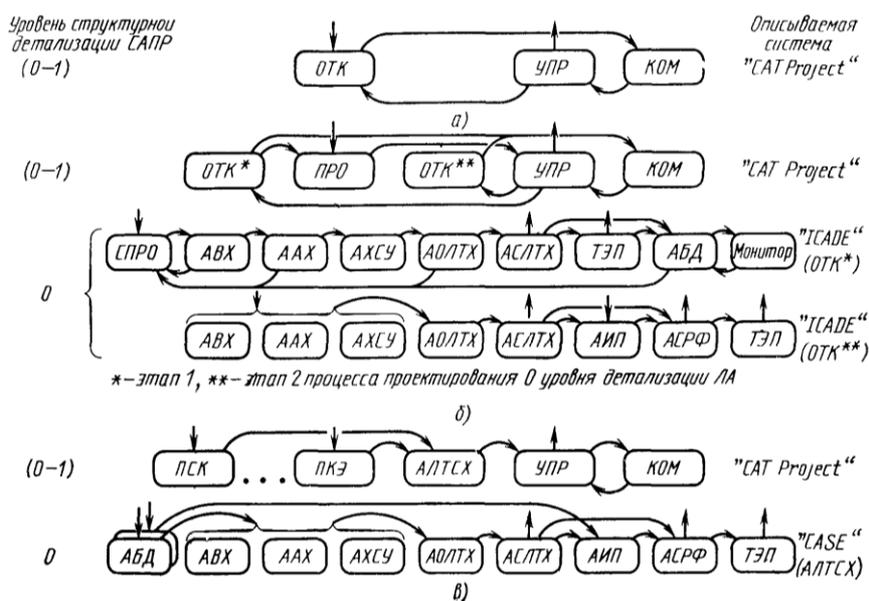


Рис. 7.3. Схема функционирования комплексной системы автоматизированного проектирования ЛА «САТ Ргојет»

В комплексной системе «САТ Ргојет» выделяются более десяти самостоятельных САПР минимальной структуры, обеспечивающих выполнение определенных проектных работ. В их число входят системы определения технической концепции ЛАСН—«ІСАДЕ», проектной разработки облика ЛАСН — «САЛЛ» и система уточненного анализа летно-технических и специфических по целевому назначению характеристик ЛАСН — «САСЕ»

Организационными системами, участвующими в автоматизированном проектировании, для этих САПР соответственно являлись: отдел автоматизированных проектных исследований, проектный отдел и отдел анализа проекта. Диаграммы состояний, соответствующие описанию функционирования этой системы и ее составляющих (САПР «ІСАДЕ» и САПР «САСЕ»), представлены на рис 7.3 применительно к реализации проектного процесса на стадии разработки технического задания (рис 7.3., а), аванпроектирования (рис 7.3., б) и эскизного проекта (рис 7.3., в). Для стадии аванпроектирования приведены две диаграммы состояния 0-го уровня

структурной детализации САПР. Одна из них соответствует выполнению 7-го, а другая - 2-го этапа процесса проектирования 0-го уровня детализации ЛА. В отличие от этого диаграмма состояний 0-го уровня структурной детализации САПР, приведенная для стадии эскизного проектирования, соответствует выполнению 2-го этапа в процессах проектирования как 0-го, так и 1-го уровней структурной детализации ЛА. Условные обозначения, использованные на рис 5.3., соответствуют оговоренным выше.

Идентичность обозначений подсистем, входящих в состав САПР «ICADE» (система ОТК) и САПР «CASE» (система АЛТСХ), не означает идентичности состояний процесса автоматизированного проектирования. Например, подсистемы ААХ, АВХ в разных САПР используют существенно различные методы анализа, отличающиеся процедурами построения расчетных моделей, алгоритмами расчета и достоверностью получаемых результатов. Подсистема ТЭП в составе САПР «CASE» учитывает не только стоимость производства и эксплуатации ЛАСН, что обеспечивается аналогичной подсистемой в составе САПР «ICADE», но и показатели надежности и живучести ЛАСН.

Применительно к разным стадиям и этапам проектирования ЛА одни и те же компоненты САПР имеют различие как в составе возможных состояний реализуемого процесса проектирования, так и в последовательность этих состояний. Так применительно к (0-1)-му уровню структурной детализации САПР возможными состояниями автоматизированного процесса проектирования на стадии разработки ТЗ являются работы по определению технической концепции; на стадии аванпроекта - работы по определению технической концепции и проектной разработке облика ЛАСН, а на стадии эскизного проектирования - работы по проектированию основных элементов ЛАСН (силовая конструкция, кабина экипажа и т.д.).

Применительно к 0-му уровню структурной детализации САПР различие состава состояний реализуемого процесса проектирования можно видеть из сравнения диаграмм, описывающих функционирование САПР «ICADE» (ОТК на этапах 1 и 2 процесса проектирования 0-го уровня детализации ЛА. Его можно видеть также при сравнении диаграмм состояний описывающих функционирование САПР «CASE» (АЛТСХ) и САПР «ICADE» (ОТК) при выполнении этапа 2 процесса проектирования 0-го уровня детализации ЛА. Особым состоянием САПР «CASE» является работа с АБД. Наличие такого состояния обусловлено получением исходной информации от большого числа других САПР, функционирующих вне зависимости друг от друга. Это порождает не только большой объем данных, которые должны быть введены в процесс функционирования САПР «CASE», но и довольно большую продолжительность выполнения такой работы. Накопление исходной информации, необходимой САПР «CASE» для проведения комплексного анализа одной серии вариантов проекта ЛАСН, занимает на стадии эскизного проектирования одну неделю. Проведение такого анализа на стадии аванпроектирования, где данная работа выполняется с использованием САПР «ICADE», характеризуется не только меньшим объемом исходной информации, но и одновременностью получения всего объема информации.

Это связано с тем, что все исходные данные для проведения комплексного анализа проекта обеспечиваются одной САПР проектных работ Ев является САПР «CASE» (система ПРО).

Диаграммы состояний (см. рис. 7.3.) иллюстрируют наличие в процессе автоматизированного проектирования условных и безусловных переходов от одного состояния к другому и распараллеливание процессов выполнения отдельных работ.

Различные типы переходов отражают типовые закономерности функционирования САПР на (0-1)- и 0-м уровнях детализации автоматизированного проектирования. Безусловные переходы продиктованы определенной логикой выполнения работ. Например, анализ аэродинамических характеристик силовой установки должны быть проведены до анализа ЛТХ; проектная разработка облика ЛА должна предшествовать анализу характеристик ЛА и т.д. Условные переходы связаны с теми альтернативами управления процессом проектирования, которые могут возникать при различных состояниях САПР. Это относится, в частности, к организации циклов поиска новых ПР, что является одной из функций системы УПР на стадии аванпроектирования. Это относится также к организации процесса поиска рациональных вариантов ПР, который иллюстрирует (см рис. 7.3., б) диаграмма состояний САПР «ICADE» (система ОТК).

Распараллеливание процессов выполнения отдельных работ (см рис. 7.3.) отражено как наличие общего входа и/или выхода для нескольких состояний или наличия нескольких входов для диаграммы состояний в целом. Распараллеливание работ не приводит к декомпозиции самой диаграммы состояний. Оно предполагает, что отдельно протекающий процесс либо является частным, а не общим случаем функционирования САПР, либо вообще не имеет собственного выхода из диаграммы состояний, а поэтому не может рассматриваться как частный вариант функционирования САПР.

Таблица 7.2.

А	В				
	ОТК*	ПРО	ОТК**	УПР	КОМ
ОТК*		0,3	—	—	0,3
ПРО	—		—	1,5	—
ОТК**	—	—		—	0,1
УПР	0,3	—	0,3		—
КОМ	—	—	—	0,1	

**Характеристики переходов между состояниями автоматизированного проектирования.** Рассмотренный выше пример описания автоматизированной технологии проектирования является достаточно типовым для САПР, ориентированных на автоматизацию проектирования ЛАСН. Он иллюстрирует описание схемы функционирования САПР на общесистемном уровне детализации этой системы, но только качественную его сторону. Иллюстрацией

количественного описания этой схемы являются табл. 7.2. и 7.3. Они представляют собой конкретные приложения информационной матрицы смежности, общая идея которой выражена табл. 7.1., для характеристики интенсивности информационного обмена между отдельными САПР. Табл. 7.2. соответствует диаграмме состояния (0—1)-го уровня структурной детализации САПР, показанной на рис. 7.3., б, табл. 7.3.—аналогичной диаграмме, показанной на рис. 7.3., в. В качестве коэффициентов  $K_A^B$  в таблицах представлены величины интенсивности информационного обмена между отдельными САПР ( $I_A^B$ ). Они характеризуют число информационных обменов за определенное время и имеют размерность «число обменов/неделя» ( $n^{-1}$ ).

Таблица 7.3.

А	В					
	ПСК	...	ПКЭ	АЛТСХ	УПР	КОМ
ПСК		—	—	1,0	—	—
⋮						
ПКЭ	—			2,0	—	—
АЛТСХ	—		—		3,0	—
УПР	—		—	—		1,5
КОМ	—		—	—	1,5	

Представленные числовые значения получены расчетно-статистическим анализом данных по использованию системы «САТ Ргојест» в процессах проектирования различных ЛАСН. Расчетная обработка статистических данных основывалась на уравнениях организации процесса проектирования. Заметим в связи с этим, что отдельные величины интенсивности информационного обмена  $I_A^B$  представленные в табл. 7.2., 7.3., определенным образом связаны с показателями интенсивности проектной разработки  $I_g^k$  и  $I_k^k$ , используемыми в уравнениях (7.15'), (7.17'). Так для аванпроектирования величина  $I_{ПРО}^{УПР}$ , соответствует показателю  $I_1^1$ , величины  $I_{УПР}^{ОТК*}$ ,  $I_{КОМ}^{УПР}$ ,  $I_{УПР}^{ОТК**}$ , и  $I_{ОТК**}^{КОМ}$  - показателю  $I_0^1$ , а величины  $I_{ОТК*}^{КОМ}$ , и  $I_{ОТК*}^{ПРО}$  - соотношению  $I_1^1/I_0^0$ . Для эскизного проектирования величины  $I_{ПКЭ}^{АЛТСХ}$  - соответствуют показателю  $I_0^2$ , величина  $I_{АЛТСХ}^{УПР}$  - выражению  $A_1A_2I_0^2$ , а величины  $I_{УПР}^{КОМ}$ ,  $I_{КОМ}^{УПР}$  могут быть представлены как  $(1+M_0^2)/(\Sigma T_0^2)_2$ .

Как можно видеть из табл. 7.2. и 7.3., интенсивность информационного обмена между отдельными САПР проектных работ может быть весьма различной. Для каждой пары САПР, входящих в качестве структурных составляющих в комплексную систему, величина  $I_A^B$  определяется прежде всего местом и ролью этих САПР в конкретных процессах проектирования В

диаграммах состояний, описывающих реализацию различных проектных процессов, информационная взаимосвязь между одними и теми же САПР может характеризоваться существенно различной величиной  $I_A^B$ .

Еще одним фактором, определяющим интенсивность информационного обмена между САПР и их компонентами, можно считать интенсификацию проектирования, которая зависит от самой автоматизации проектного процесса.

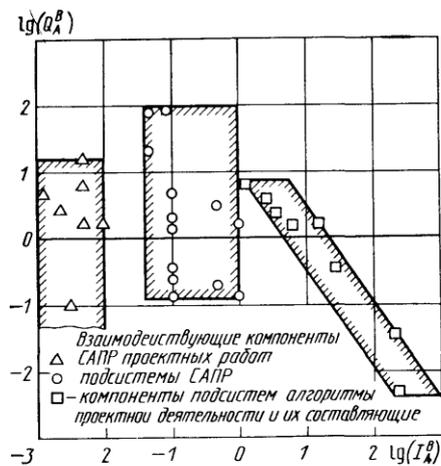


Рис. 7.4. Анализ интенсивности информационного обмена между взаимодействующими компонентами САПР ЛА

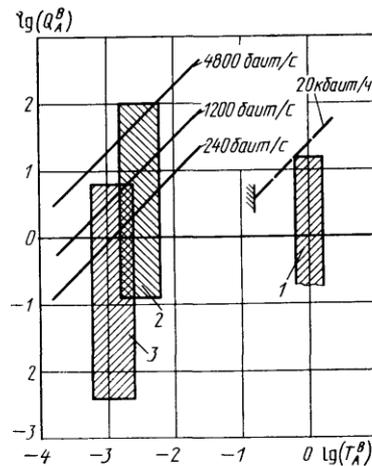


Рис. 7.5. Анализ скорости информационного обмена между взаимодействующими компонентами САПР ЛА

- САПР проектных работ; 2 - подсистемы САПР; 3 - компоненты подсистем, алгоритмы проектной деятельности и их составляющие

1

Такое влияние обусловлено отмеченной выше взаимосвязью величин интенсивности информационного обмена  $I_A^B$  и показателей интенсивности проектной разработки  $I_g^k, I_k^k$ . В связи с этим комплексный анализ показателей, количественно описывающих функционирование САПР, требует учета не только характеристик реализуемых процессов проектирования, но и характеристик самой автоматизации проектирования. Для этого может быть использован показатель интенсивности проектной разработки  $I_0^1$ . Для рассмотренного примера комплексной системы «САТ Ргојет»  $I_0^1 = 0,32 (h)^{-1}$

Фрагмент анализа количественных показателей процесса функционирования еще одной комплексной системы, подобной в целом системе «САТ Ргојет», показан на рис 7.4. и 7.5. Представленные там данные определяют комбинации величин интенсивности информационного обмена  $I_A^B$ , передаваемого при каждом обмене объема информации  $Q_A^B$  и времени этого обмена  $T_A^B$ . Данные по информационному обмену между отдельными состояниями автоматизированного проектирования сгруппированы по уровням структурной детализации САПР, которым соответствуют эти состояния. Помимо данных, характеризующих информационный обмен на общесистемном

уровне, т.е. между САПР проектных работ и между подсистемами САПР (см. рис 7.4., 7.5.), представлены также данные, относящиеся к более детальному описанию структуры и схемы функционирования САПР. Рассмотренные показатели имеют размерность  $I_A^B - (\text{ч})^{-1}$ ,  $Q_A^B - \text{кбайт}$ ,  $T_A^B - \text{ч}$ . Все точки (см. рис. 7.4.) и области (см. рис. 7.5.) соответствуют информационному обмену при использовании САПР в проектных исследованиях по ЛАСН, типичных для стадии аванпроектирования. При выполнении этих исследований функционирование комплексной системы характеризовалось величиной  $I_0^1(\text{н}) \sim 1$ .

Как результат анализа (см рис. 7 4) показаны области значений  $Q_A^B$  и  $I_A^B$ , соответствующие разным уровням структурной детализации САПР. Для первого уровня структурной детализации математическое выражение такой области имеет вид

$$\left[ \frac{K}{I_A^B} \leq Q_A^B \leq K \cdot I_A^B \right] \quad (7.6.)$$

где  $K$  - статистический коэффициент, значение которого составляет 10... 100 при размерностях  $I_A^B - (\text{мин})^{-1}$  и  $Q_A^B - \text{байт}$ .

Что касается остальных уровней структурной детализации САПР» то анализ данных, аналогичных представленным на рис. 5.4. и в табл. 5.2. и 5.3., позволяет принять следующую зависимость

$$\left[ \frac{K'}{I_A^B} \leq Q_A^B \leq K' \cdot I_A^B \right] \quad (7.7.)$$

где  $N_{\text{пр}}$ —число одновременно реализуемых в САПР программ проектных работ. Значения  $K'$  и типичные величины  $Q_A^B$ , соответствующие рассматриваемым уровням структурной детализации САПР, представлены в табл. 7.4. Значения  $K'$  соответствуют величинам  $I_0^1$  и  $I_A^B$ , имеющим размерность  $(\text{н})^{-1}$ , а величина  $Q_A^B$  имеет размерность - Кбайт

Еще одним результатом проведенного анализа (см. рис. 7.5.) является характеристика рассматриваемых САПР и их компонентов по скорости информационного обмена. Напомним, что интенсивность информационного обмена  $I_A^B$  не определяет сама по себе времени реализации этих обменов и не характеризует реализуемой при этом скорости передачи информации. Из сравнения данных (см. рис. 7.4. и 7 5) можно видеть, что довольно близкие по величине  $I_A^B$  САПР и их подсистемы существенно различаются по величине  $T_A^B$ . Напротив, подсистемы САПР и их компоненты, весьма различающиеся по величине  $I_A^B$ , почти совпадают друг с другом по величине  $T_A^B$ .

Реализация во всем диапазоне  $Q_A^B$  и  $T_A^B$  информационного обмена между подсистемами САПР и их компонентами требует скорости передачи

информации не менее 4800 байт/с. Она может быть обеспечена как на уровне внутримашинного, так и внешнего обмена между ЭВМ с помощью специальных средств связи. Для компонентов подсистем и более мелких структурных составляющих САПР информационный обмен (см. рис. 7 5) реализуется при скорости передачи информации 1200 байт/с, что соответствует возможностям обычных телефонных линий связи. При использовании разнотипных ЭВМ скорость информационного обмена между ними может лимитироваться пропускной способностью не самих линий связи, а различных связных адаптеров. Очевидно, что на рассматриваемых уровнях структурной детализации САПР, требуемая скорость информационного обмена может быть обеспечена при пропускной способности адаптера 240 байт/с.

Таблица 7.4.

Уровень структурной детализации САПР	0-1	0
$K^?$	0,7..7	34..340
$Q_A^B$	0,01..20	0,1..100

Что же касается САПР проектных работ, то потребная для их информационной взаимосвязи оперативность переноса информации может быть обеспечена с помощью внешних (промежуточных) носителей информации. К их числу относятся не только магнитные носители, использование которых при переносе больших объемов информации обеспечивает оперативность порядка 50 Мбайт/ч, но и обычные листинги с распечатками данных, предназначенных для последующего ввода в ЭВМ с экрана АЦД. Подобный способ переноса информации обеспечивает оперативность информационного обмена порядка 20 Мбайт/ч. Это вполне приемлемая величина оперативности для информационного обмена между отдельными САПР. Однако из соображения простоты и безошибочности переноса информации целесообразно использовать более автоматизированные способы обмена. К ним относится прямая передача информации по линиям связи, в том числе линиям, включающим в себя мало скоростные связные адаптеры. Низкая пропускная способность адаптеров не является здесь препятствием для организации информационного обмена.

Рассмотренные материалы содержат сведения, которые могут быть использованы на общесистемном уровне структурного описания САПР. В частности зависимость (7.7.) и данные табл. 7.4. позволяют в первом приближении оценить основные показатели информационной взаимосвязи разрабатываемой САПР с учетом предполагаемой области ее использования.

### Контрольные вопросы

1. Основные положения и понятия САПР.
2. Формализованное представление САПР как ОТС.
3. Общая методика разработки структуры САПР (Структурная диаграмма и диаграмма состояний).
4. Характеристики состояний автоматизированного проектирования

(общесистемный уровень).

5. Характеристики переходов между состояниями автоматизированного проектирования (общесистемный уровень).

ЛИТЕРАТУРА: [4].

## ЛЕКЦИЯ №8

### Тема: АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ И СХЕМЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ САПР ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ РАСЧЕТНЫХ ЗАДАЧ СИНТЕЗА ПРОЕКТНОГО РЕШЕНИЯ.

#### План лекции:

7. Описание и анализ структуры и схемы функционирования САПР при выполнении расчетных задач.
8. Описание и анализ структуры и схемы функционирования САПР при выполнении задач синтеза проектного решения.

#### 1. Описание и анализ структуры и схемы функционирования САПР при выполнении расчетных задач

**Структурная диаграмма и диаграмма состояний.** Как следует из их математических формулировок, проектные процедуры анализа ПР и расчета параметров являются типичными примерами расчетной задачи. Вопрос общей формализации расчетной задачи уже рассматривался в работе. Изложенный там кибернетический подход к пониманию задачи дает основу для описания рассматриваемых проектных процедур. На рис 8.1. показаны структурная диаграмма и диаграмма состояний ОПП расчетной задачи, соответствующая такому подходу. Структурная диаграмма расчленяет процесс решения задачи (или подсистему САПР) на отдельные компоненты. Диаграмма состояний определяет возможные варианты последовательности этих компонентов в ходе решения задачи.

Вне зависимости от конкретного содержания расчетной задачи она включает в себя следующие общие компоненты:

ознакомление с условиями задачи (ОУЗ), т. е. усвоение условий задачи и привлечение необходимой дополнительной информации;

подготовку решения задачи (ПРЗ), т.е. выбор конкретного способа решения задачи из числа возможных, приведение исходной информации в соответствие с выбранным способом решения, формирование расчетных моделей и т.д.;

получение результатов расчета (ПРР), т. е. преобразование входной информации (исходных данных для ЭВМ) в выходную (результаты расчета) с использованием выбранного способа решения;

анализ результатов расчета (АРР), т. е. выводов и заключений, и поиск, в случае необходимости, других путей решения задачи.

Выполнение каждого из этих компонентов обеспечивается определенной последовательностью действий решающей системы. При обычном, т. е. неавтоматизированном проектировании, такую систему составляют человек, решающий задачу, а также методы и справочные данные, используемые в ходе решения задачи. При автоматизированном проектировании в решающую систему входят человек (пользователь) и конкретная подсистема САПР, обеспечивающая автоматизированное решение задачи.

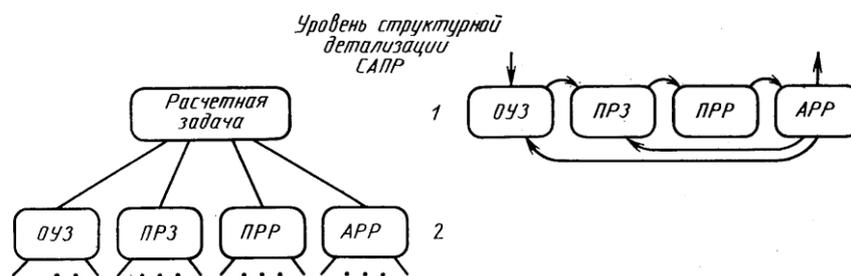


Рис. 8.1. Структура и схема функционирования САПР в процессе анализа ПР.

Дальнейшая структурная детализация ОПП расчетной задачи основана на конкретизации алгоритмов проектной деятельности, реализуемых решающей системой в рамках каждого компонента решения, и связана с составлением диаграммы состояния, соответствующей 2 уровню структурной детализации САПР. Очевидно, что конкретный состав этих алгоритмов зависит от содержания задачи и может быть рассмотрен только применительно к решению конкретных расчетных задач. Поэтому ограничимся здесь только рассмотрением вопроса о возможных вариантах автоматизированного решения расчетных задач. Они представляют собой различные комбинации характеристик состояния автоматизированного проектирования в процессе решения этих задач.

**Характеристики состояний автоматизированного проектирования.** На основании уже накопленного опыта автоматизации проектирования можно выделить несколько вариантов автоматизированного решения расчетных задач. В табл. 8.1. показано, в выполнении каких компонентов процесса решения задачи используется ЭВМ и участвует человек. Обозначение компонентов соответствует принятому на рис. 8.1.

Можно говорить о наличии пяти основных и двух дополнительных вариантов решения. Дополнительные варианты, обозначенные в табл. 8.1. как 4' и 5', отличаются от основных лишь тем, что человек участвует здесь в самой расчетной процедуре решения задачи. Необходимость этого участия возникает в тех случаях, когда специфические особенности решения расчетной задачи требуют настройки поискового алгоритма по ходу самого расчета.

Первый вариант автоматизированного решения расчетных задач соответствует способу пакетной обработки информации. Весь массив исходных данных составляется заранее в процессе подготовки решения задачи, а ввод и вывод информации осуществляется иногда не самим специалистом, решающим задачу, а оператором ЭВМ.

Существование второго варианта обусловлено тем, что в ряде случаев решение расчетных задач связано с предварительным формированием довольно сложных расчетных моделей объекта проектирования. В большинстве случаев оно сводится к формированию в памяти ЭВМ очень больших массивов числовых данных, описывающих геометрические и физические характеристики отдельных элементов модели.

Таблица 8.1.

Вариант	Компоненты			
	ОЗУ	ПРЗ	ПРР	АРР
1	Ч	Ч	Э	Ч
2	Ч	Ч-Э	Э	Ч
3	Ч	Ч	Э	Ч-Э
4	Ч	Ч-Э	Э	Ч-Э
4'	Ч	Ч-Э	Ч-Э	Ч-Э
5	Ч-Э	Ч-Э	Э	Ч-Э
5'	Ч-Э	Ч-Э	Ч-Э	Ч-Э

Примечание. Ч – выполняется человеком

Э – выполняется ЭВМ

Ч-Э – выполняется в режиме «человек-ЭВМ»

Для проверки правильности формирования этих массивов обычно используется геометрическая интерпретация содержащихся в них числовых данных с визуальным отображением формируемой расчетной модели. Для ввода числовых данных могут использоваться АЦД и диджитайзер, а для анализа графической информации—графопостроитель и графический дисплей. Масштабность выполняемой при этом работы может достигать таких размеров, что время, затрачиваемое на подготовку решения задачи, становится преобладающей составляющей в общем времени решения задачи.

Основным отличием третьего варианта решения расчетных задач от первого является то, что по окончании проведения расчетов их результаты остаются в памяти ЭВМ. Взаимодействуя с ЭВМ, человек может проанализировать эти результаты, используя дисплей, который также предназначен и для ввода исходной информации. Процедура ввода является в данном случае завершением подготовки решения задачи. Сама подготовка решения также как и ознакомление с условиями задачи проводится вне взаимодействия с ЭВМ того специалиста, который решает данную задачу.

Одна из причин, обуславливающих существование четвертого варианта автоматизированного решения расчетных задач, состоит в совмещении тех особенностей, которые присущи двум предыдущим вариантам. Другая причина наглядно иллюстрируется самим описанием расчетной задачи. Анализ полученных результатов расчета может сопровождаться поиском новых путей решения задачи (см. рис. 8.1.). Это приводит к появлению итерационной процедуры, в которую включены структурные компоненты процесса решения задачи ПРЗ, ПРР, АРР. Реализация такой процедуры возможна лишь в условиях оперативного решения задачи, при которых человек имеет возможность провести серию расчетов, не прерывая своего взаимодействия с ЭВМ.

Особенностью пятого варианта автоматизированного решения расчетных задач является использование ЭВМ для хранения и предъявления человеку той информации, которая составляет исходные условия решения задачи. Это означает, что ознакомление человека с условиями задачи начинается только после его обращения к ЭВМ и проходит при непосредственном взаимодействии

с ней. Таким же образом выполняются и все остальные компоненты процесса решения задачи.

## **2. Описание и анализ структуры и схемы функционирования САПР при выполнении задач синтеза проектного решения**

Описание такой задачи творческого характера, как синтез ПР, требует предварительного выяснения самой возможности постановки данного вопроса и определения подхода к его решению. Важное значение приобретают здесь результаты специальных исследований, направленных на изучение психологической структуры проектно-конструкторской деятельности человека.

Синтез ПР по объекту проектирования реализуется человеком как процесс построения модели технической системы. Он может выполняться человеком при использовании различных стратегий решения, что можно рассматривать как проявление *субъективной* основы в методологии решения данной творческой задачи. Однако использование той или иной стратегии решения *объективно* зависит от профессионального уровня человека, выполняющего синтез ПР. По мере повышения этого уровня происходит переход к преимущественному использованию стратегий решения, характер которых указывает на наличие в процессе решения задачи определенной последовательности и целесообразности переработки информации. Доля таких стратегий, зафиксированных при решении тестовых проектных задач, составляет 50 % для людей, не имеющих специальных знаний и опыта самостоятельной работы, 70 % - для студентов технических вузов, 95 % - для специалистов-проектировщиков.

Эти результаты позволяют сформулировать общий подход (назовем его системно-организационным) к формализованному описанию задачи синтеза ПР. Основным его положением является то, что в проектно-конструкторской деятельности, выполняемой человеком на высоком профессиональном уровне, многообразие субъективных стратегий синтеза ПР уступает место некоторой универсальной структуре и последовательности действий, основанной на вполне объективных закономерностях переработки проектной информации.

**Структурная диаграмма и диаграмма состояний.** Автором проведено исследование процессов решения типовых проектно-конструкторских задач на том профессиональном уровне, который соответствует решению этих задач в промышленности. В исследовании был использован метод изучения трудовой деятельности, классифицируемый в инженерной психологии как «анализ протоколов».

Были рассмотрены три проектно-конструкторские задачи, являющиеся по своему характеру задачами синтеза ПР. Для исключения индивидуальных различий в процессах решения задач составление протоколов проводилось на коллективной основе двумя группами специалистов, являющихся сотрудниками двух разных проектных отделов.

Анализ и обобщение полученных таким образом данных позволили расширить общее представление о протекании процесса синтеза ПР применительно к тому профессиональному уровню решения этой задачи,

который соответствует функционированию САПР. На основании этого было получено ОПП синтеза ПР. Предусмотренные этим ОПП структурная диаграмма и диаграмма состояний задачи синтеза ПР показаны на рис. 8.2. Они отражают следующие положения формализованного описания рассматриваемой проектной задачи.

1. Синтез ПР представляет собой процесс построения конструктивного графа объекта проектирования с одновременным описанием входящих в него элементов. Однако реализация этого процесса основывается на рассмотрении функциональных элементов объекта проектирования.

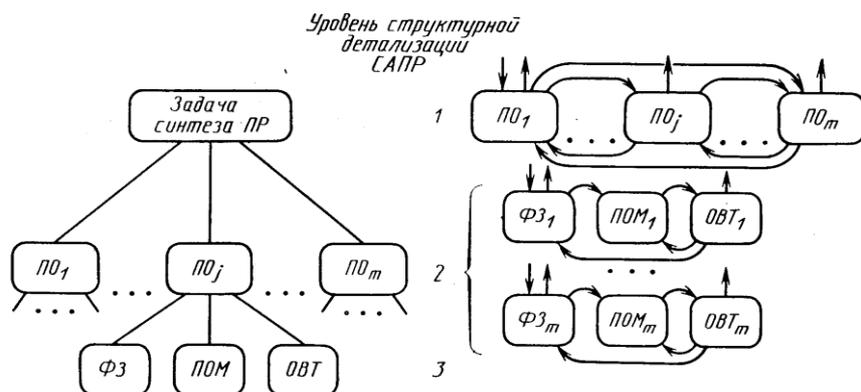


Рис. 8.2. Структура и схема функционирования САПР в процессе синтеза ПР.

2. Проектная процедура синтеза ПР разбивается на ряд идентичных по содержанию проектных операций, каждая из которых соответствует отдельному элементу объекта проектирования и включает в себя три этапа: формирование замысла (ФЗ), параметризацию образной модели (ПОМ) и оценку выполнимости требований (ОБТ). Реализация каждого этапа обеспечивается соответствующим алгоритмом проектной деятельности.

3. ФЗ связано с анализом условий задачи и/или результатов выполнения предыдущих проектных операций. Основным содержанием решения задачи здесь является поиск способа реализации требуемых функций объекта проектирования. Результатом ФЗ является образная модель проектируемого элемента (ОМПЭ) и план действий по реализации замысла (ПДРЗ).

4. Образная модель дает представление о том, какими параметрами описывается проектируемый элемент, а если этот элемент является сложным, то на какие составные части он разбивается.

5. Образная модель не содержит конкретных значений параметров. Они появляются в процессе параметризации, превращая ее тем самым в проектную модель элемента. Параметризация основана на поиске значений параметров, при которых могут быть обеспечены требуемые функции объекта проектирования. Однако учет этих требований носит интуитивный, экспертный характер и не является абсолютно точным и достаточно полным. Это обуславливает наличие в каждой проектной операции этапа действий по оценке выполнимости требований.

6. План действий по реализации замысла учитывает структурный состав и очередность проектных операций, выполняемых далее.

7. Поскольку построение конструктивного графа объекта проектирования происходит в ходе самого решения задачи синтеза ПР, нельзя сказать заранее сколько проектных операций и применительно к каким элементам должны быть выполнены. Можно указать лишь возможный перечень этих операций, который определяется используемым в ОПП синтеза ПР формализованным представлением знаний решающей системы о структурном построении объекта проектирования. Действительно, в процессе синтеза ПР в рассмотрение решающей системы могут попасть только те элементы, которые определены соответствующим описанием как имеющие отношение к этому объекту. Таким описанием может быть одна из моделей ТС как объекта проектирования в САПР.

**Типовые закономерности синтеза ПР.** Основным вопросом типовых закономерностей функционирования САПР в процессе решения задачи синтеза ПР является вопрос о последовательности действий решающей системы. Он связан с формализацией плана действий, который вырабатывается решающей системой в каждой проектной операции при формировании проектного замысла. Можно говорить о различной степени этой формализации—от словесного описания до математического выражения функции (8.2.), соответствующей каждой проектной операции в общем процессе синтеза ПР. Остановимся прежде всего на словесном описании этой формализации.

На практике встречаются два варианта реализации замысла. При первом—выполнение проектных операций по проектированию сложных элементов прерывается после формирования их образных моделей и начинается выполнение проектных операций, связанных с проектированием составных частей этих элементов. После их окончания процесс синтеза ПР возвращается к прерванным проектным операциям, и происходит параметризация уже существующих образных моделей сложных элементов. Синтез выглядит в данном случае как интеграция нескольких частных ПР в одно общее. При втором варианте реализации замысла все проектные операции выполняются строго последовательно после полного завершения каждой из них.

В зависимости от степени использования этих вариантов в рамках одной задачи последовательность действий решающей системы в процессе синтеза ПР может быть одной из следующих

1 Решение задачи синтеза ПР протекает полностью при втором варианте реализации замысла В результате чего все проектные операции и входящие в них действия выполняются строго последовательно

2 В решении задачи синтеза ПР используются оба варианта реализации замысла

3 Решение задачи синтеза ПР полностью протекает при первом варианте реализации замысла При этом разработка частных ПР проводится применительно к отдельным фрагментам конструктивного графа объекта проектирования, формируемого в процессе синтеза ПР

4 Решение задачи синтеза ПР полностью протекает при первом варианте реализации замысла И разработка частных ПР проводится после формирования конструктивного графа, описывающего объект проектирования

Исследование процессов решения типовых проектно конструкторских задач на высоком профессиональном уровне показывает, что существует два типа проектных процедур синтеза ПР. К первому из них относятся задачи, исходные условия которых не содержат никакой информации о значениях параметров проектируемого объекта. Самими проектировщиками такие задачи рассматриваются как «проектирование от нуля». Задачи второго типа содержа такую информацию в своих исходных данных. Иногда они рассматриваются проектировщиками как «вложение начинки в заданный объем».

Решению задач первого типа подходят третий и четвертый виды последовательности действий решающей системы в процессе синтеза ПР. Это связано с тем, что размерная база для параметризации образной модели сложного элемента может быть получена только после формирования проектных моделей тех составляющих, на которые этот элемент разбивается. Решение задач второго типа проходит в условиях, когда размерная база уже существует. В подобных случаях целесообразным является первый вид последовательности действий решающей системы.

Наличие этих и других положений, объективно определяющих последовательность действий решающей системы в процессе синтеза ПР, позволяет рассматривать следующие закономерности реализации процесса синтеза ПР.

1. В решении задачи синтеза ПР присутствуют, как правило, оба варианта реализации замысла, т.е. используется вторая из рассмотренных выше видов последовательности действий решающей системы. При этом на уровне объекта проектирования в целом имеет место первый, а на уровне составных частей этого объекта—второй варианты реализации замысла.

2. На уровне объекта проектирования в целом интеграция частных ПР в одно общее происходит по мере формирования самих решений (в случае их сильного влияния на выполнение требований, предъявляемых к объекту проектирования в целом) или после формирования по всем элементам (в случае их малого влияния на выполнение требований к объекту проектирования).

3. На уровне составных частей объекта проектирования в первую очередь выполняются проектные операции по тем элементам, которые в наибольшей степени влияют на облик остальных элементов и на проектирование в целом.

Следует также отметить, что между видом последовательности действий решающей системы в процессе синтеза ПР и используемым в разработке САПР описанием объекта проектирования существует определенная взаимосвязь. Так например, использование при описании объекта проектирования таких моделей как «комбинаторный файл» и «сетевая фреймовая модель» (см рис 8.3) может быть согласовано только с третьим видом последовательности действий решающей системы. Использование «матрицы ТПР с обобщенной конструктивной моделью ТС» и «множества ТПР с частными конструктивными моделями ТС» соответствует реализации четвертого вида последовательности действий. В последнем случае решение задачи синтеза ПР рассматривается состоящим из двух самостоятельных процессов: выбора типа ПР (т.е. формирования конструктивного графа объекта проектирования с заданием

конкретных значений ФПР, КПР и ФПА) и конкретизации ПР (т. е. задания конкретных значений КПА) Подобная методика решения задачи синтеза иногда рассматривается как декомпозиция синтеза ПР на две самостоятельные задачи. Обычно они именуется задачами структурного и параметрического синтеза. Использование для описания объекта проектирования модели «инвариантный граф» согласуется с любым из рассматриваемых видов последовательности действий решающей системы в процессе синтеза ПР.

Исходя из приведенных выше закономерностей реализации процесса синтеза ПР, можно считать, что для каждой проектной операции этого процесса существует некоторый рациональный план действий по реализации замысла, определяемый самой постановкой задачи и ПР, принятыми до этой операции. Представленные в виде конкретных записей, раскрывающих общий смысл выражения (32), такие планы действий образуют один из компонентов ОПП синтеза ПР. Конкретизация этих записей связана с рассмотрением прикладного содержания конкретных частных задач синтеза ПР. В связи с этим данный вопрос следует отнести к разработке компонентов математического обеспечения САПР.

Таблица 8.2.

Варианты	Алгоритм		
	ФЗ	ПОМ	ОВТ
1	Ч	Ч-Э	Ч-Э
2	Ч-Э	Ч-Э	Ч-Э

### **Характеристики состояния автоматизированного проектирования.**

Возможные варианты автоматизированного решения задачи синтеза ПР связаны с видом (вербально-графическим или математическим) реализации самой проектной модели объекта проектирования. На основании накопленного опыта автоматизации проектирования можно говорить о наличии двух основных вариантов, показанных в табл. 8.2. Алгоритмы проектной деятельности, рассматриваемые в этой таблице, соответствуют компонентам третьего уровня структурной детализации САПР в описании задачи синтеза ПР (см. рис. 8.2.).

При первом варианте автоматизированного решения рассматриваемой задачи происходит разработка только вербально-графической проектной модели. Решение начинается с формирования замысла самим проектировщиком, в результате чего в его представлении появляются более или менее полная образная модель объекта проектирования и план реализации замысла. Обращаясь далее к ЭВМ, проектировщик начинает последовательно выполнять отдельные проектные операции синтеза ПР. С помощью графического дисплея или диджитайзера, связанного с дисплеем, он формирует и параметризует образы отдельных элементов объекта проектирования. Вербально - графическая проектная модель позволяет провести проверку выполнимости требований, предъявляемых к объекту проектирования и его элементам.

Однако, так же как и параметризация образной модели, эта проверка проводится непосредственно самим человеком. ЭВМ не может быть использована для выполнения этих операций по той причине, что ничего «не знает» о функциональной структуре разрабатываемого изделия. Эта структура, являющаяся частью проектно-конструкторского замысла человека, не передана ЭВМ. Она существует в представлении самого проектировщика и может быть отражена им на экране дисплея в виде вербально-графической проектной модели. Но в таком виде ЭВМ не может воспринять эту модель, поскольку «не знает» какому элементу соответствует тот или иной геометрический образ. Поэтому она не может связать параметры отдельных элементов объекта проектирования в математическую проектную модель, наличие которой необходимо ЭВМ для проверки выполнимости требований или параметризации образной модели.

Особенностью второго варианта автоматизированного решения задачи синтеза ПР является то, что в пределах каждой из проектных операций синтеза формирование замысла является результатом совместной работы проектировщика и ЭВМ. При выполнении этого алгоритма проектной деятельности ЭВМ предлагает возможные варианты образных моделей объекта проектирования и его элементов, из которых проектировщик выбирает те, которые, по его мнению, наиболее соответствуют предъявляемым требованиям. Реагируя на решения проектировщика, ЭВМ оставляет для дальнейшего рассмотрения именно эти варианты, формируя тем самым в своей памяти структуру разрабатываемого изделия и состав его параметров. Таким образом, одновременно с тем, как проектировщик создает образную модель в своем представлении, ЭВМ формирует в своей памяти ее машинный аналог, представленный в виде информационных массивов, описывающих проектную модель объекта проектирования.

Выполнение параметризации образной модели в пределах каждой из проектных операций синтеза ПР приводит к заполнению этих массивов конкретными значениями параметров, т. е. появлению математической проектной модели. Параметризация может выполняться двумя способами: заданием значений параметров самим проектировщиком или вычислением этих значений. Вычисления проводятся на основании условий, общую формулировку которых ЭВМ уже «знает». Конкретизация этой формулировки проводится проектировщиком.

### **Контрольные вопросы**

6. Описание и анализ структуры САПР при выполнении расчетных задач.
7. Описание и анализ структуры САПР при выполнении задач синтеза проектного решения.
8. Типовые закономерности проектных решений.

ЛИТЕРАТУРА: [4].

## ЛЕКЦИЯ №9

### Тема: РАЗРАБОТКА АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ВАРИАНТОВ САПР.

#### План лекции:

#### 9. Процесс разработки альтернативных вариантов САПР.

#### 10. Примеры возможных общесистемных решений в разработке компонентов КСАП.

##### 1. Процесс разработки альтернативных вариантов САПР

Как самостоятельная задача общей технологии создания САПР разработка альтернативных вариантов САПР имеет определенную методику своего решения. Она может быть более или менее детализированной, но в любом случае не обходится без формализации самого процесса решения данной задачи.

Процесс разработки альтернативных вариантов САПР является переходом от конкретного варианта структуры и схемы функционирования к комбинациям решений по функциональным составляющим (т.е. компонентам К.САП) этой системы. Решения, входящие в эти комбинации, затрагивают основные виды обеспечения автоматизации проектирования. О существовании именно комбинаций решений можно говорить при удовлетворении следующих условий:

- соответствия всех решений конкретному варианту структуры и схемы функционирования САПР;
- взаимной согласованности решений по разным компонентам КСАП;
- практической реализуемости всех комбинируемых решений.

Необходимость удовлетворения этих условий определяет характер разработки альтернативных вариантов САПР как процесса поиска возможных вариантов решений, их сравнения и проведения вычислений, необходимых для такого сравнения.

В настоящее время не представляется возможным провести систематизацию и тем более унификацию имеющихся представлений о процессе решения рассматриваемой задачи. Встречающиеся в литературе формализованные описания этого процесса отражают скорее индивидуальные условия создания САПР, в которых формировался опыт разных авторов, чем объективные закономерности, которые существуют в процессе выполнения данной задачи. В связи с этим используемое формализованное описание процесса разработки альтернативных вариантов САПР имеет минимальную степень детализации, позволяющую отразить только самые типичные стороны этого процесса.

Графическая иллюстрация этого описания, представленная на рис. 9.1, учитывает основные составляющие процесса, обеспечивающего переход от варианта структуры и схемы функционирования САПР к возможным

комбинациям решений по функциональным составляющим Принятая формализация процесса не затрагивает последовательности разработки решений по функциональным составляющим САПР. Фиксирование такой последовательности обычно отражает особенности той конкретной ситуации, которая имеет место в условиях разработки САПР. Различие этих ситуаций может приводить к целесообразности различных последовательностей разработки решений. Более того, разработка решений по некоторым компонентам КСАП, взаимосвязь которых не имеет форму зависимости одного компонента от другого, может проходить одновременно при последующей проверке согласованности и, в случае необходимости, корректировке этих решений.

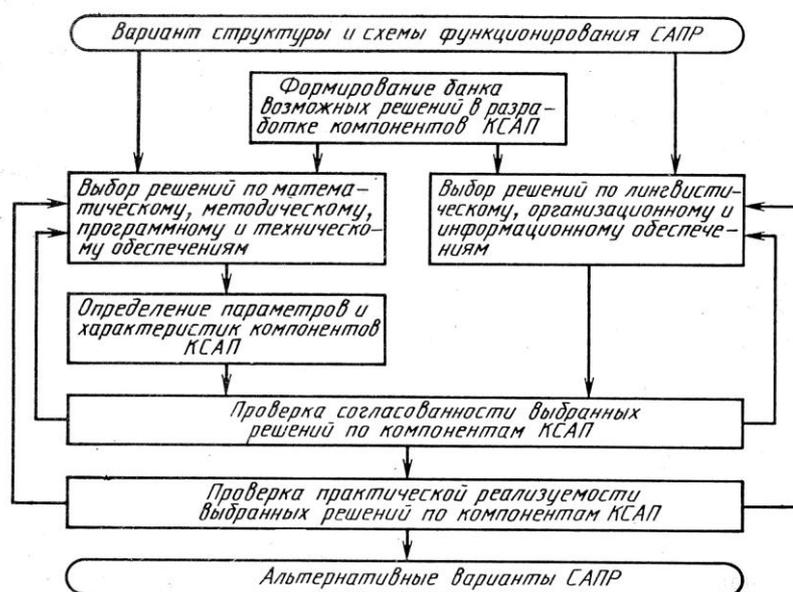


Рис. 9.1 Функциональная схема процесса разработки альтернативных вариантов САПР

Функциональная схема, показанная на рис 9.1, допускает как полностью одновременную (при одновременном выборе и корректировке решений по всем компонентам КСАП), так и полностью последовательную (при последовательном выборе и корректировке) разработку решений по функциональным составляющим САПР. Структурное выделение в этом процессе двух самостоятельных итерационных циклов обусловлено различиями в процедуре разработки решений по разным компонентам КСАП. Если разработка решений по лингвистическому, информационному и организационному обеспечению может основываться на общеконцептуальном представлении этих функциональных компонентов САПР, то проведение этой процедуры применительно к некоторым компонентам математического, методического, программного и технического обеспечения возможно лишь при рассмотрении конкретных параметров и характеристик этих компонентов.

Практическая реализация разработок альтернативных вариантов САПР требует определенного методического обеспечения всех составляющих этого процесса (см рис 9.1) В первую очередь это относится к таким составляющим,

как формирование банка возможных решений в разработке компонентов КСАП и определение их параметров и характеристик. Методика их выполнения может рассматриваться как основная часть общей методики разработки альтернативных вариантов САПР. Предварительно сформированный банк возможных решений не только упрощает разработку альтернативных вариантов САПР, но и расширяет область поиска, а следовательно увеличивает число таких вариантов. В рамках всего процесса общей разработки САПР это способствует нахождению наиболее рационального варианта разрабатываемой системы.

Ниже изложен ряд методических материалов, относящихся к реализации процесса разработки альтернативных вариантов САПР. Материалы систематизированы применительно к основным составляющим этого процесса (см. рис. 9.1).

## 2. Примеры возможных общесистемных решений в разработке компонентов КСАП

При анализе возможных решений в разработке компонентов КСАП инвариантно к назначению и области применения САПР заслуживает внимания альтернативность решений в части их обеспечения, которые имеют наибольшую общесистемную ориентацию. К ним в первую очередь относятся техническое, программное и организационное обеспечения.

**Возможные решения в разработке технического обеспечения САПР.** При разработке технического обеспечения альтернативность принимаемых решений в наибольшей степени проявляется в отношении структуры основных средств. В большей или меньшей степени это относится ко всем компонентам, т. е. центральному и интерфейсному оборудованию, комплексу средств связи. Наиболее типичные решения по структуре *центрального оборудования в составе основных средств технического обеспечения САПР* можно свести к четырем вариантам, показанным на рис. 9.2. Они рассматриваются далее как простая структура (вариант I), структура с резервированием (вариант II), структура с распределенной обработкой информации (вариант III) и структура с распределением ресурсов (вариант IV). Первый из этих вариантов соответствует использованию одиночной ЭВМ, остальные — различным видам комбинированного использования нескольких ЭВМ, объединенных стационарными каналами связи с высокой скоростью передачи информации.

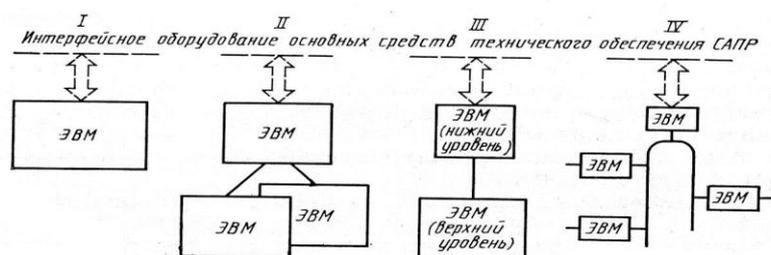


Рис. 9.2. Варианты структуры центрального оборудования в составе основных средств технического обеспечения САПР

Структура с резервированием соответствует использованию ЭВМ, включенной в состав большой вычислительной сети. Она отличается от предыдущего варианта наличием связей с другими ЭВМ, которые сами могут входить в состав технического обеспечения различных автоматизированных систем. При резервировании определенной части вычислительных ресурсов в сети, наличие связей между ЭВМ позволяет обеспечить работоспособность основных средств технического обеспечения отдельной САПР даже в условиях выхода из строя центрального оборудования этой системы. Это позволяет также в случае перегрузки одной из ЭВМ и недогрузки другой проводить рациональное распределение расчетной обработки информации по всем включенным в сеть процессорам ЭВМ.

Структура с распределенной обработкой информации предполагает использование двух существенно различных по своим характеристикам ЭВМ (нижнего и верхнего уровней), каждая из которых выполняет свои функции в общем вычислительном процессе обработки информации. Дальнейшим развитием этого варианта является структура с распределением ресурсов. Здесь центральное оборудование основных средств технического обеспечения САПР представлено локальной вычислительной сетью (ЛВС), в которой ЭВМ, имеющая непосредственную связь с интерфейсным оборудованием основных средств технического обеспечения САПР, выступает как бы в роли ЭВМ нижнего уровня, а другие — в роли ЭВМ верхнего уровня.

Таблица 9.1

Тип	Устройство	Обеспечиваемые функциональные возможности
1	Устройство нанесения информации на перфокарты	Накопление исходной информации
2	Устройство вывода информации на перфокарты	Накопление результатов автоматизированной обработки информации
3	Считывающее устройство с перфокарт	Не интерактивный ввод информации в ЭВМ
4	Автоматическое печатающее цифровое устройство	Не интерактивный вывод информации из ЭВМ
5	Графопостроитель	Не интерактивная машинная графика
6	Графический монитор	Интерактивная машинная графика
7	Алфавитно-цифровой дисплей	Интерактивное взаимодействие с ЭВМ
8	Графический дисплей	Интерактивная машинная графика и взаимодействие с ЭВМ
9	Устройство получения «жесткой» копии изображения на экране дисплея	Документирование информации при интерактивном взаимодействии с ЭВМ
10	Устройство кодирования графической информации	Интерактивный ввод информации в ЭВМ

Возможны и другие варианты структурной организации центрального оборудования (например, комплекс ЭВМ нижнего уровня с одной управляющей ЭВМ верхнего уровня) Однако они более типичны для АСУ, чем для САПР.

*Структура интерфейсного оборудования в составе основных средств технического обеспечения САПР* определяется качественным и количественным составом периферийных устройств, обеспечивающих взаимодействие пользователей САПР с автоматизированной системой В табл. 9.1 приведен перечень типовых устройств и дана характеристика тех возможное гей, которые они обеспечивают при организации вычислительного процесса. Возможные варианты решений по качественному составу интерфейсного оборудования САПР представляют собой определенные комбинации этих устройств. Наиболее типичные из них с точки зрения распространенности на практике представлены в табл. 9.2.

Таблица 9.2

Вариант	Комбинации типовых устройств	Степень соответствия требованиям САПР
I	1, 3, 4, 5	Недостаточная
II	4, 5, 7	Низкая
III	4, 5, 7, 10	Низкая
IV	4, 5, 6, 7	Средняя
V	4, 5, 7, 8, 10	Высокая
VI	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10	Высокая

Там же дана экспертная оценка вариантов в отношении обеспечения требований автоматизации проектно-научных исследований в рамках САПР.

Присутствие одних и тех же типов устройств в различных вариантах интерфейсного оборудования САПР не означает идентичности выполняемых ими функций. Поскольку технические характеристики различных устройств одного и того же типа могут существенно отличаться друг от друга, различными могут быть и функции, выполняемые этими устройствами в составе интерфейсного оборудования САПР. Так, если в варианте IV графический монитор используется совместно с АЦД для обеспечения взаимодействия с ЭВМ в условиях использования интерактивной графики, то в варианте VI, где эти функции уже выполняются графическим дисплеем, графический монитор используется как средство коллективного просмотра графической информации. Предполагается, что в варианте IV используется графический монитор с экраном обычного формата, а в варианте VI — специальный широкоэкранный монитор.

*Структура комплекса средств связи в составе основных средств технического обеспечения САПР* образуется на практике использованием трех

типовых средств связи: стационарной линии связи с малой скоростью передачи данных; стационарного канала связи с высокой скоростью передачи данных; телефонной сети.

Возможные варианты их использования приведены в табл. 9.3. Там же дана качественная характеристика интерфейсного оборудования, которому соответствуют эти варианты комплексов средств связи.

Неотъемлемой частью комплекса средств связи являются устройства сопряжения каналов и линий связи с компонентами центрального и периферийного оборудования технического обеспечения САПР. Характеристики этих устройств во многом определяют характеристики комплекса средств связи в целом.

При использовании готовых комплексов оборудования, что часто имеет место на практике, альтернативность решения по структуре рассмотренных выше компонентов технического обеспечения САПР ограничивается существующей архитектурой этих комплексов. Например, использование комплексов типа автоматизированных рабочих мест (АРМ) проектировщика ограничивает альтернативы по структуре центрального оборудования вариантами III и IV (см. рис. 9.2), альтернативы по структуре комплексов средств связи—вариантом I (см. табл. 9.3) и альтернативы по структуре интерфейсного оборудования—набором устройств конкретного АРМ. Обычно наборы этих устройств соответствуют вариантам IV и V (см. табл. 9.2).

**Возможные решения в разработке программного обеспечения САПР.** Альтернативность решений в разработке программного обеспечения САПР связана с разнообразием структурной организации этого компонента КСАП. Это проявляется не только в структуре программного обеспечения, но и в организации функционирования этого обеспечения, а также в его интеграции с техническим обеспечением САПР.

*Структура программного обеспечения САПР* может рассматриваться с разных позиций, определяющих различную степень детализации. Вопросы, возникающие в процессе общей разработки САПР, допускают, как правило, укрупненное представление программного обеспечения, позволяющее анализировать лишь саму концепцию его построения. Пример такого представления программного обеспечения приведен на рис. 9.3, где ППП — пакеты прикладных программ, т. е. совокупность программ, необходимых для выполнения какой-то части проектного процесса, заканчивающейся получением описания объема проектирования; АБД, АБЗ— автоматизированный банк данных и автоматизированная база знаний по предметной области процесса проектирования, автоматизируемого в рамках САПР; ОС САПР—операционная система САПР, т. е. часть программного обеспечения (в первую очередь мониторинговая система), предназначенная для управления процессом проектирования; ПОП— программы общего пользования; ПСН—программы специального назначения.

Таблица 9.3

Вариант	Комбинация типовых средств связи	Общая характеристика интерфейсного оборудования
I	Стационарная линия связи	Собственный стационарный терминал ЭВМ
II	Стационарная линия связи, телефонная сеть	
III	Стационарный канал связи	Стационарный терминал средств технического обеспечения САПР
IV	Стационарный канал связи, телефонная сеть	
V	Телефонная сеть	Нестационарный терминал

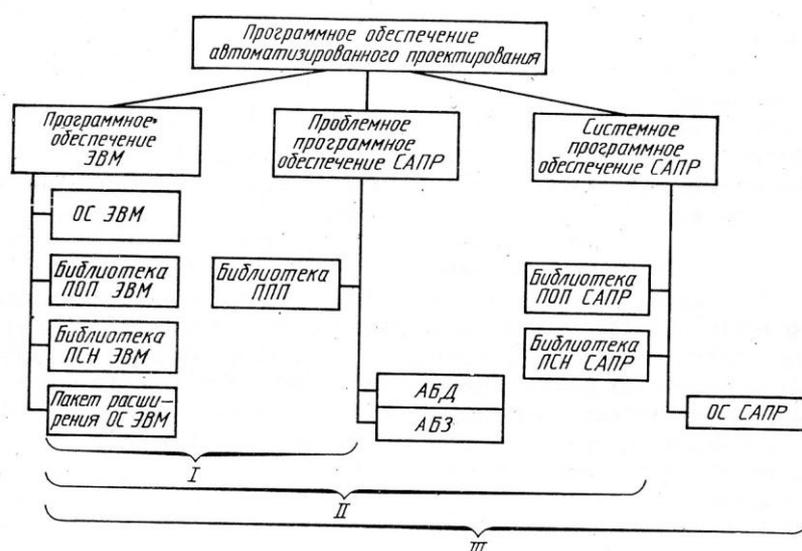


Рис. 9.3. Варианты структуры программного обеспечения САПР

Приведенное представление программного обеспечения дано в форме, подчеркивающей, что программное обеспечение ЭВМ является частью программного обеспечения САПР (т. е. программного обеспечения автоматизации проектирования), и что необходимость разработки тех или иных компонентов программного обеспечения САПР во многом определяется уровнем развития программного обеспечения ЭВМ.

Напомним, что в число основных компонентов этого обеспечения входит прежде всего ОС ЭВМ с трансляторами, компиляторами, редакторами программных связей, загрузчиком, планировщиком задач, распределителем ресурсов и другими средствами. Дополняет ОС ЭВМ пакет специальных программ, расширяющий его возможности. В него могут входить дополнительные трансляторы, компилятор, редакторы, система работы в режиме разделения времени или иной тип системы многопользовательского режима работы, стандартный вариант СУБД и т. д. Библиотека ПОП ЭВМ включает в себя программы решения типовых научных и технических задач, а

библиотека ПСН ЭВМ—программы, обеспечивающие работу ЭВМ в рамках вычислительной сети из нескольких ЭВМ, и программы, обслуживающие специальные дополнительно подключаемые к ЭВМ периферийные устройства.

От уровня развития ОС ЭВМ или пакета расширения ОС ЭВМ зависит, в частности, в какой мере имеющиеся в них средства позволяют обеспечить управление процессом решения задач проектирования. При наличии такой возможности создание интегрированной САПР обходится без разработки самостоятельной операционной системы. Если в дополнение к этому библиотека ПСН ЭВМ располагает всеми средствами, необходимыми для реализации взаимодействия человека с ЭВМ, отпадает необходимость в разработке ряда других общесистемных программных средств САПР.

В общем случае можно выделить три типовые варианта структуры программного обеспечения САПР (см. рис. 9.3). Вариант I соответствует интерфейсным САПР с минимальным уровнем автоматизации проектирования. Он может соответствовать и интегрированным САПР, реализуемым на ЭВМ с высоким уровнем развития их собственного программного обеспечения. Варианты II и III соответствуют интегрированным САПР с высоким уровнем автоматизации проектирования, в которых управление процессом решения проектных задач осуществляется средствами программного обеспечения (вариант II) или ОС САПР (вариант III).

Один из аспектов *организации функционирования программного обеспечения* связан с реализацией интерактивного режима работы пользователей САПР с ЭВМ. Здесь получили распространение различные расширения базовых языков программирования.

Согласно классификации языков САПР все они относятся к языкам программной реализации. Программы, с помощью которых обеспечивается их использование, могут быть отнесены к библиотекам ПСН. Совместно с базовыми языками, используемыми для разработки программ ввода-вывода информации непосредственно интерфейсного оборудования, расширения базовых языков образуют определенную многоуровневую систему.

Организация функциональной взаимосвязи программ, написанных на языках разного уровня, показана на рис. 9.4, где ЯВУ—язык верхнего уровня, ЯСУ—язык среднего уровня, ЯНУ—язык нижнего уровня.

Принятая трехуровневая система языков отражает ситуацию, фактически имеющую место на практике:

программы ЯНУ—программы ввода-вывода информации на базовом языке программирования, разработанные применительно к конкретным интерфейсным устройствам;

программы ЯСУ—пакеты графических и диалоговых программ, принятые в качестве межотраслевых, национальных и международных стандартов;

программы ЯВУ—библиотеки программ диалогового проектирования, удовлетворяющие требованиям конкретным САПР.

Показанные три варианта реализации программных средств ввода-вывода информации представляют собой три различные варианта организации функционирования программного обеспечения. Они определяют те условия, в

которых происходит функционирование прикладных программ (или программ общего пользования).

Вариант I предполагает связь прикладных программ непосредственно с программами ЯНУ, а вариант II—с программами ЯСУ. Они оба реализуются за счет собственных программных средств ЭВМ. Вариант III предполагает связь прикладных программ с библиотекой программ диалогового проектирования.

*Программно-техническая интеграция* понимается здесь как физическое объединение программного и технического обеспечения САПР. Вариантность решений в части программно-технической интеграции обусловлена возможностью различного распределения программных средств между компонентами вычислительной системы. В первую очередь это относится к структурам основных средств технического обеспечения с многоуровневой обработкой информации (см. рис. 9.2, варианты III, IV).

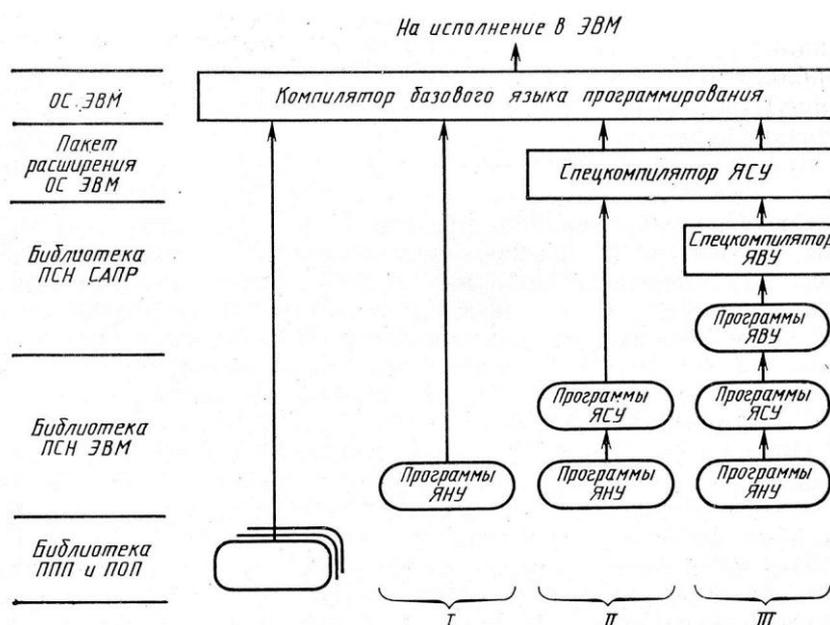


Рис. 9.4. Варианты реализации программных средств ввода-вывода информации

Возможные варианты программно технической интеграции сведены в табл. 9.4 к трем достаточно типовым случаям в зависимости от того, какая из ЭВМ оперирует теми или иными компонентами программного обеспечения САПР. Обозначения (ППП)' и (ППП)" соответствуют компонентам, предназначенным отдельно для автоматизации самого процесса решения проектных задач и для выполнения объемных расчетных операций. Второй из этих типов компонентов именуется обычно библиотекой расчетных модулей ППП. Для многопроцессорных систем ЭВМ 1 соответствует ЭВМ, ближайшей к интерфейсному оборудованию.

В табл. 9.4 рассмотрена только часть из тех компонентов программного обеспечения, которые показаны на рис. 9.3. Предполагается, что ОС ЭВМ и библиотека ПСН ЭВМ, входящие в программное обеспечение САПР, являются неотъемлемой частью соответствующей ЭВМ. В этом отношении функцией

ЭВМ 1 в каждом варианте программно-технической интеграции является, в частности, управление работой интерфейсного оборудования. В варианте III эта функция является основной.

Таблица 9.4

Вариант	ЭВМ 1	ЭВМ 2
I	программы ЯНУ, ЯСУ ППП, ПОП, АБД, АБЗ программы ЯВУ	
II	программы ЯНУ, ЯСУ (ППП)', АБД, АБЗ программы ЯВУ	(ППП)", ПОП
III	программы ЯНУ	ППП, ПОП, АБД, АБЗ программы ЯСУ, ЯВУ

**Возможные решения в разработке организационного обеспечения САПР.** Рассматривая организационное обеспечение в широком его понимании, в разработке этой функциональной составляющей САПР можно выделить варианты решения не только в части организации взаимодействия пользователей САПР с комплексом средств автоматизации проектирования, но и в части организации взаимодействия самих пользователей и всех специалистов, объединенных в организационную систему, входящую в САПР. Некоторые аспекты альтернативности решений в разработке организационного обеспечения при таком его понимании рассмотрены ниже.

*Организация использования основных средств технического обеспечения САПР* может иметь на практике три различных варианта, показанных на рис. 9.5. Они определяются тем, в какой степени монополия на использование необходимого для САПР технического обеспечения распространяется на отдельные составляющие основных средств ТО.

Вариант I представляет собой случай, когда все основные средства ТО конкретной САПР используются только этой системой и в организационном плане являются ее собственным оборудованием. Вариант II соответствует случаю, когда собственным оборудованием САПР является только одна составляющая основных средств технического обеспечения—интерфейсное оборудование, остальные составляющие используются в САПР как арендуемое оборудование. Для варианта III техническое обеспечение является арендуемым оборудованием и используется конкретной САПР наравне с другими коллективами пользователей ЭВМ.

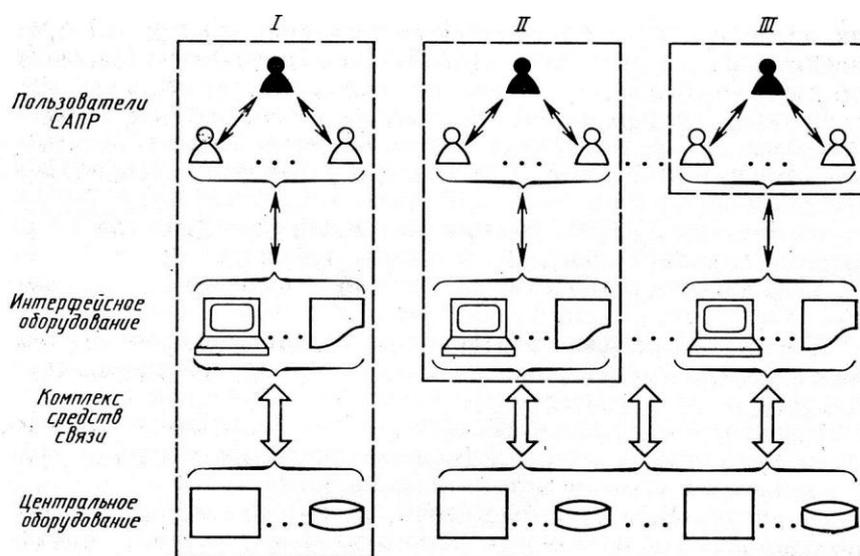


Рис. 9.5. Варианты организации использования основных средств технического обеспечения САПР.

Рассмотренные варианты использования основных средств технического обеспечения находят свое отражение в таком компоненте организационного обеспечения САПР, как структура организационной системы, входящей в состав САПР. Очевидно, что вариант I допускает, а в некоторых случаях делает целесообразным, включение в эту организационную систему специалистов по эксплуатации технического обеспечения САПР.

Гораздо в меньшей степени это свойственно варианту II и полностью исключено при организации использования основных средств технического обеспечения по варианту III. Целесообразность той или иной структуры организационной системы САПР может быть установлена только в процессе выбора рационального варианта. Поэтому при разработке альтернативных вариантов, предусматривающих монопольное использование основных средств ТО, в равной степени представляют интерес решения с различными вариантами структуры организационной системы САПР.

Следует отметить, что альтернативность решений по организации использования средств технического обеспечения САПР не зависит от характеристик компонентов этого обеспечения автоматизации проектирования. Собственным оборудованием САПР могут являться ЭВМ с очень высокой производительностью, если это требуется и может быть реализовано на практике. В то же время ЭВМ меньшей производительности могут выступать в качестве арендуемого оборудования нескольких автоматизированных систем, если это позволяет удовлетворить потребности систем в вычислительных ресурсах.

Классификация ЭВМ на основе организационных принципов их использования является более объективной и устойчивой, чем классификация на основе технических характеристик. Быстрый прогресс вычислительной техники «обесценивает» размеры, занимаемые площади, стоимость, производительность и так далее как классификационные признаки. Показатели

производительности, еще несколько лет назад соответствовавшие субъективному представлению о больших вычислительных машинах, сегодня характерны для вычислительных машин, классифицируемых как мини-ЭВМ. Независимое изменение производительности и размеров ЭВМ породило понятие супермини-ЭВМ.

В связи с этим в зарубежной практике получила распространение организационная классификация ЭВМ, предусматривающая выделение трех типов вычислительных машин:

- общего пользования—ЭВМ, используемые большим числом неорганизованных (т. е. не относящихся к единой организационной системе) пользователей;

- ограниченного пользования—ЭВМ, используемые только коллективами организованных (т. е. входящих в конкретную организационную систему) пользователей;

- индивидуального пользования — ЭВМ, обеспечивающие автоматизацию строго определенных проектных, научных, производственных или управленческих задач, выполнение которых проводится конкретными специалистами или осуществляется в рамках конкретных автоматизированных технологий (например, в рамках отдельных систем обработки экспериментальных данных).

*Реализация принципа системного единства в организации автоматизированного проектирования* может достигаться при различных вариантах решений по организационному обеспечению САПР. Все они основываются на использовании известных структур управления научно-исследовательскими и опытно конструкторскими работами (НИОКР). Различаются две противоположные по характеру структуры управления НИОКР: сетевая, именуемая также древовидной или дивизионной, и матричная. Они формализуют структуру тех связей, которые используются в организационной системе при реализации конкретных процессов проектирования.

Для САПР проектных работ сетевая структура управления НИОКР является наиболее естественной. Как было принято выше, при определении этого типа САПР подобные системы в административно-организационном плане соответствуют некоторым единичным составляющим проектной организации. А сама их организация, как правило, следует на практике принципам сетевой структуры управления НИОКР.

Для комплексной автоматизированной системы (в том числе САПР проектной организации в целом) возможно использование как сетевых, так и матричных структур управления. В обычном (т. е. неавтоматизированном) процессе проектирования оба варианта управления встречаются на уровне проектной организации в целом.

Возможные варианты реализации принципа системного единства в организационном обеспечении САПР показаны на рис.9.6.

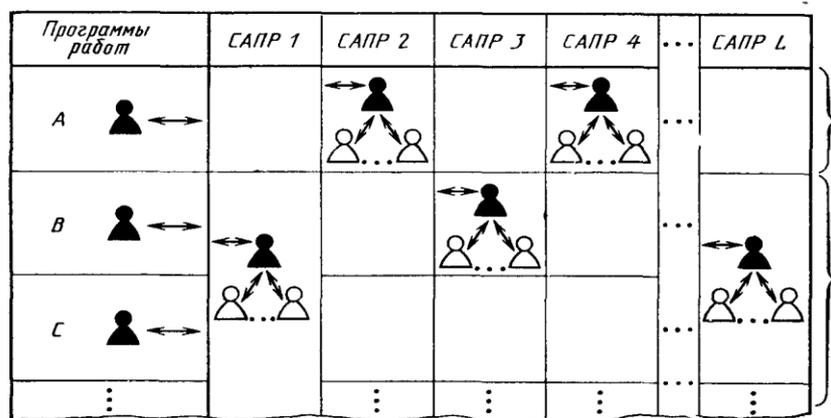


Рис. 9.6. Варианты реализации принципа системного единства в организационном обеспечении и схеме функционирования САПР

Типовая структура организационной системы САПР (см. рис. 9.1), соответствующая комплексной системе автоматизированного проектирования, декомпозирована на отдельные составляющие, относящиеся к САПР проектных работ. Вариант I соответствует сетевой, а вариант II — матричной структуре управления НИОКР. Верхний уровень ЛПР включает руководителей конкретных программ проектных и исследовательских работ, а нижний — непосредственных руководителей работ, выполняемых в рамках отдельных САПР. Основное различие показанных вариантов организационных структур состоит в том, что в случае сетевой структуры управления НИОКР между рассматриваемыми руководителями существует административно-информационная связь, а в случае матричной структуры — только информационная

### Контрольные вопросы

27. Комбинации решений и функциональная схема компонентов КСАП.
28. Решения в разработке технического, программного и организационного обеспечения.

ЛИТЕРАТУРА: [4].

## ЛЕКЦИЯ №10

### Тема: ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА И ПЛАНИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СОЗДАНИЯ САПР.

#### План лекции:

11. Основные положения методики технико-экономической оценки и планирования процесса создания САПР.
12. Расчетно-статистический анализ основных показателей технико-экономической оценки и планирования процесса создания САПР

#### 1. Основные положения методики технико-экономической оценки и планирования процесса создания САПР.

При разработке автоматизированных систем, основанных на обработке информации в ЭВМ, находят применение различные критерии их технико-экономической оценки. Применительно к САПР основные из них выглядят следующим образом:

1. Общий или частный производственный эффект САПР ( $ПЭ$ ), обеспечиваемый при установленном уровне затрат на создание и эксплуатацию системы ( $З_{\Sigma}$ )

$$ПЭ \text{ при } З_{\Sigma} = \text{const} \quad (10.1a)$$

2. Уровень затрат на создание и эксплуатацию САПР, необходимый для обеспечения заданной величины общего или частного эффекта системы

$$З_{\Sigma} \text{ при } ПЭ = \text{const} \quad (10.1b)$$

3. Отношение обеспечиваемого общего или частного производственного эффекта САПР к затратам на создание и эксплуатацию системы

$$\overline{ПЭ} = \frac{ПЭ}{З_{\Sigma}}, \text{ где } ПЭ = \text{Var},$$
$$З_{\Sigma} = \text{Var}. \quad (10.1b)$$

4. Разница между стоимостным выражением общего производственного эффекта, обеспечиваемого системой, и стоимостными затратами на создание САПР. В отечественной практике Этот критерий рассматривается как годовой экономический эффект от внедрения САПР ( $ЭЭГ$ )

$$ЭЭГ = Э_{САПР}^n + Э_{САПР}^k - E_{\Sigma} З_{САПР}, \quad (10.1г)$$

где  $Э_{САПР}^n$  - прямая годовая экономия от внедрения САПР, т. е. экономия, достигаемая в рамках автоматизируемого (с помощью САПР) этапа

проектирования;  $\mathcal{E}_{САПР}^k$  - косвенная годовая экономия от внедрения САПР, т.е. экономия, достигаемая на последующих этапах и стадиях проектирования;  $\mathcal{Z}_{САПР}$  - стоимостные затраты на создание САПР (дополнительные капиталовложения и единовременные затраты),  $E_n$ —нормативный коэффициент.

Критерий ЭЭГ является наиболее комплексным и учитывает все частные показатели, входящие в другие критерии технико-экономической оценки. В ходе самой разработки САПР критерий ЭЭГ определяется расчетным путем и носит характер условного критерия. Алгоритм расчета ЭЭГ включает в себя следующие основные зависимости

$$\mathcal{E}_{САПР}^n = \sum_{k=1}^N [(TP_{исх} C_{исх} - TP_{САПР} C_{САПР}) PP_{САПР}]_k, \quad (10.2)$$

где  $(PP_{САПР})_k$  - производительность САПР, выражающаяся числом нормативных работ, которые могут быть выполнены с использованием САПР в течение года на  $k$ -м автоматизируемом этапе проектирования,  $TP_{САПР}$ ,  $TP_{исх}$  - трудозатраты на выполнение одной нормативной работы на автоматизируемом этапе проектирования с использованием САПР и в исходных (т.е. предшествующих ее внедрению) условиях,  $C_{САПР}$ ,  $C_{исх}$  - стоимость единицы трудозатрат при использовании САПР и в исходных условиях с учетом стоимости услуг, используемых при выполнении нормативных работ (в частности, вычислительных ресурсов арендуемого оборудования в составе технического обеспечения САПР),  $N$ —число этапов проектирования, автоматизируемых с использованием САПР

$$\mathcal{E}_{САПР}^k = \sum_{j=1}^M (\Delta TP_{исх} - \Delta TP_{САПР})_j C_j, \quad (10.3)$$

где  $(\Delta TP_{исх} - \Delta TP_{САПР})_j$  - среднегодовое снижение дополнительных трудозатрат на последующем (после автоматизируемого)  $j$ -м этапе проектирования, обусловленное повышением качества проектирования при внедрении САПР,  $C_j$  - стоимость единицы трудозатрат на последующем  $j$ -м этапе проектирования,  $M$  число этапов, «реагирующих» на улучшение качества проектирования при внедрении САПР

$$\mathcal{Z}_{САПР} = (TP_{созд} C_{созд} + \mathcal{Z}_{по} + \mathcal{Z}_{то}), \quad (10.4)$$

где  $TP_{созд}$  - трудозатраты создания САПР;  $C_{созд}$  - стоимость одной единицы трудозатрат создания САПР;  $\mathcal{Z}_{по}$ ,  $\mathcal{Z}_{то}$  - единовременные затраты на приобретение компонентов программного и технического обеспечения

Стоимостные показатели  $E_n$ ,  $C_{САПР}$ ,  $C_{исх}$ ,  $C_j$ ,  $C_{созд}$ , входящие в выражение (10.1) ..(10.4), определяются или в значительной степени зависят от экономических нормативов, действующих на конкретный момент времени.

Величины этих показателей не всегда однозначно связаны с характеристиками и условиями разработки САПР. Поэтому в практике автоматизации

проектирования наряду с интегральными критериями технико-экономической оценки широкое распространение получили различные частные показатели, имеющие однозначную связь с характеристиками создаваемых систем.

К их числу относятся: относительные коэффициенты изменения производительности, трудозатрат и числа исполнителей на автоматизируемом этапе:

$$K_{\text{ПР}} = \frac{\text{ПР}_{\text{САПР}}}{\text{ПР}_{\text{исх}}}, \quad K_{\text{ТР}} = \frac{\text{ТР}_{\text{исх}}}{\text{ТР}_{\text{САПР}}},$$

$$K_{\text{ИСП}} = \frac{\text{ИСП}_{\text{исх}}}{\text{ИСП}_{\text{САПР}}} \approx \frac{K_{\text{ТР}}}{K_{\text{ПР}}};$$

абсолютная величина трудоемкости  $\text{ТР}_{\text{созд}}$ .

В качестве частных показателей могут выступать также величины  $Z_{\text{по}}$  и  $Z_{\text{то}}$ , входящие в выражение (10.4), и  $T_{\text{созд}}$  - продолжительность создания САПР

В создании САПР можно выделить три основные направления работ и три варианта условия их выполнения. Содержание направлений работ в зависимости от условий их выполнения отражено в таблица 10.1, где ППП— пакеты прикладных программ, ТО—техническое обеспечение;

На практике возможны различные сочетания условий выполнения отдельных направлений работ. Наиболее распространенные сочетания, образующие типовые случаи создания САПР в целом, показаны в таблица 10.2. Они охватывают весь диапазон возможных ситуаций - от полностью самостоятельного создания САПР (случай 1) до внедрения компонентов КСАП уже существующей САПР (случай 5). Очевидно, что характеристика случая создания САПР является одним из факторов, определяющих значения показателей  $Z_{\text{по}}$ ,  $Z_{\text{то}}$ ,  $\text{ТР}_{\text{созд}}$  и  $T_{\text{созд}}$ .

Таблица 10.1

Направления работ	Условия выполнения работ		
	Отсутствие КСАП (вариант I)	Наличие отдельных компонентов КСАП (вариант II)	Наличие КСАП (вариант III)
Пакеты прикладных программ (ППП)	Создание ППП	Программная реализация ППП	Внедрение ППП
Техническое обеспечение (ТО)	Приобретение ТО	Адаптация имеющегося ТО	Освоение имеющегося
Общественные средства (ОСС)	Создание ОСС	Адаптация имеющихся ОСС	Освоение ОСС

В общем случае основными факторами повышения качества проектирования на автоматизируемом с помощью САПР этапе проектного

процесса являются повышение качества результатов проектирования, т. е. точности и достоверности проектных решений, и повышение качества проектной информации, т. е. снижение вероятности случайных ошибок в проектной информации, представляемой в качестве исходных данных на последующие этапы проектирования.

Таблица 10.2

Случай создания САПР	Варианты условий выполнения работ			Характеристики САПР
	по ППП	по ТО	по ОСС	
1	I	I	I	Создание принципиально новой САПР
2	I	III	I	Создание новой САПР на уже имеющейся вычислительной базе
3	II	III	I	Создание САПР на базе исходного уровня автоматизации проектных работ
4	II	II	I	Создание САПР на базе исходного уровня автоматизации проектных работ с развитием вычислительной базы
5	III	III	II	Создание САПР путем внедрения существующих ПМК на имеющейся

Первый из этих факторов определяет в конечном счете эффективность объекта проектирования и мало влияет на сам процесс его разработки. Более того, совершенствование процесса проектирования в части точности решения отдельных задач, структуры и общей производительности этого процесса является способом влияния на данный фактор.

Второй из указанных факторов повышения качества проектирования оказывает влияние на процесс проектирования. С ним связано возникновение косвенного эффекта использования САПР, который измеряется снижением дополнительных трудозатрат, использующих проектную информацию, полученную на автоматизируемом этапе проектирования. Под дополнительными трудозатратами в данном случае понимается трудоемкость работ, выполняемых повторно после обнаружения случайных ошибок в результатах предыдущих этапов, использовавшихся в качестве исходных данных для этих работ. Различие  $\Delta TP_{исх}$  и  $\Delta TP_{САПР}$  тем выше, чем меньше вероятность случайных ошибок в проектной информации, получаемой с помощью САПР  $w_{САПР}$  по сравнению с аналогичной вероятностью исходного уровня автоматизации  $w_{исх}$ . Соотношение  $K_w = w_{исх} / w_{САПР}$  можно рассматривать в данном случае как еще один частный показатель технико-экономической оценки САПР. В качестве интегрального показателя качества результатов проектирования может быть использована как сама величина  $\Delta H$ , определяемая по формуле (10.24), так и относительный коэффициент

$$K_{\Delta H} = (\Delta H)_{\text{САПР}} / (\Delta H)_{\text{исх}},$$

где  $(\Delta H)_{\text{САПР}}$ ,  $(\Delta H)_{\text{исх}}$  - величины, соответствующие условиям использования САПР и исходным условиям.

Таблица 10.3

Область оценки	Показатель	Значение показателя
Прямой технико-экономический эффект	$K_{\text{ГР}}$	Изменение производительности выполнения нормативных работ, обусловленное внедрением САПР
	$K_{\text{исп}}$	Изменение числа исполнителей нормативных работ, обусловленное внедрением САПР
Косвенный технико-экономический эффект	$K_{\text{С}}$	Изменение стоимости единицы трудозатрат на выполнение нормативных работ, обусловленное внедрением САПР
	$K_{\text{W}}$	Изменение вероятности случайных ошибок в проектной информации, обусловленное внедрением САПР
	$(\Delta u_j)_{\text{САПР}}$	Предельная погрешность вычисления значений функции $u_j(x)$ в условиях использования САПР
	$(\Delta H)_{\text{САПР}}$	Снижение энтропии представления об объекте проектирования, обеспечиваемое в проектных работах, выполняемых с помощью САПР
Процесс создания САПР	$Z_{\text{ПО}}, Z_{\text{ТО}}$	Единоразовые затраты на приобретение готовых компонентов программного и технического обеспечения САПР
	$TR_{\text{созд}}$	Трудозатраты создания САПР
	$T_{\text{созд}}$	Продолжительность создания САПР

Рассмотренные выше частные показатели технико-экономической оценки и планирования процесса создания САПР систематизированы в таблице 10.3. В последующих разделах приведены некоторые методические материалы, предназначенные для определения этих показателей в процессе разработки САПР.

## 2. Расчетно-статистический анализ основных показателей технико-экономической оценки и планирования процесса создания САПР

### Уравнения прямого технико-экономического эффекта САПР.

Представленные ниже зависимости основаны на анализе статистических данных по пяти отечественным и десяти зарубежным САПР, получившим практическое применение в проектировании ЛА. В процедуре анализа использованы основные положения системно-организационного макро-

описания проектирования. Так в качестве нормативных работ, в отношении которых оценены технико-экономические показатели, приняты работы, связанные с получением или проектным анализом ПР на отдельных этапах системно-организационного макро-описания проектирования. В качестве исходного условия, предшествующего созданию САПР, принят уровень автоматизации, соответствующий традиционной обработке информации в ВЦ коллективного пользования. Это соответствует 3 и 4 случаям создания САПР (см. таблицу 10.2). В таблице 10.4 представлены данные, характеризующие процесс проектирования при исходном уровне автоматизации.

В принятой постановке процедуры анализа факторами, отличающими САПР от исходного уровня автоматизации и соответственно определяющими ее технико-экономическую эффективность, являются:

- информационная интеграция отдельных расчетных задач в единый процесс;
- интерактивность взаимодействия пользователей САПР с реализуемым в ЭВМ процессом решения проектных задач;
- эксплуатационное удобство работы пользователей САПР со средствами автоматизации проектирования (в том числе доступность средств автоматизации);
- функциональное удобство работы пользователей САПР со средствами автоматизации проектирования (в том числе уровень «искусственного интеллекта», совершенство лингвистического обеспечения и соответствие времени реакции системы требуемой величине).

Таблица 10.4

Уровень процесса проектирования	Тип ЛА	<i>ПР</i> <sub>исх</sub> , (ед./год)	<i>ТР</i> <sub>исх</sub> , (чел.-нед.)	<i>ИСП</i> <sub>исх</sub> , (чел.)
II	ЛАТН	100...150	0,5...1.0	1.0
	ЛАСН	35...40	3,0...4,0	1,0
III	ЛАТН	50...60	20...25	20
	ЛАСН	10...15	60...100	20

Эти факторы реализуются в САПР соответствующими компонентами методического, программного, технического и организационного обеспечения, создание которых связано с определенными материальными и трудовыми затратами и должно учитываться в процессе планирования создания САПР.

Фрагмент анализа трех показателей технико-экономической оценки САПР (коэффициентов роста производительности системы, снижения трудоемкости работ и уменьшения численности исполнителей) показан на рис. 10.1. Приведенные там величины показателей являются статистическими данными проводившихся ранее технико-экономических оценок САПР или расчетными значениями этих оценок, полученными автором на основании сведений о функционировании отдельных САПР в их подсистем. Различные обозначения точек соответствуют выполнению четырех типов проектных работ

с использованием двух разных САПР: систем, имеющих интерактивную машинную графику, и систем, не располагающих такими средствами автоматизации проектирования. Эти САПР реализуются соответственно при вариантах IV, V и II, III структуры интерфейсного оборудования (см. табл. 10.2).

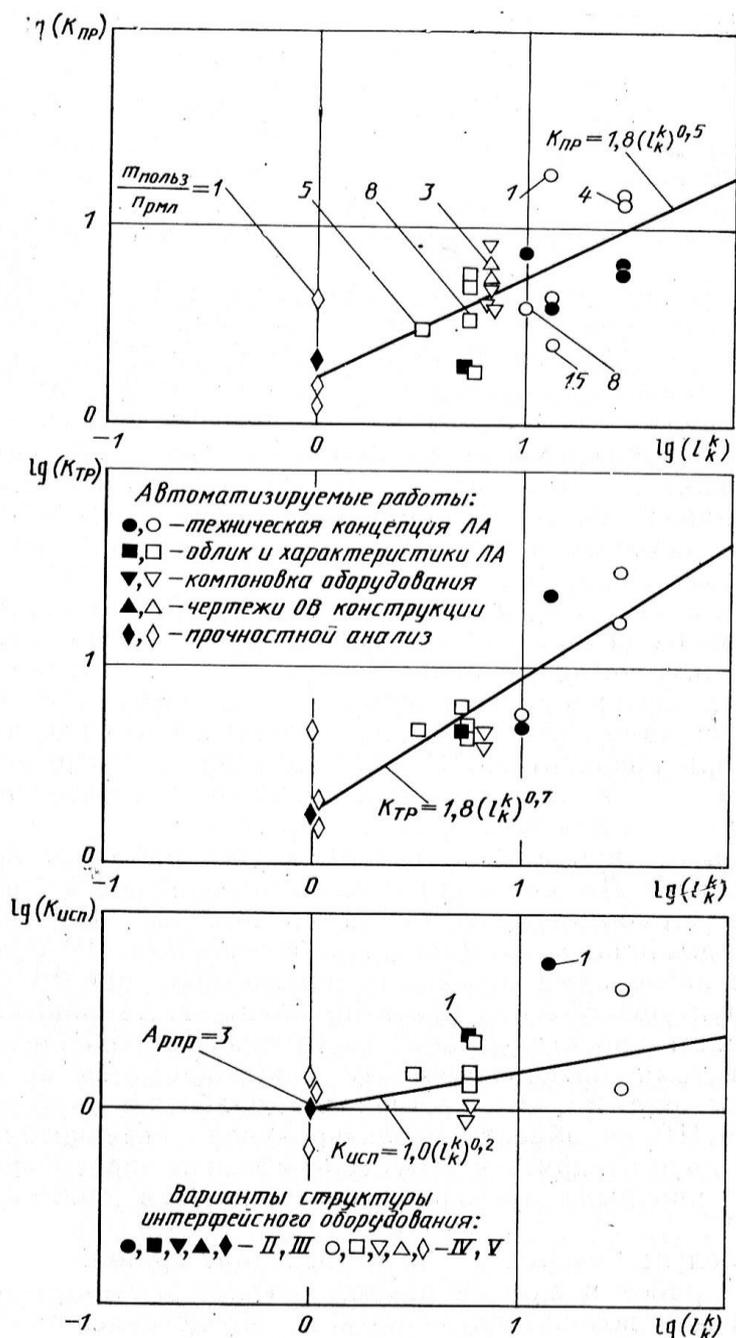


Рис. 10.1. Пример анализа частных показателей техники экономической оценки САПР.

Изменение величин  $K_{PP}$ ,  $K_{TP}$ ,  $K_{исп}$  дано (см. рис. 10.1) в зависимости от повторяемости автоматизируемых работ в рамках одного этапа проектирования. Для количественного представления этой характеристики в случаях неединичного выполнения автоматизируемых работ взято число ПР, прорабатываемых в рамках отдельных этапов проектирования элементов  $k$ -го уровня детализации  $l_k^k$ . При этом использованы результаты расчетно-статистического анализа процесса проектирования.

Как видно из рис. 10.1, более высокой повторяемости автоматизируемой работы в рамках одного этапа проектирования соответствуют большие значения  $K_{ПР}$ ,  $K_{ТР}$ ,  $K_{ИСП}$ , т.е. более высокая технико-экономическая эффективность САПР. Это является проявлением того эффекта, которое оказывает влияние в процессе проектирования на наличие в САПР автоматизированного банка данных, объединяющего выполнение отдельных задач в единый автоматизированный процесс. Наличие АБД позволяет сохранять информацию, получаемую или используемую при выполнении отдельных работ. Она может быть применена далее в аналогичных работах без расхода тех трудоресурсов и времени, которые были уже однажды затрачены на её получение или введение в процесс решения проектных задач. Повышение повторяемости одних и тех же работ при одних и тех же (или мало изменяющихся) исходных условиях, что имеет место при разработке ПР и отражается в увеличении их числа, приводит к относительному снижению трудозатрат на получение общей для всех работ информации.

Основными причинами повторяемости работ в процессе проектирования ЛА являются параметрические исследования и частичные доработки проектной документации. Параметрические исследования в которых разрабатываемые ПР отличаются только значениями отдельных параметров при сохранении самой структуры объекта проектирования, составляют значительную часть проектных работ на уровнях II и III, предусмотренных системно-организационным макро-описанием проектирования (см. рис. 10.1, д). Частичные доработки, при которых различные ПР по объекту проектирования незначительно отличаются друг от друга в структуре объекта проектирования, являются типичными примерами повторяемости работ на уровнях IV и V.

Как следует из рис. 10.1 с учётом интеграции отдельных проектных работ в единый процесс рассматриваемые технико-экономические показатели могут быть представлены выражениями:

$$K_{ПР} = 1,8(l_k^k)^{0,5}, \quad (10.5)$$

$$K_{ТР} = 1,8(l_k^k)^{0,7}, \quad (10.6)$$

$$K_{ИСП} = 1,0(l_k^k)^{0,2} \quad (10.7)$$

Исходя из смысла этих выражений, будем рассматривать их далее как уравнения прямого технико-экономического эффекта САПР.

Информационная интеграция имеет положительный эффект при реализации не только последовательных, но и параллельных по времени выполнения проектных работ. Распараллеливание процесса проектирования не снижает самой трудоемкости выполнения работ, но изменяет общие сроки их выполнения и соответственно производительность организационно-технической системы, реализующей проектирование. Это относится главным образом к комплексным проектным процессам типа тех, которые имеют место при проектной разработке ЛА, при проведении уточненного анализа летно-технических и специальных по целевому назначению характеристик ЛА и при анализе напряженно-деформированного состояния конструкции ЛА.

Обеспечиваемое здесь за счет использования АБД распараллеливание процесса проектирования является проявлением того влияния, которое внедрение САПР оказывает на саму организационную структуру этого процесса. Анализ имеющихся статистических данных показывает, что в подобных проектных процессах коэффициент распараллеливания работ по времени их выполнения или расходуемым трудоресурсам (обозначим его через  $A_{РПР}$ ) при внедрении САПР составляет 2...5. В среднем  $A_{РПР}$  равно трем. Для проектных процессов определения технической концепции ЛА, разработки чертежей общих видов агрегатов конструкций и компоновочных чертежей оборудования, относящихся к последовательным процессам проектирования,  $A_{РПР} = 1$ .

На рис. 10.1 для нескольких статистических точек указаны соответствующие им значения  $A_{РПР}$ . Для того чтобы исключить из рассмотрения влияние других факторов в качестве таких точек взяты САПР, имеющие минимальные и следовательно одинаковые уровни интерактивного взаимодействия в реализации автоматизированного проектирования. Можно видеть, что при прочих равных условиях увеличение  $A_{РПР}$  сопровождается увеличением  $K_{ПР}$  и уменьшением  $K_{ИСП}$ .

На рис. 10.1 выделено также несколько статистических точек по САПР с высоким уровнем интерактивного взаимодействия, для которых указано значение такой эксплуатационной характеристики САПР, как число пользователей САПР, приходящихся на одно автоматизированное рабочее место проектировщика ( $m_{польз}/n_{рмп}$ ).

Каждое такое место образуется соответствующим комплексом интерфейсного оборудования, обеспечивающим в САПР реализацию интерактивно графического режима работы. Если само использование интерактивной машинной графики является положительным фактором, улучшающим условия работы пользователей САПР, то перегрузка интерактивного рабочего места большим числом пользователей, снижает для каждого из них доступность необходимых ему средств автоматизации. Можно видеть (см рис. 10.1), что САПР, имеющая интерактивно-графический режим работы проектировщика, обладает большими значениями  $K_{ПР}$  чем САПР, не обладающая такой возможностью, и это преимущество тем больше, чем меньше величина ( $m_{польз}/n_{рмп}$ ).

Продолжая иллиминированный регрессионный анализ статических данных, первым шагом которого является вывод зависимостей (10.5)..(10.7), уравнения прямого технико-экономического эффекта можно расширять до вида:

$$K_{ПР} = K_{ПР}(m_{польз}/n_{рмп})^{-0,82} (A_{РПР})^{0,7} (l_k^k)^{0,5}, \quad (10.5')$$

$$K_{ТР} = K_{ТР}(m_{польз}/n_{рмп})^{-0,82} (l_k^k)^{0,7}, \quad (10.6')$$

$$K_{ИСП} = K_{ИСП} (A_{РПР})^{-0,7} (l_k^k)^{0,2} \quad (10.7')$$

где ( $m_{польз}/n_{рмп}$ )=var - характеристика САПР с интерактивной машинной графикой (см. варианты IV и V структуры интерфейсного оборудования, таблица 10.2); ( $m_{польз}/n_{рмп}$ )=3 - для САПР без интерактивной машинной графики

(варианты II и III);  $K_{ПР}$ ,  $K_{ТР}$ ,  $K_{ИСП}$  - удельные показатели технико-экономической эффективности САПР, значения которых приведены в таблице 10.5.

Значение ( $m_{польз}/n_{рмп}$ ), указанное для САПР без интерактивной машинной графики, является условным эквивалентом и принимается исходя из равной удельной трудоемкости реализации одинаковых работ в САПР различного типа. Это выражается в постоянстве удельных показателей  $K_{ТР}$  для разных САПР (см. таблицу 10.5). Группой 'А' в таблице 10.5 обозначены процессы с последовательным выполнением проектных работ. Напомни, что к их числу относится определение технической концепции ЛА. Группой «В» обозначены проектные процессы с распараллеливанием проектных работ, к числу которых относятся проектная разработка облика ЛА, уточненный анализ летно-технических и специфических по целевому назначению характеристик ЛА, анализ напряженно-деформированного состояния конструкций ЛА.

Таблица 10.5

Удельные показатели	САПР без интерактивной машинной графики		САПР с интерактивной машинной графики	
	работы группы «А»	работы группы «В»	работы группы «А»	работы группы «В»
$K_{ПР}$	3,25	2,25	6,5	4,5
$K_{ТР}$	6,5		6,5	
$K_{ИСП}$	2,0	3,0	1,0	1,5

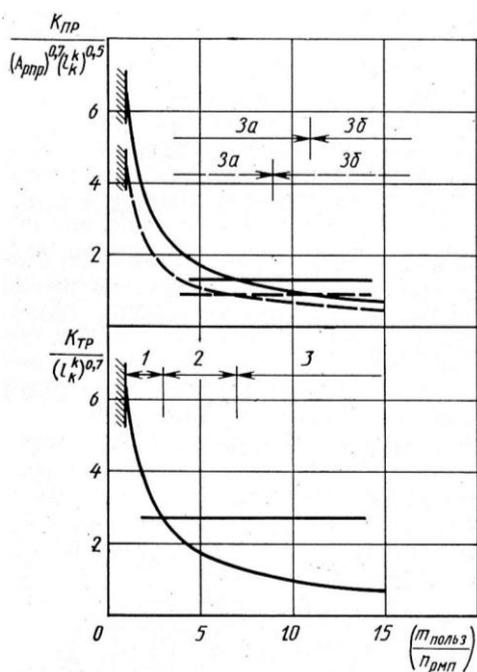


Рис.10.2. Влияние доступности интерфейсного оборудования на частные показатели технико-экономической оценки САПР

— работы группы «А»;  
 - - - - - работы группы «В»

Точность рассматриваемых зависимостей определяется степенью учета всего многообразия факторов, оказывающих влияние на технико-экономическую эффективность САПР. Оценка точности, приведенная на одиннадцати примерах САПР, показывает, что при переходе от зависимостей (10.5) ... (10.7) к зависимостям (10.5') ... (10.7'), предельные погрешности определения величин  $K_{ПР}$  и  $K_{ТР}$  снижаются со 150 ... 200 до 40 ... 50 %. Очевидно, точность может быть повышена и в большей степени, но только за счет рассмотрения дополнительных факторов, определяющих, например, функциональное удобство работы пользователя со средствами автоматизации проектирования. Точность, которая обеспечивается зависимостями (10.5') ... (10.7'), вполне приемлема для решения ряда практических вопросов, возникающих в процессе общей разработки САПР.

Полученные зависимости основаны на анализе статистических данных уже созданных САПР и учитывают комплексную взаимосвязь, которая существует между автоматизируемым процессом проектирования, функционированием САПР как организационно-технической системы и возможностями конкретного уровня автоматизации.

При равной удельной трудоемкости однотипных работ в системах с интерактивной машинной графикой при прочих равных условиях обеспечивается в два раза меньшее снижение числа исполнителей (см. табл. 10.5). Это, однако, не означает, что данный тип САПР уступает системам без интерактивной графики, так как сравнение обоих типов САПР должно включать также сопоставление величин  $K_{ДП}$  и  $K_{ТР}$

Такое сопоставление проведено на рис. 10.2, где представлена графическая интерпретация выражений (10.5'), (10.6'). Можно видеть, что в зависимости от числа пользователей, приходящихся в системах с интерактивной машинной графикой на одно рабочее место пользователя, возможны три случая в результатах сравнения прямого технико-экономического эффекта рассматриваемых типов САПР.

*Случай 1:* при  $1 < (m_{\text{польз}}/n_{\text{рмп}}) < 3$ , САПР с интерактивной машинной графикой обладает большим увеличением производительности и большим снижением трудозатрат, чем САПР без интерактивной графики.

*Случай 2:* при  $3 < (m_{\text{польз}}/n_{\text{рмп}}) < 7$ , САПР с интерактивной машинной графикой характеризуется большим увеличением производительности, но меньшим снижением трудозатрат на нормативную работу. Относительное ухудшение технико-экономической эффективности САПР с интерактивной машинной графикой объясняется в данном случае падением производительности непосредственно самих пользователей, которые могут оказаться в состоянии вынужденного ожидания своей очереди работы на интерактивных рабочих местах. Принято считать, что находясь в таком состоянии, пользователь САПР может только на 50 % загрузить себя производственной работой. Более высокая производительность САПР с интерактивной машинной графикой обеспечивается в данном случае меньшим, чем у САПР без интерактивной графики, снижением числа исполнителей работ.

*Случай 3:* при  $(m_{\text{польз}}/n_{\text{рмп}}) > 7$ , САПР с интерактивной машинной графикой уступает системам, не имеющим такого средства автоматизации проектирования, по всем рассматриваемым, показателям технико-экономической эффективности. Однако следует иметь в виду, что данный вывод относится только к прямой технико-экономической эффективности САПР и не затрагивает косвенного эффекта, определяемого выражением (8.3).

#### **Уравнение косвенного технико-экономического эффекта САПР.**

Представленные ниже методические материалы по оценке косвенного эффекта САПР основаны на статистических данных работы и данных, полученных автором в процессе опытной эксплуатации одной из отечественных САПР ЛА. Они позволяют привести к виду расчетной методики зависимость (10.3), характеризующую косвенный технико-экономический эффект от внедрения САПР.

Рассмотрим этот эффект применительно к расчётному этапу частного процесса проектирования элемента  $k$ -го уровня детализации ТС. На последующем  $j$ -м этапе проектирования среднегодовое снижение дополнительных трудозатрат, входящее в зависимость (10.3), может быть представлено следующим образом

$$(\Delta TP_{\text{исх}} - \Delta TP_{\text{САПР}})_j = B_j (\Delta TP_{\text{ср}}^1)_j (w_{\text{исх}})_p \left(1 - \frac{1}{K_w}\right)_p, \quad (10.8)$$

где  $(\Delta TP_{\text{ср}}^1)_j$  - средняя величина дополнительных трудозатрат на  $j$ -м этапе проектирования, приходящаяся на один случай корректировки исходных данных, ранее переданных с  $p$ -го этапа;  $(w_{\text{исх}})_p$  - соответствующая исходным условиям автоматизации вероятность ошибочных данных в результатах, передаваемых с  $p$ -го этапа проектирования;  $(Kw)_p = (w_{\text{исх}})_p / (w_{\text{САПР}})_p$  - снижение вероятности ошибочных данных в результатах проектирования на  $p$ -м этапе, обусловленное внедрением САПР;  $B_j$  - комплексный параметр, зависящий от положения  $j$ -го этапа относительно автоматизируемого этапа в общей структуре процесса проектирования.

Использование системно организационного макро-описания процесса проектирования позволяет выразить параметр  $B_j$ , следующим образом:

если  $j$ -й этап соответствует проектированию элемента  $(k-1)$ -го уровня детализации ТС, то

$$B_j = [(PP_{\text{САПР}})_k A_k]_j; \quad (10.9)$$

если  $j$ -й этап соответствует проектированию элемента  $(k+1)$ -го уровня детализации ТС, то

$$B_j = \left[ \frac{(PP_{\text{САПР}}) L_{k+1}}{l_k^k} \right]_j, \quad (10.10)$$

где  $A_k$ ,  $L_{k+1}$ ,  $l_k^k$  - показатели процесса проектирования, принятые в системно-организационном макро-описании;  $PP_{\text{САПР}}$  - производительность САПР, принятая в методике технико-экономической оценки САПР.

По аналогии с зависимостями (10.5)...(10.7) данные выражения могут быть названы уравнениями косвенного технико-экономического эффекта САПР.

Отметим, что зависимость (10.3) и конкретизирующая ее зависимость (10.8), так же как и зависимость (10.2), выражает условную величину технике экономического эффекта САПР. Это связано с рассмотрением исходных условий автоматизации при той же производительности проектных работ, что и в случае использования САПР.

Можно выделить три фактора, влияющие на вероятность ошибочных данных в передаваемой проектной информации, и соответствующие им компоненты этой вероятности:

неправильное использование общесистемных средств (т. е. Системного программного обеспечения, АБД, АБЗ, методического обеспечения,

организационного обеспечения), обусловленное, в частности, недостатками в разработке этих средств,— вероятность  $w_{\text{ОСС}}$ ;

отсутствие необходимого контроля за развитием ППП и недостаточная верификация ППП—вероятность  $w_{\text{ППП}}$ ;

собственные ошибки пользователей, вносимые в исходные данные при работе с ППП,—вероятность  $w_{\text{польз}}$ .

Данные факторы и соответственно величины отдельных компонентов общей вероятности ошибочных данных в разной степени зависят от характера проектных работ и от уровня их автоматизации. Величины  $w_{\text{ОСС}}$  и  $w_{\text{польз}}$  имеют наибольшие значения для группы работ «В» (см таблицу 10.5) и уменьшаются с повышением уровня автоматизации проектирования. Причем для  $w_{\text{ОСС}}$  это уменьшение происходит более интенсивно чем для  $w_{\text{польз}}$ . Еще более сильное влияние оказывает уровень автоматизации на величину  $w_{\text{польз}}$ , которая в то же время мало зависит от того к какой группе по своему характеру относится автоматизируемая проектная работа.

В табл. 10.6 даны ориентировочные величины основных показателей, входящих в зависимость (10.8). Приведенные значения основаны на обработке различных данных по использованию САПР ЛА и учитывают отмеченный выше характер влияния САПР различного типа на отдельные компоненты общей вероятности ошибочных данных. Значение средней величины дополнительных трудозатрат, указанное для группы работ «А», соответствует случаю, когда  $j$ -й этап входит в процесс проектирования элемента  $(k-1)$  уровня детализации ТС, а значение, указанное для группы работ «В»,—элемента  $(k+1)$  уровня детализации. Такое сочетание можно считать наиболее типичным для проведения технико-экономической оценки САПР.

Приведенные выше методические материалы позволяют рассмотреть вопрос о качественном сравнении двух типов САПР (обладающих и не обладающих средствами интерактивной машинной графики) в отношении косвенного технико-экономического эффекта, который проявляется при их использовании на практике. Возможные варианты результатов такого сравнения отражены на рис. 10.2, где показано, что результаты сравнения разных типов САПР, полученные в части прямого технико-экономического эффекта, могут быть дополнены еще двумя случаями:

*Случай 3а:* САПР с интерактивной машинной графикой имеет преимущества по величине среднегодового снижения труда затрат на  $j$  этапе проектирования перед системой, не обладающей такими возможностями.

*Случай 3б:* САПР с интерактивной машинной графикой уступает по рассматриваемому показателю системе, не обладающей такой возможностью.

**Уравнения планирования процесса создания САПР.** Представленные ниже зависимости основаны на анализе статистических данных о процессах создания девяти (в том числе двух отечественных) САПР, предназначенных для автоматизации процесса проектирования различных типов ЛА.

Таблица 10.6

Показатель и	Работы группы «А»		Работы группы «В»	
	САПР без интерактивной графики	САПР с интерактивной графикой	САПР без интерактивной графики	САПР с интерактивной графикой
$w_{исх}$	0,3		0,5	
$(Kw)р$	3,0	55,0	2,0	5,0
$(\Delta TP_{ср}^1)_i$	4,0 чел ... нед		12,0 чел ... нед	

Общая схем, анализа статистических данных соответствует представлению об основных направлениях и условиях выполнения работ по САПР (см. табл. 10.1). Согласно принятой схеме, трудозатраты (или трудоемкость) создания САПР рассматриваются как

$$TP_{созд} = TP_{ппп} + TP_{то} + TP_{осс}, \quad (10.11)$$

где  $TP_{ппп}$  - трудозатраты на создание библиотеки ППП, входящей в проблемное программное обеспечение САПР;  $TP_{то}$  - трудозатраты на создание технического обеспечения САПР;  $TP_{осс}$  - трудозатраты на создание общесистемных средств (системное программное обеспечение, АБД, АБЗ, методическое, организационное и информационное обеспечение).

Применительно к типовым случаям создания САПР (см, табл. 10.2) доминирующими составляющими в величине  $TP_{созд}$  являются  $TP_{ппп}$  и  $TP_{осс}$ . Создание технического обеспечения реализуется в практике автоматизации проектирования в основном за счет использования уже готового оборудования. Поэтому в отношении создания технического обеспечения интерес представляют не столько сами трудозатраты, сколько дополнительные показатели, характеризующие, например, степень риска в обеспечении требуемых сроков приобретения необходимого оборудования, его установки, а если это необходимо, то и доработки. В связи с этим будем далее рассматривать трудозатраты создания технического обеспечения совместно с трудозатратами создания общесистемных средств, именуя их в целом трудозатратами системной реализации САПР ( $TP_{сист}$ ). Тогда выражение (10.11) примет вид:

$$TP_{созд} = TP_{ппп} + TP_{сист}. \quad (10.11')$$

Следует подчеркнуть, что вопрос о трудозатратах создания ППП не является аналогичным вопросу о трудоемкости создания программного обеспечения. Пакеты прикладных программ аккумулируют в себе не только программное обеспечение, но и методы проектирования (расчетные схемы и структуры, методики и алгоритмы, логические зависимости и расчетные формулы). Многие из этих методов рассчитаны на использование ЭВМ, в связи

с чем их разработка является составной частью общего процесса автоматизации проектирования. Создание ППП—не простое программирование. Анализ процессов разработки комплексных программ весового расчета показывает, что проведение дополнительной верификации и доработки уже имеющихся расчетных алгоритмов увеличивает трудоемкость создания программ на 10...15 %. При необходимости же полной разработки новых расчетных алгоритмов трудоемкость создания подобных программ может возрасти в 5...6 раз.

Исходя из формулы трудоемкости разработки программного обеспечения «встроенного» типа (т.е. того типа, который наиболее соответствует характеру ППП), можно рассматривать следующий вид зависимости трудозатрат создания ППП:

$$TP_{ППП} = (k_1 + k_2 a_{ППП}) \left( \frac{N_{ППП}}{1000} \right)^{1,2}, \quad (10.12)$$

где  $N_{ППП}$  - число операторов программного обеспечения в составе ППП;  $k_1$  - коэффициент трудозатрат на программирование;  $k_2$  - коэффициент трудозатрат на разработку нового прикладного математического обеспечения;

$a_{ППП}$  - относительная величина нового прикладного математического обеспечения в его общем объеме.

Анализ имеющихся данных по созданию библиотек ППП и отдельных проектирующих подсистем САПР, представленный на рис. 10.3, подтверждает в целом приемлемость формулы (10.12) и позволяет принять  $k_2=2,0$  при размерности  $TP_{ППП}$  «чел. - лет.». Указанные значения  $k_1$  и  $k_2$  соответствуют разработке программного обеспечения при проведении программирования в условиях быстрой пакетной обработки информации или в режиме диалога с ЭВМ. Это типичные условия работы программистов. Варианты условий создания ППП соответствуют принятым в табл. 10.1.

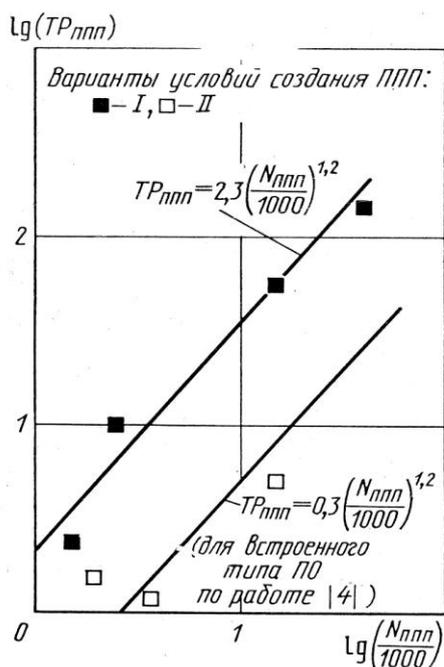


Рис. 10.3. Трудоемкость создания пакетов прикладных программ

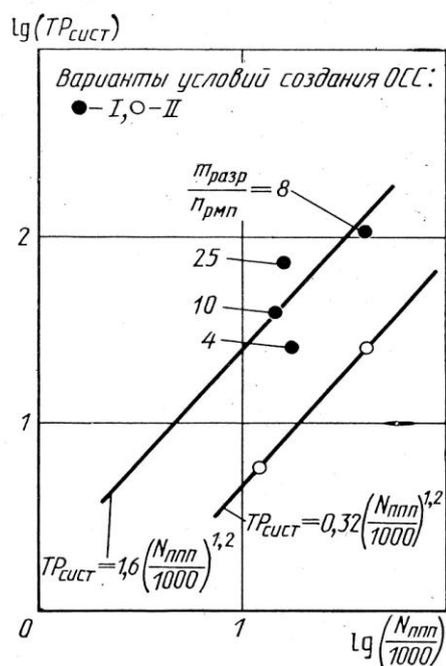


Рис. 10.4. Трудоемкость системной реализации САПР

Вопрос о трудозатратах системной реализации САПР не имеет каких-либо аналогов, уже рассмотренных в литературе. Очевидно, что величина этих трудозатрат зависит от масштабности автоматизируемого процесса проектирования и условий создания САПР. Косвенной характеристикой первого из этих факторов является размерность проблемного программного обеспечения, которая для достаточно масштабных разработок может быть количественно охарактеризована величиной  $N_{ППП}$ .

Анализ имеющихся данных о трудозатратах системной реализации САПР в зависимости от величины  $N_{ППП}$  показан на рис. 10.4. Представленные здесь статистические данные соответствуют созданию САПР путем внедрения уже имеющихся ПМБ (вариант II условий создания ОСС по табл. 10.1) или путем полной разработки необходимых ПМК, (вариант I условий создания САПР по табл. 10.1). Использование уже существующих ПМК в пять раз снижает трудозатраты системной реализации САПР. А в целом для этих трудозатрат сохраняется тот же вид зависимости от  $N_{ППП}$ , что и для трудозатрат создания библиотеки ППП. Поэтому примем

$$TP_{\text{сист}} = (k_3 + k_4 a_{\text{ОСС}}) \left( \frac{N_{\text{ППП}}}{1000} \right)^{1,2}, \quad (10.13)$$

где  $k_3$  - коэффициент трудозатрат на разработку не тиражируемых обеспечений (организационное, информационное) и ввод в действие САПР;  $k_4$  - коэффициент трудозатрат на создание тиражируемых обеспечений САПР (системное программное обеспечение, АБД, АБЗ, методическое обеспечение),  $a_{\text{ОСС}}$  - относительная величина новых общественных средств.

При использовании для  $TP_{\text{сист}}$  размерности «чел. - лет.» статистические коэффициенты имеют значения  $k_3 = 0,32$  и  $k_4 = 1,28$ .

По данным работы [4] предельная погрешность зависимости типа (10.12) при ее использовании для оценки трудоемкости разработки программного обеспечения может составлять более 300 %. И две трети величины этой погрешности обусловлены встречающимся на практике различием квалификационного уровня и опыта специалистов, выполняющих данную работу. Согласно экспериментальным данным [30] трудоемкость выполнения одних и тех же связанных с разработкой программ работ для слабых программистов в 15..20 раз выше, чем для сильных программистов.

Однако вряд ли следует ожидать сильного влияния данного фактора на оценку трудозатрат создания САПР. Индивидуальные различия исполнителей, играющие заметную роль при оценке трудоемкости сравнительно небольших работ, связанных с программированием, стираются при переходе к оценке трудозатрат выполнения такой масштабной работы, как создание САПР в целом. Создание САПР требует участия в этой работе большого коллектива исполнителей, а в нем всегда имеет место разброс квалификационного уровня и опыта специалистов. Даже при самом тщательном подборе этого коллектива практически невозможно создать его из специалистов, обладающих одновременно глубокими знаниями и опытом прикладника, аналитика и программиста.

В целом можно считать, что предельная погрешность зависимостей (10.12), (10.13) при их использовании в оценке трудозатрат создания САПР не превышает 100 %. Величина этой погрешности отражает различие условий выполнения тех или иных работ по САПР. К числу таких условий относится методологическая обеспеченность или наличие инструментария для выполнения конкретных работ, а также обеспеченность работ вычислительными ресурсами и доступность для разработчиков САПР необходимых им вычислительных средств. Имеющая место на практике вариация доступности вычислительных средств может на 15 % изменить трудоемкость программирования как в большую, так и в меньшую сторону [4], а вариация методологической обеспеченности и наличия инструментария может обуславливать 40 % -е изменение трудоемкости программирования относительно некоторого номинала.

Гораздо более сильным может быть влияние этих факторов в системной реализации САПР. Создание (т. е. разработка, отладка, верификация и описание) программно-методических компонентов, разрабатываемых в процессе системной реализации САПР, тем или иным образом связано с использованием рабочих мест пользователей в составе интерфейсного оборудования будущей системы. Поэтому доступность необходимых вычислительных средств может быть оценена числом разработчиков, приходящихся на одно автоматизированное рабочее место пользователей САПР в период создания этой системы ( $m_{РАЗР}/n_{РМП}$ ). Отсутствие достаточного числа таких рабочих мест создает определенные неудобства для разработчиков и, как следствие, увеличивает трудозатраты системной реализации САПР. Очевидно значение рассматриваемого фактора повышается по мере перехода от простого освоения уже имеющихся общесистемных средств САПР к активному их созданию. Статистические точки, соответствующие именно такому варианту условий создания ОСС, представлены на рис. 10.4 с указанием величины ( $m_{РАЗР}/n_{РМП}$ ). Используя эти данные для проведения еще одного шага иллиминированного регрессионного анализа, зависимость (10.13) можно привести к виду

$$TP_{\text{сист}} = \left[ (k_3 + 0,34a_{\text{ОСС}} \left( \frac{m_{\text{РАЗР}}}{n_{\text{РМП}}} \right)^{0,6} \right] \left( \frac{N_{\text{ППП}}}{1000} \right)^{1,2}. \quad (10.13')$$

Учет рассматриваемого фактора позволяет снизить погрешность расчетного определения  $TP_{\text{сист}}$  до 30 %.

Переходя к оценке продолжительности создания САПР, уточним понимание этого показателя в данной работе. Создание САПР как организационно-технической системы, обеспечивающей выполнение в автоматизированном режиме по крайней мере отдельного этапа проектирования,—это комплексный и широкомасштабный процесс, вовлекающий в работу многие десятки исполнителей. Непременным условием реализации этого процесса является его контролируемость и управляемость со стороны руководства и служб, ответственных за проведение программы автоматизации.

Принято считать, что при создании автоматизированной системы, основанной на обработке информации в ЭВМ, продолжительность создания системы определяется в первую очередь трудоемкостью выполняемых работ

[4]. Не отрицая влияния трудоемкости программирования на сроки создания программного обеспечения, отметим, что данный факт нельзя распространять на создание САПР в целом. Это связано со следующими обстоятельствами.

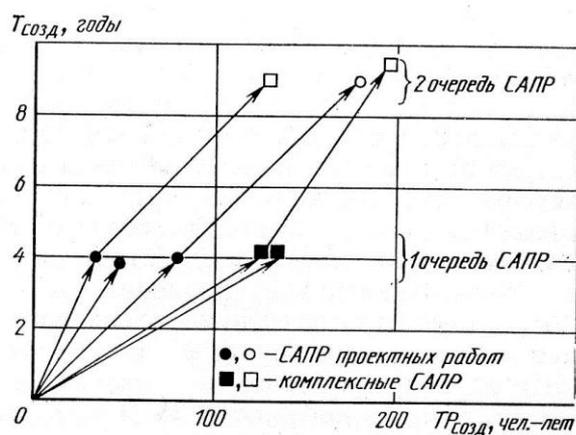


Рис. 10.5. Анализ факторов, определяющих продолжительность создания САПР.

Во-первых, помимо разработки программного обеспечения в процесс создания САПР входит целый ряд других работ, сроки выполнения которых связаны с чисто временным фактором. Так ввод в действие технического обеспечения связан с выполнением плановых поставок оборудования и графиком проведения строительно-монтажных и пуско-наладочных работ. Принятие окончательных решений по вариантам методического и информационного обеспечению также требуют определенного времени, необходимого для опытной апробации и согласования отдельных компонентов этих обеспечений. В свою очередь темпы подготовки технического и методического обеспечений определяют темпы разработки программного обеспечения и т. д.

Во-вторых, объективным фактором, лимитирующим сроки создания САПР, является физическое и моральное старение вычислительной техники. Существует определенная периодичность (примерно 10 лет) обновления вычислительной базы, используемой в САПР. И сроки создания должны быть определенным образом согласованы с этой периодичностью, чтобы обеспечить достаточный для получения практической отдачи от использования САПР период эксплуатации системы. Несоблюдение этого положения может превратить создание САПР в процесс постоянных переделок и доработок.

В-третьих, создание САПР не является самоцелью. И реализация этого процесса всегда проходит в условиях объективной потребности использования САПР. Эта потребность диктует свои требования к срокам создания и ввода САПР в эксплуатацию. Несоблюдение этих требований может приводить к снижению актуальности работ по созданию САПР и, как следствие, к их прекращению.

Изложенные обстоятельства позволяют понять и объяснить результаты анализа, показанные на рис. 10.5. Там представлены данные по примерам создания ряда отечественных и зарубежных САПР ЛА с указанием

продолжительности и величины трудозатрат этих работ. Все рассмотренные системы создавались на базе исходного уровня автоматизации проектирования, характеризующегося наличием базового пакета прикладных программ или, по крайней мере, проблемного математического обеспечения, необходимого для разработки ППП. Поэтому указанные трудозатраты не включают в себя трудоемкость разработки ППП. Можно считать, что такой случай создания САПР (случай 3 табл. 10.2) является характерным вариантом для начального этапа автоматизации проектирования.

Из рис. 10.5 видно, что вне зависимости от величины трудозатрат ввод САПР в эксплуатацию происходит примерно через четыре года после начала работ. В проведенном анализе не рассматривались неудачные попытки создания САПР. Очевидно, что в большинстве случаев четырехлетний срок не позволяет удовлетворить все требования и использовать все возможности, которые существуют в создании САПР. С этим связана существующая как в отечественной, так и в зарубежной практике двух ступенчатость автоматизации проектирования, предусматривающая создание САПР первой и второй очереди. Судя по данным (см. рис. 10.5), развитие уже созданных САПР занимает в среднем пять лет.

Отсутствие корреляции между величиной трудозатрат и продолжительностью создания САПР можно рассматривать как существование определенной зависимости между числом разработчиков САПР и трудоемкостью создания системы

$$m_{\text{разр}} = \frac{TP_{\text{созд}}(N_{\text{ППП}}, a_{\text{ППП}}, a_{\text{ОСС}}, m_{\text{разр}}, n_{\text{рмп}})}{T_{\text{созд}}}, \quad (10.14)$$

Величина  $TP_{\text{созд}}$  определяется здесь приведенными выше формулами, а  $T_{\text{созд}}$  выступает в качестве определенной константы. Разумеется, зависимость вида (10.14) справедлива в определенном диапазоне величин  $T_{\text{созд}}$  и  $TP_{\text{созд}}$ . Из нее не следует, что бесконечно большое число разработчиков способны мгновенно создать САПР.

Таблица 10.7

Случай создания САПР	$TP_{\text{ППП}}$	$TP_{\text{СИСТ}}$	$T_{\text{СОЗД}}$
1	Формула (10.12) $k_1=0, k_2=0, a_{\text{ППП}}=1$	Формула (10.13') $k=0, a_{\text{ОСС}}=1$	4...5 лет
2	»	»	»
3	Формула (10.12) $k_1=0, k_2=0, a_{\text{ППП}}=0$	»	»
4	»	»	»
5	$TP_{\text{ППП}} = 0$	Формула (10.13') $k_3=0, a_{\text{ОСС}}=0$	»

Результаты проведенного анализа обобщены в табл. 10.7, где указан способ оценки основных показателей планирования процесса создания САПР. Рассмотренные случаи создания САПР соответствуют табл. 10.2, а составляющие трудозатрат— формуле (10. 11').

### **Контрольные вопросы**

29. Критерии технико-экономической оценки. Факторы повышения качества проектирования.
30. Уравнения прямого и косвенного технико-экономического эффекта.
31. Уравнение планирования процесса создания САПР.

ЛИТЕРАТУРА: [4].

## **ТЕМА IV. АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ОБЛИКА ПАССАЖИРСКОГО САМОЛЕТА В САПР ЛЕКЦИЯ №11**

**Тема: ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ. ОПИСАНИЕ  
АЛГОРИТМА ФОРМИРОВАНИЯ ОБЛИКА САМОЛЕТА.**

### **План лекции:**

- 13. Применение математического моделирования в рамках САПР.**
- 14. Постановка задачи проектирования.**
- 15. Описание алгоритма формирования облика самолета.**

В качестве иллюстрации применения методов математического программирования в проектировании рассмотрим задачу автоматизированного формирования облика пассажирского самолета на этапе разработки технических предложений. Этот этап играет особую роль в общем процессе проектирования самолета. Занимая промежуточное положение между этапами разработки ТЗ и эскизного проектирования, он в значительной мере определяет правильность выбора как целей проектирования, так и путей их достижения. Известно, что на этом этапе принимается более 70 % решений по проекту и от качества этих решений в огромной мере зависит возможность последующей реализации проекта самолета с желаемыми характеристиками в заданные сроки при ограничениях на финансирование программы создания нового самолета.

Применение математического моделирования в рамках САПР позволяет существенно поднять уровень проектных исследований на этом этапе и повысить тем самым качество принимаемых решений. Проектировщик получает возможность оценивать перспективность тех или иных проектных концепций. Особо важное значение при этом имеет возможность осуществления многопараметрической оптимизации, позволяющей отыскивать наилучшее сочетание проектных параметров. При этом задачу оптимизации проектных параметров самолета, как правило, удается свести к однокритериальной, что существенно упрощает ее решение. В качестве критериев обычно используются обобщенные показатели, характеризующие технико-экономическое совершенство самолета. К числу таких показателей относятся: взлетная масса самолета  $m_0$ , прямые эксплуатационные расходы (ПЭР), себестоимость тонно-километра, приведенная себестоимость, топливная эффективность и некоторые другие. Критерий "топливная эффективность" в настоящее время является одним из важнейших. Выбор того или иного показателя в качестве единственного критерия определяется конкретной постановкой задачи.

В настоящее время достигнуты определенные успехи в автоматизации проектирования на этапе разработки технических предложений. Созданы и функционируют ряд подсистем САПР, реализующих процесс разработки

аванпроекта. Основные черты и особенности автоматизированного формирования облика самолета рассмотрим на примере учебно-исследовательской САПР МАИ.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Состав и структура технического предложения определяют перечень задач, которые необходимо решать на этом этапе проектирования от ТЗ. Назовем важнейшие из них:

1. Предварительное формирование облика самолета, удовлетворяющего ТЗ на проект, включающее в себя:

определение основных проектных параметров;  
компоновку и центровку в рамках выбранной схемы.

2. Оптимизация проектных параметров самолета по выбранному критерию с учетом ограничений, налагаемых на проект уровнем требуемых ТЗ летно-технических характеристик, Нормами летной годности самолетов и другими директивными документами. Исследование окрестностей оптимума (квазиоптимальных решений).

3. Исследование изменения технико-экономических характеристик проектируемого самолета при применении технических решений на основе современных достижений авиационной науки, в частности:

усовершенствований в области аэродинамики и двигателей самолетов;  
прогресса в области авиационных материалов;  
использования новых концепций схемного проектирования и т.д.

4. Проведение расчетов летно-технических и технико-экономических характеристик самолета с выбранными параметрами.

Отметим, что в терминах методологии оптимального проектирования первая задача представляет собой задачу формирования допустимой области существования проекта и нахождения в ней допустимого проекта, описываемого параметрами начального приближения. Вторая задача — собственно задача оптимального проектирования. Третья задача — это задача параметрического анализа, направленная на исследование чувствительности проекта к изменению проектных альтернатив (вариантов схемных решений), проектных параметров и проектных ограничений.

Уточненные расчеты характеристик самолета с выбранными параметрами содержание четвертой задачи, целью которой является документирование результатов проектирования.

Ясно, что для того чтобы проводить анализ, необходимо сформулировать проектную альтернативу (синтезировать гипотезу). Отбор (селекция) плодотворных гипотез осуществляется на основе многократного повторения анализа для различных вариантов проектных альтернатив. Упорядоченный процесс поиска наилучшей в определенном смысле проектной альтернативы осуществляется методами оптимизации.

Помимо перечисленных выше задач, которые можно отнести к классу задач "проектирования от ТЗ", в практике ОКБ весьма часто встречаются

задачи "проектирования от прототипа". Эти задачи связаны с проектированием различных вариантов модификаций самолета на базе имеющегося прототипа (базового самолета). В таких задачах в отличие от предыдущих значительная часть схемных решений и параметров в процессе проектирования остается неизменной (фиксированной).

Так, например, может возникнуть задача разработки модификации самолета с новыми, более совершенными двигателями (меньший удельный расход, большая статическая тяга, меньшие размеры и т.д.). При этом требуется определить минимально необходимую доработку прототипа, связанную с изменением массы составляющих, его перекомпоновкой, а также определить технико-экономические характеристики самолета.

Могут также возникнуть задачи доработки проекта, связанные с заменой материалов (например на композиционные) в некоторых агрегатах самолета; применением нового профиля и конфигурации крыла или нового типа механизации на нем; применением системы активного управления аэродинамическими силами для снижения ветровых и маневренных нагрузок, снижения запасов устойчивости благодаря использованию автоматических систем управления; заменой оборудования и т.д.

Отдельную группу задач составляют задачи разработки различных модификаций самолета (семейства) для различных вариантов его применения (различные варианты загрузки, различные дальности полета, различные условия базирования) с максимальным использованием агрегатов, систем, отсеков прототипа (принцип модульности в проектировании).

Совершенно очевидно, что конкретные алгоритмы решения перечисленных задач, даже в рамках одного класса, а тем более задач разных классов, могут иметь существенное различие. Это различие объясняется тем, что в каждой задаче существуют свои исходные данные, искомые параметры, ограничения и критерии. Различны степень и источники информационной обеспеченности задач. Однако, несмотря на разнообразие алгоритмов, в них можно выделить систему инвариантов (модулей), которые будут использоваться для решения различных задач. Эти модули должны составлять основу обобщенной модели самолета, обеспечивающей под управлением мониторинг системы реализацию произвольных стратегий проектирования. Структурная схема модели представлена на рис. 11.1. В основе модели лежат различные методы весового, аэродинамического, прочностного расчетов и расчетов устойчивости и управляемости, силовой установки и эффективности самолета. На рассматриваемом этапе проектирования информация о создаваемом самолете в основном ограничена знаниями его потребных характеристик, сведениями, почерпнутыми из прошлого опыта проектирования самолетов аналогичного назначения, и некоторыми данными научных исследований по новым техническим решениям. Это предопределяет применение в модели полу эмпирических методов расчета самолета, базирующихся на упрощенных теоретических формулах и аппроксимациях, отражающих важнейшие параметрические связи. В ряде случаев в эти формулы

вводятся поправочные коэффициенты, получаемые на основе обработки статистического и экспериментального материала.

Схема потоков информации при формировании облика самолета представлена на рис. 11.2.

Дадим обобщенную постановку задачи формирования облика самолета, включающую первые три задачи из класса задач "проектирования от ТЗ". Она формулируется следующим образом. *Найти вектор параметров, характеризующих форму, структуру и размеры самолета, который бы удовлетворял требованиям, предъявляемым к проектируемому самолету, и обеспечивал достижение минимума (максимума) целевой функции.*

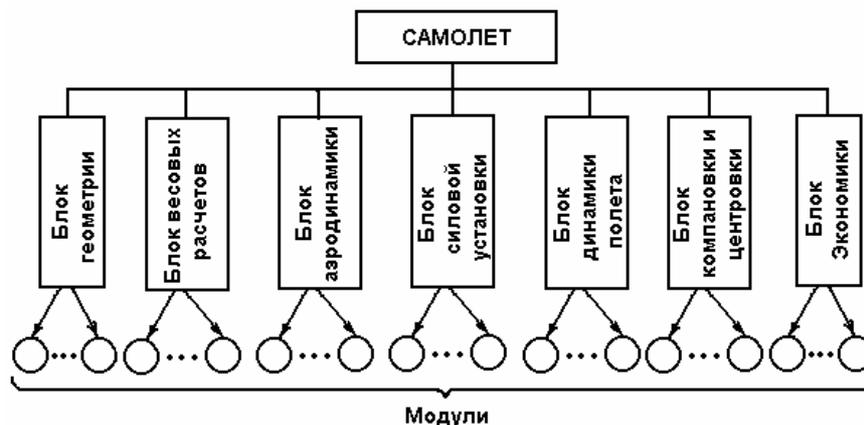


Рис. 11.1. Структурная схема модели «самолет»

В такой постановке она представляет собой задачу нелинейного математического программирования, т.е. задачу (11.9).

Раскроем содержание понятий "параметры" и "ограничения" применительно к пассажирскому самолету.

Вектор искомых параметров  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  представляет собой набор независимых переменных, которые однозначно определяют все остальные параметры и характеристики самолета, а также значение целевой функции. Число параметров, с достаточной степенью подробности характеризующих структуру, архитектуру и размеры самолета (его облик). Даже на этапе разработки технических предложений достаточно велико. Облик прежде всего характеризуется *схемными признаками*. Эти признаки определяют способ балансировки самолета (нормальная схема, "утка", "бесхвостка" или их комбинации), схему крыла (моноплан, низкоплан ...), схему силовой установки (тип двигателей, воздухозаборников и их размещение на самолете) и т.д. Схемные признаки дискретны. При автоматизированном проектировании их можно закодировать определенными числами, выступающими в роли констант для одного варианта расчета. Основными схемными признаками являются:

- схема расположения крыла (низкоплан, высокоплан, среднеплан);
- схема механизации крыла (тип механизации по передней и задней кромкам, наличие интерцепторов);
- схема оперения (нормальное, Т-образное, крестообразное);
- схема силовой установки (тип и расположение двигателей на самолете, тип воздухозаборников);

схема шасси (схема уборки, число основных стоек, число колес на передней и основной стойках, число тормозных колес);

тип управления самолетом (ручное, бустерное, электродистанционное);

особенности конструкции (тип панелей, способ герметизации топливных баков, степень использования композиционных материалов в конструкции самолета);

схема фюзеляжа (узко-, широкофюзеляжный, число палуб).

В рамках заданной схемы форма и размеры самолета и его частей характеризуются следующими параметрами. Это прежде всего размерные параметры: площадь крыла  $S$  и стартовая тяга двигателей  $P_0$ . В практике проектирования иногда удобно пользоваться производными этих параметров: удельной нагрузкой на крыло  $p_0 = m_0 g/S$  и стартовой тяговооруженностью  $P_0 = P_0/m_0 g$ . Здесь  $m_0$  — проектное значение взлетной массы самолета. Эти и обобщенные параметры, характеризующие аэродинамическое совершенство схемы самолета ( $c_{ya}$ ,  $c_{xa}$ ,  $K$ ) и эффективность его силовой установки ( $c_p$ ,  $m_T$ ), однозначно определяют летные характеристики самолета. Названные аэродинамические и энергетические параметры являются функциями геометрических параметров планера и газодинамических параметров двигателя, а также параметров, характеризующих взаимное расположение агрегатов самолета. Основные из них приведены ниже.

Параметр	Обозначение
Площадь крыла, м <sup>2</sup>	$S_{\text{КР}}$
Удлинение крыла	$\lambda_{\text{КР}}$
Стреловидность крыла, градус	$\chi_{\text{КР}}$
Сужение крыла	$c_{\text{КР}}$
Площадь горизонтального оперения (ГО), м <sup>2</sup>	$\eta_{\text{КР}}$
Удлинение ГО	$\lambda_{\text{КР}}$
Площадь вертикального оперения (ВО), м <sup>2</sup>	$S_{\text{ВО}}$
Удлинение ВО	$\lambda_{\text{ВО}}$
Удлинение фюзеляжа	$\lambda_{\text{Ф}}$
Диаметр фюзеляжа, м	$D_{\text{Ф}}$
Плечо горизонтального и вертикального оперения, м	$L_{\text{ГО}}, L_{\text{ВО}}$
Статическая тяга двигателей, даН	$P_0$
Степень двухконтурности двигателей	$m^*$
Степень сжатия компрессора	$\pi_{\text{К}}$
Степень сжатия вентилятора	$\pi_{\text{В}}$
Температура газов перед турбиной, К	$T_3,$

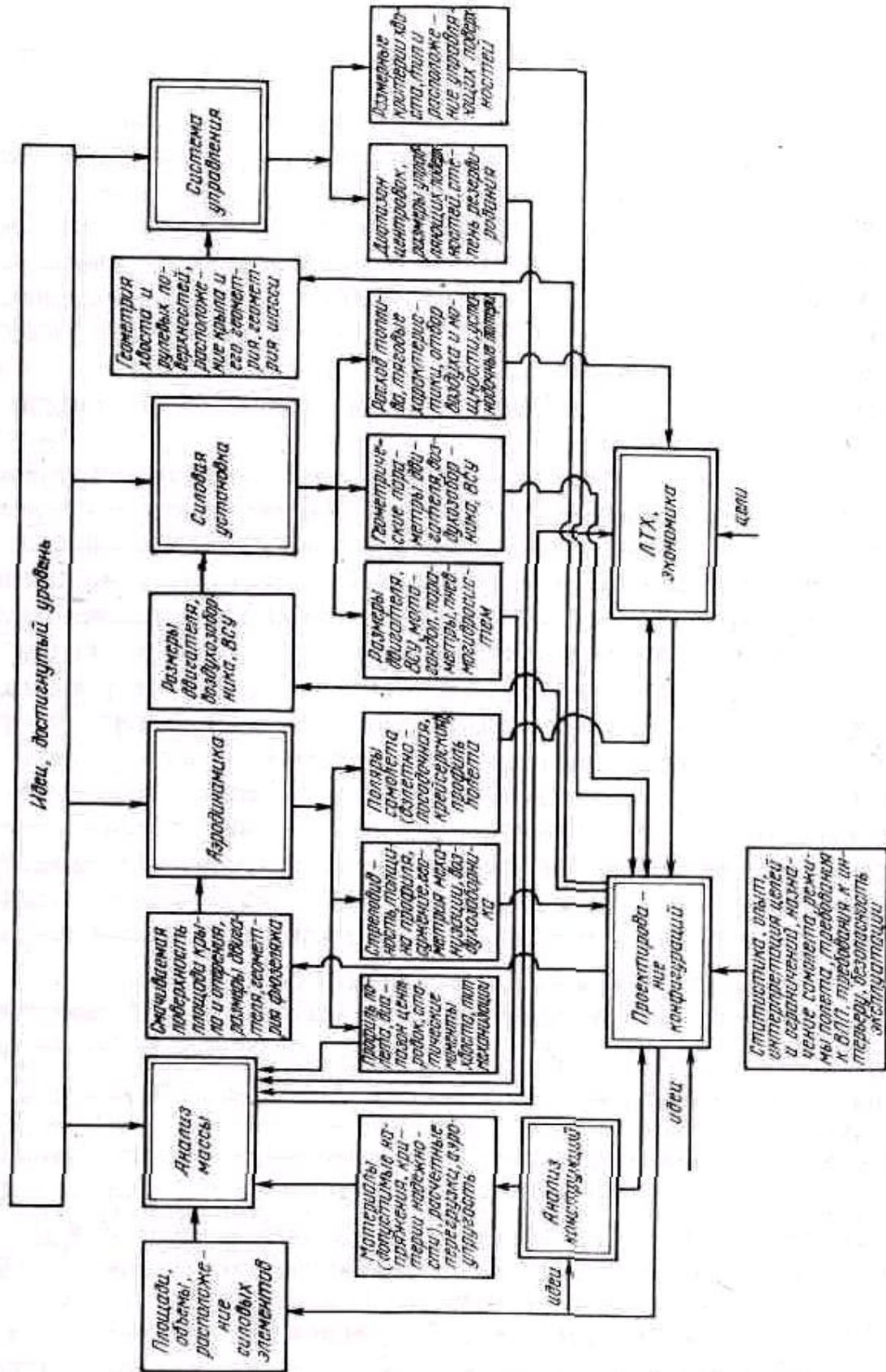
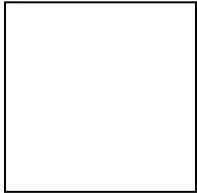
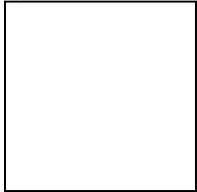
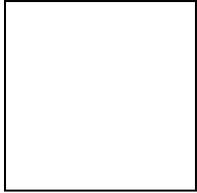
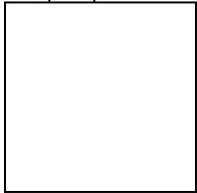


Рис.9.2. Схема потоков информации в процессе формирования облика самолета.



Угол установки крыла, градус	$\psi$
Геометрическая крутка крыла, градус	$\Phi_{кр}$
	
Относительная толщина ГО	$\eta_{ГО}$
Сужение ГО	$\chi_{ВО}$
Стреловидность ВО, градус	
	
Относительная площадь вертикального оперения	
	
Относительная площадь горизонтального оперения	
Относительный размах закрылков	$l_{закр}/l_{кр}$
	
Относительные координаты двигателей по размаху крыла	

Варьируя эти параметры, а также схемные решения, проектировщик достигает целей проектирования. Разумеется, указанные параметры и схемные признаки не позволяют получить полное представление о проекте. Можно назвать целый ряд дополнительных параметров, от выбора которых зависит совершенство самолета. Например, для крыла такими параметрами являются параметры, характеризующие форму и размеры наплывов и законцовок крыла, законы деформации его срединной поверхности, крутку и т.д.

Увеличение числа искомых параметров в процессе поиска оптимального облика самолета вследствие учета их взаимовлияния может привести к улучшению характеристик проекта. Однако это связано с усложнением вычислительного алгоритма и трудностями его реализации на ЭВМ. К тому же в настоящее время мы не располагаем достаточно точными и надежными алгоритмами, описывающими все многообразие связей между параметрами и характеристиками самолета, особенно на ранних этапах его разработки. В этих условиях задачу приходится решать поэтапно, оставляя принятие решения по целому ряду параметров на более поздние этапы разработки либо принимая их априори на основании прошлого опыта. По мере развития представлений о таких связях, а также совершенствования ЭВМ и вычислительных методов анализа и оптимизации многопараметрических моделей число искомых параметров постоянно увеличивается.

Рассмотрим теперь основные факторы, которые формируют область существования проекта, т.е. выступают в качестве *ограничений* при выборе

проектных параметров, либо однозначно их определяют. Прежде всего это ограничения, диктуемые условиями физической реализуемости самолета. Эти условия являются обязательными для любого самолета, независимо от его назначения. Связи между параметрами и характеристиками самолета, определяемые условиями физической реализации, называют *уравнениями существования* [27].

Следующая группа ограничений вытекает из необходимости выполнять при проектировании самолета ряд требований директивного характера, диктуемых, например, Нормами летной годности. Нормами прочности и т.д. Они одинаковы для всех самолетов определенного назначения.

И, наконец, заключительную группу ограничений, определяющих выбор проектных параметров, формируют требования ТЗ к характеристикам проектируемого самолета, специфичные для каждого самолета. ТЗ регламентирует, например, массу коммерческой нагрузки для расчетных дальностей полета, диапазоны скоростей и высот полета, требования к аэродромам базирования и т.д. Эти ограничения целесообразно задавать в виде неравенств. Ниже представлены важнейшие характеристики самолета, задаваемые ТЗ.

<b>Характеристика</b>	<b>Обозначение</b>
Число пассажиров, чел.	$N_{ПАС}$
Шаг кресел, мм	$t_{КР}$
Максимальная коммерческая нагрузка, кг	$m_{К.Н}$
Расчетная дальность полета, км	$L_P$
Максимальная дальность полета, мм	$L_{max}$
Потребная посадочная дистанция при максимальной посадочной массе, м	$L_{ПОС}$
Потребная длина ВПП при максимальной взлетной массе в расчетных условиях ( $T=30^{\circ}C$ , $p=730$ мм рт.ст.), м	$L_{ВПП}$
Крейсерская скорость полета или $M^*_{КР}$ , км/ч	$V_{КР}$
Скорость захода на посадку с максимальной посадочной массой, км/ч	$V_{З.П}$
Число членов экипажа и бортпроводников, чел.	$N_{ЭК}$
Ресурс до списания планера самолета, основных самолетных агрегатов, элементов несъемного оборудования, ч (число посадок)	$T_P(N)$
Срок службы, лет	$T_C$

Числовые значения, характеризующие схему самолета, а также величины его потребных характеристик являются исходными данными для проектирования. Однако перечисленных данных обычно недостаточно, чтобы однозначно определить параметры самолета и рассчитать его технико-экономические характеристики. Некоторые дополнительные исходные данные представлены ниже.

<b>Дополнительные исходные данные</b>	<b>Обозначение</b>
Эксплуатационно-экономические данные	
Цена топлива, руб./л	$c_T$

Коэффициент загрузки	$\varphi$
Годовое время использования ч/год	$T_{\Gamma}$
Срок амортизации, лет	$T_a$
Остаточная стоимость, %	$T_{\text{ОСТ}}$
Число самолетов в серии, шт.	$N_C$
Отношение числа пассажиров в салонах 1-го класса к общему числу пассажиров	$N_{\text{пас}}^1/N_{\text{пас}}$
Прочие данные	
Максимальный скоростной напор, даПа	$q_{\text{max}}$
Масса постоянного бортового оборудования, кг:	
радиотехнического	$m_{\text{Р.О}}$
пилотажно-навигационного	$m_{\text{П.Н}}$
контрольно-испытательного	$m_{\text{К.И}}$
Относительная мощность ВСУ	$N_{\text{ВСУ}}/N_{\text{ДВ}}$

Решения о численных значениях приведенных данных должны быть приняты к моменту начала проектирования.

К числу дополнительных исходных данных можно также отнести характеристики двигателя (если самолет проектируется под готовый двигатель) и некоторые другие.

## ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА ФОРМИРОВАНИЯ ОБЛИКА САМОЛЕТА

В САПР описанную выше задачу можно реализовать на основе алгоритма, схема которого представлена на рис. 11.3. Операции, выполняемые проектировщиком, на схеме обозначены окружностью, а машинные операции - прямоугольником.

Входными данными алгоритма являются прежде всего числовые величины, определяющие значения летно-технических характеристик самолета, диктуемые ТЗ на проект. Вторая группа входных данных формируется из назначаемых проектировщиком схемных решений. На основе анализа требований к самолету, опыта разработки самолетов аналогичного назначения, изучения результатов научных исследований по перспективным направлениям авиастроения, личных творческих способностей проектировщик намечает ряд признаков, характеризующих схему самолета.

Каждому признаку в алгоритме соответствует определенное число — "ключ". Числовые значения входных данных выступают в качестве констант модели для одного варианта расчета. Их ввод осуществляется пользователем с пульта алфавитно-цифрового дисплея.

На основе входных данных, а также информации, хранящейся в банке данных, вычисляют или задают:

    параметры стандартной атмосферы на расчетных высотах полета и расчетное число  $M$  полета;

    параметры аэродромов взлета и посадки ( $L_{\text{ВПП}}$ ,  $V_{\text{ВПП}}$ ,  $P_{\text{ЭКВ}}$ ,  $\sigma_{\text{ГР}}$ , ...);

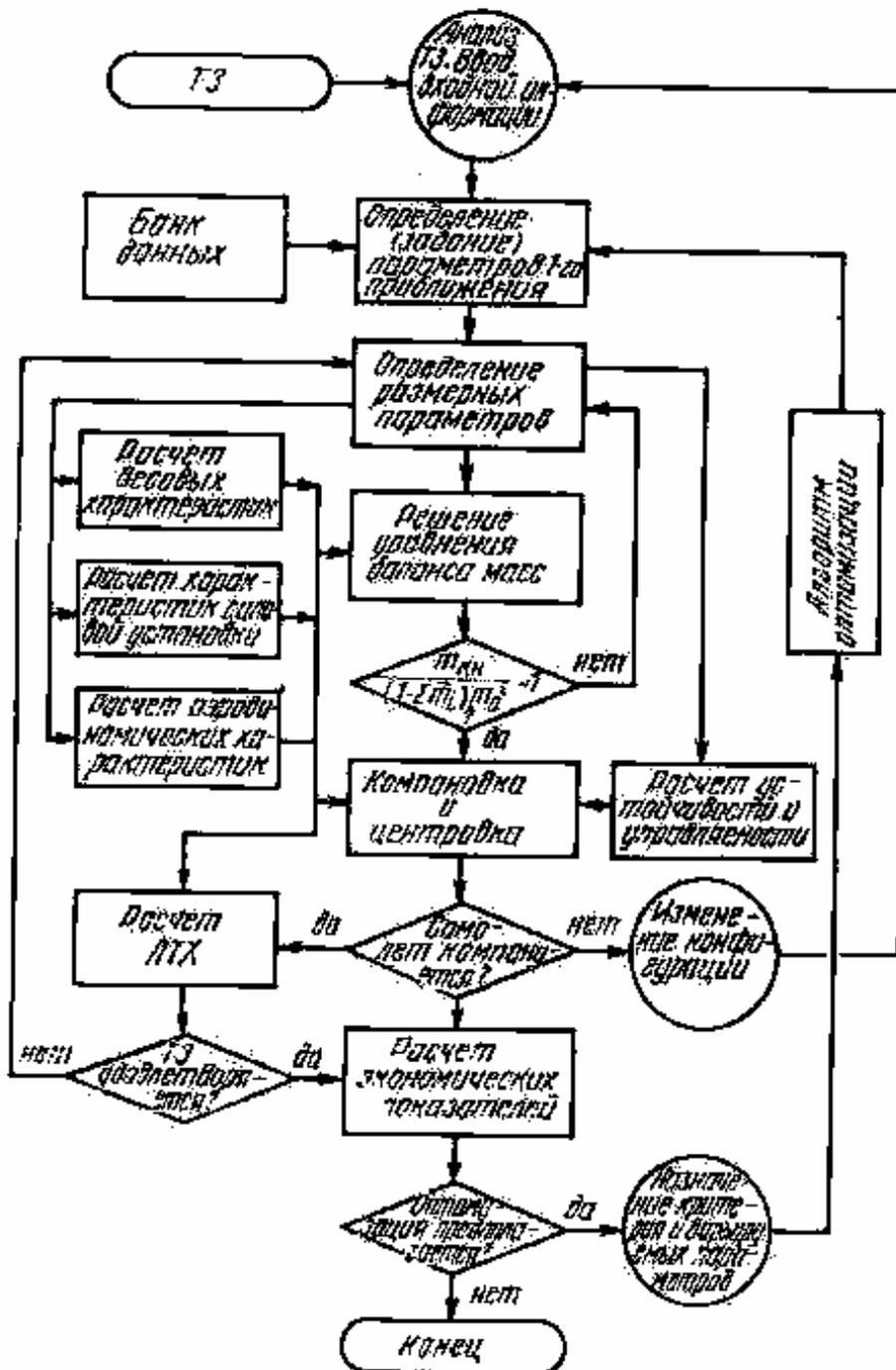
    избыточное давление в пассажирском салоне;

прогнозируемые значения аэродинамических характеристик самолета ( $c_{y_{отр}}$ ,  $c_{y_{з.п.}}$ ,  $K_{кр}$ ,  $K_{взл}$ ,  $c_{x_0}$ , ...);

коэффициенты, характеризующие изменение тяги двигателя по скорости и высоте, а также некоторые другие статистические коэффициенты, необходимые для определения проектных параметров начального приближения;

начальные значения искомых параметров ( $S$ ,  $P_0$ ,  $\lambda$ ,  $\chi$ ,  $c$ ,  $\eta$ ,  $m^*$ ,  $T_3$ , ...).

Определение основных параметров начинают с нахождения параметров "завязки" проекта — удельной нагрузки на крыло  $p_0$  и стартовой тяговооруженности самолета  $P_0$ . Предусмотрена также возможность задания  $p_0$  проектировщиком.



### Рис. 11.3. Схема алгоритма формирования облика самолета

Далее определяют составляющие уравнения баланса масс. Для этого вначале проводят расчеты, связанные с определением массы, геометрических параметров и рабочих характеристик силовой установки. Если самолет проектируют под заданный двигатель, его характеристики могут быть непосредственно введены пользователем. Затем последовательно определяют массу топлива, массу крыла, оперения, фюзеляжа, шасси, оборудования, снаряжения и управления. В алгоритме предусмотрена возможность задания пользователем массы готовых изделий, входящих в комплектацию проектируемого самолета. Уравнение баланса масс записывают в следующем виде:

$$A = \frac{m_{к.н}}{(1 - \bar{m}_{\Sigma})m_0},$$

где  $m_{к.н}$  — масса коммерческой нагрузки;  $\bar{m}_{\Sigma}$  — сумма относительных масс конструкции, топлива, силовой установки, оборудования, снаряжения, управления;  $m_0$  — взлетная масса самолета;  $A$  — результат решения.

Уравнение (11.1) считается решенным, если  $A = 1 \pm 0,001$ . Решение его осуществляется итерационным способом.

Полученное значение взлетной массы позволяет определить размеры самолета и перейти к реализации итерационных циклов, связанных с соблюдением условия равенства потребной и располагаемой тяги. Для этого уточняют геометрические параметры самолета, соответствующие определенному значению взлетной массы, расчетным значениям нагрузки на крыло и стартовой тяговооруженности. Затем рассчитывают аэродинамические характеристики самолета. Эти расчеты позволяют при замене статистических данных по аэродинамике на расчетные повторить циклы расчетов по определению основных параметров самолета, начиная с определения удельной нагрузки на крыло. Число итераций зависит от того, насколько правильно были выбраны аэродинамические характеристики самолета на этапе формирования начальной информации. В рассматриваемом алгоритме условием выхода из итерации является удовлетворение неравенству

$$\frac{m_{0(i-1)} - m_{0i}}{m_{0i}} \leq 0,001,$$

где  $m_{0i}$  — значение взлетной массы самолета, определенное на  $i$ -ом шаге итерации.

Следующий цикл расчетов связан с коррекцией параметров самолета исходя из основных требований компоновки и центровки. Здесь решается задача определения рационального взаимного расположения крыла, фюзеляжа, оперения и шасси, а также размещения грузов в самолете. С целью упрощения формализации процесса компоновки самолет расчленен на три компоновочные группы: группу крыла, группу шасси и группу фюзеляжа. Последняя принята в качестве базовой. Задача компоновки сводится к определению местоположения начала координат компоновочных групп, предварительно сформированных в

соответствии с директивами по схеме самолета, относительно начала координат базовой группы. Цель достигается путем решения системы уравнений компоновки, отражающих следующие условия и ограничения:

условие продольной статической устойчивости на крейсерском режиме;

условие балансировки самолета на взлетно-посадочных режимах;

условие подъема переднего колеса шасси на скорости  $0,95 V_{\text{отр}}$  при взлете;

условие несваливания на хвост пустого снаряженного самолета при стоянке на земле;

условие незадевания ВПП хвостовой частью фюзеляжа при отрыве или посадке;

условие незадевания ВПП концом крыла при посадке с максимально допустимым креном;

условие неопрокидывания на крыло при рулежке по земле с заданным радиусом разворота;

условие незадевания ВПП носом фюзеляжа при резком торможении;

условие незадевания ВПП гондолами двигателей (при их размещении под крылом);

условие минимального разбега центровок в летном диапазоне;

конструктивные ограничения на базу и колею шасси.

Расчеты, связанные с определением характеристик устойчивости и управляемости самолета, дают возможность осуществить коррекцию таких конструктивных параметров самолета, как угол поперечного  $V$  крыла, угол установки двигателей, угол установки стабилизатора, балансировочные углы отклонения поверхностей управления и т.д. В случае необходимости после этого уточняют аэродинамические и весовые характеристики самолета и затем согласовывают его параметры.

Для того чтобы убедиться, что фактические (расчетные) летно-технические характеристики самолета полностью удовлетворяют ТЗ на проект, а его экономические показатели являются приемлемыми, необходимо провести поверочные расчеты по определению летно-технических характеристик самолета и его экономических данных по общепринятым методикам. Оценивая результаты этих расчетов, проектант в случае необходимости изменяет "входы", прежде всего связанные с задаваемыми проектными альтернативами, добиваясь соответствия расчетных характеристик требуемым либо их корректировки по согласованию с заказчиком.

Смысл описанного выше алгоритма формирования облика самолета сводится к определению допустимого варианта проекта самолета, удовлетворяющего заданным требованиям и ограничениям при выбранной схеме самолета и заданном наборе независимых параметров, характеризующих его планер и силовую установку. Конечная же цель проектирования — нахождение оптимального по выбранному критерию проекта самолета. Эта цель достигается подключением алгоритма оптимизации, реализующего специальную процедуру управления, которая позволяет на основе оценки

результатов расчетов итеративно изменять независимые переменные, добиваясь достижения экстремума целевой функции.

Комбинация имеющихся в библиотеке численных методов оптимизации позволяет достаточно надежно отыскать глобальный экстремум целевой функции, для принятой номенклатуры варьируемых параметров.

Для реализации описанного выше алгоритма формирования облика самолета разработан программный комплекс, структурно-функциональная схема которого представлена на рис. 11.4. Помимо общесистемных средств комплекс включает в себя управляющие программы режимов работы и пакеты прикладных программ.

В соответствии с блочным принципом моделирования пакеты объединены в функциональные блоки, соответствующие структуре модели самолета (см. рис. 11.1). Комплекс состоит из семи функциональных блоков, представляющих собой набор модулей простой и сложной структуры, решающих отдельные задачи проектирования. Модульный принцип программирования делает комплекс открытым для дальнейшего развития, позволяет производить замену отдельных модулей, либо расширение их состава в зависимости от типа решаемой задачи и используемых методов расчета. Описание алгоритмов функциональных блоков учебно-исследовательской (УИ) САПР МАИ приведено в приложении.

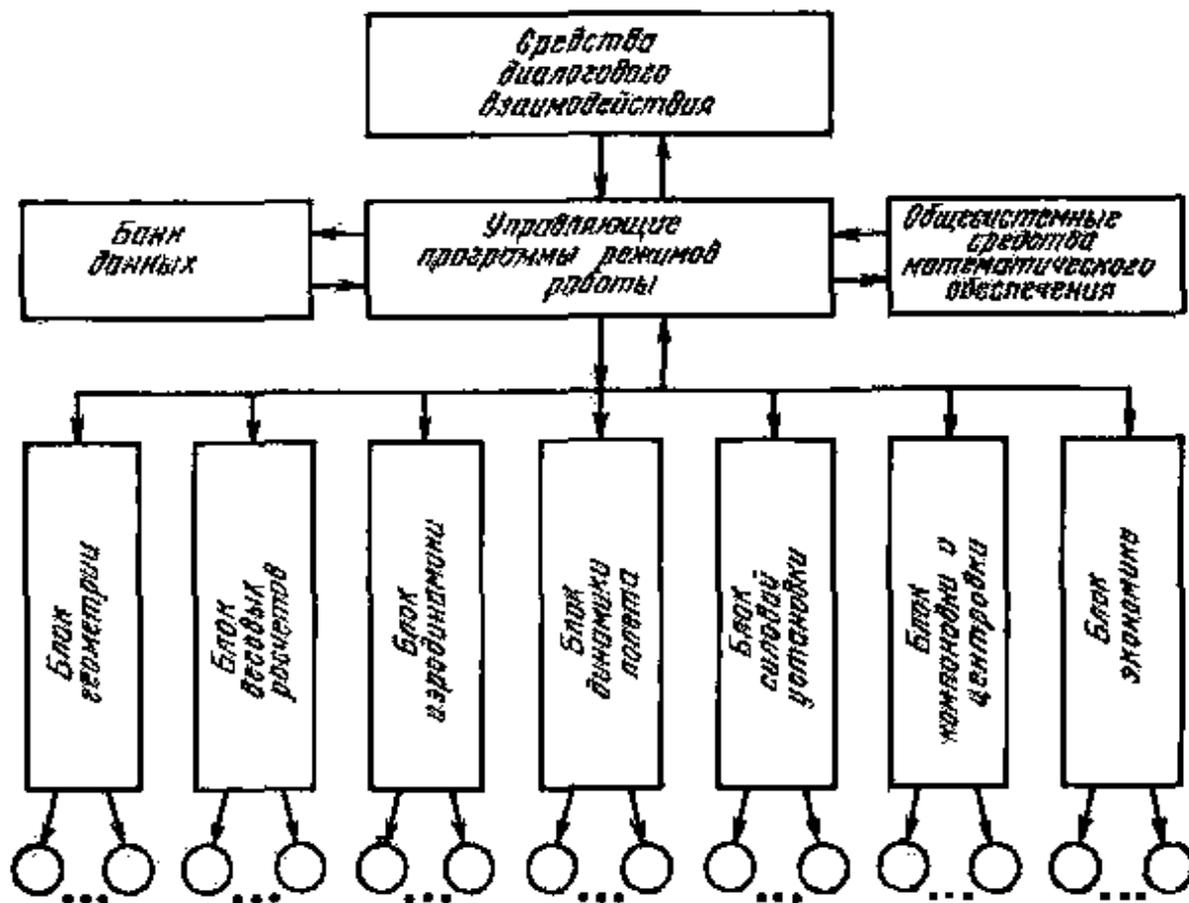


Рис. 11.4. Структурно-функциональная схема программного комплекса формирования облика самолета

Комплекс функционирует с помощью управляющих программ режимов расчета. В соответствии с перечнем задач рассматриваемого этапа предусмотрено три режима работы комплекса: собственно режим формирования облика, режим параметрического анализа и режим оптимизации.

Управляющие программы определяют последовательность обращений к блокам или их модулям, обмен данными между ними, организуют необходимые итерационные циклы в зависимости от режима работы комплекса. Управляющая программа состоит из обращений к модулям, а также логических операторов. Обмен информацией между управляющей программой и модулями осуществляется через формальные параметры.

Программы написаны на алгоритмическом языке ФОРТРАН-IV для операционной системы ОС ЕС.

Пакеты прикладных программ и управляющие программы записаны на магнитных дисках в библиотечный набор данных и вызываются оттуда стандартными средствами языка управления заданиями ЕС ЭВМ.

Для работы программного комплекса рассмотренной конфигурации требуется около 150 К оперативной памяти. Время счета одного варианта в режиме формирования облика не превышает 1 мин.

### **Контрольные вопросы**

1. Применение математического моделирования
2. Перечень задач на этапе проектирования от ТЗ
3. Схема потоков информации при формировании облика самолета
4. Основные схемные признаки
5. Параметры, характеризующие взаимное расположение агрегатов самолета.
6. Важнейшие характеристики самолета, задаваемые ТЗ
7. Схема алгоритма формирования облика самолета
8. Структурно-функциональная схема программного комплекса формирования облика самолета

ЛИТЕРАТУРА: [1, 2].

## ЛЕКЦИЯ №12

### Тема: ОПИСАНИЕ СТРУКТУРЫ ПРОГРАММ ФОРМИРОВАНИЯ ОБЛИКА САМОЛЁТА В САПР.

#### План лекции:

**16. Структура формирования облика самолета.**

**17. Описание блоков, специфических для самолётов заданного типа.**

#### **1. Структура формирования облика самолета.**

Использование ЭВМ в процессе проектирования возможно в следующих направлениях:

- разработка программ формирования облика перспективных самолетов (первый уровень);
- разработка программ оптимизации параметров и форм отдельных частей самолета (второй уровень);
- оптимизация конструктивно-силовых схем самолета (третий уровень);
- разработка автоматизированного каталога авиационной техники;
- автоматизированная система изготовления аэродинамических моделей на станках с числовым программным управлением;
- конструирование и изготовление отдельных деталей на станках с программным управлением;
- автоматизация чертежных работ.

Вопросам разработки программ формирования облика самолета, с помощью которых могут решаться следующие задачи:

- определение предварительного облика самолета, удовлетворяющего заданным ТТТ, с одновременной оптимизацией основных параметров по заданному критерию;
- сравнение различных компоновочных решения самолетов данного класса;
- формирование рациональных ТТТ к самолету (например, определение рациональной пассажироместимости и расчетной дальности пассажирских самолетов).

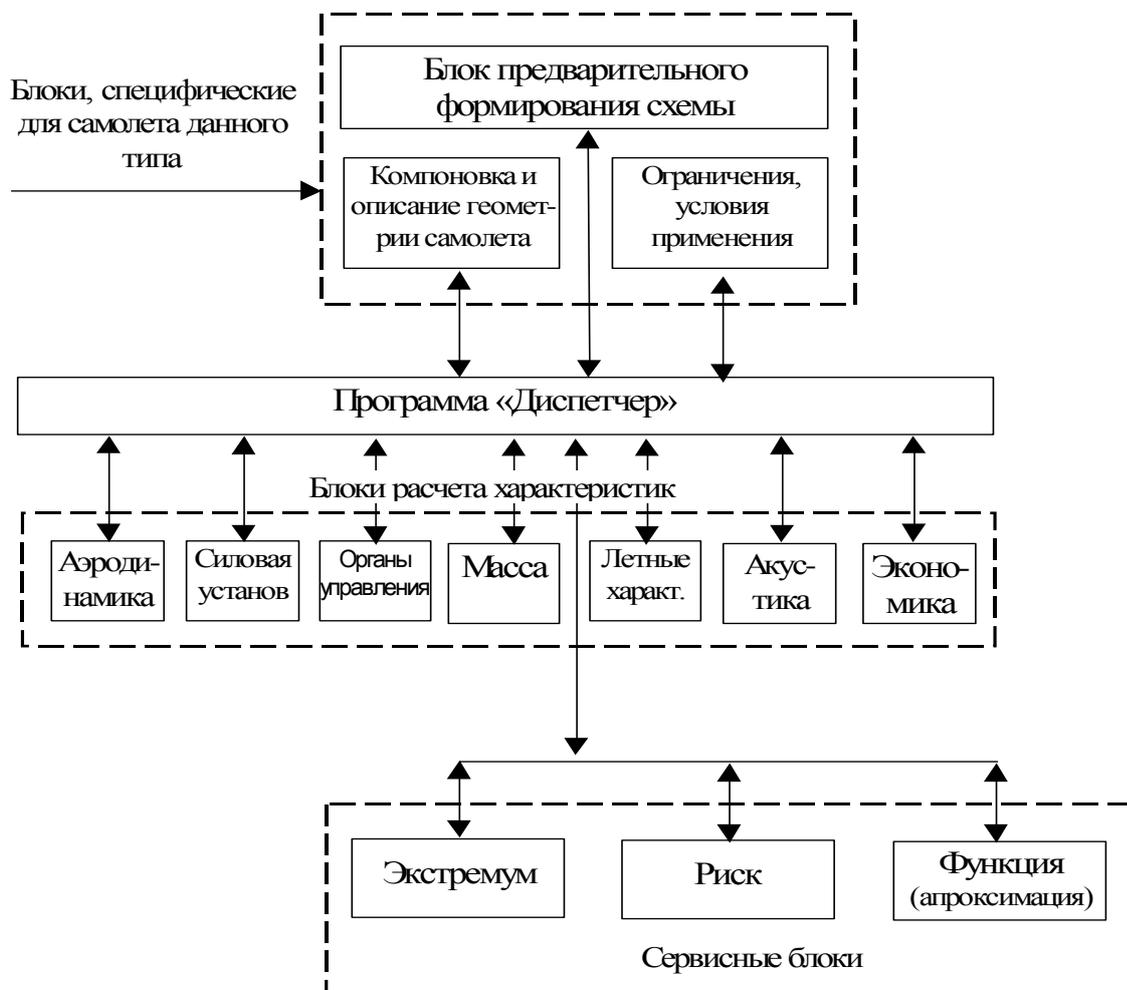
Рекомендации о рациональном облике самолета могут быть сделаны только на основе комплексных проработок с участием проектировщиков различных специальностей.

Поскольку комплексная программа должна включать значительное число блоков («Аэродинамика», «Прочность», «Аэроупругость», «Устойчивость и управляемость», «Силовая установка», «Акустика» и т.д.), то целесообразна модульная структура программы, при которой отдельные блоки (модули) разрабатываются специалистами в данной области. Однако ряд вопросов, рассматриваемых при проектировании (компоновка, ограничения эксплуатационного характера, прочность, типовая операция применения и т.д.), специфичен для каждого типа самолетов, что требует создания специализированных блоков, применимых только к данному типу самолетов.

Кроме того, обеспечение возможности расчета характеристик самолетов различных типов и схем вызывает увеличение объема программ универсальных блоков («Аэродинамика», «Масса», «Силовая установка» и т.д.) и усложнение их структуры.

Таким образом, при создании блоков расчета характеристик необходимо установить в первую очередь разумную степень универсализации этих блоков.

Рассмотрим следующую структуру программы формирования (Рис. 12.1). Блоки задания исходной схемы, компоновки, ограничений являются специфическими для каждого типа самолетов, т. е. они могут иметь различную структуру в зависимости от типа проектируемого самолета. Блоки «Аэродинамика», «Масса», «Силовая установка», «Механика», «Акустика», «Экономика» и т. д. предназначены для расчета различных характеристик скомпонованного варианта самолета могут обладать различной степенью универсальности. Блоки «Экстремум», «Риск», «Функция (аппроксимация)» являются универсальными. Взаимодействие блоков осуществляется с помощью программы «Диспетчер», структура которой должна быть специфична для каждого типа рассматриваемых летательных аппаратов.



**Рис. 12.1 Структура блоков формирования облика самолета.**

Работа программы начинается с формирования принципиальных схем самолета из отдельных элементов в блоке формирования исходной схемы. Этот этап осуществляется человеком (конструктором) в режиме диалога человек-

машина. На этом же этапе задается набор параметров ( $p$ ,  $S$ ,  $\lambda$ ,  $\chi$ ,  $c$  и т. д.), позволяющий получить размерную схему. Сформированные принципиальные схемы рассчитываются в блоке «Компоновка», в котором удовлетворяются условия размещения заданных объемов, центровки, устойчивости и управляемости, взаимного расположения агрегатов и производится математическое описание геометрии самолета.

## **2. Описание структуры блоков, специфических для самолётов заданного типа.**

### **Блок «Предварительное формирование схемы самолета»**

Задачами этого блока являются формирование предварительной схемы самолета путем набора возможных комбинаций из некоторого заранее заданного множества элементов схем в режиме диалога конструктор - ДВМ, настройка модулей в соответствии с выбранной схемой и задача изображения схемы на экране дисплея.

Блок предварительного формирования облика самолета содержит следующие основные подпрограммы (Рис. 12.2).

Подпрограмма «Архив» содержит предусмотренный конструктором набор возможных элементов, из которых может быть сформирована желаемая схема.

Подпрограмма «Схема» непосредственно формирует схему самолета и может работать в следующих режимах:

- формирование схемы из элементов, содержащихся в подпрограмме «Архив»;
- частичная замена элементов а схеме, выбранной на основе прототипа, содержащегося в информационном модуле;
- работа со схемой, соответствующей прототипу.

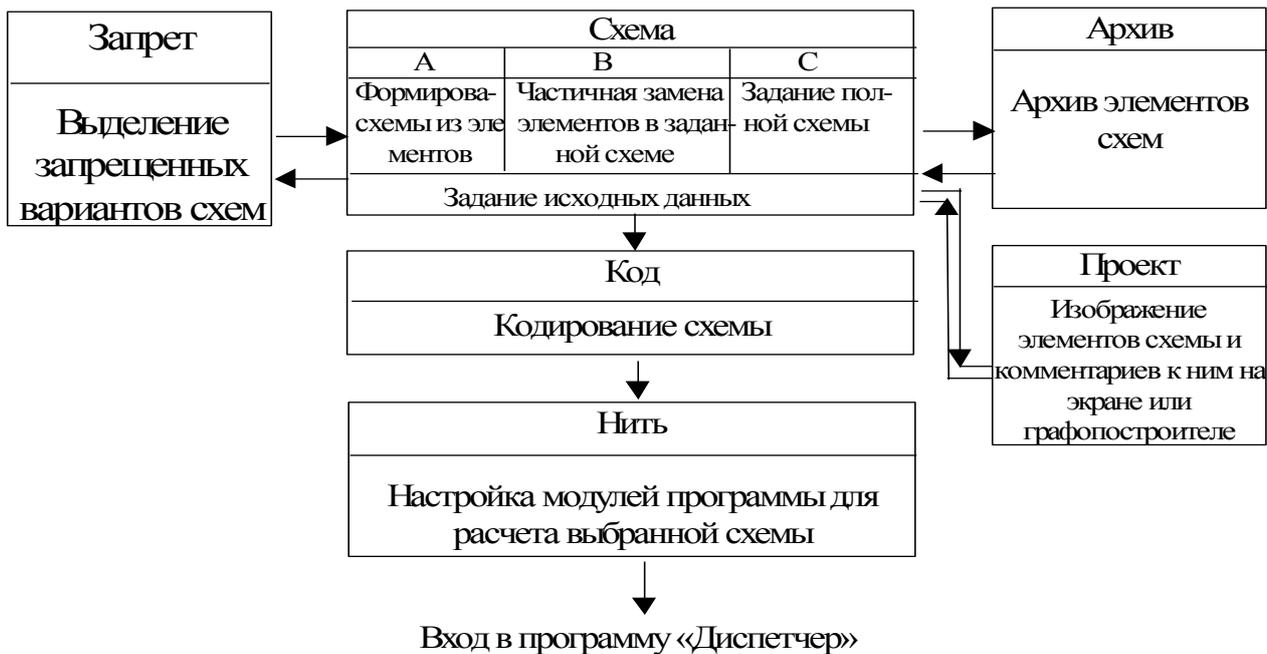
В каждом из указанных режимов работы данной подпрограммы предусматриваются операции по вводу исходных данных для выбранной схемы.

Подпрограмма «Проект» формирует по желанию конструктора изображение элементов к комментарию к ним на экране (или графопостроителе).

Подпрограмма «Запрет» определяет, не является ли выбранная конструктором схема запрещенной. Запрет может быть обусловлен либо нереализуемостью схемы, либо отсутствием алгоритма расчета каких-либо характеристик выбранной схемы.

Подпрограммы «Код» и «Пить» ставят в соответствие схеме, выбранной конструктором, определенный цифровой или буквенный код, согласно которому производится настройка модулей программы.

Блок предварительного формирования схемы должен обеспечивать возможность быстрой замены элементов схем как по отдельности, так и в определенной последовательности, задаваемой оператором.



**Рис. 12.2. Блок предварительного формирования схемы самолета**

### **Блок «Компоновка»**

При любом способе проектирования самолета, после того как выбрана схема самолета и каким-либо образом определен или задан ряд параметров, возникает задача компоновки самолета при имеющемся сочетании параметров.

Выполнить компоновку самолета — значит:

- определить внешние обводы отдельных агрегатов и самолета в целом;
- разместить агрегаты на самолете в соответствии с принятой силовой схемой;
- выполнить условия, наложенные на взаимное расположение агрегатов;
- обеспечить размещение на самолете потребного запаса топлива;
- выполнить требования устойчивости и управляемости;
- рассчитать все необходимые для работы других блоков комплексной программы геометрические параметры

В качестве исходных данных для компоновочного блока используется набор характеристик параметров, полученных на выходе из блока формирования схемы самолета или задаваемых в ТТТ:

- характеристики схемы и взаимного расположения агрегатов на самолете (двигатели под крылом, в крыле, на хвосте; шасси в крыле, фюзеляже и т. д.);
- расчетная перегрузка (для расчета масс и центровок);
- режимы полета;
- габариты двигателей и их число;
- параметры, характеризующие расход воздуха через двигатели;
- условия базирования самолета;
- габариты отсеков, кабины;
- массовые (объемные) характеристики оборудования;

- относительные параметры крыла;
  - параметр, характеризующий абсолютные размеры крыла (площадь, размах);
  - относительные параметры оперения;
  - относительные параметры носовой к хвостовой частей фюзеляжа;
- Компоновочный блок должен выполнять следующие операции:
- определение параметров шасси;
  - расчет геометрии гондол двигателей;
  - расчет геометрических параметров отсеков оборудования;
  - формирование обводов фюзеляжа;
  - расчет параметров крыла;
  - выбор размеров оперения;
  - расчет объемов отсеков и их центров тяжести;
  - взаимную увязку агрегатов;
  - определение центровки по заданному запасу статической устойчивости;
  - определение формы и площадей поперечных сечений самолета.

В процессе проведения расчетов возможно обращение к другим блокам комплексной программы, а именно к блоку «Масса» и к блоку «Аэродинамика» (расчет аэродинамического фокуса самолета).

После проведения компоновки в принципе становятся известны все размеры и геометрические параметры самолета. Для ряда целей необходимо математическое описание указанных характеристик.

### **Блок «Описание геометрии самолета»**

Этот блок предназначен для формирования цифровых моделей внешних обводов самолета, пригодных для проведения расчетов аэродинамических характеристик и визуализации форм самолета, подготовки управляющей информации для изготовления аэродинамических моделей, а также для задания части исходных данных, необходимых для автоматизации построения цифровых моделей для расчета на прочность по методу конечного элемента.

Блок состоит из двух частей: программы формирования приближенных (в частности, кусочно-плоских) моделей поверхности; программы формирования кусочно-гладкой модели поверхности.

Вся программа построена по принципу деления на агрегаты, что позволяет производить исследования, компоновку и модификацию агрегатов (крыла, фюзеляжа, оперения, гондол двигателей и их элементов) по отдельности.

Подсистемами блока служат программы, выполняющие следующие операции:

- 1) расчет геометрических параметров и дифференциальных характеристик поверхности:
  - пересечение поверхностей и кривой с поверхностью;
  - сечения, объемы и площади;
  - нормали и эквидистантные кривые;

- 2) визуализацию геометрической информации:
  - формирование центральных проекций агрегата и самолета в целом для случая произвольного положения наблюдателя;
  - формирования ортогональных проекций (вида в плане, сбоку, спереди);
  - сглаживание элементов изображения (при необходимости);
  - стирание невидимых линий (элементов) изображения;
  - формирование теневых и цветных изображений, включая стереоизображение;
  - процедуры вывода изображений на графопостроители и дисплеи;
- 3) подготовку управляющей информации для станков с ЧПУ;
- 4) подготовку геометрических исходных данных для формирования цифровой модели конструкции по методу конечного элемента.

При работе блоков предварительного формирования схемы самолета и компоновки особую роль играет возможность визуализации геометрических параметров самолета.

### **Блок «Учет ограничений и условий применения»**

В процессе формирования облика самолета необходимо учитывать совокупность ограничений, удовлетворение которым обеспечивает безопасность эксплуатации и регламентируется нормами летной годности, техническими требованиями к проектируемому самолету и др. Эти ограничения являются специфичными для каждого типа самолетов. Так например, для пассажирских и транспортных самолетов необходимо учитывать:

- 1) ограничения, связанные с обеспечением безопасности на различных этапах полета:
  - нормируемые скорости на взлете и посадке ( $V_{СВ}$ ,  $V_{МЭВ}$ ,  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$ ,  $V_{ЗАХ}$ ),
  - минимальные углы наклона траектории на различных участках взлета и посадки с уходом на второй круг ( $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$ ),
  - потребные для взлета и посадки длины ВПП,
  - допустимые минимальные скорости в крейсерском полете на разных высотах,
  - ограничения по обзору из кабины пилотов;
- 2) ограничения по прочности:
  - максимальный скоростной напор (флаттер, реверс элеронов),
  - максимальная эксплуатационная перегрузка  $n_{y \max}$ ,
  - перегрузки от порывов ветра;
- 3) ограничения, связанные с обеспечением прочности аэродромного покрытия:
  - нормируемый момент и упругая характеристика плиты,
  - допустимое давление на грунт,
  - глубина колея;
- 4) ограничения, связанные с обеспечением комфорта пассажиров:
  - угол наклона пола пассажирского салона,

— вертикальные скорости при наборе высоты и снижении (перепад давления в кабине);

5) ограничение по шуму, создаваемому самолетом на местности при взлете и заходе на посадку.

Ряд указанных ограничений необходимо учитывать в блоке «Механика» при расчете траектории на различных этапах полета (нормируемые скорости и углы наклона траектории). Другие ограничения могут оказаться существенными при выборе параметров самолета, например для выбора тяги и площади крыла—ограничения по величинам  $L_{ВПП}$ ,  $\theta_3$ ,  $V_{ЗАХ}$ . Ограничения по прочности должны учитываться при расчете массы конструкции, ограничения по прочности аэродромного покрытия – в блоке «Выбор схемы шасси».

### **Контрольные вопросы**

- 32.Использование ЭВМ в процессе проектирования
- 33.Разработка программ формирования облика самолета
- 34.Структура блоков формирования облика самолета.
- 35.Блок предварительного формирования облика самолета
36. Компоновочный блок
37. Блок предварительного формирования
- 38.Блок учета ограничений и условий применения

ЛИТЕРАТУРА: [1 ].