

**Автоматизированное  
проектирование  
электронных устройств**

- Изложены общие сведения о методологии автоматизированного проектирования электронной аппаратуры.
- Дан анализ методов структурного синтеза и алгоритмов проектирования устройств силовой и слаботочной электроники.
- Рассмотрены методы анализа проектных решений. Изложены вопросы автоматизации конструкторско-технологического проектирования.
- Освещены активно развиваемые в последнее время технологии CALS.
- Предназначено для студентов направления «Электроника и микроэлектроника» и может быть использовано при изучении курса, выполнении практических заданий и лабораторных работ, курсовых и выпускных квалификационных работ магистров и дипломированных специалистов.

# ВВЕДЕНИЕ

- С внедрением систем автоматизированного проектирования (САПР) существенно меняются функции разработчика электронной аппаратуры – инженер, не умеющий работать в САПР, не может считаться полноценным специалистом,
- а предприятия, ведущие разработки без использования САПР, оказываются неконкурентоспособными из-за больших материальных и временных затрат на проектирование и невысокого качества проектов.

- Составными частями САПР являются многие современные информационные технологии.
- Техническое обеспечение САПР основано на использовании вычислительных сетей и телекоммуникационных технологий, персональных компьютеров и рабочих станций.
- Математическое обеспечение САПР отличается богатством и разнообразием используемых методов вычислительной математики, статистики, математического программирования, дискретной математики, искусственного интеллекта.
- Программные комплексы САПР относятся к числу наиболее сложных современных программных систем, включают реляционные и объектно-ориентированные базы данных, стандарты обмена данными в компьютерных средах.

- Поэтому, с целью подготовки специалистов в области создания и использования САПР необходимо систематизированное изложение принципов организации САПР, применяемого математического аппарата, методов автоматизированного проектирования, математических моделей, программных и технических средств САПР.

- Дисциплина "Автоматизированное проектирование электронных устройств" призвана способствовать выработке у студентов передовых научно-технических воззрений, ориентации их на мировой уровень производительности труда, подготовке специалистов, которые должны обеспечить бездефектное проектирование, снижение материальных затрат, сокращение сроков проектирования и количества инженерно-технических работников, занятых разработкой новой техники.
- Курс базируется на знании общеобразовательных и специальных дисциплин по математике, электронной технике, методам анализа и расчета электронных схем.

- В главе 1-ой рассматриваются общие сведения о проектировании, классификация и основные структуры САПР, виды обеспечения и информационные потоки в САПР, методы параметрического и структурного синтеза проектных решений. Дан обзор критериев оптимальности и методов расчета оптимальных значений проектных параметров, рассмотрено применение методов планирования эксперимента в системах автоматизированного проектирования.
- В главе 2-ой содержатся сведения о моделях и методах, используемых для анализа проектных решений различных иерархических уровней, анализируются особенности математического моделирования на основных этапах проектирования электронной аппаратуры.

- Глава 3-я посвящена методам формализации структурного синтеза, анализу алгоритмов автоматизированного проектирования устройств силовой электроники и формированию моделей основных компонентов этих устройств.
- В главе 4-ой рассматриваются вопросы автоматизированного проектирования устройств слаботочной электроники на основе использования типовых функциональных преобразователей.
- Глава 5-я посвящена вопросам автоматизации конструкторско-технологического проектирования электронных устройств, описанию автоматизированной системы обеспечения надежности электронной аппаратуры, проектному анализу электромагнитной совместимости.



# ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОЕКТИРОВАНИИ

## 1.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ

- Проектированием называется процесс составления описания, необходимого для создания в заданных условиях ещё не существующего объекта на основе первичного описания этого объекта и (или) алгоритма его функционирования, путем преобразования (в ряде случаев неоднократного) первичного описания, оптимизации заданных характеристик объекта и алгоритма его функционирования, устранения некорректностей первичного описания и последовательного представления описаний (при необходимости) на различных языках.

- Или, более коротко.
- Проектирование – это процесс, заключающийся в получении и преобразовании исходного описания объекта в окончательное описание на основе выполнения комплекса работ исследовательского, расчетного и конструкторского характера.

- Результатом проектирования при этом выступает получаемое в результате выполнения комплекса исследовательских, расчетных и конструкторских работ описание объекта (комплект документов), по которому этот объект можно изготовить.

- История развития методов проектирования связана с общей историей развития общества, на разных стадиях развития которого можно выделить:
- *1. Традиционные методы проектирования.* К ним относят эволюцию кустарных промыслов – постепенную подгонку изделий в соответствии с медленными темпами развития общества. Примером такой подгонки является телега, конструкция которой создавалась долгие годы и учитывает множество нюансов. Например, развал колес, обеспечивающий движение в такт ходьбы лошади.
- Сейчас развал-схождение автомобиля проверяют на компьютерных стендах.

- *2. Чертёжный способ проектирования.*  
Возник на стадии машинного производства, когда потребовалось существенно увеличить число проектируемых изделий.
- Определяется как метод проектирования путём создания чертежей объекта в определенном масштабе. Поиск осуществляется методом проб и ошибок и отдален от производства.
- Отличается тем, что в каждый момент рассматривается лишь одна концепция целого.

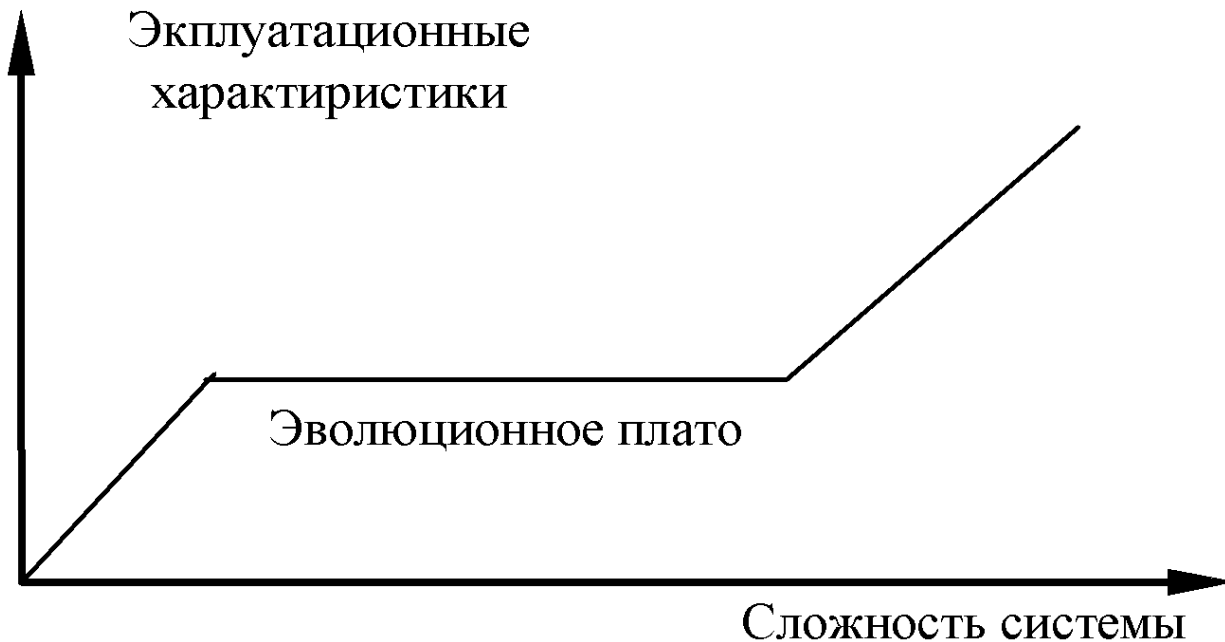
- Структура объекта определяется на основе опыта и творческой интуиции разработчика по схеме:

*логика – интуиция – рациональность.*

- *Декомпозиция* объекта (разбиение целого на части) осуществляется ведущим специалистом.
- *Композиция* (объединение частей в единое целое) осуществляется с использованием методов стандартизации: унифицированных размеров, единой разрядности цепей, согласованных нагрузочных характеристик.

- *Этапы развития чертежного способа:*
- • индивидуальное проектирование (изделия создаются впервые, без прототипов);
- • типовое проектирование – проектируется не одно конкретное изделие, а целое семейство (параметрические ряды) конструктивно подобных изделий, *характеризуется* внедрением методов *группового проектирования, агрегатирования, унификации*, сущность которых в разработке минимального количества узлов и деталей, которые многократно используются;
- • переход к единой системе конструкторской документации (ЕСКД), устанавливающей единые правила оформления и оборота конструкторской документации.

- Такой подход дает хорошие результаты на уровне изделий и их частей.
- Если изобразить графически соотношение сложность системы – эксплуатационные характеристики (рис. 1.1), то видно, что существует эволюционное плато, преодолеть которое возможно использованием современных способов проектирования, позволяющих учитывать взаимное влияние большого количества факторов.



- Рис.1.1. Зависимость качества эксплуатационных характеристик от сложности проектируемой системы



- *3. Современные методы проектирования.*  
Позволяют рассматривать множество концепций целого за счёт расширения пространства решений, в котором ведётся поиск новых структур.
- Новые методы проектирования – это формальные схемы, позволяющие разделить задачу проектирования на части и указать взаимные связи между ними, т.е. получить технические задания (ТЗ) на проектируемые части, учитывающие последующее соединение их между собой.
- Необходимый для принятия решения объем информации на каждом уровне проектирования может быть обеспечен только на базе современных информационных технологий в соответствии с принципом – *вся информация должна быть в компьютере, а не в голове.*

- Общие особенности современных методов проектирования определяют *стратегию* проектирования, которая включает три основных этапа:
  - Сбор обширного множества альтернативных решений и подготовка грубых моделей для их исследования. Этот этап называется *анализ* или *дивергенция* – представление вариантов самостоятельными единицами.
  - Проведение всей последовательности испытаний на моделях, отбраковка ненужных. Этот этап называется *синтез (трансформация)*.
  - Устранение внутренних противоречий и определение одного эскизного решения (прототипа), удовлетворяющего всем критериям, – *оценка* или *конвергенция* (сведение вариантов к единому целому).

- Стратегия проектирования может быть линейной, когда каждое последующее действие зависит от исхода предыдущего, но не зависит от результата последующих действий.
- В противном случае стратегия становится циклической, разветвленной.

- Для формализации процесса расширения области поиска решений проектной проблемы, т. е. генерации множества возможных вариантов структур проектируемого объекта, используют методы поиска идей:
  - мозговая атака (штурм) – метод активизации коллективной творческой деятельности, при его применении разделяются во времени процессы генерирования идей и их критические оценки;
  - синектика – активное применение аналогий;
  - ликвидация тупиковых ситуаций;
  - морфологические карты;
  - ТРИЗ – теория решения изобретательских задач (Г.С. Альтшуллер, 40-е годы XX века).

- Морфологические карты составляются в виде таблицы

Основные параметры (функции)	Промежуточные решения			
	1	2	3	4
А	*			
В		*		
С			*	

- Морфологические карты для устройств преобразовательной техники (выпрямитель, конвертор, инвертор)

Вид преобразования	Функция	Варианты				
Выпрямление	Схема	Мост	Со средней точкой	Однополупериодная		
	Преобразование уровня	Трансформатор	Регулирование			
	Регулирование	Фазовое	Отпайки трансформ.	Авто трансформ.		
	Сглаживание пульсаций	C-фильтр	LC-фильтр	Многозвенный фильтр		
	ЭМС	Входной ВЧ-фильтр	Коррекция $\cos \varphi$			
	Гальваническая развязка	Трансформатор				
	Защиты	По напряжению	По току	По перегреву		

Вид преобразования	Функция	Варианты				
Преобразование постоянного тока	Схема	ППН-1	ППН-2, ППН-3	Двухтактные схемы	<u>Однотактный прямоходовой</u>	<u>Однотактный обратногоходовой</u>
	Преобразование уровня	Трансформатор	Регулирование			
	Регулирование	ШИМ	ЧИМ	Релейное управление		
	Сглаживание пульсаций	LC-фильтр однозвенный	LC-фильтр двухзвенный	LR-фильтр		
	ЭМС	<u>Входной ВЧ-фильтр</u>	Коррекция <u><math>\cos \varphi</math></u>			
	Гальваническая развязка	Трансформатор				
	Защиты	По напряжению	По току	По перегреву		

Вид преобразования	Функция	Варианты				
Инвертирование	Схема	Мост	Со средней точкой	Полумост		
	Тип	Инв. напряжения	Инв. тока	Резонансный		
	Преобразование уровня	Трансформатор	Регулирование			
	Регулирование	Амплитудное (по цепи питания)	Однотактная ШИМ	Многотактная ШИМ		
	Формирование выходного напр.	Многотактная ШИМ	Ступенчатая аппроксимация	Г-фильтр	Р-фильтр	Комбинирован.
	ЭМС	Входной ВЧ-фильтр	Коррекция $\cos \varphi$			
	Гальваническая развязка	Трансформатор				
	Защиты	По напряжению	По току	По перегреву		



- План действий при составлении карт:
- 1. Определить функции, которые приемлемый вариант изделия должен быть способен выполнять.
- 2. Перечислить на карте широкий спектр возможных решений, т.е. альтернативных средств осуществления каждой функции.
- 3. Выбрать по одному приемлемому решению (\*) для каждой функции.
- 4. В идеальном случае на карте должны быть представлены все возможные частные решения. Это легче осуществить, если в каждом горизонтальном ряду будет столбец «другие средства».
- Число возможных решений в имеющейся таблице:
- $N = K i$ , где
- $K$  – количество функций;
- $i$  – количество возможных вариантов решений.

- Основная трудность заполнения карты – определение набора функций существенных для любого решения, независимых друг от друга, охватывающих все аспекты проблемы и немногочисленных.
- Например, любой полупроводниковый преобразователь должен реализовать следующие функции:
  - собственно преобразование рода тока (схема);
  - регулирование параметров преобразованной энергии (методы регулирования: импульсная модуляция, физические эффекты в линейных и нелинейных цепях);
  - согласование уровня напряжения питания и нагрузки;
  - гальваническая развязка;
  - электромагнитная совместимость;
  - кондиционирование входных и выходных параметров (фильтрация);
  - защиты (в т.ч. fool proof / fool tolerance).
- Первые две функции реализуются посредством полупроводниковых управляемых ключей. Следующие две – с помощью трансформаторов. Последние две – с помощью фильтров.

- *Примеры современных методов проектирования:*
- Функционально-стоимостной анализ (ФСА) – стратегия, направленная на снижение стоимости за счёт нахождения самого дешёвого решения.
- Системотехника – методология, цель которой добиться внутренней совместимости между элементами и внешней совместимости между изделием и окружающей средой.
- Для реализации современных стратегий используют два вида проектирования:
- *внешнее* – описание цели создания, основных характеристик, внешних воздействий;
- *внутреннее* – описание изделия, его структуры, технических решений, конструкции, режимов эксплуатации.

- Процесс проектирования может идти как от внешнего к внутреннему с определением критериев проектирования деталей и узлов,
- так и наоборот – по разработанным унифицированным узлам и нормативным правилам их сборки осуществляется синтез изделия.
- Считается, что оптимальным является наличие 30% оригинальных узлов и 70% унифицированных.
- Естественно, такой объем работ можно выполнить только с применением современных средств оргтехники и, самое главное, систем автоматизированного проектирования (САПР), которые обеспечивают высокое качество и сжатые сроки проектирования за счет использования широких возможностей средств вычислительной техники.

- Процесс проектирования должен охватывать все *стадии жизненного цикла*:
- Маркетинг, формирование требований к изделию и разработка технического задания.
- Проектирование.
- Подготовка производства, изготовление, испытание и доводка опытных образцов.
- Серийное производство, упаковка, хранение, реализация.
- Эксплуатация и целевое применение, сервис.
- Утилизация.
- Такой подход возможен только при использовании CALS (Continuous Acquisition and Life Cycle Support) – технологий непрерывной информационной поддержки жизненного цикла изделия (ИПИ).

- CALS-технология – это технология комплексной компьютеризации сфер промышленного производства, цель которой унификация и стандартизация документации (проектной, технологической, производственной, маркетинговой, эксплуатационной) промышленной продукции на всех этапах ее жизненного цикла.
- В CALS-системах предусмотрены хранение, обработка и передача информации в компьютерных средах, оперативный доступ к данным в нужное время и в нужном месте.
- Применение CALS позволяет существенно сократить объемы проектных работ, так как описания многих составных частей оборудования, машин и систем, проектировавшихся ранее, хранятся в базах данных сетевых серверов, доступных любому пользователю технологии CALS.
- Существенно облегчается решение проблем ремонтпригодности, интеграции продукции в различные системы, адаптации к меняющимся условиям эксплуатации, специализации проектных организаций и т.п.
- Ожидается, что успех на рынке сложной технической продукции будет немыслим вне технологии CALS.

- Развитие CALS-технологии должно привести к появлению так называемых *виртуальных производств*, при которых процесс создания спецификаций с информацией для программно-управляемого технологического оборудования, достаточной для изготовления изделия, может быть распределен *во времени и пространстве* между многими организационно автономными проектными студиями.
- Среди несомненных достижений CALS-технологии следует отметить легкость распространения передовых проектных решений, возможность многократного воспроизведения частей проекта в новых разработках и др.

- Построение открытых распределенных автоматизированных систем для проектирования и управления в промышленности составляет основу современной CALS-технологии. Главная проблема их построения – обеспечение единообразного описания и интерпретации данных в общей системе, имеющей масштабы вплоть до глобальных.
- Структура проектной, технологической и эксплуатационной документации, языки ее представления должны быть стандартизованными. Тогда становится реальной успешная работа над общим проектом разных коллективов, разделенных во времени и пространстве и использующих разные CAE/CAD/CAM-системы.
- Одна и та же конструкторская документация может быть использована многократно в разных проектах, а одна и та же технологическая документация адаптирована к разным производственным условиям, что позволяет существенно сократить и удешевить общий цикл проектирования и производства. Кроме того, упрощается эксплуатация систем.



- CALS-технология базируется на локальных решениях, разработанных и реализованных на предыдущих этапах развития информационных систем (САПР-К, САПР-Т, АСУТП, АСУ различных уровней, отдельные компьютеризованные производства) и включает:
- 1.Интегрированную компьютеризацию и единую информационную среду в электронной форме для всех участников жизненного цикла изделий с использованием: корпоративной сети; территориальных вычислительных сетей; глобальной сети Интернет, исключаящих человека в качестве главного информационного канала при передаче данных по этапам жизненного цикла изделий.

- 2. Применение CAD/CAM/CAE- систем, обеспечивающих автоматизированное проектирование, производство, инженерные расчетные исследования; PDM-систем, обеспечивающих управление данными о продукции; ERP- систем, обеспечивающих планирование ресурсов предприятия, возможный прямой доступ со стороны заказчика, параллельное проектирование и других информационных технологий.
- 3. Полное электронное определение изделий: электронный макет изделий, пространственная увязка сборок изделий (3D – модели), исключение бумажного параллельного документооборота, электронно-цифровая подпись (ЭЦП).

- 4. Применение передовых информационных технологий, программных и аппаратных средств, современного технологического оборудования, высокоэффективных конструкционных и функциональных материалов.
- 5. Единую информационную базу участников создания изделий как основу разработки и выпуска конкурентоспособной продукции в короткие сроки с оптимальными затратами.
- 6. Использование международных стандартов и других материалов в области информационных технологий.
- 7. Обеспечение информационной безопасности, регламентированный доступ и защита информации, предотвращающая возможность случайных или преднамеренных угроз безопасности информации, исходящих как из внутренних, так и внешних источников.

- *Терминология: автоматизированное проектирование*
- CALS – Continuous Acquisition and Life cycle Support – непрерывная информационная поддержка жизненного цикла изделия.
- EDA – Electronic Design Automation – автоматизированное проектирование электронных устройств.
- ECAD – Electronic Computer Aided Design – автоматизированное проектирование электронных устройств.
- CAD - Computer Aided Design – автоматизированное конструирование.
- CAM – Computer Aided Manufacturing – автоматизация технологии (автоматизированная подготовка производства).
- CAE – Computer Aided Engineering – инженерные расчеты.
- PLM – Product Life Management – управление жизненным циклом продукции.
- PDM – Product Data Management – управление данными об изделии.
- ERP – Enterprise Resource Planning – управление ресурсами предприятия.
- ILM – Information Life Cycle Management – управление жизненным циклом информации (данных).

## 1.2. ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

- Основные концепции современного проектирования с переходом от схемы «логика – интуиция – рациональность» к схеме «анализ – синтез – оценка» реализуются только на основе автоматизированного проектирования.
- Автоматическое проектирование возможно лишь в отдельных частных случаях для сравнительно несложных объектов.
- Автоматизированное проектирование определяется как проектирование, при котором отдельные преобразования описания объекта, а также представление описания на различных языках осуществляется взаимодействием человека и ЭВМ.

- В автоматизированный режим может быть переведено до 90% проектных работ. Но и оставшиеся 10% работы могут быть значительно интенсифицированы за счёт автоматизации информационно-справочного обслуживания.
- Человек в такой системе является лицом, принимающим решения (ЛПР).
- Система, реализующая автоматизированное проектирование, представляет собой *систему автоматизированного проектирования* (в англоязычном написании *CAD System — Computer Aided Design System*).

- Интерпретация и конкретизация системного подхода при автоматизированном проектировании реализуются в ряде известных подходов, которые также можно рассматривать как компоненты системотехники.
- Таковы структурный, блочно-иерархический, объектно-ориентированный подходы.

При *структурном подходе (концептуальном проектировании)* требуется синтезировать варианты системы из компонентов (блоков) и оценивать варианты при их переборе с предварительным прогнозированием характеристик компонентов.

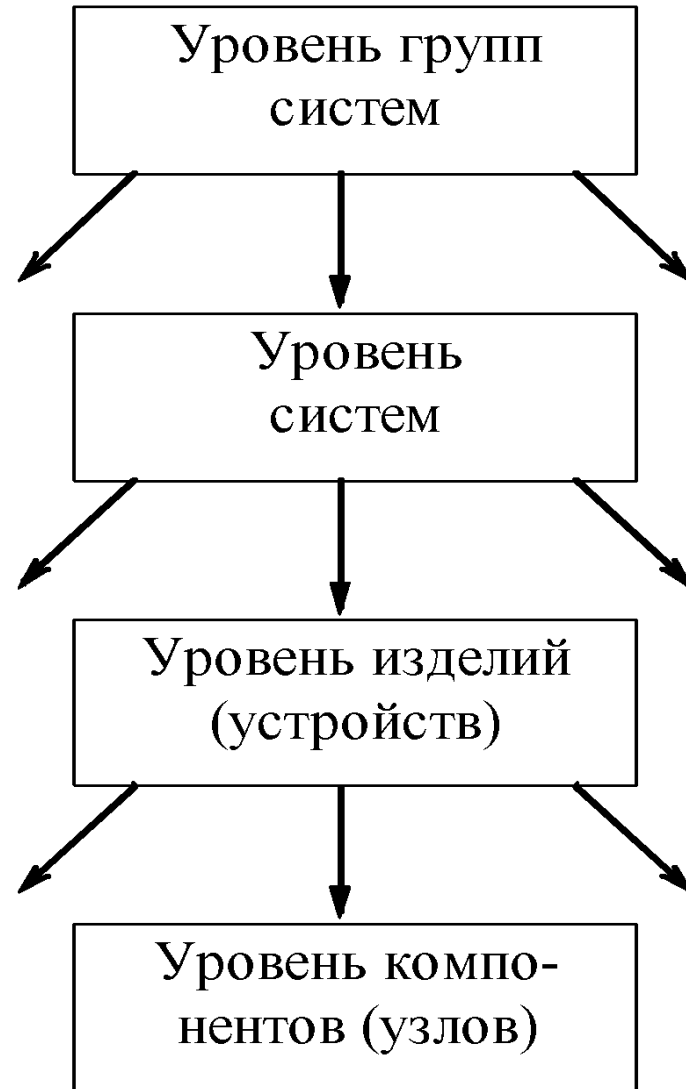
Таким образом, концептуальное проектирование (проектирование «от концепции», замысла) – это сбор из простых элементов (форм) соответствующей замыслу комплексной формы.



- *Блочно-иерархический* подход к проектированию основан на декомпозиции сложных объектов и соответственно средств их создания на иерархические уровни и аспекты, вводит понятие стиля проектирования (восходящее и нисходящее), устанавливает связь между параметрами соседних иерархических уровней.
- *Объектно-ориентированный* подход к проектированию вносит в модели приложений структурную определенность, распределяя данные и процедуры между *классами объектов*.

- Для всех подходов к проектированию сложных систем характерны следующие особенности:
- *Структуризация* процесса проектирования, выражаемая декомпозицией проектных задач и документации, выделением стадий, этапов, проектных процедур.
- *Итерационный* характер проектирования.
- *Типизация и унификация* проектных решений и средств проектирования.

Декомпозиция системы на иерархические уровни производится, в соответствии с уровнями сложности систем (рис. 1.2).



- Рис. 1.2. Уровни сложности систем

- Блочно-иерархический подход включает по каждому уровню иерархии *аспекты*:
- *функциональное проектирование*
- (разработка принципов действия, структурных, функциональных, принципиальных схем),
- *конструкторское проектирование*
- (определение форм и пространственного расположения компонентов изделий),
- *алгоритмическое проектирование*
- (разработка алгоритмов и программного обеспечения),
- *технологическое проектирование*
- (разработка технологических процессов).

- Процесс проектирования состоит из стадий, этапов, проектных процедур и проектных операций.
- *Основные стадии процесса проектирования:*
- Предпроектные исследования и разработка технического задания (ТЗ).
- Разработка эскизного проекта.
- Разработка рабочей, конструкторской и технологической документации (рабочий проект).
- Изготовление, предварительные испытания опытного образца.
- Приёмка опытно-конструкторской разработки (ОКР).

- На стадии ТЗ определяется комплекс требований к разрабатываемому устройству,
- На стадии эскизного проектирования синтезируется его схема и проводится предварительный расчет основных технико-экономических показателей (прототип),
- На стадии рабочего проекта производится разработка комплекта конструкторской и технологической документации.
- После изготовления и испытаний опытных образцов ОКР сдается заказчику.

- *Этапы проектирования* (последовательность этапов определяется договором на проведение ОКР):
- Разработка и согласование ТЗ.
- Разработка принципиальной электрической схемы.
- Изготовление макета и проведение лабораторных испытаний (моделирование).
- Разработка программы обеспечения надёжности.
- Разработка схемы испытаний и ТЗ на нестандартное испытательное оборудование.
- Разработка технических условий (ТУ).
- Разработка альбома рабочих чертежей.



- Разработка эксплуатационной документации (формуляр (ФО), паспорт (ПС), инструкция по эксплуатации (РЭ), этикетка (ЭТ), ведомость эксплуатационных документов (ВЭ)).
- Разработка технологической документации.
- Разработка инструкций по настройке.
- Разработка программы предварительных испытаний.
- Изготовление опытных образцов для предварительных испытаний, изготовление испытательного оборудования.
- Проведение предварительных испытаний.
- Выпуск отчёта по предварительным испытаниям и корректировка КД.
- Присвоение КД литеры "0" (готовность к серийному производству).
- Изготовление, приёмочные испытания и поставка.

- *Составной частью процесса проектирования является проектная процедура* – формализованная совокупность действий в результате которой получают проектные решения.
- Процедура включает в себя проектные операции, неизменные для данной процедуры.
- Заданная последовательность проектных процедур определяется как *маршрут проектирования*.

*Проектные процедуры этапа «Разработка принципиальной электрической схемы»:*

- детализация и выбор элементов, входящих в схему электрическую принципиальную. Заканчивается выпуском перечня разрешенных элементов;
- детализация и выбор электрических связей между элементами. Заканчивается моделью, макетом, эскизом;
- описание схемы электрической принципиальной в стандартных формах.

- Проектным решением называется промежуточное или конечное описание объекта проектирования, необходимое и достаточное для рассмотрения и определения дальнейшего направления или окончания проектирования.
- Документ, выполненный по заданной форме, в котором представлено какое-либо проектное решение, полученное в процессе проектирования, называется проектным.
- Совокупность проектных документов в соответствии с установленным перечнем, в которых представлен результат проектирования, называется проектом.

- 1.3. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ
- По мере усложнения электронных устройств процедуры их исследования приходится формализовать, т.е. делать однотипными (стандартизировать процессы) для любых сложных устройств заданного назначения, рассматривая части устройства с учетом их взаимодействия.

- Такой подход называется системным и предполагает:
- Установление границ проектируемой системы как целого, т.е. выделение ее из окружающей среды.
- Выявление структуры системы, типизация связей, определение атрибутов (основных свойств и параметров).
- Определение целей системы, критериев качества ее функционирования и методов их расчета.
- Декомпозицию системы на составные части или подсистемы. Рассмотрение частей системы с учетом их взаимодействий.
- Изучение системы во всех требуемых аспектах, анализ влияния внешней среды.

- В технике дисциплину, в которой исследуются сложные технические системы и их проектирование называют системотехникой.
- Классический подход основан на том, что свойства целого определяются свойствами составляющих его элементов.
- Системный подход основан на том, что элементы детерминируются целым, в рамках которого они функционируют.
- При этом у системы есть свойства, которых нет у ее элементов: *синергизм* – системный эффект (сумма целого за счет синергетики всегда больше суммы составляющих целое частей).

- Существует пять принципов системного подхода при проектировании электронных устройств:
- 1. Электронное устройство рассматривается не само по себе, а в совокупности с источником питания на входе и нагрузкой на выходе, кроме того учитываются все внешние воздействия.
- 2. Определяется необходимый набор критериев качества и функционирования электронного устройства и рассматриваются существующие методики его расчета.



- 3. Производится декомпозиция устройства для упрощения его анализа и расчета.
- *Выделяют два уровня декомпозиции:*
- верхний уровень – система разделяется на элементарные базовые ячейки;
- нижний уровень – элементарные базовые ячейки рассматриваются как совокупность элементов.

- 4. При анализе электромагнитных процессов в электронных устройствах принимаются следующие *классы допущений*:
  - все элементы схемы идеальны; источники бесконечной мощности; нагрузка идеализирована;
  - учитываются реальные параметры элементов схемы; нагрузка остается идеализированной;
  - все элементы схемы замещаются реальными моделями с реальными параметрами.
- 5. В процессе проектирования осуществляется учет взаимосвязей между проектными процедурами (стратегия проектирования не всегда линейная).

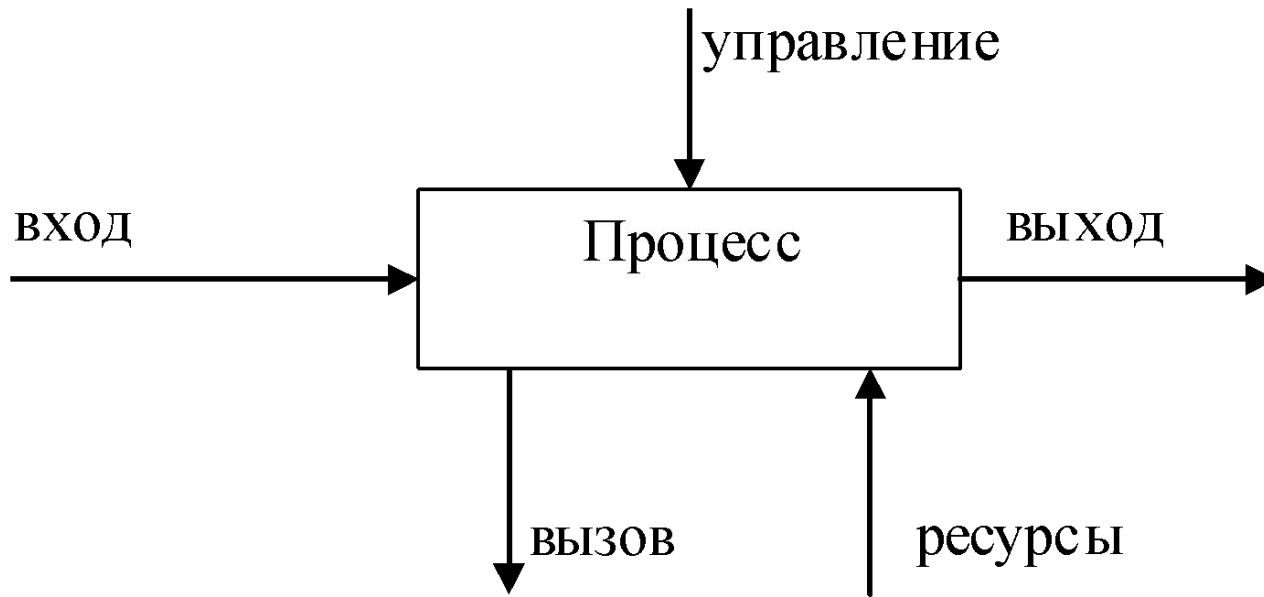
- Соответственно этапам процесса проектирования разрабатываются структурная, функциональная и принципиальная схемы ЭУ.
- *Схема структурная* – определяет основные функциональные части изделия, их назначение и взаимосвязи.
- Схемы структурные разрабатывают при проектировании изделий на стадиях, предшествующих разработке схем других типов, и пользуются ими для общего ознакомления с изделием.

- *Схема функциональная* – схема, разъясняющая определенные процессы, протекающие в отдельных функциональных цепях изделия или в изделии в целом.
- Схематическими функциональными пользуются для изучения принципов работы изделий, а также при их наладке, контроле и ремонте.

- *Схема принципиальная (полная)* – схема, определяющая полный состав элементов и связей между ними и, как правило, дающая детальное представление о принципах работы изделия, происходящих в изделии процессах и его технической реализации. Схематически принципиальными пользуются для изучения принципов работы изделий, а также при их наладке, контроле и ремонте. Они служат основанием для разработки других конструкторских документов, например схем соединений и чертежей

- При проектировании реализуется *процессный подход*. По ГОСТ Р ИСО 9001–2001 процесс – это система действий преобразования вход – выход.
- Процессы преобразуют состояние предмета.
- Каждый процесс имеет цель и управляется (реализуется) процедурами.
- *Процедура* – путь, которым выполняются работы, чтобы реализовать процесс, способ осуществления процесса.
- *Эффективность процесса* – ресурсы, используемые для достижения цели.
- *Результативность процесса* – степень приближения к цели.
- *Цикл управления PDCA (Planning – Do – Check – Action)*.

Рис. 1.3. Условное обозначение процесса



## *Требования к проектным документам:*

- 1. Системность (ссылки на используемые документы).
- 2. Функциональная полнота (исчерпывающий).
- 3. Адекватность (соответствие стандарту).
- 4. Идентифицируемость (по видам документов).
- 5. Адресность (для кого).
- 6. Простота.
- 7. Актуальность (учет изменений).

Электронные устройства проектируются в соответствии со стандартами:

- industry, military, space (общепромышленный, военный, космической техники).

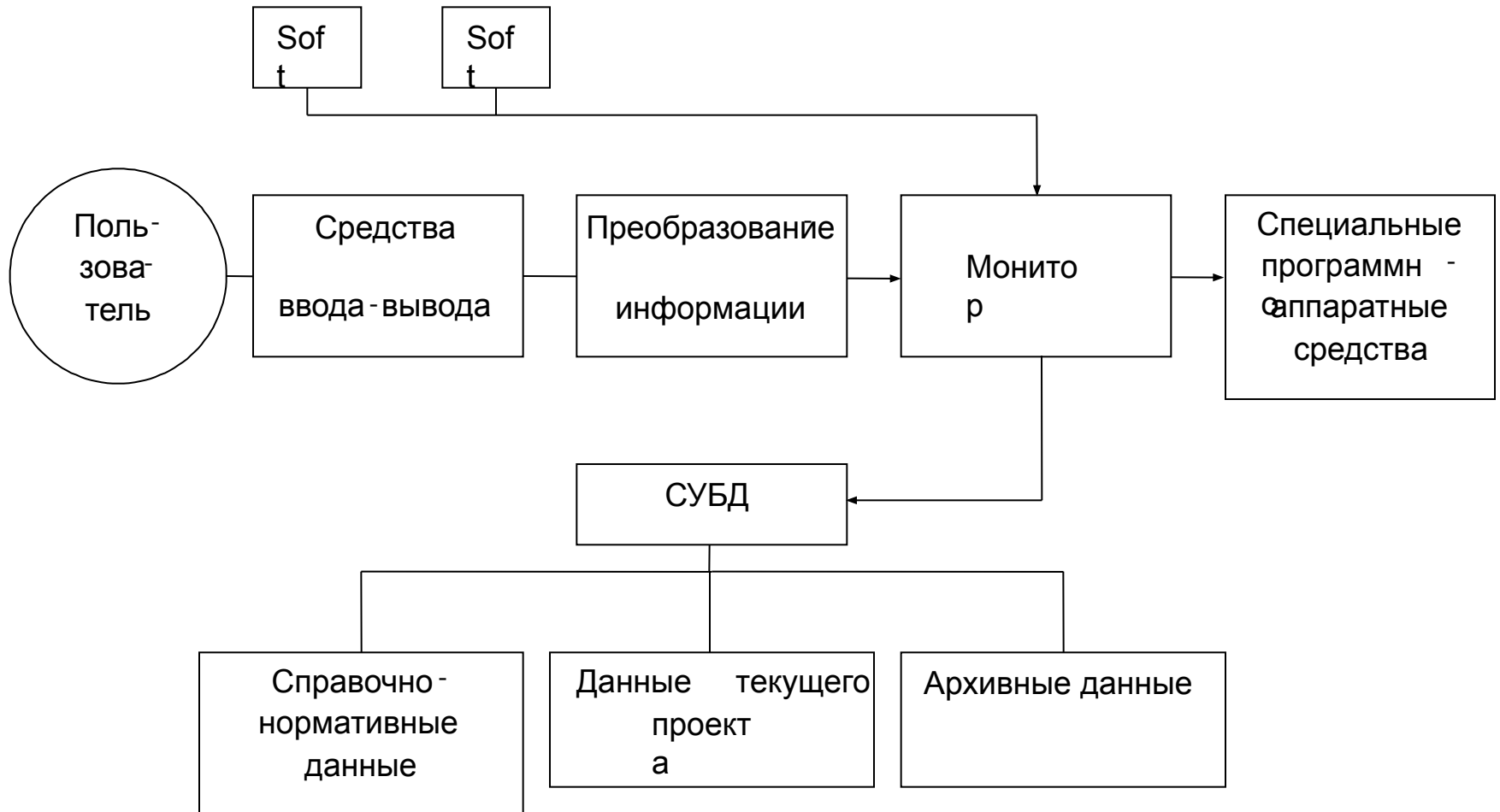


- 1.4. СТРУКТУРА САПР
- САПР представляет собой организационно - технический комплекс, состоящий из большого количества взаимосвязанных и взаимодействующих элементов.
- Схема процесса автоматизированного проектирования и функциональная схема САПР представлены на рис. 1.4 и 1.5.

Рис. 1.4. Схема процесса автоматизированного проектирования



Рис. 1.5. Функциональная схема САПР



- *Монитор* – это система управления процессом проектирования – DesPM (Design Process Manager), организующая взаимодействие между всеми компонентами САПР.
- В качестве монитора выступают PLM-PDM системы, реализующие управление всей информацией об изделии, процедурах и процессах его разработки и технологической подготовки производства, объединяющие всю основную информацию о жизненном цикле изделия, делающие данные доступными всем пользователям

- *Основные цели создания САПР:*
- • повышение качества и технико-экономического уровня продукции;
- • уменьшение затрат на ее создание и эксплуатацию;
- • сокращение сроков, уменьшение трудоемкости проектирования;
- • повышение качества проектной документации.

- *Эти цели в САПР реализуются за счет:*
- Систематизации и совершенствования процессов проектирования на основе применения эффективных мат. методов и моделей объектов и средств вычислительной техники.
- Комплексной автоматизации проектных работ и повышения качества управления проектированием.
- Использования методов многовариантного проектирования и оптимизации.
- Автоматизации трудоёмких и рутинных проектных работ.
- Замены натуральных испытаний и макетирования математическим моделированием.
- Создания единых банков данных, содержащих данные необходимые для проектирования (информационное обеспечение).
- Унификации и стандартизации методов проектирования.

- В интегрированной САПР осуществляется проектирование от ввода первичного описания объекта до выдачи проекта с необходимым комплектом документации.
- В любой автоматизированной системе проектирования регламентируются следующие части (виды обеспечения):

- ◦ *техническое* (ТО), включающее различные аппаратные средства (ЭВМ, периферийные устройства, линии связи, сетевое коммутационное оборудование). По функциональному признаку выделяют следующие группы технического обеспечения:
  - устройства подготовки и ввода данных (клавиатура, магнитные носители, сканеры, дигитайзеры, цифровые фото- и телекамеры);
  - средства передачи данных (повторители, концентраторы, коммутаторы, модемы, мультиплексоры, сетевые платы);
  - технические средства программной обработки данных (ЭВМ, процессор);
  - технические средства отображения и документирования данных – алфавитно-цифровые и графические дисплеи (мониторы, терминалы), принтеры, плоттеры (графопостроители), устройства на магнитных носителях, устройства специального назначения (фотоплоттеры, координатографы);
  - технические средства архива проектных решений – комплект средств для хранения, контроля, восстановления и размножения данных, включает все перечисленные выше устройства.



- ◦ *математическое* (МО), объединяющее математические методы, модели и алгоритмы для выполнения проектирования;
- ◦ *программное* (ПО), представляемое компьютерными программами САПР, включает документы с текстами программ, программы на машинных носителях и эксплуатационные документы к ним. Программное обеспечение подразделяется на общесистемное – операционные системы, трансляторы и т.д. и прикладное – пакеты прикладных программ, предназначенных для получения проектных решений;

- ◦ *информационное* (ИО) – документы с описанием типовых элементов, комплектующих изделий, материалов и другие данные, а также файлы и блоки на машинных носителях с записью указанных документов.
- Компоненты информационного обеспечения создаются на основе максимального использования информационно-поисковых систем (ИПС) и стандартных банков данных со структуризацией данных по формальным признакам, разграничением доступа и защитой данных.
- Для доступа к данным в СУБД используется, в частности язык SQL (Structured Query Language).

- В информационно-поисковых системах САПР хранится и обрабатывается, как правило, документальная информация.
- Для обеспечения взаимодействия пользователей и ИПС служит нормативный (фиксированный) словарь понятий, с помощью которого можно описывать содержание, как документов, так и запросов. Такой словарь называется *тезаурусом*. Тезаурус является моделью системы понятий предметной области.
- Запросы и поиск информации в ИПС и БД осуществляются по атрибутам – атрибутивный поиск, и всему содержанию документов – контентный поиск;

- ◦ *лингвистическое*, выражаемое языками общения между проектировщиками и ЭВМ, языками программирования и языками обмена данными между техническими средствами САПР;
- ◦ *методическое*, включающее материалы, в которых изложены теория, методы, математические модели, алгоритмы, методики проектирования, терминология, нормативы, обеспечивающие методологию проектирования в САПР, отражены состав, правила отбора и эксплуатации средств автоматизированного проектирования;
- ◦ *организационное* – совокупность правил и приказов, должностных инструкций и других документов, регламентирующих организационную структуру подразделений предприятия и их взаимодействие с комплексом средств автоматизированного проектирования, права, обязанности и функции участников САПР.

- Основными структурными звеньями САПР являются *подсистемы*, обеспечивающие выполнение некоторой законченной проектной процедуры с получением проектных решений и документов.
- Различают объектно-ориентированные и инвариантные (управление, обработка информации) подсистемы.
- По целевому назначению различают САПР или подсистемы САПР, обеспечивающие разные аспекты проектирования: *конструкторские САПР* общего машиностроения – САПР-К, часто называемые просто САД-системами; *технологические САПР* общего машиностроения – САПР-Т, иначе называемые автоматизированными системами технологической подготовки производства АСТПП или системами САМ (Computer Aided Manufacturing).

- По структурному признаку выделяют также отдельные программно-методические комплексы (ПМК) САПР, например, комплекс анализа прочности механических изделий в соответствии с методом конечных элементов (МКЭ) или комплекс анализа электронных схем.
- Системы ПМК это системы с уникальными архитектурами не только программного (software), но и технического (hardware) обеспечений.

- Структура САПР должна строиться в соответствии со следующими основными принципами:

Принцип включения и системного единства предусматривает связь всех подсистем САПР, согласование параметров и возможностей конкретной САПР со стоящей выше на иерархическом уровне, одноразовое занесение информации, программная целостность документов (недопустимость «ручных» правок).

Принцип развития – предусматривает возможность наращивания и совершенствования компонентов САПР и связей между ними.

Принцип комплексности – заключается в обеспечении связности проектирования отдельных элементов и всего объекта в целом на всех стадиях проектирования (системный подход).

Принцип информационного единства – требует использования в подсистемах САПР установленных в отрасли нормативными документами языков программирования, способов представления информации, терминов, символов, форматов данных и др.

Принцип инвариантности – подсистемы и компоненты САПР должны быть по возможности универсальными или типовыми, т. е. инвариантными к проектируемым объектам и отраслям.

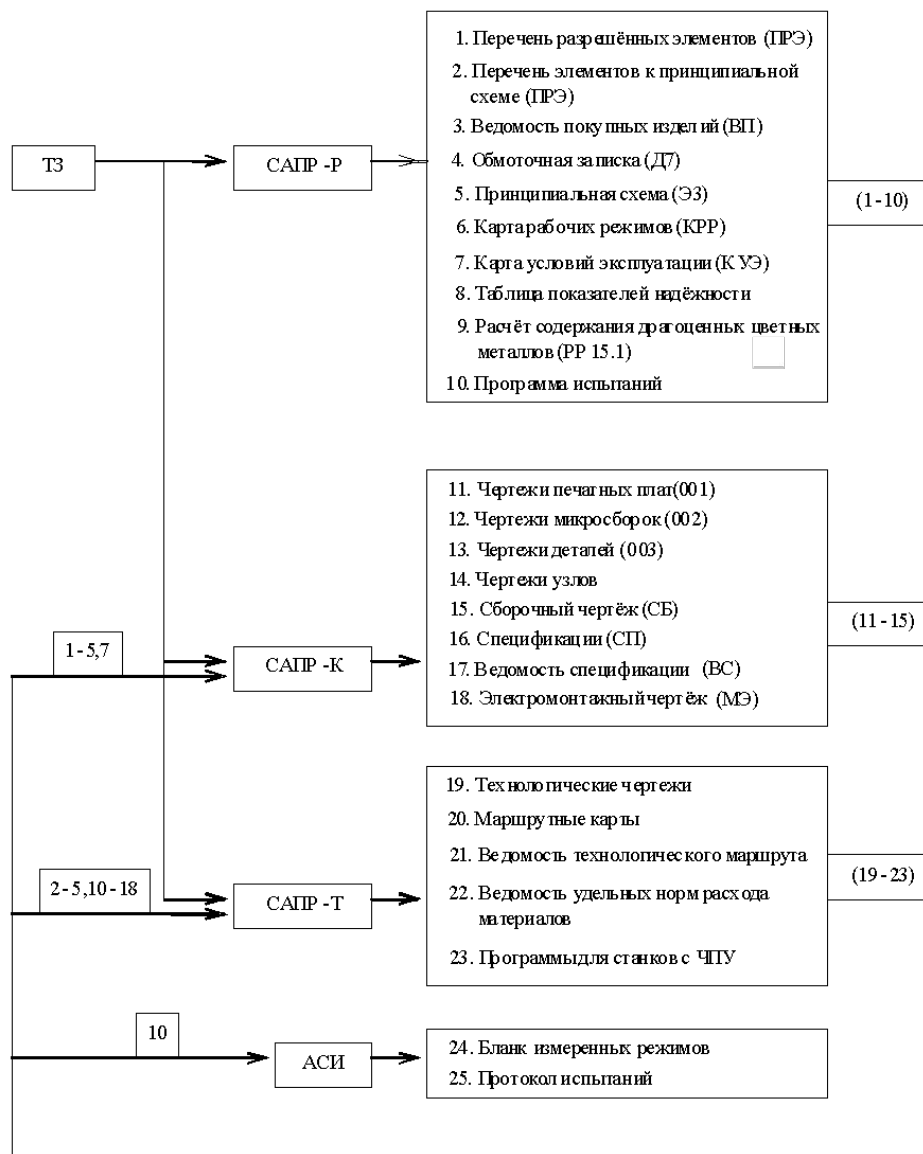
- 1.5. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ ИНТЕГРИРОВАННОЙ САПР
- В интегрированную САПР (ИСАПР) электронных устройств входят проблемно и объектно-ориентированные подсистемы и базовые программно-методические комплексы. Основными из них являются:
  - Подсистема расчёта электронных устройств и компонентов.
  - Подсистема функционального и схемотехнического моделирования и расчёта динамических характеристик.
  - Автоматизированная подсистема обеспечения надёжности и выбора элементов (АСОН).
  - Подсистема проектирования печатных плат и микросборок.
  - Подсистема корпусных деталей и выпуска КД.
  - Подсистема разработки и выпуска чертежей оснастки.
  - Подсистема выпуска технологической документации (ТД), в том числе программ для станков с ЧПУ.



- В ИСАПР подсистемы проектируются с учётом их взаимодействия с подсистемами АСУ и АСИ (автоматизированные системы испытаний).
- Подсистемы, входящие в ИСАПР, концентрируются в профессиональных САПР: САПР-Р (разработчика); САПР-К (конструктора); САПР-Т (технолога); АСИ (автоматизированная система испытаний); АСМТС (автоматизированная система материально-технического снабжения) и др.

- На рис. 1.6 приведена структура информационных связей и иерархия подсистем в интегрированной САПР.
- Информационная связь подсистем САПР основана на основополагающем принципе САПР – принципе одноразового занесения информации.
- В результате работы в ИСАПР формируется комплект КД – необходимых описаний в последовательности и объеме, приведённом на рис. 1.6.

Рис. 1.6. Информационная связь и иерархия подсистем в интегрированной САПР

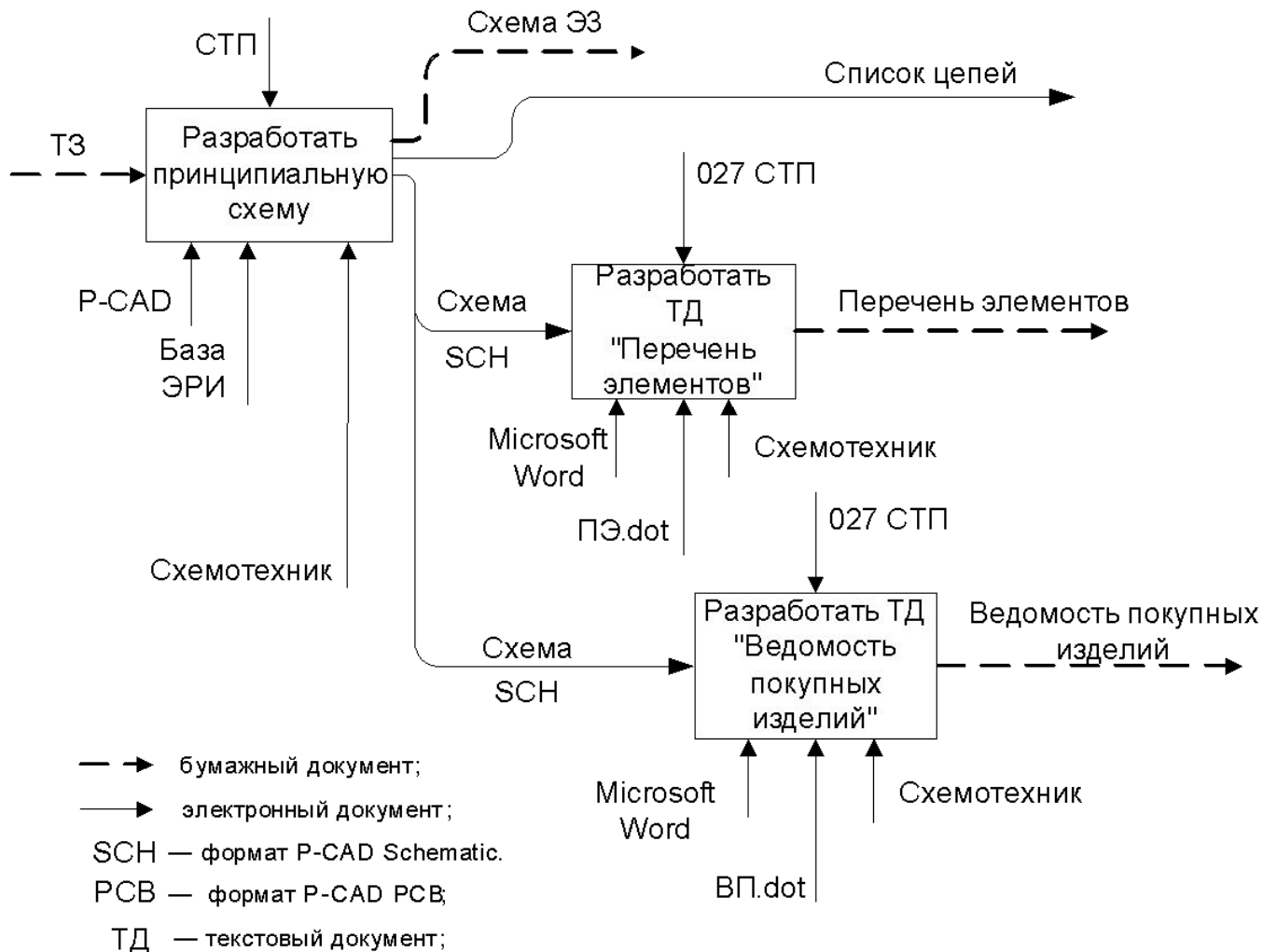


- Каждой ОКР, проводимой на предприятии, и каждому конструкторскому документу, выпускаемому в рамках этой ОКР, присваивается (по классификатору) классификационное обозначение (децимальный номер).
- Например, для ведомости покупных изделий широтно-импульсного модулятора, номер имеет вид ФЮРА. 468165.001 ВП и включает: первые четыре буквы – код предприятия, шесть цифр – код изделия по классификатору (класс, подкласс, группа, подгруппа), затем три цифры – порядковый номер, затем обозначение вида документа.

- Обозначения для некоторых документов, входящих в комплект конструкторской документации:  
пояснительная записка – ПЗ, схема структурная – Э1, схема функциональная – Э2, схема электрическая принципиальная – Э3, схема электрическая испытаний – Э8, перечень элементов – ПЭ, ведомость покупных изделий – ВП, сборочный чертеж – СБ, электромонтажный чертеж – МЭ, габаритный чертеж – ГЧ, спецификация – Сп, ведомость спецификаций – ВС, чертежи печатных плат – 001, прочие детали – 002, расчет электрический – РР2.
- *The developer – designer – technologist*
- *Разработчик – конструктор – технолог*

- *Краткое описание профессиональных САПР*
- *САПР разработчика* принципиальной схемы. Оформление принципиальной электрической схемы осуществляется в графическом редакторе Schematic пакета P-CAD 2002 (рис. 1.7).
- Все элементы выбираются из библиотек ЭРИ и размещаются на поле чертежа, затем проводятся электрические связи между выводами компонентов.
- После создания принципиальной электрической схемы в файле sch сосредоточена вся графическая и текстовая информация, необходимая для выпуска конструкторской документации: ЭЗ, ПЭЗ, ВП.
- Кроме того, созданный список цепей, включающий информацию об используемых компонентах и корпусах, связях между выводами, служит исходными данными для упаковки схемы в редакторе *PCB*.
- С помощью программ ПЭ.dot и ВП.dot схемотехник автоматически формирует в текстовом редакторе Microsoft Word перечень элементов и ведомость покупных изделий к принципиальной электрической схеме.

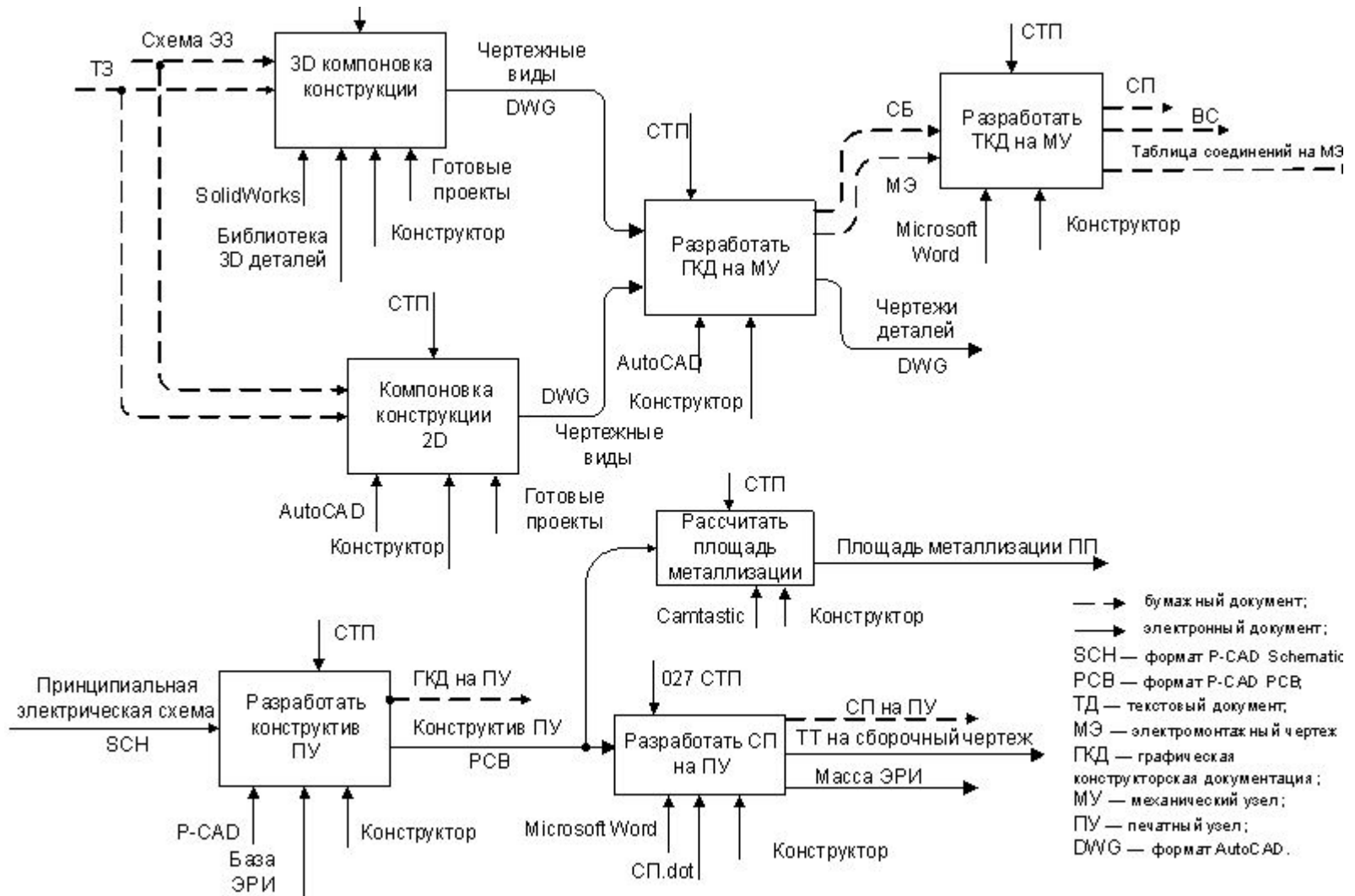
Рис. 1.7. Структурная схема САПР схемотехника (формат IDF0)



- *САПР конструктора.* После получения файла принципиальной электрической схемы от схемотехника конструктор в среде пакета P-CAD формирует список цепей, производит упаковку графических изображений корпусов ЭРИ из базы данных в графический редактор РСВ. Затем осуществляется разработка конструктива и выпускается графическая конструкторская документация: чертеж детали печатной платы (ПП), сборочный чертеж.
- Спецификация и технические требования на сборочный чертеж формируются с помощью программы СП.dot в текстовом редакторе Microsoft Word (рис. 1.8).
- Расчет площади металлизации ПП производится в программе подготовки фотошаблонов к производству Camtastic.
- Компоновка блока осуществляется в пакете AutoCAD на основе прототипов – ранее разработанных проектов – либо в системе объемного твердотельного моделирования SolidWorks, при этом используется библиотека объемных моделей деталей и сборочных единиц.
- Графическая конструкторская документация на механические детали и узлы (чертежи деталей, сборочные, электромонтажные, габаритные чертежи) оформляется в системе AutoCAD, текстовая (спецификация, ведомость спецификаций, таблица соединений, таблица контактов) – в Microsoft Word.

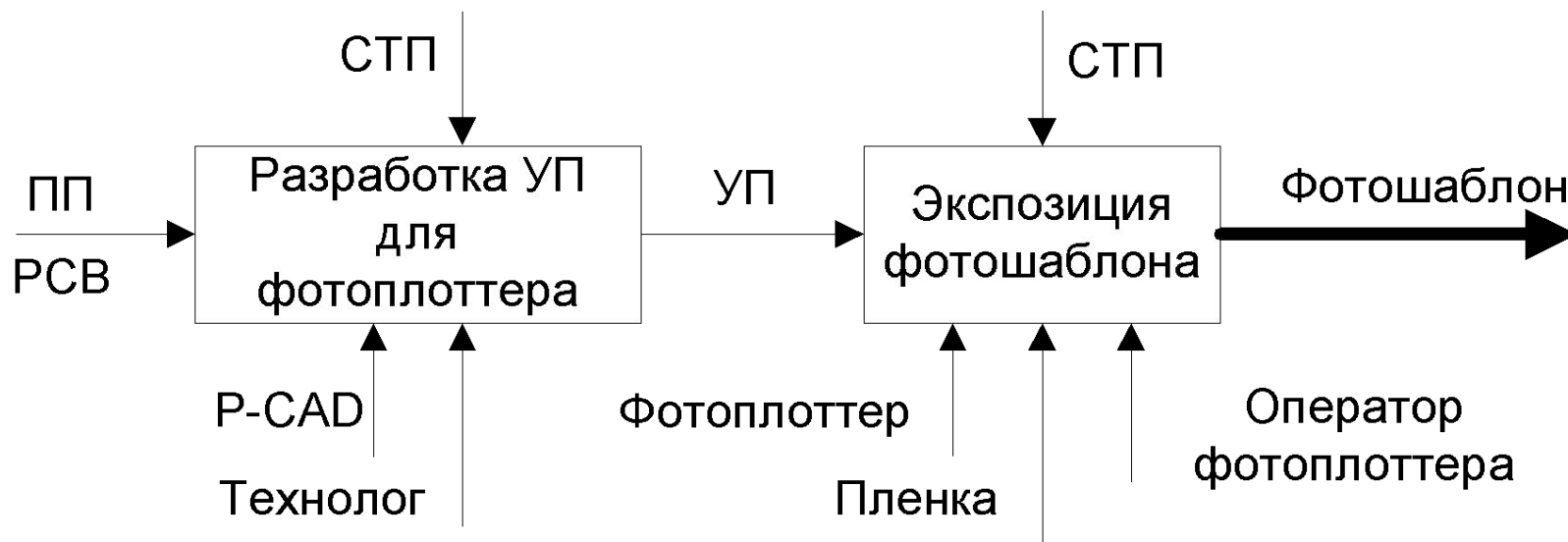


Рис. 1.8. Структурная схема САПР конструктора



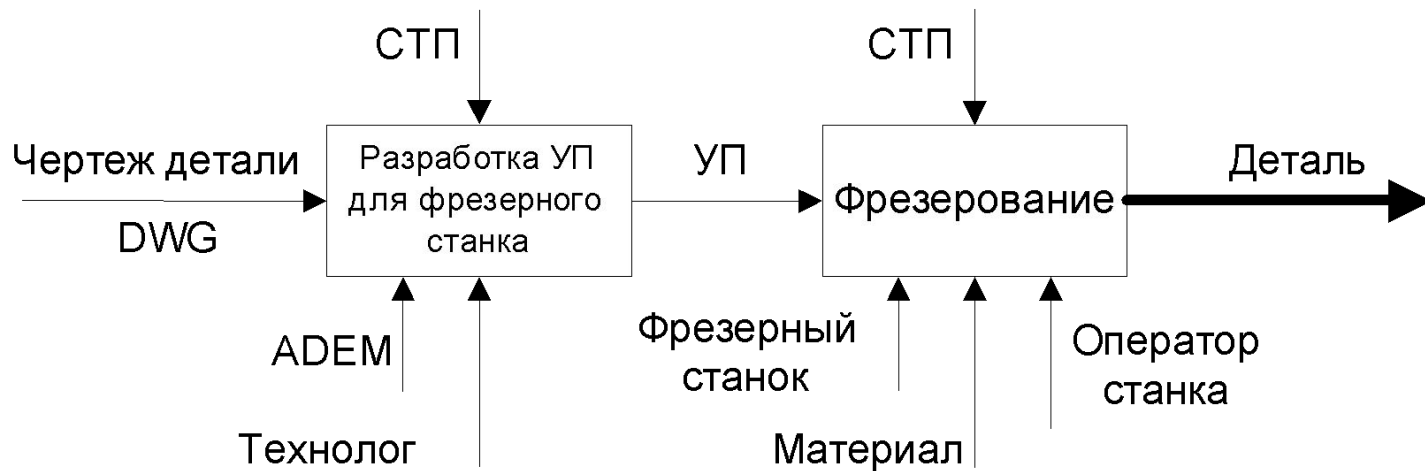
## Структурная схема САПР технолога ПП

- *САПР технолога печатных плат.* Исходными данными для работы технолога печатных плат служит файл печатной платы в формате РСВ. Средствами P-CAD 2002 технолог проводит доработку фотошаблона печатной платы, подставляет таблицу аппертур и формирует управляющую программу для фотоплоттера Gerber, Emma .

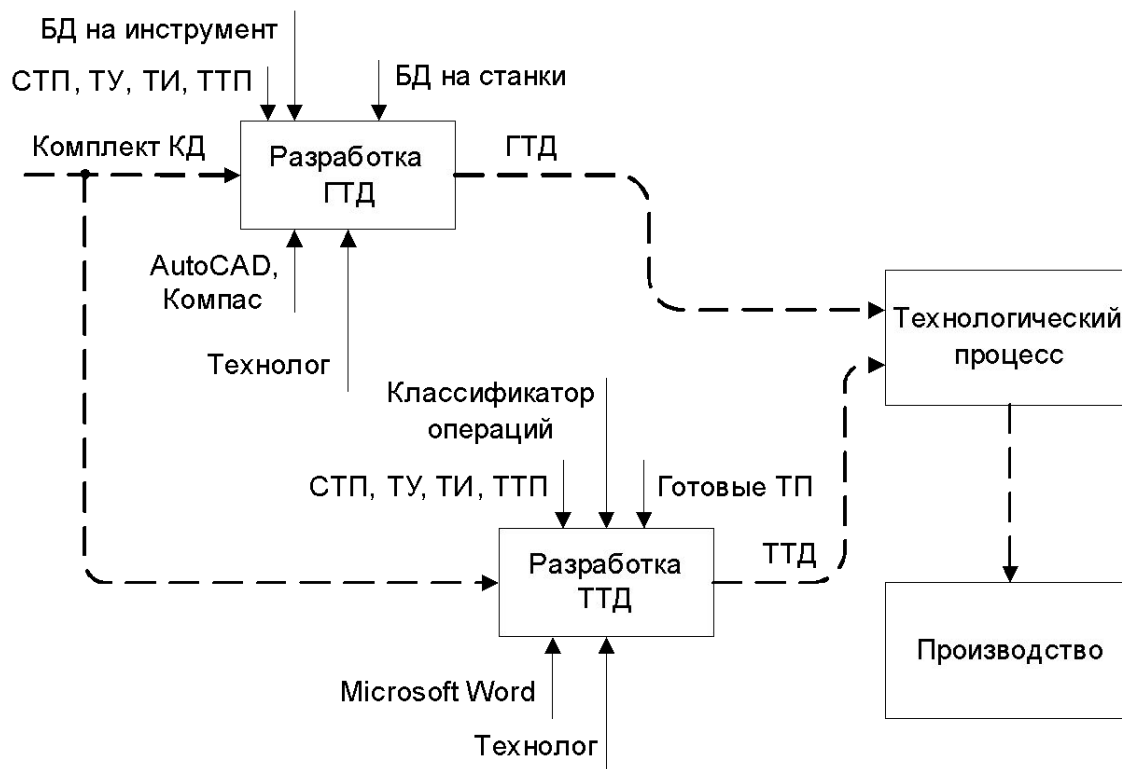


- САПР технолога механических деталей. Разработка управляющих программ на фрезерный станок осуществляется с помощью САПР

ADEM. Входными данными являются файлы в формате AutoCAD



- САПР технолога общей технологии. Исходными данными для работы технолога служат: СТП, ТУ, ТИ-технологическая инструкция, ТТП-типовой техпроцесс, классификатор операций, база данных на станки, база данных на инструмент. Разработка графической технологической документации осуществляется в САПР КОМПАС, AutoCAD, текстовой в текстовом редакторе Microsoft Word ( ГТД – графическая технологическая документация; ТТД – текстовая технологическая документация )



- 1.6. СИНТЕЗ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ В САПР
- Подавляющее большинство задач автоматизированного проектирования относится к классу оптимизационных задач, решаемых путем сравнения множества допустимых вариантов по целому ряду критериев.
- Задачи проектирования делят на задачи синтеза и задачи анализа.
- Под синтезом понимают построение описания системы по заданному функционированию, т.е. задачи синтеза связаны с созданием проектных документов и самого проекта.
- Анализ это определение функционирования по заданному описанию. Задача анализа – оценка проектных документов (решений). Именно анализ позволяет получить необходимую информацию для целенаправленного выполнения процедур синтеза в итерационном процессе проектирования.
- Поэтому синтез и анализ неразрывно связаны, и задачи синтеза часто решают методом многовариантного анализа (параметрический синтез на базе многовариантного анализа).

- Различают синтез структурный и параметрический – получение структуры и определение численных значений параметров элементов в структуре.
- Синтез называют оптимизацией, если определяются наилучшие в заданном смысле структуры и значения параметров.
- Проектирование начинается со *структурного синтеза*, при котором генерируется принципиальное решение. Таким решением может быть физический принцип действия датчика, или одна из типовых схем инвертора, или функциональная схема микропроцессора.
- Но эти конструкции и схемы выбирают в параметрическом виде, т.е. без указания числовых значений параметров элементов.
- Прежде чем приступить к верификации проектного решения, нужно задать или рассчитать значения этих параметров, т.е. выполнить *параметрический синтез*.

- *Постановка задач структурного синтеза.* Задачи синтеза структур проектируемых объектов относятся к наиболее трудно формализуемым.
- Именно по этой причине структурный синтез, как правило, выполняют в интерактивном режиме при решающей роли инженера-разработчика, а ЭВМ осуществляет предоставление необходимых справочных данных, включая базы типовых проектных решений, фиксацию и оценку промежуточных и окончательных результатов.
- Имеются и примеры успешной автоматизации структурного синтеза – это задачи конструкторского проектирования печатных плат и кристаллов БИС, логического синтеза комбинационных схем цифровой автоматики и вычислительной техники, синтеза технологических процессов и управляющих программ для механообработки в машиностроении и некоторые другие.

- Структурный синтез заключается в преобразовании исходных описаний проектируемого объекта, содержащих информацию о требованиях к свойствам объекта, об условиях его функционирования, ограничениях на элементный состав и т.п., в результирующее описание, которое должно содержать сведения о *структуре*, т.е. о составе элементов и способах их соединения и взаимодействия.
- Исходное описание, как правило, представляет собой ТЗ на проектирование, результатом структурного синтеза является структурная схема электронного устройства.
- Большинство практических задач структурного синтеза решают с помощью *приближенных (эвристических)* методов, использующих специфические особенности того или иного класса задач.
- Часто они приводят к результатам, близким к оптимальным, при приемлемых затратах вычислительных ресурсов.



- 1. Методы *концептуального проектирования* предусматривают поиск и сравнение возможных вариантов компоновочных решений, получаемых варьированием типами, параметрами и связями блоков, на основе многократного расчета и анализа, сравнения результатов и последовательного приближения к варианту, удовлетворяющему требованиям задания с учетом иерархии приоритетов.
- Применение ЭВМ позволяет увеличить число сравниваемых вариантов и учитываемых факторов. Но при этом открытым остается вопрос о том, насколько окончательно принятое решение близко к принципиально наилучшему в рамках задания, так как задача решается без формально определенного алгоритма перебора вариантов.
- Концептуальное проектирование ЭУ – разработка его концепции, т.е. по существу структурной и функциональной схем.

- 2. В теории интеллектуальных систем (*системы искусственного интеллекта*) синтез реализуется с помощью экспертных систем (ЭС)
- ЭС =  $\langle \text{БД}, \text{БЗ}, \text{И} \rangle$ ,
- где *БД* – база данных, включающая сведения о базовых элементах; *БЗ* – база знаний, содержащая правила конструирования вариантов структуры; *И* – интерпретатор, устанавливающий последовательность применения правил из *БЗ*.
- Трудности формализации процедур структурного синтеза привели к популярности применения экспертных систем в САПР, поскольку в них вместо выполнения синтеза на базе формальных математических методов осуществляется синтез на основе опыта и неформальных рекомендаций, полученных в том числе от экспертов в конкретной предметной области.
- В системах искусственного интеллекта знания отделены от процедурной части программ и представлены в одной из характерных форм. Такими формами могут быть продукции, фреймы, семантические сети.

- *Продукция* представляет собой правило типа «если  $A$ , то  $B$ », где  $A$  – условие, а  $B$  – действие или следствие, активизируемое при истинности  $A$ .
- Продукционная БЗ содержит совокупность правил, описывающих определенную предметную область.
- *Фрейм (кадр, рамка)* – структура данных, в которой в определенном порядке представлены сведения о свойствах описываемого объекта. Типичный вид фрейма:
  - $\langle \text{имя фрейма}; x_1=p_1; x_2=p_2; \dots; x_N=p_N; q_1, q_2, \dots, q_M \rangle$ ,
  - где  $x_i$  – имя  $i$ -го атрибута,  $p_i$  – его значение,  $q_i$  – ссылка на другой фрейм или некоторую обслуживающую процедуру. В качестве  $p_i$  можно использовать имя другого (вложенного) фрейма, описывая тем самым иерархические структуры фреймов.
- *Семантическая сеть* – форма представления знаний в виде совокупности понятий и явно выраженных отношений между ними в некоторой предметной области. Семантическую сеть удобно представлять в виде графа, в котором вершины отображают понятия, а ребра или дуги – отношения между ними. В качестве вершин сети можно использовать фреймы или продукции.

- 3. *Эволюционные методы* предназначены для поиска предпочтительных решений и основаны на статистическом подходе к исследованию ситуаций и итерационном приближении к искомому состоянию систем.
- В отличие от точных методов математического программирования эволюционные методы позволяют находить решения, близкие к оптимальным, за приемлемое время, а в отличие от известных эвристических методов оптимизации, характеризуются существенно меньшей зависимостью от особенностей приложения (т.е. более универсальны) и в большинстве случаев обеспечивают лучшую степень приближения к оптимальному решению.
- Важнейшим частным случаем эволюционных методов являются *генетические методы и алгоритмы*. Генетические алгоритмы основаны на поиске лучших решений с помощью наследования и усиления полезных свойств множества объектов определенного приложения в процессе имитации их эволюции.

- 4. Если при формализации задачи все управляемые параметры удалось представить в числовом виде, то можно попытаться использовать *методы, базирующиеся на достижениях прикладного нелинейного программирования* и алгоритмических методах направленного поиска.
- Данные методы предусматривают формирование функциональной зависимости массива основных параметров (независимых переменных проектирования  $x_1 \dots x_n$ ) и показателя качества  $F(x)$  и определение значений этих параметров, обеспечивающих минимум показателя качества.
- Математически задача формулируется следующим образом.
- Найти вектор  $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , обеспечивающий минимальное значение функции качества ,  $F(X) = F(x_1, x_2, \dots, x_n)$
- при выполнении системных ограничений

$$g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0$$

$$x_{j1} \leq x_j \leq x_{j2}$$

- где  $i=1, 2, \dots, m$ ,  $j=1, 2, \dots, n$ ,  $D$  – область допустимых значений вектора  $X$ .

- Для поиска оптимального варианта используются алгоритмические методы поиска экстремума полученной целевой функции при варьировании большим количеством независимых переменных полной модели, которая формируется индивидуально для каждой проектируемой системы.
- Такой подход позволяет в общем случае определить сочетание параметров, обеспечивающих экстремальное значение функции цели, но при этом ввиду сложности задачи и трудности формирования критерия не учитывается часть показателей и параметров даже на уровне ограничений.
- Такая схема малопригодна для проектирования высокоэффективных специализированных систем и используется, как правило, для предварительных оценок на основе упрощенных моделей (удельных характеристик).

- 1.7. ВЫБОР КРИТЕРИЕВ ОПТИМАЛЬНОСТИ И МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ
- При проектировании на основе САПР имеется возможность получать множество решений. Выделение некоторого подмножества решений из всего известного множества относится к *проблеме выбора и принятия решений*.
- При этом различают два типа задач.
  - Задачи выбора – это задачи, в которых всё множество вариантов решений неизвестно.
  - Задачи оптимизации, – когда всё множество вариантов и критерий оптимизации известны.
- Если при проектировании можно выделить один параметр как основной (например, масса), то его естественно принять за целевую функцию  $F(x)$  или *частный* критерий, при этом условия работоспособности остальных выходных параметров относятся к ограничениям задачи (например, коэффициент стабилизации, надежность и др.).

- Сложность постановки оптимизационных проектных задач обусловлена наличием у проектируемых объектов нескольких выходных параметров, которые могут быть критериями оптимальности, но целевая функция должна быть одна, в связи с чем возникает проблема сведения многокритериальной задачи к однокритериальной.
- Задачи проектирования, проводимые по нескольким критериям, носят название многокритериальных, или задач векторной оптимизации.
- В этих задачах частные критерии  $F_i(x)$  свертываются в *составной (интегральный) критерий*, объединяющий все выходные параметры (частные критерии) в одну целевую функцию  $F(x) = \Phi(F_1(x), \dots, F_n(x))$ .
- Такой критерий называют обобщённым или интегральным критерием.



- Основные виды интегральных критериев:
- *Аддитивный критерий* – образуется сложением нормированных значений частных критериев.
- ,
 
$$F(x) = \sum_{i=1}^m \frac{F_i(x)}{F_0(x)} C_i$$
- где  $C_i$  – весовой коэффициент (определяет степень его важности (  $\sum C_i = 1$  ));
- $F_0$  – нормирующий делитель этого критерия.
- *Мультипликативный критерий* – образуется произведением частных критериев без их нормирования (тонно-километры). В случае неравноценности частных критериев могут вводиться весовые коэффициенты:

- .
 
$$F(x) = \prod_i^m F_i^{C_i}(x)$$

- *Минимаксный критерий* – ищется такое сочетание значений переменных проектирования, при которых нормированные значения всех частных критериев становятся равными между собой:

$$C_i \frac{F_i(x)}{F_0(x)} = K$$

- Для определения весовых коэффициентов используются различные виды оценок.
- 1. Количество показателей  $n$  записывается по порядку важности и каждому присваивается вес равный:

$$C_i = \frac{(n+1-i)}{n(n-1)}$$

- (для  $n = 3$ ,  $C_1 = 0.5$ ,  $C_2 = 0.33$ ,  $C_3 = 0.17$ ).
- 2. Можно принять все веса равными: (для трёх  $C_i = 0.33$ ).
- 3. Используется также метод опроса специалистов с усреднением их экспертных оценок по условию:

$$\sum_{i=1}^n c_i = 1$$

- В САПР основные *методы поиска экстремума* целевой функции можно разделить на две группы: детерминированного и недетерминированного поиска.
- К группе детерминированных методов относятся методы вычислительной математики: итерационный, градиентный и др.
- К группе недетерминированных методов относятся метод простого перебора независимых переменных (метод сканирования), а также методы организованного (рационализированного) перебора, в том числе методы планирования эксперимента.

- Комплекс мер по сокращению числа вариантов (рационализации перебора) включает:
- - ограничение диапазона изменения независимых переменных (НП) на основе опыта или предварительных расчетов;
- - использование функциональных зависимостей между переменными и удельных характеристик для сокращения количества НП;
- - использование проверок (оценок) на разных стадиях расчета, позволяющих исключить из дальнейшего рассмотрения неудовлетворительные результаты (варианты).

- Детерминированные методы основаны на пошаговом изменении управляемых параметров:  $X_{k+1} = X_k + \Delta X_k$ .
- В большинстве методов приращение  $\Delta X_k$  вектора управляемых параметров вычисляется по формуле  $\Delta X_k = hg(X_k)$ .
- Здесь  $X_k$  – значение вектора управляемых параметров на  $k$ -м шаге,  $h$  – шаг, а  $g(X_k)$  – направление поиска. Если выполняются условия сходимости, то реализуется пошаговое (итерационное) приближение к экстремуму.

- *Методы оптимизации классифицируют по ряду признаков*
- В зависимости от числа управляемых параметров  $X$  различают методы *одномерной* и *многомерной* оптимизации, в первых управляемый параметр единственный, во вторых размер вектора  $X$  не менее двух.
- Реальные задачи в САПР многомерны, методы одномерной оптимизации играют вспомогательную роль на отдельных этапах многомерного поиска.
- Различают методы *условной* и *безусловной* оптимизации по наличию или отсутствию ограничений. Для реальных задач характерно наличие ограничений, однако методы безусловной оптимизации также представляют интерес, поскольку задачи условной оптимизации с помощью специальных методов могут быть сведены к задачам без ограничений.
- В зависимости от числа экстремумов различают задачи одно- и многоэкстремальные. Если метод ориентирован на определение какого-либо локального экстремума, то такой метод относится к *локальным методам*. Если же результатом является глобальный экстремум, то метод называют *методом глобального поиска*.

- В зависимости от того, используются при поиске производные целевой функции по управляемым параметрам или нет, различают методы нескольких порядков. Если производные не используются, то имеет место метод *нулевого порядка*, если используются первые или вторые производные, то соответственно метод *первого* или *второго порядка*.
- Методы первого порядка называют также градиентными, поскольку вектор первых производных  $F(X)$  по  $X$  есть градиент целевой функции.
- Конкретные методы определяются следующими факторами:
  - способом вычисления направления поиска  $g(X_k)$ ;
  - способом выбора шага  $h$ ;
  - способом определения окончания поиска.
- Шаг может быть или постоянным, или выбираться исходя из одномерной оптимизации – поиска минимума целевой функции в выбранном направлении  $g(X_k)$ . В последнем случае шаг называют оптимальным.
- Окончание поиска обычно осуществляют по правилу: если на протяжении  $r$  подряд идущих шагов траектория поиска остается в малой  $\epsilon$ -окрестности текущей точки поиска  $X_k$ , то поиск следует прекратить, следовательно, условие окончания поиска
- $|X_k - X_{k-r}| < \epsilon$ .

- В качестве примера использования интегрального критерия рассмотрим оптимизацию автономной системы электроснабжения по критерию минимума суммарной массы.
- Пусть имеется автономная система электроснабжения, содержащая первичный источник (ПИ) энергии (например, аккумулятор) и полупроводниковый преобразователь (ПУ).



- Мощность нагрузки  $P_n = 1000$  Вт, удельный показатель первичного источника ПИ = 25 кг/кВт. Рассматриваются два варианта преобразователя:
- 1) ПУ1:  $P = 200$  Вт,  $M = 10$  кг,
- 2) ПУ2:  $P = 100$  Вт,  $M = 11$  кг,
- где  $P$  – потери мощности в преобразователе.



- Эффективность системы определяется соотношением

$$\omega = \frac{W_H}{M_{ПИ} + M_{ПУ}}$$

- где  $W_H$  – энергия, отдаваемая в нагрузку.
- Масса первичного источника включает две составляющие
- $M_{ПИ} = M_H + M_P$ ,
- первая определяется мощностью нагрузки и равна  $M_H = \gamma_{ПИ} \cdot P_H = 25 \text{ кг}$ , а вторая – мощностью потерь в преобразователе  $M_P = P \cdot \gamma_{ПИ}$ .
- Здесь  $\gamma_{ПИ}$  – нормирующий множитель, приводящий все составляющие интегрального критерия к одной размерности.
- Для рассматриваемых вариантов полная масса первичного источника составит
- 1)  $25 + 5 = 30$  (кг),
- 2)  $25 + 2.5 = 27.5$  (кг).
- А суммарная масса системы 40 и 38,5 кг, соответственно. Вывод о предпочтительности второго варианта очевиден.

- При проектировании преобразователей электрической энергии пользуются понятием приведенной массы – аддитивным критерием, включающим собственную массу преобразователя и присоединенную массу первичного источника:
- $M_P = P \gamma_{ПИ}$
- Для рассматриваемых вариантов приведенная масса преобразователя составляет
- 1)  $10 + 5 = 15$  (кг),
- 2)  $11 + 2.5 = 13.5$  (кг).
- Что также позволяет сделать вывод о предпочтительности второго варианта.

- Можно показать, что при КПД преобразователя  $\eta > 0.9$  по данному критерию  $(m_i + P_i \gamma_{\text{ПИ}}) = \min$  можно проектировать не только преобразователь в целом, но и его отдельные компоненты с массой  $m_i$  и потерями мощности  $P_i$ .
- Интервал неопределённости при этом не превышает 5%. Если при оптимизации учитывать и стоимость вариантов, то необходимо составлять интегральный (из массы и стоимости) критерий.
- Таким образом, в критерии  $(m_i + P_i \gamma_{\text{ПИ}}) = \min$  составляющая  $P_i \gamma_{\text{ПИ}}$  является системообразующим фактором, позволяющим проектировать элемент не сам по себе, а в интересах системы.

- 1.8. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
- (DOE – design of experiments)
- Для исследования и оптимизации вариантов в САПР используются математические методы планирования экспериментов на моделях.
- Эти методы позволяют исследовать поведение модели в локальной области изменения ее параметров при сокращении количества требуемых экспериментов.

- Сущность теории планирования эксперимента иллюстрирует простой пример измерения величины сопротивления каждого из трех последовательно включенных резисторов  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ .
- Традиционными методами измеряют сопротивления каждого в отдельности, предварительно выполнив еще одно измерение, с замкнутыми накоротко выводами измерительного прибора для установки нуля его показаний.
- Схему всего эксперимента, состоящего из четырех опытов, можно представить матрицей планирования  $X$ , столбцы которой отражают операцию измерения сопротивлений  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и для общности математических выражений обозначены  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ; зависимая переменная представлена вектором  $Y$ :

$$X = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ +1 & -1 & -1 \\ -1 & +1 & -1 \\ -1 & -1 & +1 \end{bmatrix}, \quad Y = \begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix},$$

- где знак «+» указывает, что резистор подключен к измерительному прибору, а знак «-» означает, что значение сопротивления резистора не измеряется.
- Значение сопротивления оценивается по результатам двух измерений; установки нуля прибора и непосредственного измерения величины сопротивления. При этом получаем следующие величины сопротивлений:
- $R_1 = y_1 - y_0$ ,  $R_2 = y_2 - y_0$ ,  $R_3 = y_3 - y_0$ .

- Измерение этих же последовательно включенных сопротивлений можно провести по-другому в соответствии со следующей матрицей:

$$X = \begin{bmatrix} +1 & -1 & -1 \\ -1 & +1 & -1 \\ -1 & -1 & +1 \\ +1 & +1 & +1 \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix}.$$

- Как и в предыдущем случае, измеряется каждое из сопротивлений в отдельности, а в последнем четвертом опыте измеряется полное сопротивление всех трех резисторов, предварительная установка нуля прибора не производится.
- Значение каждого из сопротивлений получаем перемножением элементов вектора  $Y$  на элементы столбцов  $x_1, x_2, x_3$  матрицы  $X$  с делением результата на два, так как измерение каждого из сопротивлений выполнено дважды.

- Таким образом, находим:
- $R1 = 0,5(y1 - y2 - y3 + y4);$
- $R2 = 0,5(-y1 + y2 - y3 + y4);$
- $R3 = 0,5(-y1 - y2 + y3 + y4).$
- Новая схема измерений дает уменьшение дисперсии  $D$  вдвое, а ошибки в  $\sqrt{2}$  раз по сравнению с традиционным методом при одинаковом количестве измерений.
- $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - M)^2}{N}}$  - среднеквадратическая ошибка.
- Чтобы получить такую же точность традиционным методом, необходимо количество измерений увеличить вдвое.
- Повышение точности получено благодаря тому, что значение каждого сопротивления во второй схеме измерялось во всех четырех опытах, а по первой схеме – только в двух.

- *Таким образом, планирование экспериментов преследует две основные цели:*
- Сокращение общего объема испытаний.
- Повышение информативности каждого из экспериментов в отдельности.
- *Основные определения.*
- Факторное пространство – это множество внешних и внутренних параметров модели, значения которых контролируются при проведении эксперимента. Так как факторы могут иметь как количественный, так и качественный характер, их значение указывается уровнями.
- Каждый из факторов имеет верхние и нижние уровни, расположенные симметрично относительно некоторого нулевого уровня. Точка факторного пространства, соответствующая нулевым уровням всех факторов, называется центром плана.
- Интервалом варьирования фактора называется число  $j$ , прибавление которого дает верхний уровень, а вычитание – нижний. Обычно план эксперимента строится относительно одного выходного параметра  $y$ , который называется наблюдаемой переменной.



- *При планировании эксперимента должны быть решены две задачи:*
- *1. Идентификация факторов.* Под идентификацией факторов понимается их ранжирование по уровню важности. Выделяют первичные и вторичные факторы. Первичные факторы – те факторы, влияние которых исследуется. Вторичные факторы не являются предметом исследований, но их влиянием пренебречь нельзя.
- *2. Выбор уровней факторов.* Уровни факторов должны покрывать весь возможный диапазон их изменения. Общее количество уровней факторов не должно приводить к чрезмерному объему моделирования.

- *Существуют следующие планы (виды) экспериментов.*
- 1. Полный факторный эксперимент  $N = L^K$  , где  $N$  – число опытов,  $L$  – число уровней (одинаково для всех факторов),  $K$  – число факторов.
- Если имеется три фактора ( $x_1$   $x_2$   $x_3$ ) по три уровня (1, 0, -1) каждый, то общее количество опытов (табл. 1.2).
- Полный факторный эксперимент целесообразно использовать, если исследуется взаимное влияние всех факторов. Если взаимным влиянием факторов можно пренебречь (или оно слабое), то проводят один из частичных факторных экспериментов (ЧФЭ).

# Таблица 1.2

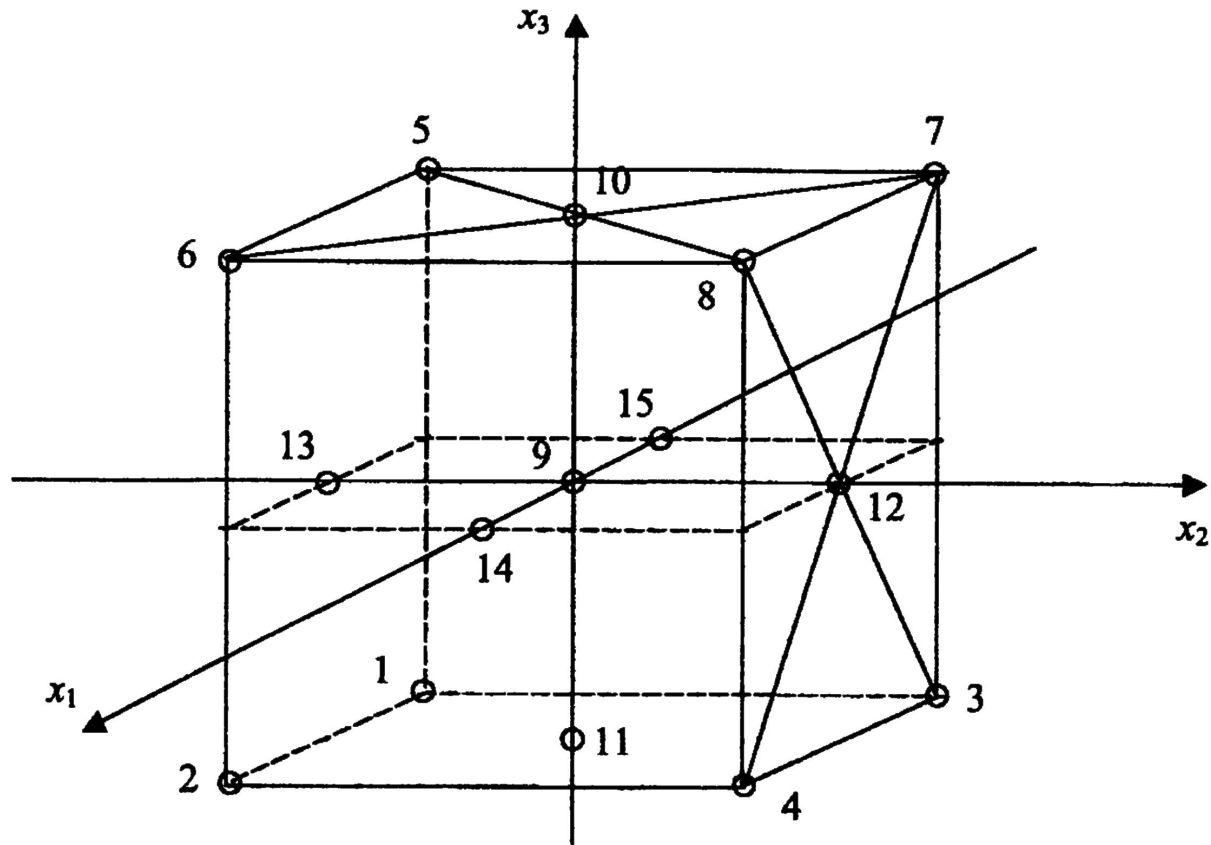
Номер эксперимента	X1	X2	X3
1	1	1	1
2	1	1	0
3	1	1	-1
4	1	0	1
5	1	0	0
6	1	0	-1
7	1	-1	1
8	1	-1	0
9	1	-1	-1
10	0	1	1
11	0	1	0
12	0	1	-1
13	0	0	1
14	0	0	0
15	0	0	-1
16	0	-1	1
17	0	-1	0
18	0	-1	-1
19	-1	1	1
20	-1	1	0
21	-1	1	-1
22	-1	0	1
23	-1	0	0
24	-1	0	-1
25	-1	-1	1
26	-1	-1	0
27	-1	-1	-1

2. Дробный факторный эксперимент (полный для двух уровней). Общее количество опытов  $N = 2^K$

Номер эксперимента	$X_1$	$X_2$	$X_3$
1	0	0	0
2	0	0	1
3	0	1	0
4	0	1	1
5	1	0	0
6	1	0	1
7	1	1	0
8	1	1	1

### 3. Ортогональный план .

Графическая интерпретация плана для 3-х факторов – куб, имеющий 8 вершин; 6 центров граней; 1 центр куба ( $N=16$ ).



- 4. Рандомизированный план.
- Предполагает выбор значений факторов случайным образом. Такие планы используются для сложных многофакторных систем.

5. Латинский план (квадрат). Проводится эксперимент с одним первичным фактором и несколькими вторичными. Пусть  $A$  – первичный;  $B, C$  – вторичные факторы. Для 3-х факторов и 4-х уровней  $N=16$ .

Значение $B$	Значение фактора $C$			
	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$
$B_1$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$
$B_2$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_1$
$B_3$	$A_3$	$A_4$	$A_1$	$A_2$
$B_4$	$A_4$	$A_1$	$A_2$	$A_3$

- 6. Эксперимент с изменением факторов по одному.
- Один из факторов «пробегаёт» все  $L$  уровней, а остальные поддерживаются постоянными. Обеспечивается исследование влияния каждого фактора в отдельности. Общее количество опытов (для 3-х факторов и 4-х уровней  $N=12$ ).



- *Пример планирования.* Простым примером планирования эксперимента является определение статической ошибки стабилизатора при заданных диапазонах изменения напряжения питания и мощности нагрузки.
- Проводится эксперимент на модели стабилизатора и статическая ошибка определяется как разность между максимальным и минимальным значениями выходного напряжения, измеренными в опытах при различных сочетаниях  $U_{пит}$  и  $P_{нагр}$ .

## Таблица значений факторов

$U_{план}$	$S_{нагр}$
Макс. (+1)	(+1)
Ном. (0)	(0)
Мин. (-1)	(-1)

- Виды экспериментов:
- 1. Полный факторный эксперимент .
- 2. Дробный факторный эксперимент – исключаем один уровень (номинальный) .
- 3. Эксперимент с изменением факторов по одному – строятся характеристики  $U_{вых}(I_n)$ ,  $U_{вых}(U_{пит})$ , . Это по существу парциальные характеристики, сечения зависимости  $U_{вых}(I_n, U_{пит})$ .
- Основным преимуществом факторного эксперимента является то, что одновременно варьируются все факторы.
- При традиционном подходе при переходе от одного опыта к другому изменяется только один фактор, все остальные остаются постоянными, при этом число опытов значительно увеличивается.