

### 3. ОБЪЕКТЫ И ЗАДАЧИ АФЛП И АСхП (МОДЕЛИРОВАНИЯ)

Одним из важных вопросов, которые приходится решать при проектировании сложных [радиоэлектронных устройств](#) (РЭУ) является исследование процессов обработки сигнала по мере его прохождения от входа к выходу РЭУ. Это исследование можно проводить на ПЭВМ с разной степенью точности: либо весьма точно, что требует больших затрат машинного времени, либо достаточно приближённо, но быстро. В первом случае радиоэлектронное устройство моделируется на основе физического подхода методами схемотехнического моделирования, а во втором – на основе информационного подхода методами функционально-логического (системного) моделирования.

Для дальнейшего изложения материала данной главы целесообразно определить некоторые общие понятия, которые относятся к проектированию любых устройств независимо от их физической природы. Введём понятие параметров функциональных блоков и компонентов, параметров устройства и параметров окружающей среды.

Параметры функциональных блоков и компонентов, из которых состоит проектируемое устройство, будем называть внутренними; параметры устройства, по которым оценивается его качество – выходными; параметры действующих на устройство внешних информационных сигналов – *входными*; параметры окружающей среды – *внешними*.

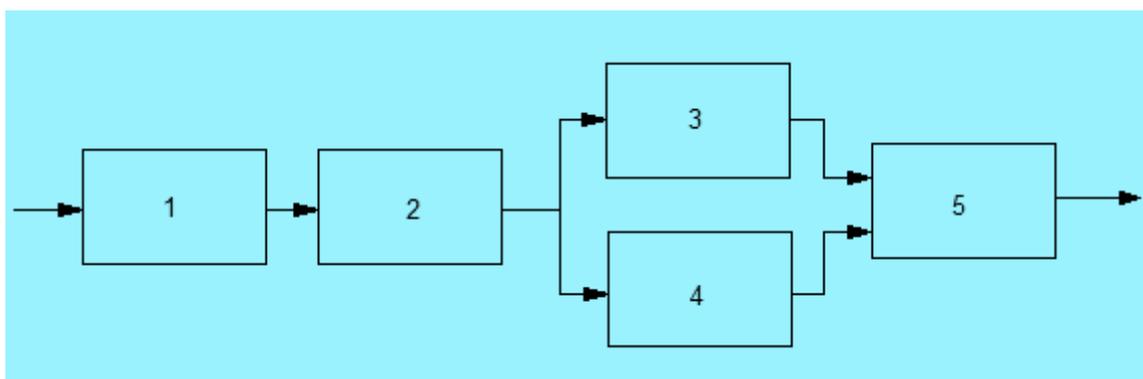
Пример (применительно к проектированию транзисторного усилителя): параметры самих транзисторов и пассивных элементов, входящих в состав этого усилителя – *внутренние* параметры; потребляемая мощность, коэффициент гармонических искажений – *численные выходные* параметры; АЧХ и ФЧХ – *функциональные выходные* параметры (выходные характеристики); частота и амплитуда входного сигнала – *численные входные* параметры; спектральная характеристика входного сигнала –

*функциональный входной* параметр; температура окружающей среды – *внешний* параметр.

### 3.1. Функциональный уровень АФЛП

Процесс АФЛП выполняется в два этапа [21]. Первый этап – это этап проектирования функциональных схем. Вторым этапом является этап логического проектирования, на котором разрабатывается логическая схема устройств, т.е. схема на уровне логических элементов: сумматоров, регистров, триггеров, счётчиков и др. Исходной информацией для разработки служат функциональные схемы, алгоритмы их работы и система базовых логических элементов, из которых строится устройство.

Подчеркнём, что в нашем курсе мы уделим основное внимание этапу функционального моделирования (ФМ). Суть ФМ состоит в разбиении РЭС на отдельные функциональные блоки (элементы 1...5 на рис. 3.1), каждый из которых выполняет то или иное функциональное преобразование сигнала (усиление, ограничение, интегрирование, фильтрация, детектирование и др.), и расчёте формы выходного сигнала и его основных параметров в каждом узле полученной функциональной схемы.



**Рис. 3.1. Преобразование устройства в виде функциональной схемы для выполнения моделирования**

При этом под формой сигнала понимается либо зависимость сигнала от времени  $x(t)$  при моделировании во временной области, либо эквивалентное представление сигнала в виде изображения по Лапласу  $x(p)$  или зависимости от комплексной частоты  $j\omega$  при моделировании в частотной области.

Основным требованием при функциональном (системном) моделировании является высокая скорость моделирования, необходимая для того, чтобы за короткое время можно было исследовать большое число различных вариантов функциональных схем. Поскольку этап проектирования функциональной схемы относится к начальным этапам общего процесса проектирования, то высокой точности от ФМ не требуется.

Первым основным допущением, характерным для ФМ, является развязка отдельных блоков функциональной схемы, т.е. независимость характеристик и параметров отдельных блоков от режима работы других блоков. Условие развязки блоков эквивалентно выполнению условий  $R_{вх} \rightarrow \infty, R_{вых} = 0$  для каждого из блоков.

Второе основное допущение – допущение об однонаправленности блоков (элементов), т.е. сигнал на выходе любого блока не влияет на сигнал на его входе. Это позволяет считать, что сигнал в функциональных схемах распространяется однонаправлено – от входа к выходу каждого блока (элемента).

Характерным примером задач, решаемых методами ФМ, является исследование поведения систем автоматического регулирования и систем передачи данных, функциональные схемы которых состоят из типовых звеньев.

Другим примером может служить исследование временных диаграмм работы аналогово-цифровых и цифровых схем методами логического

моделирования, которое имеет ряд специфических особенностей, и как одно из видов функционального моделирования подробно рассматривается в [21].

Несмотря на всё многообразие функциональных блоков (элементов) их можно свести к следующим четырём основным типам, которые будем называть базовыми: генераторы (источники) сигналов, безынерционные блоки, инерционные линейные блоки и инерционные нелинейные блоки. Основной характеристикой таких блоков при ФМ является их функция преобразования, которая связывает входной и выходной сигналы.

Подробно вид этих функций для перечисленных выше четырёх типов базовых блоков (элементов) обсудим позже в главе 4.

### 3.2. Функциональный уровень [АСхП](#)

Вначале сформулируем основные задачи схемотехнического проектирования и моделирования.

Каждый из пяти функциональных уровней проектирования: [АСтП](#), [АФЛП](#), [АСхП](#), [АКП](#) и [АКТП](#) – включает решение следующих задач: расчета, анализа, оптимизации, синтеза и выпуска технической документации. Эти задачи называют также *проектными* процедурами. Рассмотрим эти задачи на примере схемотехнического проектирования, которые имеют здесь следующее содержание.

**Расчет** – определение выходных параметров и характеристик устройств при неизменных значениях его внутренних параметров и постоянной структуре. Пример: расчет широкополосного усилителя, включая расчет режима по постоянному току, полюсу пропускания, площадь усиления и т.п.

**Анализ** – определение изменения выходных параметров и характеристик устройства в зависимости от изменения его внутренних и входных параметров. В случае применения ПЭВМ задача расчета часто называется одновариантным анализом, а задача анализа – многовариантным

анализом. Например, вариация (*stepping*) номиналов пассивных компонентов оценивает их влияние на функциональные выходные характеристики (АЧХ и ФЧХ) усилителя.

**Оптимизация** – определение наилучших в том или ином смысле значений выходных параметров и характеристик путем целенаправленного изменения внутренних параметров устройства (при параметрической оптимизации) или структуры устройства (при структурной оптимизации). При этом большое значение имеет опыт разработчика, а также используются методы оптимизации проектных решений и специальный математический аппарат теории чувствительности.

Подчеркнем, что наиболее сложными процедурами являются задачи **параметрического и структурного синтеза**. В общем случае синтезом называется генерация исходного варианта устройства, включая его структуру (структурный синтез) и значения внутренних параметров (параметрический синтез). Указанная генерация может выполняться различными способами: выбором из уже известных устройств, построением на основе определенных теоретических соотношений, путем изобретательства, эвристического решения и др. Примеры эвристических решений: двойной *RC*-мост Вина, схема *RC*-генератора Сифорова, автогенератор по схеме Клаппа, трехточка Ричарда Ши и др. Полученное в результате синтеза устройство не обязательно должно быть наилучшим, но обязательно работоспособным, т.е. иметь практический смысл. Если же полученное устройство – наилучшее в каком-либо смысле, то такой синтез называется *оптимальным*. Подчеркнем, что задача синтеза – это весьма сложная задача и в большинстве случаев не может быть решена автоматически без участия и помощи специалиста-разработчика. В конце концов, любой сложный алгоритм и соответствующая ему программа разрабатываются человеком.

Решение задачи **разработки и выпуска технической документации** необходимо для изготовления и последующей эксплуатации конкретного

радиоэлектронного устройства. На этом этапе выполняется компоновка и размещение элементов и узлов, разводка печатных и проводных соединений, а также решаются задачи теплоотвода, электрической прочности, защиты от внешних воздействий и т.п. Затем проводится технологическая подготовка производства, которая предполагает разработку технологических процессов изготовления отдельных блоков и всей системы в целом.

Теперь обсудим существующие типы объектов схемотехнического проектирования и моделирования.

Как правило, все радиоэлектронные устройства (РЭУ), проектируемые на ПЭВМ, разделяют на три типа: аналоговые, дискретные и цифровые.

К **аналоговым** относятся устройства, в которых используются аналоговые сигналы, или сигналы аналогичные, полностью подобные порождающему его физическому процессу. Эти сигналы являются непрерывными во времени. Примеры: сигнал гармонической формы, пилообразной, треугольной и др.

В **дискретных** устройствах используются *дискретные* сигналы, которые образуются из аналоговых путем дискретизации по времени.

К **цифровым** относят устройства, рабочие сигналы которых закодированы в виде чисел, обычно представляемых в двоичном коде цифрами 0 и 1 (триггеры, счетчики, регистры, микропроцессоры, микроконтроллеры и т.п.). Эти сигналы получают из аналоговых путем использования двух операций: дискретизации (получение выборок, отсчетов) и квантования.

Наконец, существуют промежуточные классы устройств: аналого-дискретные и аналого-цифровые.

В **аналого-дискретных** устройствах используют дискретный способ изменения параметров аналоговых устройств без явного дискретизатора. Например, электронные схемы на переключаемых МОП - конденсаторах.

К *аналого-цифровым* устройствам относятся разного типа преобразователи: аналого-цифровые (аналог – код, АЦП), цифро-аналоговые (код – аналог, ЦАП), спецвычислители, процессоры с аналоговыми устройствами ввода и вывода и др.

Наконец, рассмотрим в несколько упрощенном виде процесс автоматизированного схемотехнического проектирования [РЭУ](#). Он состоит из нескольких этапов (см. рис. 3.2).

На первом этапе (1) сложное проектируемое устройство разбивается на функционально законченные блоки и вырабатываются частные технические задания (ТЗ) на каждый отдельный блок. ТЗ предусматривает описание внешних и внутренних параметров: входных и выходных сигналов, диапазона частот, потребляемой мощности, условий эксплуатации, предельных допусков на основные характеристики и т.п. На этом этапе очень многое зависит от личности разработчика-конструктора: от его знаний, интуиции, интеллекта и кругозора.

На втором этапе (2) после формулировки ТЗ на разрабатываемый блок составляется его принципиальная электрическая схема начального (нулевого) приближения. Это обычно делается разработчиком также на основании собственного опыта и опыта предыдущих разработок. Здесь же выбираются компоненты схем, как-то: транзисторы, диоды, ИМС, резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности и др., а также номинальные значения и допуски на параметры компонентов.

Далее на третьем этапе (3) выбирается система автоматизированного схемотехнического проектирования (моделирования), а в ней программа, которая наилучшим образом подойдет для анализа данной электронной схемы и позволит судить о соответствии ТЗ выбранной схеме. Подчас в выбранном пакете требуется не одна, а группа программ для проведения всех необходимых вычислений. Например, анализ по постоянному току, анализ во временной и частотной областях.

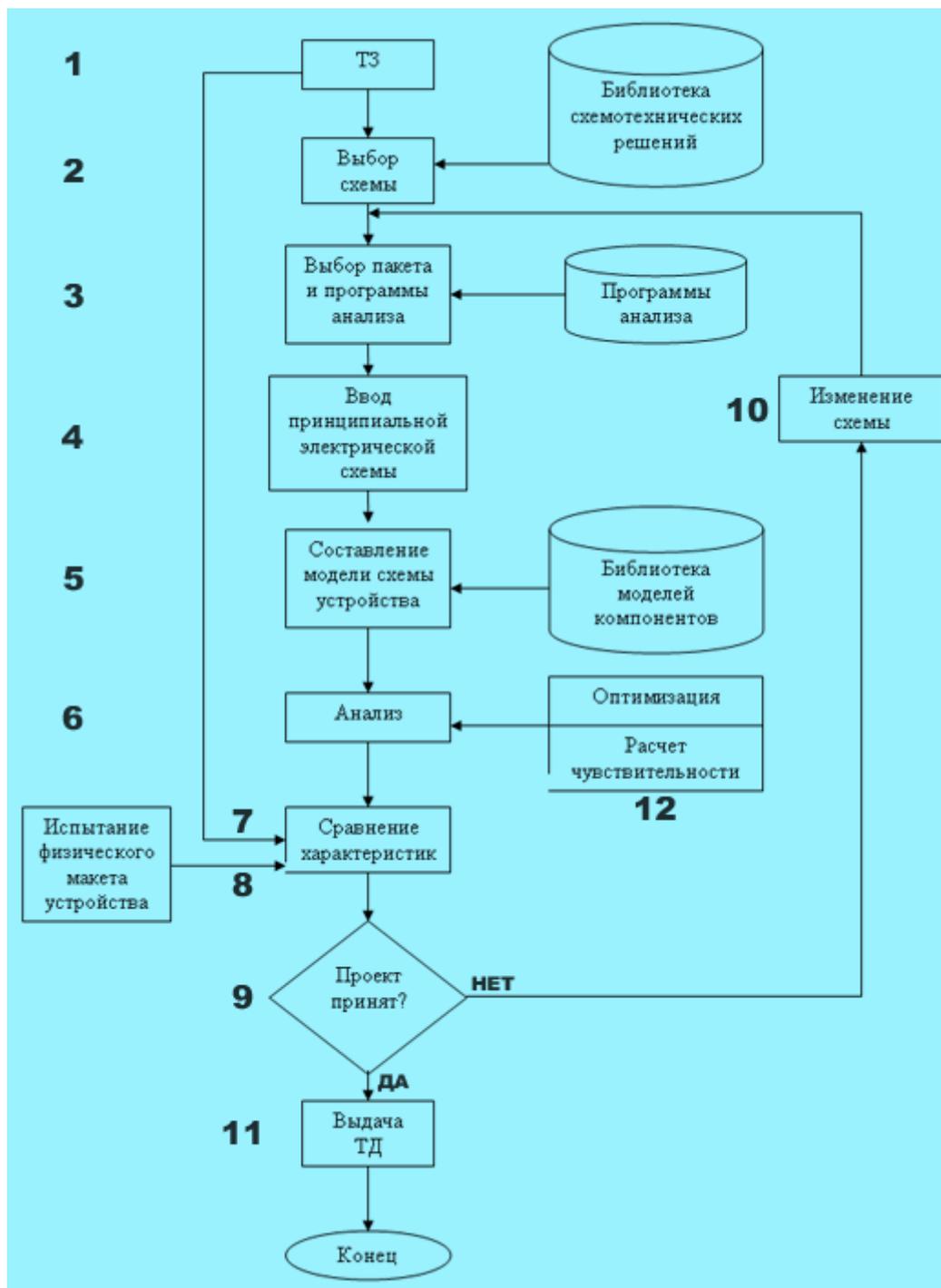


Рис.3.2.Основные этапы автоматизированного проектирования электронных схем

Затем принципиальная схема проектируемого блока подготавливается для проведения компьютерного анализа и вводится в память ПЭВМ текстовым или графическим способом (этап 4).

Далее на основании встроенной библиотеки моделей компонентов *автоматически* составляется математическая модель анализируемого устройства по введенной принципиальной схеме (этап 5).

На этапе 6 производится анализ математической модели электронной схемы в диалоговом режиме. Например, в случае анализа схемы аналогового устройства предполагается выполнение следующих видов расчетов:

- расчет схемы по постоянному току;
- расчет схемы в частотной области; например, вычисление АЧХ и ФЧХ, спектральной плотности шума;
- расчет во временной области; например, определение переходных и импульсных характеристик, проведение спектрального анализа.

Полученные в результате анализа характеристики схемы сравниваются с данными ТЗ и (или) с результатами испытаний макета (этапы 7 и 8).

На основании этого сравнения принимается решение о принятии или отклонении рассмотренного варианта проекта (этап 9). Такое решение проводится неформально, так как в некоторых случаях инженерное понимание сути дела позволяет пренебречь некоторым расхождением результатов компьютерного анализа с ТЗ. После принятия проекта разрабатывается техническая документация для последующего изготовления разработанного устройства и проведения испытаний (этап 11).

Если характеристики неудовлетворительны, то принципиальная схема и (или) модели компонентов должны быть изменены (этап 10).

Цикл анализа затем повторяется снова. Именно здесь, при проведении многовариантных расчетов, компьютерные программы анализа электронных схем особенно полезны: они дают возможность автоматически в течение короткого времени провести анализ многих вариантов. Модификация схемы может производиться также с помощью специальных программ оптимизации на ПЭВМ (этап 12), в которых широко применяются методы оптимизации

проектных решений, основанных на решении задач математического (линейного и нелинейного) программирования. В этих задачах производится поиск минимума или максимума некоторой целевой функции, зависящей от многих переменных при наличии ограничений на эти переменные. При проектировании РЭУ эта целевая функция отображает качество работы, стоимость аппаратуры и иные характеристики, зависящие от параметров компонентов, оптимальные значения которых требуется найти в результате решения задачи. Ограничения же формулируются в виде системы соотношений, сужающих допустимую область изменения параметров компонентов при решении задачи оптимизации РЭУ.

По окончании оптимизации можно рассчитать чувствительность схемы, оценить влияние разброса параметров компонентов и получить другие важные характеристики. Таким образом, при таком процессе проектирования решаются задачи, связанные с расчетом, анализом и оптимизацией схемных решений.

Что касается задачи синтеза, то это весьма сложная задача, ее можно жестко алгоритмизировать только для некоторых частных случаев [13,20], например, существует методика классического синтеза пассивных и активных аналоговых и цифровых частотных фильтров, классического синтеза широкополосных согласующих устройств, синтеза цифровых автоматов. В других случаях обычно задача синтеза решается эвристическим путем, основываясь на предыдущем опыте, путем изобретательства.

Подчеркнем, что в процессе конструирования и разработки технологии также может потребоваться коррекция принципиальных схем, структуры системы и даже исходных данных. Поэтому процесс проектирования является не только *многоэтапным*, но и *многократно корректируемым* по мере его выполнения, т.е. процесс носит *итерационный характер*.

Отметим, что автоматизированное проектирование электронных схем с помощью ПЭВМ имеет ряд преимуществ перед традиционным способом

проектирования “вручную” с последующей доводкой на физическом макете. Разработчик может использовать возможности ПЭВМ в нескольких областях. Во-первых, с помощью прикладных программ гораздо легче наблюдать эффект варьирования параметров схемы, чем с помощью сугубо экспериментальных исследований. Во-вторых, имеется возможность анализировать критические режимы работы устройства без физического разрушения его компонентов. В-третьих, программы анализа позволяют оценить работу схемы при наихудшем сочетании параметров, что трудно и не всегда возможно осуществить экспериментально. В-четвертых, программы дают возможность провести такие измерения на модели электронной схемы, которые трудно выполнить экспериментально в лаборатории. Особенно это утверждение справедливо для БИС и СБИС.

### **3.3. Понятие о математических моделях на разных функциональных уровнях проектирования**

В общем случае под математической моделью какого-либо реального объекта понимается любое формализованное (математическое) описание <sup>1)</sup>, отражающее с требуемой точностью поведение этого объекта в заданных (реальных) условиях.

Основными характеристиками модели являются тип рабочего сигнала, способ представления, характер зависимостей, уравнений и т.д.

Классификация моделей по этим признакам приведена на рис. 3.3.

Говоря о различных способах представления моделей, следует отметить аналитические модели как наиболее простые; алгоритмические модели как наиболее точные и универсальные; табличные модели как

---

<sup>1</sup> То-есть записанное с помощью математических (условных) однозначно трактуемых символов.

наиболее эффективные в смысле затрат машинного времени на их обработку, но требующие больших объёмов памяти.

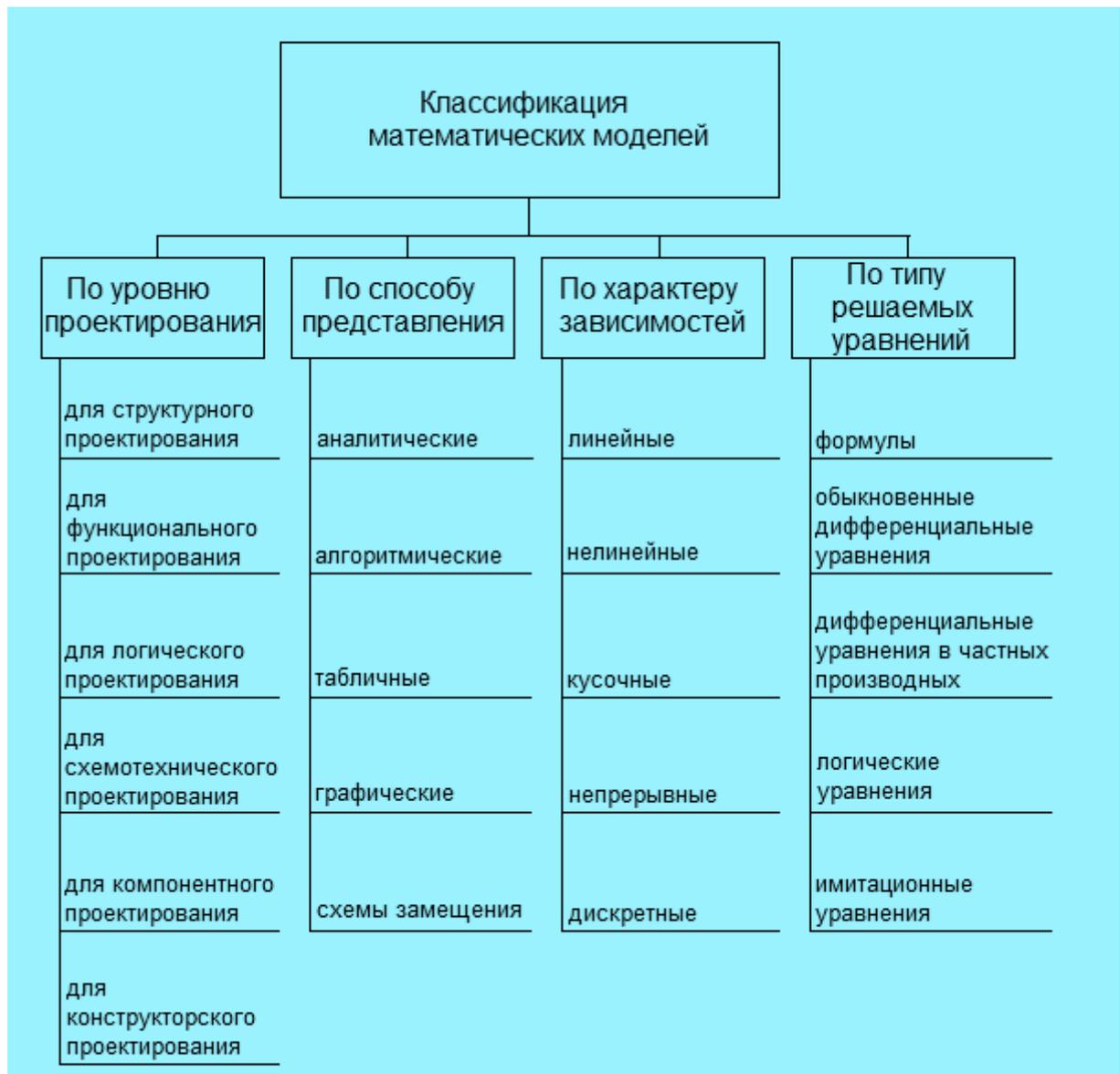
Рассмотрим модели объектов на уровне решаемых уравнений, которые используются на разных функциональных уровнях проектирования.

На компонентном уровне, например, для проектирования компонентов интегральных микросхем, очень часто используют уравнения в частных производных, описывающие процессы в полупроводниковых или плёночных структурах.

Если распределённым характером процессов можно пренебречь, как, к примеру, в МОП-транзисторах, то вместо распределённых используются сосредоточенные модели, в которых внутренними параметрами обязательно должны быть физико-топологические или электрофизические параметры компонента, характеризующие его размеры, топологию, свойства материалов и т.д.

На схемотехническом уровне проектирования модели электронных компонентов в общем случае представляются в виде обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих компонент его схемой замещения с сосредоточенными параметрами.

На функциональном уровне модели компонентов (в данном случае функциональных блоков) – это функции или алгоритмы, позволяющие по заданной форме входного сигнала  $x_{\text{ВХ}}(t)$  или  $x_{\text{ВХ}}(j\omega)$  найти форму выходного сигнала  $x_{\text{ВЫХ}}(t)$  или  $x_{\text{ВЫХ}}(j\omega)$ .



**Рис. 3.3. Классификация математических моделей**

Наконец, на уровне структурного проектирования модели компонентов обычно считаются идеальными в смысле выполнения своих функций, так как на структурном уровне чаще всего обычно изучают лишь характерные структуры, в том числе точностные, которые обусловлены тем или иным способом соединения этих компонентов и их составом, а не их неидеальностью.

### *Контрольные вопросы*

1. В чем состоит этап функционального моделирования на уровне АФЛП?
2. Какова возможная классификация функциональных базовых блоков, исходя из реализуемой ими функции преобразования?
3. Дайте характеристику проектным процедурам, которые возникают на каждом функциональном уровне проектирования.
4. Перечислите существующие типы объектов схмотехнического проектирования и моделирования и дайте им краткую характеристику.
5. Какие этапы можно выделить в процессе автоматизированного схмотехнического проектирования РЭУ? Какие виды работ выполняются на каждом из этапов?
6. Сформулируйте определение термина «математическая модель реального объекта». Назовите основные характеристики такой модели.
7. Дайте характеристику моделям объектов на уровне решаемых уравнений, которые используются на разных функциональных уровнях автоматизированного проектирования.