

## 1.8 Программные средства функционального проектирования РЭС

Основные программные средства функционального проектирования РЭС представлены в таблице 1.

Таблица 1

Уровень проектирования	Задачи	САПР, ППП, среды, программы
Функциональный	Функциональное моделирование РЭУ (системы радиоавтоматики и другие радиотехнические устройства)	<b>SystemView</b> (Elanix), <b>Simulink</b> , Signal Processing (MatLab),
	Функциональное и логическое моделирование цифровых схем	<b>VHDL</b> (язык описания аппаратуры), <b>OrCad</b>
	Моделирование систем сбора и обработки данных	<b>LabView</b> , <b>LabWindows</b> (NI)
	Проектирование устройств цифровой обработки сигналов, в том числе проектирование цифровых фильтров	<b>DSPworks</b> , <b>SigLab</b> , <b>System View</b> , <b>SPW/HDS Monarch</b> , <b>QEDesign 1000+</b>
	Проектирование схем на основе ПЛИС и микроконтроллеров	<b>Max+Plus</b> (Altera) <b>WebFITTER</b> (Xilinx) <b>Easy Analog Design Software</b> (Motorola), <b>Nexar</b> , <b>MPLab</b> , <b>PROTEUS</b> , <b>TASKING</b> (программирование контроллеров)
Схемотехнический	Схемотехническое моделирование аналоговых и аналого-цифровых устройств, в т. ч. проектирование аналоговых фильтров	Pspice → Design Lab 8.0, → <b>OrCad 9.0</b> <b>Electronics WorkBench</b> , <b>APLAC 7.0</b> , <b>MicroCap Dr. Spice</b> (ф. Deutch Research) <b>CircuitStudio</b> (для PROTEL) <b>OrCad 9.0</b>
	Проектирование аналоговых программируемых БИС	<b>Pac Designer</b> (Lattice Semiconductors) <b>AnadigmDesigner</b> (беспл.)
Компонентный	Проектирование устройств СВЧ	<b>MicroWave Office</b> (AWR), <b>Analog Office</b> , <b>Visual System Simulator</b> , <b>APLAC</b> , <b>SuperNEC</b>



## 2 Математические основы компьютерного моделирования компонентов РЭС

### 2.1 Математические модели и их характеристики

Моделирование это замещение исследуемой системы её условным образом (моделью), с целью последующего изучения свойств системы посредством исследования свойств ее модели.

Модель – упрощенное представление реального явления или объекта. Различают физические и математические модели.

Математическая модель технического объекта – совокупность математических объектов (чисел, переменных, множеств, графов, матриц и др.) и отношений между ними, адекватно отражающих некоторые свойства объекта с требуемой степенью точности.

Математическую модель (ММ) можно рассматривать как некоторый оператор, ставящий в соответствие системе внутренних параметров объекта  $x_1, \dots, x_n$ , внутрисистемных параметров  $z_1 \dots z_i$ , управляющих параметров  $u_1 \dots u_j$  совокупность функционально связанных между собой внешних параметров  $y_1, \dots, y_m$  (рисунок 3).

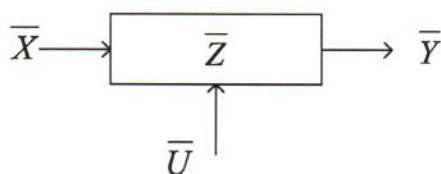


Рисунок 3 – Объект моделирования

Математическое моделирование – анализ объекта, представленного математической моделью.

Примерами ММ могут быть уравнения вольт - амперных характеристик или дифференциальные уравнения переходных процессов в компоненте.

Пример. Математической моделью полупроводникового диода можно считать уравнение его вольт-амперной характеристики:

$$i = I_0 \left( e^{\frac{u}{\varphi_T}} - 1 \right) = q \frac{SD_p p_0}{L_p} \left( e^{\frac{u}{\varphi_T}} - 1 \right),$$

где  $I_0$  — тепловой ток;  $\varphi_T$  — температурный потенциал;  $q$  — заряд электрона;  $S$  — площадь  $p-n$  перехода;  $D_p$  — коэффициент диффузии дырок;  $p_0$  — равновесная концентрация дырок;  $L_p$  — диффузионная длина дырок в базе диода.

В данном случае внешними параметрами модели являются ток  $i$  и напряжение  $u$ , а внутренними можно считать либо электрический параметр  $I_0$ , либо геометрические и электрофизические параметры диода  $S$ ,  $p_0$ ,  $L_p$  и др.

Математические модели могут быть представлены:

- действительными или комплексными величинами;
- векторами, матрицами;
- геометрическими образами;
- неравенствами, функциями, функционалами;
- множествами;



- алгебраическими, разностными, дифференциальными и интегральными уравнениями;

- функциями распределения вероятности, статистиками.

Если математическая модель реализована на ЭВМ, то моделирование называется машинным или компьютерным.

Пример. Физическая модель колебательного контура может быть представлена в виде принципиальной схемы (рисунок 4), элементами которой являются резистор с сопротивлением  $R$ , катушка индуктивности с индуктивностью  $L$  и конденсатор емкостью  $C$ .

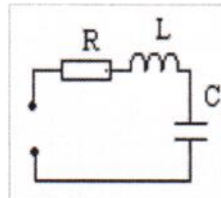


Рисунок 4 – Схема колебательного контура

Математическая модель процесса  $g(t)$  накопления конденсатором заряда, протекающего в электрической цепи под воздействием электродвижущей силы  $E(t)$ , представляется обыкновенным дифференциальным уравнением второго порядка с постоянными коэффициентами:

$$a_1 \frac{\partial^2 z(t)}{\partial t^2} + a_2 \frac{\partial z(t)}{\partial t} + a_0 z(t) = f(t).$$

Для колебательного контура:  $z(t)=g(t)$ ,  $f(t)=E(t)$ ,  $a_1=R$ ,  $a_2=L$ ,  $a_0=1/C$ .

Одно из основных требований к внутренним параметрам модели — возможность их измерения, прямого или косвенного. В противном случае ценность модели существенно падает, поскольку требования к внутренним параметрам, полученные в результате анализа и оптимизации схемы, не возможно реализовать.

## 2.2 Виды математического моделирования

В инженерной практике используются два вида математического моделирования: аналитическое и имитационное.

При аналитическом моделировании модель системы или ее элементов имеет вид функциональных зависимостей между входными, выходными и параметрами состояния системы. Это могут быть математические или логические функции, а модели могут иметь вид алгебраических, дифференциальных, интегро-дифференциальных уравнений или логических условий.

Исследования поведения системы или ее элементов по аналитическим моделям состоит в решении аналитически, либо численными методами соответствующих уравнений и интерпретации полученных результатов.

Последовательность действий при аналитическом моделировании:

- 1) теоретическое исследование характеристик объекта (надежности, производительности, точности и др.);
- 2) вывод расчетных формул, уравнений или алгоритмов и реализация их на ЭВМ.



Основные способы реализации аналитического моделирования при проектировании РЭС:

1. Программирование: получение ММ в виде системы уравнений → выбор или разработка численного метода (дискретизация) → разработка алгоритма → составление программы (Pascal, Delphi).

2. С помощью математических программ: получение ММ в виде системы уравнений → решение с помощью универсальных математических программ и сред → инженерная интерпретация полученных результатов (MathCAD, MatLab, Mathematics).

3. В среде схемотехнического моделирования: разработка принципиальной или функциональной схемы → описание схемы и заданий на моделирование на входном языке системы моделирования (графическое или текстовое). Получение и решение ММ реализует сама среда! (Electronics WorkBench, OrCAD).

Имитационное моделирование используется для анализа сложных систем на уровне структурных и функциональных схем аналоговых устройств и для моделирования цифровых устройств (Simulink, MatLab, LabView, SystemView, MicroLogic, языки VHDL, GPSS). Процесс функционирования исследуемого объекта воспроизводится на ЭВМ в отсутствие аналитических зависимостей между входными, выходными параметрами и параметрами состояния системы, при этом сохраняется логическая структура системы и последовательность протекания процессов во времени. По результатам имитационного моделирования на ЭВМ можно прогнозировать поведение исследуемой системы.

Последовательность действий:

- 1) построение модели проектируемого устройства;
- 2) реализация модели на ЭВМ;
- 3) расчет характеристик объекта проектирования на основе результатов моделирования.

### 2.3 Классификация математических моделей РЭС

1 По характеру зависимостей:

1.1 Линейные, нелинейные. Линейные модели основаны на использовании только линейных зависимостей между токами и напряжениями в случае аналитического представления только линейных пассивных элементов и идеальных генераторов тока и напряжения в случае представления в виде схем замещения. Нелинейные модели обязательно включают в себя элемент с нелинейной вольт-амперной характеристикой.

Для проверки моделей на линейность используют принцип суперпозиции, например:

$$y^2 = (y_1 + y_2)^2 \neq y_1^2 + y_2^2 - \text{нелинейная ММ};$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} = \frac{\partial (U_1 + U_2)}{\partial x} = \frac{\partial U_1}{\partial x} + \frac{\partial U_2}{\partial x} - \text{линейная ММ}.$$

Линейные модели описываются линейными уравнениями (алгебраическими, дифференциальными или разностными).



## 1.2 Статические – динамические.

Если среди независимых переменных модели есть время, то модель является динамической, иначе - статической.

## 1.3 Стационарные – нестационарные.

Стационарная – модель с неизменными во времени параметрами, нестационарная – с переменными.

1.4 Модели со сосредоточенными параметрами и с распределенными параметрами.

Модель с распределенными параметрами – ММ, в которой учитывается пространственная зависимость ее параметров. Такие модели описываются дифференциальными уравнениями в частных производных.

## 1.5 Детерминированные и стохастические модели.

Детерминированная – модель, состояние которой можно определить в любой момент времени; для стохастической известно лишь множество возможных состояний.

## 1.6 Непрерывные и дискретные модели.

$$f(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 2, & x > 6 \\ 3, & x > 20 \end{cases} \quad \text{- дискретная ММ;}$$

$f(x) = \sin x$  – непрерывная ММ.

## 2 По характеру отражаемых свойств:

- функциональные – отражают свойства, связанные с процессом функционирования объекта,
- технологические – с процессами изготовления,
- структурные – отражают чаще всего геометрические свойства.

## 3 По способу получения модели:

- теоретические – полученные на основе изучения физических закономерностей функционирования объекта,
- эмпирические – на основе изучения внешних проявлений объекта.

## 4 По способу представления:

- аналитические – представленные в формульном виде,
- алгоритмические – в виде реализации численного метода,
- топологические (в виде графов),
- табличные (таблицы и матрицы),
- схемы замещения,
- описание на входном языке САПР.

Схемы замещения сложных компонентов схем строятся из базовых элементов. В зависимости от цели моделирования для одного объекта может быть построено несколько моделей. Так, работа схемы в режиме по постоянному току описывается системой нелинейных уравнений, работа той же схемы в динамике – системой интегро-дифференциальных уравнений. Для транзистора (рисунк 5), операционного усилителя существует несколько моделей, представленных разными схемами замещения.

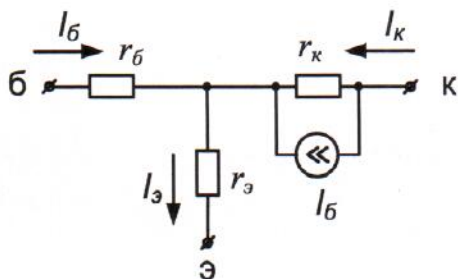


Рисунок 5 – Т-образная схема замещения транзистора

В схемотехническом моделировании базовыми считаются двухполюсники R, C, L, управляемые и неуправляемые источники токов и напряжений. Простейшая модель операционного усилителя может быть построена в виде управляемого источника напряжения с заданным коэффициентом усиления (рисунки 6 - 9).

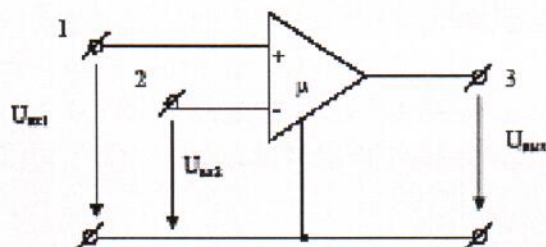


Рисунок 6 – Схема операционного усилителя

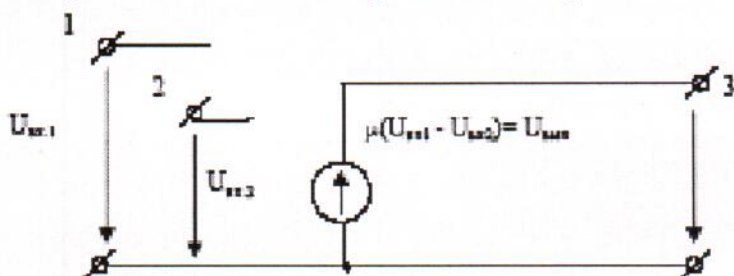


Рисунок 7 – Схема замещения операционного усилителя

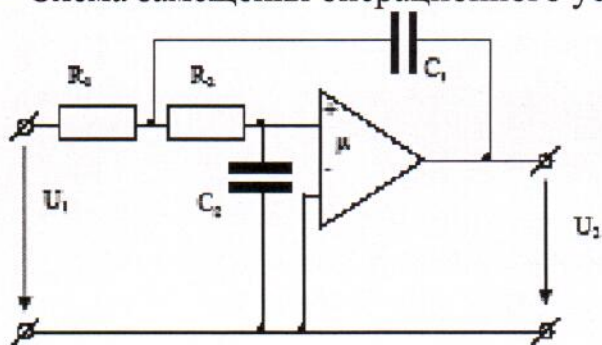


Рисунок 8 – Схема цепи с операционным усилителем

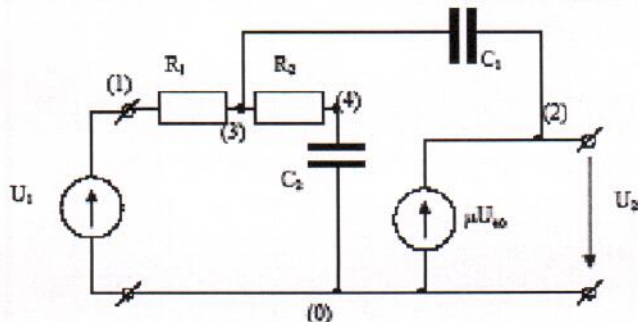


Рисунок 9 – Схема цепи со схемой замещения операционного усилителя



При компьютерном моделировании и проектировании часто используют смешанные формы представления: так, модель диода можно задать аналитически в виде уравнения вольт-амперной характеристики и графически в виде схемы замещения или графика вольт-амперной характеристики. Табличное задание используется лишь в тех случаях, когда компонент описывается сложной экспериментальной зависимостью, для которой трудно найти удобное и точное аналитическое выражение или схему замещения.

5 По уровню проектирования и типу решаемых уравнений:

Каждому аспекту и уровню абстрагирования соответствуют свои модели, различающиеся принадлежностью к используемому математическому аппарату.

Таблица 2

Аспект или уровень абстрагирования	Объекты проектирования	Математические модели устройств, схем	Математические модели компонентов
<b>Системный</b>	Вычислительные системы, радиотехнические системы	Имитационные модели массового обслуживания	
<b>Функционально-логический</b>	Устройства и блоки цифровой аппаратуры	Системы логических уравнений, программы.	Логические уравнения
	Устройства и блоки аналоговой аппаратуры	Системы обыкновенных дифференциальных уравнений, системы интегродифференциальных уравнений	Алгебраические уравнения, интегродифференциальные уравнения
<b>Схемотехнический</b>	Радиоэлектронные схемы	Системы ОДУ, системы интегродифференциальных уравнений	Алгебраические уравнения, системы уравнений
<b>Компонентный</b>	Элементы ИМС в процессе их функционирования и изготовления, полупроводниковые структуры и компоненты	Уравнения математической физики (ДУ в частных производных)	Уравнения в частных производных
<b>Конструкторский</b>	Печатные платы	Графы, таблицы, матрицы, регрессионные уравнения	Графы, матрицы

6 По диапазону рабочих сигналов различают модели для малого сигнала (малосигнальные) и для большого сигнала. Обычно малосигнальные модели — линейные, поскольку они получаются при рассмотрении малых отклонений то-



ков и напряжений от стационарной рабочей точки, так что нелинейностью характеристик можно пренебречь. Модели большого сигнала, как правило, нелинейны.

7 По диапазону рабочих частот различают низкочастотные модели, в которых инерционность модели на высоких частотах не учитывается, и высокочастотные модели, в которых она учтена либо дифференциальным уравнением, описывающим переходный процесс внутри компонента, либо дополнительными внешними емкостями.

8 По уровню проработки:

- исходное уравнение  $F(x)=0$ ,

- теоретический алгоритм. Если это нелинейное уравнение, то его решение может быть выполнено с помощью метода Ньютона, тогда теоретический алгоритм будет представлен итерационным алгоритмом реализации формулы  $F'(x^{(k)})\Delta x^{(k)} = -F(x^{(k)})$ , или алгоритмом, соответствующим методу простых итераций  $x^{(k+1)} = x^{(k)} - \lambda F(x^{(k)})$ ,

- машинный алгоритм, учитывает все реальные особенности численной реализации – ограниченная точность вычислений (должен быть предусмотрен критерий остановки вычислений по достижении  $\varepsilon$  ( $\|x^{(k+1)} - x^{(k)}\|, < \varepsilon$ ), остановку вычислений при несходимости и др.).

#### 2.4 Методы построения моделей компонентов. Оценка точности соответствия модели реальному компоненту

Как правило, в САПР обращение к модели заключается в перечислении численных значений параметров. Параметры – коэффициенты уравнений, описывающих тот или иной компонент. Модель радиоэлектронного компонента должна быть построена таким образом, чтобы параметрам модели соответствовали реальные измеряемые характеристики моделируемого объекта. Такие характеристики обычно представлены в справочниках или в фирменных описаниях, поставляемых с изделиями.

Общая методика получения ММ компонентов:

1. Устанавливаются свойства моделируемого объекта, подлежащие отображению в модели. При этом определяются смысл и перечень выходных и входных параметров.

2. Выбирается структура модели (система математических соотношений модели в параметрическом виде, с неопределенными численными значениями параметров), часто в виде схем. Схемы должны быть такими, чтобы им однозначно соответствовало математическое описание.

3. Решается задача идентификации, то есть рассчитываются численные значения параметров модели для заданной структуры модели.

4. Определяются погрешности модели в выбранных тестовых задачах. Если условия в тестовых испытаниях не выполняются, переходят к п. 2.

5. Решается задача отыскания допустимых диапазонов изменений внешних параметров, в пределах которых модель адекватна объекту.



Для оценки точности соответствия модели реальному компоненту наиболее часто используются следующие характеристики:

1 Максимальное относительное отклонение в рабочем диапазоне:

$$\delta_i = \frac{|i_m - i_k|_{\text{макс}}}{i_k}, \quad \delta_u = \frac{|u_m - u_k|_{\text{макс}}}{u_k},$$

где  $i_m$ ,  $u_m$ ,  $i_k$ ,  $u_k$  — соответственно токи и напряжения вольт-амперных характеристик модели и компонента.

2 Среднеквадратическое относительное отклонение в рабочем диапазоне:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_1^n \left( \frac{i_{m_j} - i_{k_j}}{i_{k_j}} \right)^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\delta_{i_j})^2}{n}},$$
$$\sigma_u = \sqrt{\frac{\sum_1^n \left( \frac{u_{m_j} - u_{k_j}}{u_{k_j}} \right)^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\delta_{u_j})^2}{n}},$$

где  $n$  — число точек измерения.

Данная характеристика точности усредняет отдельные «выбросы» ошибок и характеризует расхождение модели и компонента не в одной точке, а в некотором диапазоне.