

**Т.И. ЧЕРНЫШОВА, В.А. ТЁТУШКИН**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ В  
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ  
СРЕДСТВАХ**

**ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ**

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Тамбовский государственный технический университет»

**Т.И. ЧЕРНЫШОВА, В.А. ТЁТУШКИН**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ В  
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ  
СРЕДСТВАХ**

Программа и методические указания  
по выполнению контрольных работ  
для студентов заочного и дистанционного обучения  
специальности 210201



---

Тамбов  
Издательство ТГТУ  
2005

УДК 621.396.6.001.57(07)  
ББК ◀844-02я73-5  
Ч-497

Рецензент

Доктор технических наук, профессор  
*Д.А. Дмитриев*

**Чернышова, Т.И.**

Ч-497 Моделирование в радиоэлектронных средствах : программа и метод. указ. по выполнению контрольных работ / Т.И. Чернышова, В.А. Тётушкин. Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. 24 с.

Даны программа курса «Моделирование в РЭС», методические указания по выполнению контрольной работы, имеются вопросы для самопроверки и список рекомендуемой литературы.

Издание предназначено для студентов заочного отделения и дистанционного обучения специальности 210201.

УДК 621.396.6.001.57(07)

ББК ←844-02я73-5

© Чернышова Т.И., Тётушкин В.А., 2005

© Тамбовский государственный  
технический университет (ТГТУ), 2005

Учебное издание

**ЧЕРНЫШОВА Татьяна Ивановна,  
ТЁТУШКИН Владимир Александрович**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ В  
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ  
СРЕДСТВАХ**

Программа и методические указания  
по выполнению контрольных работ

Редактор З.Г. Чернова  
Компьютерное макетирование Е.В. Кораблевой

Подписано в печать 26.05.2005

Формат 60 × 84 / 16. Бумага офсетная. Печать офсетная  
Гарнитура Times New Roman. Объем: 1,4 усл. печ. л.; 1,3 уч.-изд. л.  
Тираж 100 экз. С. 397<sup>М</sup>

Издательско-полиграфический центр  
Тамбовского государственного технического университета,  
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

## **ВВЕДЕНИЕ**

Курс «Моделирование в радиоэлектронных средствах» (РЭС), изучаемый студентами-заочниками на третьем курсе специальности 210201 «Проектирование и технология радиоэлектронных средств», включает в себя пять тем. Эти темы охватывают, в основном, вопросы построения математических моделей и решения задач моделирования технических объектов, в том числе РЭС.

Целью преподавания данной дисциплины является формирование и развитие фундаментальных знаний при подготовке специалистов в области моделирования в РЭС, применяемого на всех этапах жизненного цикла радиоэлектронных средств и в управлении производством.

Основными задачами дисциплины являются следующие: изучение основ, принципов и методологии моделирования в РЭС; овладение техническими и программными средствами, математическим аппаратом, используемыми в моделировании; получение представлений об автоматизированных системах подготовки производства, технологиях проектирования микропроцессорных средств, интегрированных системах автоматизации проектных работ и управления производством.

Комплекс всех вышеперечисленных вопросов и задач позволяет сформировать инженерное мышление и кругозор конструктора-технолога, необходимые ему как в практической работе, так и на завершающих этапах обучения – при выполнении курсовых работ и дипломного проекта.

Курс «Моделирование в радиоэлектронных средствах» базируется на знаниях, полученных студентами при изучении следующих специальных дисциплин: «Математика», «Физика», «Основы радиоэлектроники», «Информатика и языки программирования».

Во время изучения дисциплины студенты-заочники прослушивают курс лекций, работают с рекомендуемой литературой, выполняют лабораторные работы и одну контрольную работу.

### **ПРОГРАММА КУРСА «МОДЕЛИРОВАНИЕ В РЭС» И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОТДЕЛЬНЫМ ТЕМАМ**

#### ***1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОБЪЕКТАХ И ЗАДАЧАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ***

##### **1.1 Классификация параметров и задач проектирования**

Общие понятия, относящиеся к проектированию любых устройств, независимо от их физической природы: внутренние, выходные, входные и внешние параметры.

Схемотехническое проектирование включает решение задач расчета, анализа, оптимизации и синтеза. Эти задачи называются проектными процедурами.

Проектирование РЭС ведется следующими основными способами: неавтоматизированный расчет по заранее известным соотношениям; физическое моделирование – исследование объектов одной физической природы с помощью объектов, имеющих другую физическую природу, но такое же математическое описание; натурное макетирование; математическое моделирование на ЭВМ.

Обычно под математическим моделированием на ЭВМ понимают весь комплекс вопросов, связанных с составлением математической модели устройства и ее использованием в процедурах расчета, анализа, оптимизации и синтеза.

##### **1.2 Уровни сложности РЭС и уровни автоматизированного проектирования**

Невозможно РЭС разной степени сложности анализировать и проектировать с одинаковой степенью детализации. Поэтому проектирование сложных РЭС представляет собой многоэтапный иерархический процесс, число этапов которого и их содержание зависят от многих причин (особенности объекта проектирования, цели проектирования, используемая элементная база, математический аппарат, уровень технологии, время, отведенное на проектирование и т.д.).

Выделяют системное, структурное, функциональное, схемотехническое проектирование и проектирование компонентов.

Уровни проектирования можно реализовать на основе двух подходов: информационного и физического. При информационном подходе определяется лишь преобразование входного сигнала в выходной без учета реальных внутренних физических процессов. При физическом учитываются все реальные физические процессы и явления.

### **1.3 Типы объектов проектирования**

Обычно проектируемые РЭС делят на аналоговые, цифровые и аналогово-цифровые.

Цифровые – устройства, рабочие сигналы которых закодированы в виде чисел (обычно в двоичной системе). При проектировании цифровых устройств наибольшее значение имеют временные соотношения между моментами появления цифр или чисел и сами числа, а форма реализующих их электрических сигналов имеет меньшее значение.

Аналоговые – устройства, информация о работе которых заключена в различных характеристиках сигнала – форме, спектре и т.д.

Аналого-цифровые – устройства, содержащие как аналоговую, так и цифровую части, осуществляющие преобразования аналог-код или код-аналог.

### **1.4 Типы процессов проектирования**

Теоретически можно различить два основных типа процессов проектирования: «сверху вниз» (от сложного к простому) и «снизу вверх» (от простого к сложному). Сложные РЭС (системы, устройства) проектируются «сверху вниз», а относительно простые (элементы, узлы) – «снизу вверх». Практически процесс проектирования сочетает оба способа на различных этапах. Комплекс декомпозируется на устройства, те, в свою очередь, на узлы, а после проектирования узлов начинается обратный процесс: «сборка» узлов в устройство, а устройств – в комплекс.

### **1.5 Понятие о математических моделях**

Математическая модель объекта – любое формализованное (записанное с помощью математических, т.е. условных однозначно трактуемых символов) описание, отражающее состояние или поведение объекта с требуемой степенью точности.

Основные характеристики модели – тип рабочего сигнала, способ представления, характер зависимостей, уравнений и т.д.

Модели объектов на уровне исходных уравнений, используемые на разных уровнях проектирования: модели с распределенными параметрами для проектирования компонентов (элементов) ИС; модели компонентов (элементов) для схемотехнического проектирования; модели компонентов для функционального проектирования; модели компонентов для структурного проектирования.

## **2 СТРУКТУРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

### **2.1 Постановка задачи**

Одним из первых этапов проектирования РЭС является проектирование ее структуры. На этом этапе объект проектирования представляется в виде структурной схемы, т.е. совокупности взаимосвязанных достаточно крупных завершенных блоков. При этом физические каналы связи между блоками могут рассматриваться как отдельные блоки с соответствующими параметрами, а графические связи между блоками на схеме считаются идеальными каналами.

Исходными данными при проектировании структурной схемы обычно являются: тип, параметры и характеристики отдельных блоков структуры (надежность, точность, пропускная способность и т.п.); требования к выходным параметрам и характеристикам всей системы (производительность, стоимость, надежность и т.п.).

## **2.2 Основные способы структурного моделирования**

**Аналитическое моделирование.** При анализе функционирования системы возможен случай, когда для каждого блока может быть записано аналитическое выражение, описывающее его работу. При этом аналитическое выражение функционирования всей системы возможно, если функции, описывающие поведение отдельных блоков хорошо известны, не имеют точек разрыва, а отклонениями параметров блока можно пренебречь. Полученную аналитическую зависимость можно исследовать, т.е. определять состояние системы в зависимости от значений ее параметров, входных сигналов и действующих факторов.

**Имитационное моделирование.** Моделирование называется имитационным, если временная последовательность событий в модели и в реальном устройстве одинаковая. Строится имитационная модель – алгоритмическая модель функционирования системы – так, чтобы отразить исследуемые характеристики системы (надежность, точность, производительность). Построение модели системы производится на основе ее описания в виде схем, текстов, формул, таблиц и т.д. При этом в модели реализуется описание каждого из блоков, который предварительно рассматривается автономно, с учетом всех необходимых особенностей его функционирования.

## **2.3 Типовые задачи структурного моделирования**

Исследование надежности системы.

Моделирование производительности системы.

## **2.4 Модели блоков и сигналов**

Модели блоков и сигналов для структурного проектирования достаточно разнообразны и зависят от типа решаемых задач. Три основных типа таких задач: моделирование точности работы, моделирование надежности и моделирование обслуживания (пропускная способность, коэффициент загрузки т.д.).

Независимо от типа задачи, общим для моделей блоков и сигналов является отражение в них статистических свойств моделируемых объектов, поэтому их основу составляют генераторы случайных чисел.

Исследование моделирования равномерного и нормального распределения.

# **3 ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

## **3.1 Постановка задачи**

Одним из важных вопросов, которые приходится решать при проектировании сложных РЭС, является исследование процесса преобразования сигнала по мере его прохождения от входа к выходу РЭС. Это исследование можно проводить на ЭВМ с разной степенью точности – либо весьма точно, что требует больших затрат машинного времени, либо достаточно приближенно, но быстро. В первом случае РЭС моделируется на основе физического подхода методами схемотехнического (электрофизического) моделирования, а во втором – на основе информационного подхода методами функционального (электроинформационного) моделирования.

Суть функционального моделирования (ФМ) состоит в разбиении РЭС на отдельные функциональные блоки, каждый из которых выполняет то или иное функциональное преобразование сигнала (усиление, ограничение, интегрирование и т.д.), и расчете формы сигнала и его основных параметров в каждой точке полученной функциональной схемы.

Основным требованием при ФМ является высокая скорость моделирования, необходимая для того, чтобы за короткое время можно было исследовать большое число различных вариантов функциональных схем.

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

Вторым основным допущением, характерным для ФМ, является допущение об однонаправленности элементов, т.е. сигнал на выходе любого элемента не влияет на сигнал на его входе.

### **3.2 Базовые элементы функциональных схем**

Функциональные элементы можно свести к следующим четырем основным (базовыми) типам: генераторы сигналов, безынерционные элементы, инерционные линейные элементы, инерционные нелинейные элементы. Основной характеристикой элемента при ФМ является его функция преобразования, связывающая входной и выходной сигналы.

### **3.3 Способы моделирования типовых структур**

Большинство существующих функциональных схем (ФС) можно свести к следующим типовым структурам: простая последовательная структура, структура с обратной связью, сложная последовательная структура.

Можно выделить два общих подхода при построении алгоритмов моделирования ФС.

Формальный подход состоит в рассмотрении ФС как обычной ненаправленной структуры, описываемой уравнениями связей элементов (топологическими уравнениями) и уравнениями самих элементов (компонентными уравнениями). Далее к этим уравнениям можно применять любые алгоритмы

мы решения систем уравнений соответствующего класса. Формальность изложенного подхода заключается в том, что при построении алгоритма моделирования не учитываются особенности ФМ – развязки и однонаправленность элементов.

Причинно-следственный или имитационный подход к построению алгоритмов ФМ учитывает эти особенности и состоит в организации процесса моделирования так, чтобы он имитировал последовательное прохождение сигналов от одного элемента к другому в соответствии с принципом: сначала вычисляется причина – входной сигнал, а затем следствие – сигнал на выходе элемента.

### **3.4 Расчет статических временных диаграмм**

Пусть на вход ФС подан сигнал  $x(t)$ , изменяющийся настолько медленно, что инерционностью элементов ФС можно пренебречь и считать схему безынерционной. Получающиеся при этом зависимости  $y(t)$  на выходе и во внутренних точках ФС назовем статическими временными диаграммами (СВД). Расчет СВД позволяет проверить правильность функционирования ФС и выявить ошибки структурного типа, вызванные, например, неверным соединением элементов ФС друг с другом.

Вычисление СВД может быть выполнено двумя способами: последовательного полного сигнала (ППС) и способом мгновенного сигнала.

## **4 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ**

### **4.1 Виды моделей цифровых устройств**

Целью моделирования цифровых устройств (ЦУ) является получение картины логико-временного поведения ЦУ при различных входных воздействиях. Модели ЦУ, используемые при проектировании радиоустройств, можно разделить на две основные группы: физические и логические.

В первом случае отдельные элементы, из которых состоит ЦУ, представляются их электрическими макромоделями, состоящими из базовых элементов теории цепей, на основании которых формируется полная электрическая модель ЦУ. Система уравнений во временной области, соответствующая полной электрической модели ЦУ, обычно представляет собой систему дифференциальных уравнений высокого порядка, решение которой требует больших затрат машинного времени.

Физические модели ЦУ позволяют наиболее полно представить работу устройства во времени с учетом реальных задержек срабатывания элементов, но их целесообразно использовать на заключительном этапе проектирования из-за больших затрат времени на моделирование, когда необходимо иметь данные об устройстве, которые нельзя получить с помощью более простых моделей.

### **4.2 Описание цифровых устройств и его алфавиты в моделях логического уровня**

При моделировании на логическом уровне физическая природа сигналов (ток или напряжение), распространяющихся в ЦУ, не конкретизируется. Сигналы задаются символами, совокупность которых описывает состояние и работу элементов, из которых состоит ЦУ. Совокупность различных символов, используемых при моделировании, называют алфавитом логического моделирования. Между реальными сигналами и символами алфавита всегда можно установить однозначное соответствие.

Простейший из используемых алфавитов для моделирования ЦУ на логическом уровне — двоичный, включающий всего два символа: 0 и 1. Он обеспечивает максимальную скорость моделирования, но не позволяет выявить неоднозначность работы ЦУ и характер переходных процессов.

Для анализа состояний сигналов на элементах ЦУ используют троичный алфавит, содержащий кроме 0 и 1 еще символ неопределенного состояния  $X$ , которому ставится в соответствие процесс перехода из 0 в 1 и обратно либо безразличное состояние сигнала.

Для уточнения характера процесса смены состояний элементов ЦУ используется пятизначный алфавит.

### **4.3 Синхронное моделирование цифровых устройств двоичными алфавитами**

При синхронном моделировании ЦУ на логическом уровне не учитываются задержки срабатывания отдельных элементов, из которых состоит ЦУ. Это позволяет свести моделирование к последовательному вычислению сигналов на выходах элементов ЦУ по значениям сигналов на их входах с помощью булевых уравнений или таблиц истинности, моделирующих каждый элемент. При этом считается, что независимыми переменными, синхронизирующими работу модели устройства, являются события – изменение сигналов на входах ЦУ. После определения состояния, в которое перейдет ЦУ при очередной смене входных сигналов, осуществляется сдвиг модельного времени до момента наступления очередного события.

В промежутке между двумя событиями смены сигналов на входах ЦУ не происходит, а если на входах устройства появятся новые сигналы, то они будут отнесены к началу следующего такта моделирования. Контроль временного интервала между событиями необходим для построения временных диаграмм, наглядно представляющих работу ЦУ в предположении нулевой длительности переходных процессов.

Алгоритмы решения системы логических уравнений делят на две группы: сквозные и событийные.

### **4.4 Асинхронное моделирование цифровых устройств двоичными алфавитами**

Алгоритмы синхронного моделирования ЦУ двоичным алфавитом обладают высоким быстродействием, но результаты моделирования ими не могут выявить ошибки в работе ЦУ, которые могут возникнуть из-за задержек в срабатывании элементов. Поэтому были разработаны более медленные, но зато более адекватные реальной работе ЦУ асинхронные алгоритмы, учитывающие задержки срабатывания отдельных элементов. Задержка срабатывания элемента цифрового устройства зависит от многих факторов: от того, на каком входе элемента и каким образом произошла смена сигнала, от начального состояния элемента, цепей питания и т.д.

При рассмотрении алгоритмов принимают следующие допущения: задержки срабатывания не зависят от вида переключения; задержки в линиях передачи равны нулю; переходные процессы в ЦУ завершаются до следующей смены входных сигналов.

Применяют асинхронное сквозное моделирование и асинхронное событийное моделирование.

## **5 СХЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

Под схмотехническим моделированием (СхМ) понимают моделирование электрических процессов в электронных устройствах, традиционно изображаемых в виде принципиальных электрических схем, т.е. соединений условных обозначений диодов, транзисторов, резисторов и т.д.

Схмотехническое моделирование электрических процессов учитывает, в отличие от информационного, реальные физические ограничения в электрических процессах – так называемые законы сохранения. Это первый и второй законы Кирхгофа. Они вытекают из законов сохранения заряда и работы и называются обычно законами электрического равновесия. Необходимость выполнения этих законов в каждой расчетной точке требует решения соответствующих уравнений электрического равновесия, что составляет наиболее существенное отличие СхМ от функционального, логического, и других видов информационного моделирования, не требующего решения уравнений равновесия.

СхМ соответствуют электрические модели. Понятие электрической модели включает либо систему уравнений, связывающих напряжения и токи в электрической схеме, являющейся моделью объекта, либо саму электрическую схему, составленную из базовых элементов (резисторов, конденсаторов и т.п.), на основе которой можно в ЭВМ получить систему уравнений, связывающих напряжения и токи в модели объекта.

Математическая модель в СхМ – система уравнений, которая в общем случае состоит из двух подсистем – компонентной и топологической. Компонентная подсистема состоит из моделей отдельных элементов, а топологическая – из уравнений электрического равновесия, составленных на основе законов Кирхгофа.

Цель СхМ состоит обычно в определении формы и параметров сигналов тока и напряжения, возникающих в разных точках схемы. Типовыми задачами СхМ являются расчет статического режима, переходных процессов, частотных характеристик.

На основе решения этих задач можно далее вычислить параметры сигналов (фронт, длительность, задержку и др.), рассчитать спектр выходного сигнала, чувствительность схемы к изменению параметров ее элементов, решить задачи статистического анализа схемы и оптимизации ее параметров.

СхМ позволяет учесть особенности физических процессов в электрической схеме, но гораздо сложнее информационного моделирования, и требует больше времени для расчета.

## **ТЕМЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ**

- 1 Постановки задач идентификации.
- 2 Пакеты прикладных программ для идентификации моделей.

- 3 Функциональные модели процессов.
- 4 Модели для прогнозирования.
- 5 Моделирование функциональных и электрических схем.
- 6 Имитационное моделирование функционального узла РЭС.
- 7 Построение моделей по экспериментальным данным.

## **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

- 1 Классификация параметров РЭС.
- 2 Модели блоков и сигналов. Равномерное распределение.
- 3 Основные задачи проектирования.
- 4 Моделирование нормального распределения.
- 5 Способы проектирования РЭС.
- 6 Постановка задачи функционального моделирования.
- 7 Иерархия уровней сложности и уровней проектирования.
- 8 Базовые элементы функциональных схем. Генератор сигналов.
- 9 Типы объектов проектирования.
- 10 Безынерционный линейный элемент или нелинейный элемент.
- 11 Типы процессов проектирования.
- 12 Инерционный линейный элемент.
- 13 Понятие о математических моделях. Классификация.
- 14 Инерционный нелинейный элемент.
- 15 Постановка задачи при структурном моделировании.
- 16 Способы моделирования типовых структур функциональных схем.
- 17 Основные способы структурного моделирования. Аналитическое моделирование.
- 18 Общие подходы к моделированию функциональных схем.
- 19 Основные способы структурного моделирования. Имитационное моделирование.
- 20 Расчет статических временных диаграмм.
- 21 Исследование надежности системы.
- 22 Виды моделей цифровых устройств.
- 23 Моделирование производительности системы.
- 24 Алфавиты цифровых устройств в моделях логического уровня.
  
- 25 Синхронное моделирование цифровых устройств.
- 26 Схемотехническое моделирование.
- 27 Понятие статистического моделирования.
- 28 Сущность метода Монте-Карло.

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ**

## 1 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ И ОФОРМЛЕНИЯ РАБОТЫ

При изучении курса «Моделирование в РЭС» студенты выполняют одну контрольную работу, состоящую из двух заданий: рассмотрения теоретического вопроса и решения практической задачи моделирования.

Номера вариантов по каждому заданию устанавливаются преподавателем на установочной сессии согласно порядковому номеру в журнале. Произвольный выбор варианта не разрешается.

Вариант теоретического задания выбирается из перечня теоретических вопросов, а вариант электрической схемы для практической части согласовывается с преподавателем.

Контрольные работы оформляются как текстовые документы (пояснительная записка) в соответствии с определенными требованиями. При оформлении работы рекомендуется использовать информационные технологии, а именно текстовый редактор Word со следующими параметрами: листы формата А4, шрифт Times New Roman, кегль 14, межстрочный интервал 1,5, параметры страницы: слева – 3 см, сверху, снизу и справа – 1,5 см.

Порядок следования необходимых листов: титульный лист, аннотация с указанием количества таблиц и рисунков, объема контрольной работы в страницах (нумерация страниц сквозная, начинается с титульного листа, проставляется с содержания), содержание, введение, первая (теоретическая) и вторая (практическая) части контрольной работы, заключение (выводы), список использованных источников.

Выполненная контрольная работа сшивается, помещается в папку с этикеткой, в которую также вкладывается дискета с электронной версией работы, и сдается на проверку.

## 2 ПЕРЕЧЕНЬ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ВОПРОСОВ

- 1 Общие вопросы построения математических моделей компонентов РЭС.
- 2 Модели биполярного транзистора.
- 3 Модель интегрального МДП-транзистора.
- 4 Макромодель операционного усилителя.
- 5 Макромодель умножителя.
- 6 Макромодель делителя.
- 7 Макромодель двухвходового вентиля НЕ – И.
- 8 Макромодель JKRS-триггера.
- 9 Определение параметров моделей трансформаторов.
- 10 Математическая модель нелинейного трансформатора.
- 11 Моделирование теплового режима РЭС.
- 12 Математические модели объектов проектирования.
- 13 Модели технологических процессов.
- 14 Общие сведения о математических моделях РЭС.
- 15 Модели дискретных элементов. Модель пленочного резистора. Модель диффузного резистора.
- 16 Модели дискретных элементов. Модель пленочного конденсатора. Модель диффузного конденсатора.
- 17 Модель биполярного транзистора. Физико-топологическая модель транзистора.
- 18 Модель полупроводникового диода. Модель МДП-транзистора.
- 19 Электрические модели интегральных схем.
- 20 Описание языков моделирования и элементов цифровых устройств в моделях логического уровня.
- 21 Синхронное моделирование цифровых устройств двоичными алфавитами.

- 22 Асинхронное двоичное моделирование цифровых устройств.
- 23 Моделирование цифровых устройств многозначными алфавитами.
- 24 Моделирование неисправностей в цифровых устройствах и синтез диагностических тестов.
- 25 Математическое моделирование радиосистем.
- 26 Математические модели монтажно-коммутационного пространства.
- 27 Математические модели конструкций РЭС.
- 28 Алгоритмы компоновки конструктивных модулей.
- 29 Алгоритмы размещения конструктивных модулей.
- 30 Алгоритмы трассировки проводных соединений.

*Литература:* [1, 7, 9]

### 3 ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

Целью второго задания контрольной работы является изучение теоретических основ математического моделирования работы РЭС на уровне электрической принципиальной схемы с использованием метода статистического моделирования Монте-Карло применительно к задаче расчета точности выходных параметров схемы, а также получение практических навыков по составлению математических моделей и проведению вычислительного эксперимента.

#### **3.1 Моделирование параметров РЭС с использованием метода статистического моделирования (метод Монте-Карло)**

Одна из задач, возникающих при проектировании РЭС (например, электронных измерительных средств), это оценка точности выходных параметров узлов, блоков, и средства в целом. Решение этой задачи возможно на основе математического статистического моделирования.

Достоинство метода: возможность учета любых статистических законов распределения параметров, любой функциональной связи параметров, а также любых дополнительных ограничений на параметры компонента РЭС и его внешние характеристики.

Конечной целью статистического моделирования является оценка вероятностных характеристик исследуемых параметров. Метод основан на математическом моделировании случайных величин и процессов для проведения математического эксперимента.

В общем случае выходной параметр разрабатываемого средства  $U$  является функцией входной величины  $A$ , параметров комплектующих элементов  $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \xi_n$ ; внешних возмущающих воздействий  $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m$ :

$$U = F(A, \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n, \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m). \quad (1)$$

Нахождение функции является первым этапом любого моделирования и требует изучения объекта моделирования, влияющих факторов и их взаимосвязей. Параметры, входящие в данную функцию являются случайными. Параметры комплектующих элементов задаются как определенные номинальные значения с некоторым разбросом,  $x_i = 10 \text{ кОм} \pm 5 \%$ , аналогично и внешние факторы, например напряжение питания  $\varphi_1 = 220 \text{ В} \pm 10 \%$ .

Так как каждая из величин подчиняется своему закону распределения, а между ними могут иметь место корреляционные связи, то определение закона распределения и доверительного интервала для входного параметра осуществляется с применением вероятностно-статистического аппарата.

С помощью метода Монте-Карло определяются вероятностные модели параметров величин, которые затем используются для определения величины  $U_i$ . Повторяя эту процедуру  $N$  раз, формируется последовательность параметров  $U_1, U_2, \dots, U_N$ , являющихся случайными величинами, по которым оценивается закон распределения параметра  $U$  и его числовые характеристики.

Таким образом, сущность метода Монте-Карло – в математическом моделировании случайных величин или процессов с заданными вероятностными характеристиками и многократным вычислением исследуемого параметра по заданной аналитической модели объекта.

Точность метода Монте-Карло определяется:

– **АДЕКВАТНОСТЬЮ АНАЛИТИЧЕСКОГО ВЫРАЖЕНИЯ, ОПИСЫВАЮЩЕГО РЕАЛЬНЫЙ ОБЪЕКТ;**

– числом статистических испытаний  $N$  (числом моделируемых реализаций)

$$N \geq \frac{9P(1-P)}{\delta^2}, \quad (2)$$

где  $P$  – вероятность обеспечения заданной точности моделирования;  $\delta$  – точность моделирования.

То есть высокую точность можно получить при большом числе испытаний  $N$ . Например, чтобы обеспечить с вероятностью  $P = 0,99$  точность моделирования  $\delta = 0,01$  (1 % максимального отклонения значения моделируемой величины) необходимо провести  $N = 90\,000$  испытаний.

При решении инженерных задач выбирают  $\delta = 0,01 \dots 0,05$  (1...5 % максимального отклонения значения моделируемой величины).

Схема расчета достаточно проста. Для каждого элемента его параметр разыгрывается как случайное число; затем по (1) при неизменном  $A$  вычисляют  $U$ . Повторяют этот опыт  $N$  раз, и получают значения  $U_1, U_2, \dots, U_N$ . Этот процесс и называется статистическим моделированием. Затем производят обработку результатов эксперимента, и получают математическое ожидание  $M_U$  и среднеквадратическое отклонение  $\sigma_U$ , которое и характеризует точность выходного параметра.

Статистическое моделирование проводится на основе метода Монте-Карло следующим образом. В качестве исходных данных используются: математическая модель вида (1), параметры элементов и закон распределения  $P(\xi_j)$  параметров элементов, который предполагается нормальным.

Положим:

$X$  – номинальное значение параметра элемента;

$X^{(-)}$  – максимальное нижнее отклонение параметра элемента;

$X^{(+)}$  – максимальное верхнее отклонение параметра элемента.

Обозначим  $x$  значение параметра элемента в реальных условиях. Предполагая закон распределения параметров элементов нормальным, с вероятностью  $P = 0,997$  получим:

$$X = M(x), \quad X^{(-)} = M(x) - 3\sigma_x, \quad X^{(+)} = M(x) + 3\sigma_x, \quad (3)$$

где  $M(x)$  – математическое ожидание  $x$ ;  $\sigma_x$  – средняя квадратичная погрешность  $x$ .

На основании центральной предельной теоремы теории вероятностей  $x$  можно представить в виде

$$x = \sum_{i=1}^n \xi_i, \quad (4)$$

где  $\xi$  – случайная величина, равномерно распределенная на некотором отрезке  $[a; b]$ . Поскольку она распределена равномерно, то ее можно представить в виде

$$\xi = a + \eta(b - a), \quad (5)$$

где  $\eta$  – случайное число, равномерно распределенная на отрезке  $[0; 1]$ .

Величины  $a$  и  $b$  можно определить из следующих соображений. Пусть  $x$  принимает минимальное возможное значение:

$$x \rightarrow \min = X^{(-)} = X - 3\sigma_x. \quad (6)$$

Это возможно в случае, когда каждое слагаемое (4) принимает минимальное значение:

$$\xi = a + \eta(b - a) \rightarrow \min : \eta \rightarrow 0 \Rightarrow \xi \rightarrow a. \quad (7)$$

Отсюда получаем:

$$x = \sum_{i=1}^n \xi_i \rightarrow \min \Rightarrow X - 3\sigma_x = \sum_{i=1}^n a = na; \quad \Rightarrow a = \frac{X}{n} - 3\frac{\sigma_x}{n}. \quad (8)$$

Аналогично:

$$\begin{aligned} x \rightarrow \max &= X^{(+)} = X + 3\sigma_x; \\ \Rightarrow \xi &= a + \eta(b - a) \rightarrow \max : \eta \rightarrow 1 \Rightarrow \xi \rightarrow b; \\ \Rightarrow X + 3\sigma_x &= \sum_{i=1}^n b = nb, \quad \Rightarrow b = \frac{X}{n} + 3\frac{\sigma_x}{n}. \end{aligned} \quad (9)$$

Алгоритм расчета следующий:

- 1 Вычисляется выходной параметр схемы по номинальным значениям параметров элементов (по (1)).
- 2 Определяется требуемое число реализаций  $N$  при  $\delta = 0,05$  и  $P = 0,95$  по выражению (2).
- 3 Генерируется случайное (псевдослучайное) число  $\eta$ , равномерно распределенное на отрезке  $[0; 1]$ .
- 4 По формуле (5) разыгрывается случайная величина  $\xi$ , при этом  $a$  и  $b$  вычисляются по (8) и (9) с учетом того, что  $\sigma_x - 1/3$  указанного отклонения номинала применяемых элементов.
- 5 Выполняя пункты 2, 3  $q \geq 12$  раз, определяется параметр  $x$  элемента по (4).
- 6 Пункты 2 – 4 выполняются для всех элементов.
- 7 Вычисляем значения выходного параметра по (1) с учетом пунктов 2 – 4.
- 8 Пункты 2 – 6 выполняются  $N$  раз.
- 9 Определяется математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение:

$$M_U = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N U_j; \quad (10)$$

$$\sigma_U = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N [U_j - M_U]^2}{N - 1}}. \quad (11)$$

Выполнение контрольной работы можно разделить на два основных этапа: построение математической модели устройства вида (1) и написание программы моделирования по изложенному выше алгоритму.

Построение математической модели производится на основе ранее изученных курсов по основам схемотехники электронных устройств.

Выполнение второго этапа базируется на курсах по алгоритмам и программированию на алгоритмических языках. Предполагается использование языка C++ версии Borland C++ 3.1.

Основой программы моделирования является генератор равномерно распределенных псевдослучайных чисел (псч). Один из возможных алгоритмов генерации последовательности таких псч приведен ниже.

### 3.2 Алгоритм генерации последовательности псевдослучайных чисел

Самый простой алгоритм, обеспечивающий генерацию последовательности равномерно распределенных псевдослучайных чисел:

$$i_{j+1} = ai_j \text{ mod } m.$$

Поскольку язык высокого уровня (C++) дает переполнение разрядов, то для обхода этого эффекта используется следующий прием:

$$m = aq + r.$$

Если  $r < q$  и  $0 < z < m$ , то при этом величины  $az \text{ mod } q$  и  $r(z/q)$  лежат в интервале  $(0, m - 1)$ . Для вычисления результата операции  $x \text{ mod } y$  используется алгоритм:

$$t = az \text{ mod } q - r \cdot (z/q) \text{ если } t < 0 \text{ то } t + = m; \quad az \text{ mod } m = t.$$

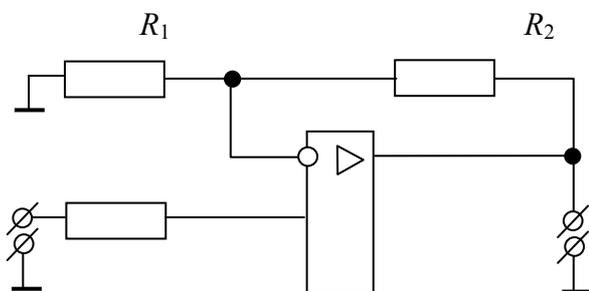
При этом используются следующие значения констант:

$$a = 168070, \quad m = 2147483647, \quad q = 12773, \quad r = 2836.$$

*Литература:* [4 – 6, 8, 10, 11, 13, 14].

## 4 ПРИМЕР ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОГРЕШНОСТИ

Задание. Построить математическую модель относительной погрешности коэффициента усиления неинвертирующего усилителя (рис. 1), вызванной погрешностью сопротивлений резисторов, и провести статистический вычислительный эксперимент по оценке параметров закона ее распределения. Резисторы общего применения, отклонение сопротивлений от номинального  $\Delta R = \pm 5\%$ . Номиналы:  $R_1 = 20 \text{ кОм}$ ,  $R_2 = 100 \text{ кОм}$ ,  $R_3 = 10 \text{ кОм}$ ,  $m = 5$ .



$U_{\text{ВХ}}$  $U_{\text{ВЫХ}}$ **Рис. 1 Неинвертирующий усилитель**

*Выполнение.* Для операционного усилителя (ОУ) собственное выходное напряжение  $U_{\text{ВЫХ}}$  равно разнице напряжений на его входах помноженной на собственный коэффициент усиления:

$$U_{\text{ВЫХ}} = K (U'_{\text{ВХ. Н}} - U'_{\text{ВХ. И}}), \quad (1)$$

где  $K$  – собственный коэффициент усиления ОУ;  $U'_{\text{ВХ. Н}}$  – напряжение на неинвертирующем входе;  $U'_{\text{ВХ. И}}$  – напряжение на инвертирующем входе.

Напряжение на неинвертирующем входе равно входному напряжению

$$U'_{\text{ВХ. Н}} = U_{\text{ВХ}}, \quad (2)$$

а напряжение на инвертирующем входе формируется цепью обратной связи  $R_1 - R_2$  из выходного. Цепь обратной связи  $R_1 - R_2$  представляет собой делитель напряжения, напряжение в средней точке которого, попадающее на инвертирующий вход, равно

$$U'_{\text{ВХ. И}} = U_{\text{ВЫХ}} \frac{R_1}{R_1 + R_2}. \quad (3)$$

Подставляя (2) и (3) в (1), получаем

$$U_{\text{ВЫХ}} = K \left( U_{\text{ВХ}} - U_{\text{ВЫХ}} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right). \quad (4)$$

Коэффициент усиления есть отношение выходного напряжения к входному. Таким образом, с учетом (4):

$$\begin{aligned} K_{\text{Н}} &= \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{K}{U_{\text{ВХ}}} \left( U_{\text{ВХ}} - U_{\text{ВЫХ}} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) = K \left( 1 - \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) = \\ &= K - K K_{\text{Н}} \frac{R_1}{R_1 + R_2}; \\ \Rightarrow K_{\text{Н}} &= \frac{K}{1 + K \frac{R_1}{R_1 + R_2}} = \frac{1}{\frac{1}{K} + \frac{R_1}{R_1 + R_2}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \frac{1}{1 + \frac{R_1 + R_2}{K R_1}}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $K_{\text{Н}}$  – коэффициент усиления неинвертирующего усилителя.

Так как собственный коэффициент усиления ОУ очень велик (порядка нескольких десятков тысяч), то

$$\frac{R_1 + R_2}{KR_1} \rightarrow 0, \Rightarrow K_H \approx 1 + \frac{R_2}{R_1}. \quad (6)$$

Тогда получим

$$\varepsilon_m = \frac{K^P - K^H}{K^H}, \quad (7)$$

где  $K^H$  рассчитывается по (6) с использованием номинальных значений сопротивлений резисторов, а  $K^P$  также рассчитывается по (6), но с использованием разыгранных согласно вышеизложенной методике значений сопротивлений.

Таким образом произведем вычисления, при этом  $m = 5$ :

$$K_H = 1 + (100/20) = 6.$$

Примем:

$$\Delta R_2^1 = +4 \%; \Delta R_2^2 = +4 \%; \Delta R_2^3 = +3 \%; \Delta R_2^4 = +5 \%; \Delta R_2^5 = -2 \%;$$

$$\Delta R_1^1 = -3 \%; \Delta R_1^2 = -2 \%; \Delta R_1^3 = -2 \%; \Delta R_1^4 = -4 \%; \Delta R_1^5 = +1 \%.$$

Тогда  $1 \% R_2 = 1 \text{ кОм}$ ;  $1 \% R_1 = 0,2 \text{ кОм}$ :

$$1) K_p^1 = 1 + (104/19,4) = 6,36;$$

$$2) K_p^2 = 1 + (104/19,6) = 6,31;$$

$$3) K_p^3 = 1 + (103/19,6) = 6,26;$$

$$4) K_p^4 = 1 + (105/19,2) = 6,47;$$

$$5) K_p^5 = 1 + (98/20,2) = 5,85.$$

Относительная погрешность в соответствии с (7) равна:

$$1) \varepsilon_m^1 = (6,36 - 6) / 6 = 0,06;$$

$$2) \varepsilon_m^2 = (6,31 - 6) / 6 = 0,052;$$

$$3) \varepsilon_m^3 = (6,26 - 6) / 6 = 0,043;$$

$$4) \varepsilon_m^4 = (6,47 - 6) / 6 = 0,078;$$

$$5) \varepsilon_m^5 = (5,85 - 6) / 6 = -0,025.$$

Тогда  $\delta\varepsilon = (\sum|\varepsilon_m| / m)100 \%$ :

$$\delta\varepsilon = (0,06 + 0,052 + 0,043 + 0,078 + 0,025) / 5 = 5,16 \%$$

Расчет также можно произвести, используя программу моделирования, написанную на языке программирования, например, на C++:

```
# include <conio.h>
# include <iostream.h>
# include <math.h>
# include <stdlib.h>

float eta;          // глобальная переменная, в которую помещаются генерируемые
                   // члены последовательности псч;

float rnd()
{
//-----
const double   A=168070,
               M=2147483647,
               Q=12773,
               R=2836;

double t=0;
t=A*fmod(eta,Q)-R*(eta/Q);
if(t<0) t+=M;
eta=t;
t/=M;
return(t);
}
//-----

void main ()
{
//--- начало main ---
const int q=20,    // число слагаемых в сумме(7);
          N=6000;  // число реализаций;

int i, j, k;
float NomR[2]={0, 0}, // номиналы резисторов
      devR[2]={0, 0}, // и их отклонения (разброс);
      ReR[2]={0, 0},  // разыгранные значения
                   // сопротивлений;
      a[2]={0, 0},    // параметры a;
      b[2]={0, 0},    // параметры b;
      ksy=0,          // псевдослучайная величина;
      K=0,            // теоретический к.у.;
      ReK=0;          // смоделированный к.у.;
double Epsilon[N], // относительная погрешность;
      SumEpsilon=0,
      MEpsilon=0, // матожидание отн. погр. к.у.;
      SumSigmaEpsilon=0,
      SigmaEpsilon=0; // СКО отн. погр. к.у.;
clrscr();
randomize(); //инициализация генератора rand()пс.ч;
eta=rand();// генерация псч–первого члена посл;
//--- ввод номин значений сопрот и их разброса ---
for (i=0; i<2; i++)
```

```

    {
cout<<<«Введите номинал <<<i+1<<<-го резистора, Ом:»;
    cin>>NomR[i];
    cout<<<«Введите предел его допуск отклонения:»;
    cin>>devR[i];
    }
K=1+NomR[1]/NomR[0]; // расчет теор. к.у.;
//--- нахождение параметров a и b ---
for (i=0; i<2; i++)
    {
    a[i]=NomR[i]/q-(devR[i]*NomR[i])/q;
    b[i]=NomR[i]/q+(devR[i]*NomR[i])/q;
    }
//--- цикл по числу реализаций ---
for (i=0; i<N; i++)
    {
    //--- цикл по числу элементов ---
    for (j=0; j<2; j++)
        {
        //--- разыгрывание номинала j-го элемента ---
        ReR[j]=0;
        for (k=0; k<q; k++)
            {
            ksy=a[j]+rnd()*(b[j]-a[j]);
            ReR[j]+=ksy;
            }
        //--- конец разыгрывания номинала j-го элемента ---
        }
    //--- конец цикла по числу элементов ---
    ReK=1+ReR[1]/ReR[0]; // получение реализации к.у.;
    Epsilon[i]=(K-ReK)/K; // расчет отн. погр. к.у.;
    SumEpsilon+=Epsilon[i];
    }
MEpsilon=SumEpsilon/N; // расчет матожид отн. погр.;
//--- расчет СКО отн. погр. ---
for (i=0; i<N; i++)
    {
    SumSigmaEpsilon+=pow((Epsilon[i]-MEpsilon),2);
    }
SigmaEpsilon=sqrt(SumSigmaEpsilon/(N-1));
//--- конец расчета СКО отн. погр. ---
//--- вывод полученных значений на экран ---
cout<<<«Матожидание относительной погрешности K равно «
<<MEpsilon<<<«\n»;
cout<<<«СКО относительной погрешности K равно: <<<SigmaEpsilon<<<«\n»;
cout<<<«Для выхода из прогр нажмите любую клавишу»;
getch(); // задержка экрана в сост отобр резулт
//расчета.
} //--- конец main ---

```

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 *Автоматизация проектирования РЭС: Учеб. пособие для вузов /*  
О.В. Алексеев и др. М.: Высш. шк., 2000. 479 с.
- 2 *Автоматизированное проектирование систем управления /* Под ред. М. Джемшиди и др.; Пер. с  
англ. В.Г. Дунаева и А.М. Косилова. М.: Машиностроение, 1989. 344 с.
- 3 *Влах И., Сингхал К.* Машинные методы анализа и проектирования электронных схем. М.: Радио и  
связь, 1988. 560 с.
- 4 *Гмурман В.Е.* Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высш. шк., 1977. 479 с.
- 5 *Гутников В.С.* Интегральная электроника в измерительных устройствах. Л.: Энергоатомиздат,  
1988. 304 с.
- 6 *Каяцкас А.А.* Основы радиоэлектроники: Учеб. пособие для вузов по спец. «Конструирование и  
производство радиоаппаратуры». М.: Высш. шк., 1988. 464 с.
- 7 *Курейчик В.М.* Математическое обеспечение конструкторского и технологического проектирова-  
ния с применением САПР: Учеб. для вузов. М.: Радио и связь, 1990. 352 с.
- 8 *Манаев Е.И.* Основы радиоэлектроники: Учеб. пособие для вузов. М.: Радио и связь, 1985. 488 с.
- 9 *Моделирование и оптимизация на ЭВМ радиоэлектронных устройств /* З.М. Беленсон и др. М.:  
Радио и связь, 1981. 272 с.
- 10 *Опадчий Ю.Ф., Глудкин О.П., Гуров А.И.* Аналоговая и цифровая электроника (Полный курс):  
Учеб. для вузов / Под ред. О.П. Глудкина. М.: Горячая линия – Телеком, 2002. 768 с.
- 11 *Подбельский В.В.* Язык С++. М.: Финансы и статистика, 1995. 560 с.
- 12 *Системы автоматизированного проектирования: В 9 кн. Кн. 4.* Математические модели техниче-  
ских объектов: Учеб. пособие для вузов / Под ред. И.П. Норенкова. М.: Высш. шк., 1986. 160 с.
- 13 *Соболь И.М.* Метод Монте-Карло. М.: Наука, 1972. 64 с.
- 14 *Хоровиц П., Хилл У.* Искусство схемотехники: В 2 т. М.: Мир, 1986.