Лекция 1

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОГРАММ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ЦЕПЕЙ

План

1. Введение
2. Общая характеристика программ схемотехнического моделирования
3. Граф электрической цепи. Топологические матрицы
5. Выводы

1. Введение

Компьютерное моделирование является в настоящее время важнейшей составной частью процесса проектирования электронных устройств. Это объясняется следующими обстоятельствами.

1. Необходимостью сокращения сроков разработки новых электронных устройств. В первую очередь это касается интегральных схем, поскольку физическое моделирование ИС связано с большими материальными затратами.
2. Наличием эффективных алгоритмов и программ компьютерного моделирования электрических цепей.
3. Развитой теорией математического моделирования электронных компонентов.

Современные программы моделирования электронных цепей представляют виртуальные лаборатории, включающие обширные библиотеки электронных компонентов. Они дают возможность инженеру проверить, удовлетворяет ли спроектированное устройство требованиям технического задания, когда используются реальные компоненты с характеристиками, отличающимися от идеальных. Многие программы позволяют автоматизировать все стадии проектирования электронных устройств, включая подготовку принципиальных схем, моделирование процессов в аналоговых и цифровых цепях, компоновку и трассировку печатных плат, редактирование и расширение библиотек компонентов.

Необходимым условием для эффективного использования моделирующих программ является понимание алгоритмов, реализованных в программе и знание принципов построения моделей электронных компонентов. Неправильное применение моделей компонентов, настройка и использование вычислительных алгоритмов могут привести к получению ошибочных результатов моделирования.

В курсе лекций по дисциплине «Компьютерное моделирование электронных цепей и устройств» изучаются вопросы автоматизации схемотехнического проектирования электронных цепей. Рассмотрены основные алгоритмы, используемые в современных программах схемотехнического моделирования: методы формирования и решения уравнений линейных цепей, определение рабочих точек нелинейных резистивных цепей, анализ в частотной области, анализ нелинейных динамических цепей при действии сигналов произвольной формы, расчет чувствительностей, статистический анализ при заданном законе изменения параметров. Рассмотрен алгоритм функционирования программы схемотехнического моделирования SPICE.

Неотъемлемой составной частью курса являются цикл практических занятий и курсовая работа. В ходе практических занятий и при выполнении курсовой работы студенты приобретают практические навыки компьютерного моделирования в среде PSpice.

Выбор PSpice в качестве основной программы обусловлен следующими причинами. Во-первых, PSpice в течение ряда лет считается эталонной программой схемотехнического моделирования и широко используется как в промышленности, так и в учебном процессе ведущих университетов. Во-вторых, алгоритмы SPICE используются практически во всех других программах схемотехнического моделирования. Немаловажным является и тот факт, что имеются свободно распространяемые студенческие версии программы.

В материал курса включены в качестве приложений описания нескольких программ анализа электронных цепей – PSpice, Multisim, Circuit Maker. В качестве инструмента, используемого в ходе проведения практических занятий, может быть выбрана любая из перечисленных программ. Выбор той или иной программы определяется преподавателем, ведущим занятия.

Рекомендуемая литература. Для углубленного изучения отдельных разделов курса можно рекомендовать классические учебники Л. Чуа и П.-М. Лина, И. Влаха и К. Сингхала [12, 13]. Хорошим руководством для начинающих по программе Pspice является книга Р. Хайнемана [2]. Системы Pspice и Micro-CAP подробно рассмотрены в книгах В. Д. Разевига [1, 3]. Для первоначального знакомства с алгоритмами анализа электронных цепей можно рекомендовать учебное пособие [7].

2. Общая характеристика программ схемотехнического моделирования

В настоящее время на рынке программного обеспечения, предназначенного для проектирования электронных цепей и устройств,

можно насчитать десятки специализированных пакетов. Перечислим некоторые наиболее известные программы.

Программа Pspice. Программа является модификацией программы анализа электронных цепей SPICE (**S**imulation **P**rogram with **I**ntegrated **C**ircuit **E**mphasis). В настоящее время ее считают эталонной программой моделирования электронных цепей и устройств. Модели электронных компонентов в формате SPICE используются большинством других программ схемотехнического моделирования.

В первых версиях PSpice исходные данные о цепи готовились в текстовой форме в виде списка соединений (netlist). Результаты моделирования также представлялись в текстовой форме. Позднее появились графические редакторы Schematics и Capture, позволяющие создавать и редактировать чертежи принципиальных схем. Schematics является одновременно управляющей оболочкой для запуска других модулей PSpice. Для представления результатов расчетов в удобной форме служит графический постпроцессор Probe. Он выводит на экран графики результатов моделирования и выполняет их математическую обработку.

Базовый набор элементов Pspice включает резисторы, конденсаторы, индуктивные катушки, диоды, биполярные транзисторы, полевые транзисторы с управляющим *p-n* переходом и изолированным затвором, длинные линии, источники напряжения и тока различной формы. Аналоговые интегральные схемы, а также некоторые компоненты, такие как тиристоры, представляются подсхемами, параметры которых задает пользователь.

Перечислим основные виды анализа, реализуемые PSpice.

- расчет режима по постоянному току;
- расчет переходных процессов и спектров сигналов;
- расчет частотных характеристик и спектральных плотностей шума;
- многовариантный анализ при изменении любых параметров схемы и температуры;
- статистический анализ по методу Монте-Карло и расчет наихудшего случая.

Базовый набор элементов PSpice содержит также цифровые функциональные блоки, выполняющие логические операции. Цифровые элементы могут реализовываться пользователем на основе функциональных блоков. Кроме того, существуют обширные библиотеки серийно выпускаемых цифровых компонентов.

Разработаны обширные библиотеки компонентов в формате SPICE, выпускаемых ведущими мировыми производителями электронного оборудования.

Для некоммерческого использования в учебных заведениях предоставляются бесплатно версии Pspice 8.0 и Pspice 9.x.

Программа Micro-CAP разработана фирмой Spectrum Software. Программа имеет удобный графический редактор, позволяющий создавать и редактировать принципиальные схемы аналоговых и цифровых устройств. Основные виды анализа:

- расчет статического режима по постоянному току;
- расчет частотных характеристик линеаризованной цепи;
- расчет реакции во временной области при произвольных входных воздействиях;
- анализ шумов и параметрической чувствительности;
- многовариантный анализ, включая статистический анализ методом Монте-Карло;

Программа имеет обширную библиотеку моделей компонентов ведущих фирм США, Европы и Японии.

Программа Multisim (фирма National Instruments Corporation). Первые версии программы имели название Electronics Workbench и разрабатывались фирмой с одноименным названием. Программа имела очень простой и интуитивно понятный графический интерфейс. В настоящее время фирма Electronics Workbench является дочерней компанией, которой полностью владеет фирма National Instruments Corporation.

Последние версии программы используют математические модули и модели компонентов SPICE. Особенностью программы Multisim является наличие виртуальных измерительных приборов, имитирующих реальные аналоги. В состав Multisim входят эффективные средства графической обработки результатов моделирования.

Другая важная особенность программы заключается в том, что Multisim поддерживает взаимодействие с графической средой LabVIEW, предназначенной для разработки программно-аппаратных средств измерения и управления.

Программа Circuit Maker (фирма Protel International) предназначена для моделирования аналоговых, цифровых и смешанных аналого-цифровых устройств. Она имеет удобный графический интерфейс, позволяющий быстро подготовить электрические схемы аналоговых и цифровых устройств. Результаты моделирования выводятся в графической форме, в виде осциллограмм и графиков частотных характеристик. Программа имеет набор виртуальных измерительных приборов (осциллографов, построителей частотных характеристик, цифровых мультиметров, анализаторов логических сигналов).

Используются модели электронных компонентов в формате SPICE.

Имеется студенческая версия программы, распространяемая бесплатно. Разрешено использование этой версии на домашних компьютерах студентов.

Перечисленные программы используют модули анализа, разработанные для программы SPICE. Он предусматривает следующие виды анализа.

1. Расчет рабочей точки нелинейной резистивной цепи постоянного тока (режим большого сигнала);
2. Анализ резистивных цепей постоянного тока (расчет узловых напряжений, токов и напряжений ветвей);
3. Расчет частотных характеристик линейных цепей (режим малого сигнала, анализируется линейная цепь);
4. Анализ временных характеристик нелинейных цепей при действии сигналов произвольной формы (режим большого сигнала);
5. Расчет характеристик чувствительности линейных цепей к вариациям параметров компонентов в режимах постоянного и переменного тока;
6. Анализ в частотной и временной областях при вариациях параметров схемы;
7. Анализ шумовых характеристик моделируемой цепи;
8. Статистический анализ для оценки влияния случайного изменения параметров цепи на ее частотные и временные характеристики.
9. Анализ чувствительности.
10. Расчет спектрального состава колебаний.

2. Граф электрической цепи

Уравнения, составленные по законам Кирхгофа, определяются только схемой соединений ветвей, т.е. геометрической структурой цепи. Они не зависят от вида и характеристик элементов. Поэтому при составлении уравнений по законам Кирхгофа удобно отвлечься от вида и характеристик ветвей, и заменить их линиями, соединяющими узлы. В результате мы получим граф электрической цепи.

Геометрические свойства цепей изучает раздел теории цепей, который называют топологией. Это одно из направлений математики, называемое теорией графов. Подробный разбор вопросов топологии электрических цепей не является целью лекции. Мы лишь рассмотрим основные понятия, касающиеся топологии электрических цепей.

Путь графа – непрерывная последовательность ветвей, соединяющих пару выбранных узлов;

Подграф – часть графа, полученная путем удаления некоторых ветвей исходного графа;

Контур – замкнутый путь, проходящий через ряд ветвей и узлов;

Дерево графа – подграф, содержащий все узлы графа, но не содержащий контуров;

Ветви связи (хорды) – ветви исходного графа, не вошедшие в дерево. Присоединение каждой ветви связи к дереву дает контур, называемый

главным. Каждая ветвь связи входит только в один контур. Поэтому уравнения по второму закону Кирхгофа для главных контуров будут независимыми.

Сечение – система ветвей, удаление которых разбивает граф на две несвязные части. Сечение рассматривают как обобщение понятия «узел».

В качестве иллюстрации рассмотренных топологических понятий рассмотрим резистивную цепь, показанную на рис. 1.1.

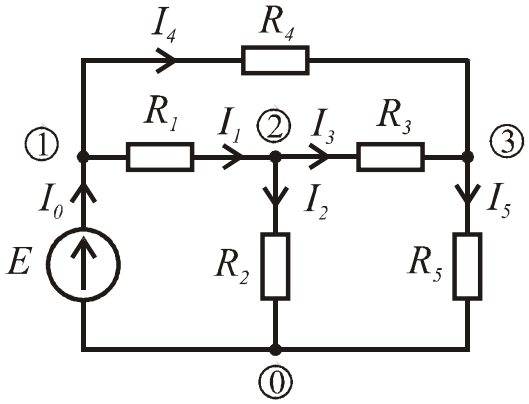

Рис. 1.1

Граф цепи показан на рис. 1.2. На рис. 1. показано дерево графа, образованное ветвями 1, 2, 3. Ветви, показанные на рис. 1. пунктиром, являются хордами.

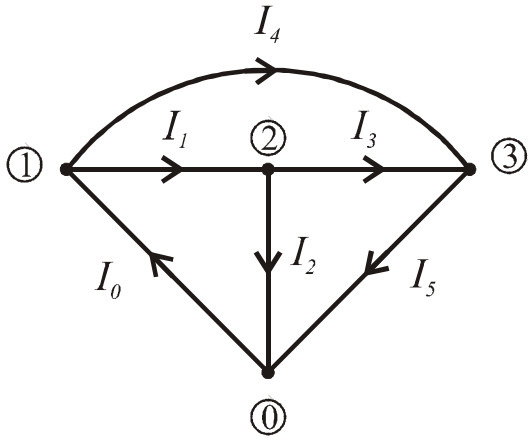

Рис. 1.2

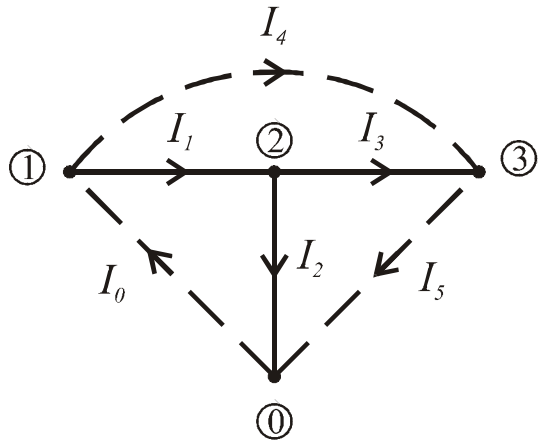

Рис. 1.3

4. Топологические матрицы

Информацию о графе удобно представлять в виде двумерных массивов, называемых топологическими матрицами.

Матрица инциденций $[A]$ – таблица, которая содержит $n_у$ строк и $n_в$ столбцов. Каждая строка соответствует узлу, а каждый столбец – ветви графа. Если ветвь с номером j направлена от узла i то в i-й строке и j- м столбце записываем +1. Если j- я ветвь направлена к узлу i, то в i-й строке и j- м столбце записываем – 1. Все остальные элементы матрицы инциденций равны нулю.

Матрица инциденций дает полное описание направленного графа. С помощью матрицы инциденций удобно записывать уравнения по первому закону Кирхгофа в матричном виде:

$$[A][i^в]=0\,.$$

Предположим, что мы знаем напряжения всех узлов цепи относительно базисного узла. Тогда напряжения ветвей цепи можно найти с помощью матрицы инциденций:

$$[u^в]=[A]^t[u^у].$$

Матрица инциденций для цепи, показанной на рис. 1.1, имеет вид:

$$[A]=\begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}.$$

Матрица главных контуров $[B]$ описывает соединения ветвей, входящих в независимые контуры. Она представляет таблицу размера $n_к \times n_в$. Каждая строка соответствует главному контуру, образованному присоединением к дереву ветви связи, а столбец – ветви. Если i- я ветвь входит в j- й контур, то элемент $b_{ji} = \pm 1$. Остальные элементы матрицы главных контуров равны нулю.

Матрица главных контуров является матрицей коэффициентов системы уравнений, записанных в соответствии с вторым законом Кирхгофа для главных контуров. Поэтому система уравнений по второму закону Кирхгофа в матричной форме имеет вид

$$[B][u^в] = 0.$$

Матрица главных контуров, соответствующая графу, показанному на рис. 1.3, имеет вид:

$$[B] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Столбец, соответствующий ветви связи, содержит только один ненулевой элемент, равный $+1$. Каждая ветвь дерева входит в два смежных контура. Поэтому столбцы, соответствующие ветвям дерева, содержат два ненулевых элемента, равных $+1$ и -1.

Топологические матрицы позволяют формализовать запись уравнений по законам Кирхгофа, что очень важно с точки зрения машинных расчетов. Рассмотрим алгоритм формирования матрицы инциденций.

Исходная информация о цепи представляется в виде таблицы соединений. Информация о каждой ветви хранится в виде триплета *k, i, j*. Здесь *k* – номер ветви *i, j* – номера узлов подключения. Формирование матрицы инциденций выполняется в следующем порядке.

На первом шаге все элементы матрицы полагаются равными нулю:

$$[A] = 0.$$

Затем просматривается таблица соединений. Если k –я ветвь включена между узлами с номерами ветви I и j, то $a_{ik} = +1$, $a_{jk} = -1$.

Формирование матрицы инциденций заканчивается, когда достигнут конец списка ветвей.

Алгоритм формирования матрицы инциденций оказывается наиболее простым. Процедура получения матрицы главных контуров оказывается сложнее, поскольку сначала необходимо выбрать дерево графа.

5. Выводы

1. Компьютерное моделирование является в настоящее время важнейшей составной частью процесса проектирования электронных устройств.
2. Современное программное обеспечение позволяет автоматизировать все стадии проектирования электронных устройств, включая подготовку принципиальных схем, моделирование процессов в аналоговых и цифровых цепях, компоновку и трассировку печатных плат, редактирование и расширение библиотек компонентов.
3. Уравнения, составленные по законам Кирхгофа, определяются только схемой соединений ветвей и не зависят от вида и характеристик элементов. Поэтому при составлении уравнений по законам Кирхгофа удобно отвлечься от вида и характеристик ветвей, и заменить их линиями, соединяющими узлы. В результате мы получим граф электрической цепи.
4. Основными топологическими понятиями, характеризующими граф электрической цепи, являются контур, дерево и сечение.
5. Информацию о графе представляют в виде двумерных массивов, называемых топологическими матрицами.