

Лекция 9

АЛГОРИТМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРОГРАММЫ SPICE

План

1. Введение
2. Функциональные возможности среды Pspice
3. Алгоритм функционирования SPICE
4. Моделирование цифровых и аналого-цифровых устройств
5. Заключение

1. Введение

PSpice является модификацией известной программы моделирования интегральных схем SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis), разработанной в Калифорнийском Университете. В настоящее время SPICE де-факто стала эталонной программой моделирования аналоговых электронных цепей.

Первая версия SPICE была разработана в середине 70-х годов. Она позволяла анализировать линейные и нелинейные цепи во временной области, рассчитывать частотные характеристики линейных цепей. Для анализа линейных резистивных цепей использовался метод узловых напряжений. Библиотека моделей включала модели диода и биполярного транзистора (модель Эберса-Молла).

С течением времени программа совершенствовалась, появлялись новые версии, расширялся список моделей компонентов. В конце 70-х годов SPICE стала широко использоваться в промышленности для моделирования электронных схем.

В 1983 году появилась версия SPICE2G.6, разработанная в Калифорнийском университете (Беркли). Это была последняя версия, написанная на языке FORTRAN. Математический модуль подвергся существенной переработке. Для анализа линейных цепей в версии 2G.6 использовался модифицированный метод узловых напряжений. При расчете динамических цепей использовались алгоритмы с автоматическим выбором шага интегрирования. Были переработаны модели биполярных и МОП-транзисторов. Модель биполярного транзистора в версии SPICE2G.6 основана на уравнениях Гуммеля-Пуна.

Заметим, что версия SPICE2G.6 оказалась эффективной и надежной. Она используется и в некоторых современных программах схемотехнического моделирования.

В 1985 году была разработана следующая версия программы, SPICE3. Она базируется на версии SPICE2G.6 и является ее развитием. Математическое ядро программы было написано на языке С. Для представления результатов моделирования использовался графический интерфейс. В новой версии программы удалось преодолеть некоторые трудности, связанные с численной неустойчивостью алгоритмов, используемых при анализе нелинейных цепей. В программу были включены новые модели электронных компонентов: длинных линий с потерями, неидеальных ключей и т.д. Появились модели МОП-транзисторов, учитывающие физические эффекты, возникающие при уменьшении геометрических размеров приборов.

В середине 80-х годов появились программы схемотехнического моделирования, предназначенные для персональных компьютеров. Корпорация MicroSim представила версию SPICE для персональных компьютеров, назвав ее PSpice, в 1984 г. Эта и последующие версии используют математические модули SPICE, такой же формат представления входных и выходных данных.

Первые версии PSpice позволяли моделировать только аналоговые устройства. Рассчитывались переходные процессы при действии сигналов различной формы, частотные характеристики, рабочие точки нелинейных приборов. В начале 90-х годов были созданы версии, позволяющие моделировать не только аналоговые, но и смешанные аналого-цифровые устройства. Программа получила удобный интерфейс, обеспечивающий графический ввод схем.

Современные версии PSpice представляют вычислительную среду, предназначенную для моделирования аналоговых и цифровых электронных схем. Существенное достоинство программы заключается в возможности моделирования смешанных аналого-цифровых схем без применения вспомогательных устройств согласования аналоговых и цифровых сигналов. Это достигается за счет автоматического использования специальных интерфейсов и значительно облегчает моделирование смешанных аналого-цифровых устройств.

Процедура моделирования электронных схем в программе PSpice состоит из трёх этапов:

1. Создание принципиальной схемы;
2. Моделирование;
3. Представление результатов моделирования в удобной для пользователя форме.

Для создания графического изображения принципиальных схем служат редакторы Schematics и Capture. Они выполняют одновременно функции управляющей оболочки для запуска других модулей PSpice. Перед началом моделирования проверяется правильность соединения элементов схемы. Разумеется, программа может выявить только простейшие ошибки, такие как «висящий» узел, к которому подключен только один элемент, или отсутствие заземления.

Для представления результатов расчетов в удобной для пользователя 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 (тиристоры, некоторые виды полевых транзисторов) представляются подсхемами, параметры которых задает пользователь.

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.

2. Функциональные возможности среды PSpice

Возможны следующие виды анализа.

1. Bias - расчет рабочей точки нелинейной резистивной цепи постоянного тока (режим большого сигнала);
2. DC - Анализ резистивных цепей постоянного тока (расчет узловых напряжений, токов и напряжений ветвей);
3. AC - Расчет частотных характеристик линейных цепей (режим малого сигнала, анализируется линейная цепь);
4. Transient – расчет переходных процессов в нелинейных цепях при действии сигналов произвольной формы;
5. Fourier Analysis – анализ спектров сигналов, полученных в режиме Transient;
6. Parametric Sweep – режим вариации параметров цепи;
7. Sensitivity – Расчет характеристик чувствительности линейных цепей к вариациям параметров компонентов в режимах постоянного и переменного тока (метод наихудшего случая);

8. Noise Analysis – анализ спектральной плотности мощности шума на входе и выходе схемы;
9. Вероятностный анализ разброса параметров методом Монте-Карло.

3. Алгоритм функционирования SPICE

Блок-схема, иллюстрирующая функционирование и связь отдельных модулей программы показана на рис. 9.1.

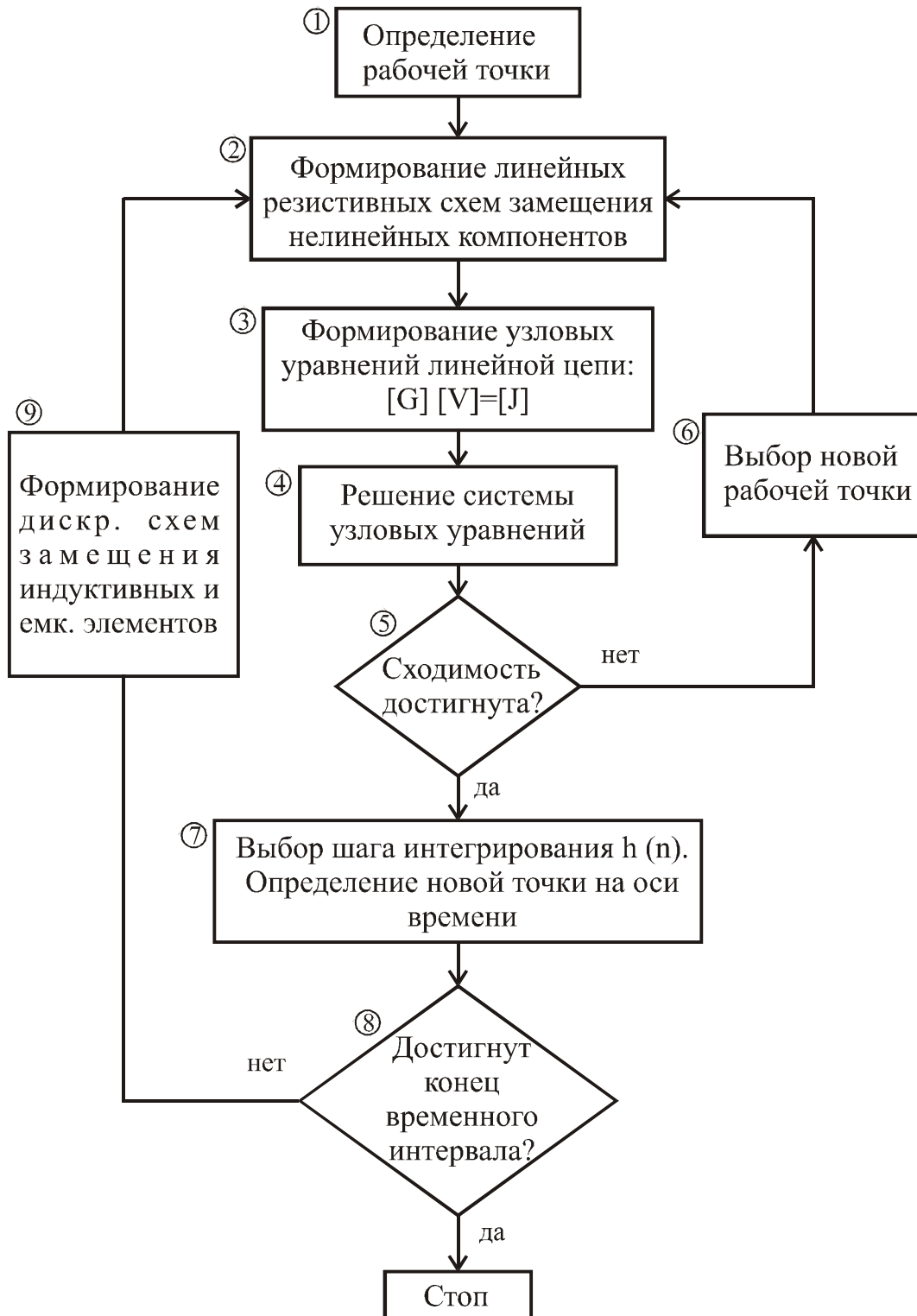


Рис. 9.1.

Перечислим основные виды анализа, выполняемые SPICE:

1. Анализ нелинейных резистивных цепей постоянного тока;
2. Анализ линейных цепей в частотной области;
3. Анализ нелинейных динамических цепей при действии сигналов произвольной формы.

Остальные виды анализа, такие как статистический анализ, расчет чувствительностей или режим вариации параметров являются производными и базируются на трех перечисленных режимах. Рассмотрим подробнее перечисленные базовые виды анализа.

Анализ нелинейных резистивных цепей постоянного тока. Этот вид анализа выполняется в следующих случаях.

1. При определении рабочей точки нелинейной цепи.
2. При расчете частотных характеристик. В этом режиме предварительно выполняется расчет резистивной подсхемы, определяется рабочая точка и строится линейная схема замещения.
3. При расчете переходных процессов. В этом режиме рабочая точка определяется на каждом временном шаге.
4. В режиме вариации параметров. Расчет рабочей точки выполняется для каждого нового значения варьируемого параметра.

При анализе резистивных цепей индуктивные и емкостные элементы исключаются. Емкостный элемент заменяется разрывом, а зажимы индуктивного элемента закорачиваются.

Простейшим является анализ линейных резистивных цепей. В этом случае используются модули 3 и 4 алгоритма. Для анализа линейной резистивной цепи используется модифицированный метод узловых напряжений.

При анализе нелинейных резистивных цепей используется итеративная процедура, включающая блоки 1 – 6. Эта процедура представляет схемотехническую интерпретацию метода Ньютона-Рафсона. На каждой итерации формируются узловые уравнения эквивалентной линейной резистивной цепи. В результате решения этой системы уравнений определяется уточненное значение рабочей точки.

Расчет частотных характеристик линейных цепей. Расчет частотных характеристик проводится в два этапа. Сначала автоматически определяется рабочая точка нелинейной резистивной цепи. Для этого выполняется анализ резистивной цепи, в которой исключены индуктивные и емкостные элементы. Затем нелинейные компоненты заменяются линеаризованными моделями с параметрами, соответствующими рабочей точке. После этого выполняется расчет частотных характеристик. Если в цепи действуют несколько синусоидальных источников, их частоты полагаются одинаковыми. Если действует только один источник, целесообразно установить атрибут $AC = 1$. В этом случае значение реакции будет равно значению передаточной функции.

Необходимо помнить, что при расчете частотных характеристик анализируется линеаризованная схема замещения, искажения сигнала, обусловленные нелинейностью ВАХ элементов, отсутствуют. Поэтому токи и

напряжения могут достигать очень больших величин, совершенно не соответствующих реальной ситуации.

По результатам анализа программа PROBE строит частотные характеристики напряжений и токов, указанных пользователем.

Анализ нелинейных динамических цепей. Для расчета переходных процессов используются неявные методы численного интегрирования – методы трапеций, Гира второго порядка или неявный метод Эйлера. По умолчанию используется метод трапеций. Максимальный шаг интегрирования выбирается пользователем или устанавливается автоматически. SPICE автоматически выбирает шаг интегрирования, обеспечивающий оптимальное соотношение между точностью и временем расчета.

Интегрирование начинается с момента $t=0$. Каждый из источников, действующих в схеме, может иметь свою форму. Если источники синусоидальные, их частоты могут быть разными.

Процедура расчета переходного процесса является многошаговой. На каждом шаге интегрирования автоматически определяется рабочая точка – токи и напряжения нелинейных компонентов. При определении рабочей точки нелинейной цепи напряжения и токи источников сигнала полагаются равными нулю, индуктивные элементы заменяются коротким замыканием, а емкостные – разрывом. Расчет рабочей точки ведется итеративным методом Ньютона-Рафсона. На каждой итерации нелинейные компоненты заменяются линеаризованными схемами замещения, соответствующими режиму этого компонента.

Анализ нелинейных динамических цепей является наиболее сложным видом анализа. В этом режиме используются все модули алгоритма.

По результатам анализа программа PROBE строит графики напряжений и токов, указанных пользователем.

Многовариантный анализ. Режим Parametric Sweep. Помимо рассмотренных базовых методов анализа частотных и временных характеристик программа SPICE дает проектировщику еще один мощный инструмент исследования электронных схем – параметрический анализ. В этом режиме пользователь имеет возможность проводить многовариантный анализ частотных или временных характеристик. Результатом такого анализа являются семейства кривых, наглядно показывающие, как влияет изменение того или иного параметра на характеристики цепи.

На каждом шаге вариации параметров могут выполняться различные виды анализа. Варьироваться могут напряжения и токи источников, температура компонентов, параметры моделей, глобальные параметры.

Статистический анализ. Элементы реальных цепей всегда имеют случайные отклонения от номинальных значений. Программа Pspice позволяет моделировать характеристики электронных цепей с учетом статистического разброса параметров компонентов. В ходе одного цикла статистического анализа цепь может моделироваться несколько сотен раз. При этом каждый раз моделирование осуществляется с новым набором параметров, задаваемых случайным образом. Например, если предусмотрен графический вывод испытаний с помощью программы Probe, максимальное количество испытаний $n=400$. На одну диаграмму Probe могут быть выведены результаты 399 испытаний. Отклонения значений элементов от номинальных задаются с помощью генератора случайных чисел. Случайное значение параметра x рассчитывается по формуле

$$x = x_{\text{ном}} (1 + z \Delta),$$

где $x_{\text{ном}}$ – номинальное значение параметра, указанное пользователем;

Δ – относительный разброс параметра x ;

z – центрированная случайная величина, принимающая значения на отрезке $(-1, +1)$.

В программе Pspice имеются генераторы случайных чисел с двумя законами распределения:

UNIFORM – равномерное распределение на отрезке $(-1, +1)$;

GAUSS – гауссовское распределение на отрезке $(-1, +1)$ с нулевым средним и среднеквадратическим отклонением $s = 0.25$.

По умолчанию выбирается равномерное распределение.

Статистические испытания по методу Монте-Карло могут проводиться при расчете режима по постоянному току, анализе переходных процессов или расчете частотных характеристик. Проведение статистического анализа по методу Монте-Карло позволяет определить многие важные характеристики электронных цепей. Например, по величине отклонения частотных характеристик можно судить о чувствительности цепи.

При статистическом анализе предусматривается разнообразная статистическая обработка результатов моделирования. Возможны следующие виды обработки:

- расчет максимального отклонения текущей реализации от номинальной;
- расчет максимального значения в каждой реализации;
- расчет минимального значения в каждой реализации;

4. Моделирование цифровых и аналого-цифровых устройств

Ранние версии программ схемотехнического моделирования были предназначены только для моделирования аналоговых устройств. Современные версии среды Pspice позволяют проводить моделирование не только аналоговых, но и цифровых, а также комбинированных аналого-цифровых схем.

Смешанные аналого-цифровые устройства моделируются в режимах DC или Transient. Режим расчета цепей постоянного тока позволяет определить логические уровни выходных сигналов цифровых устройств. При расчете частотных характеристик (режим AC Sweep) цифровая часть смешанного аналого-цифрового устройства игнорируется и определяются характеристики только аналоговой части.

При моделировании цифровых устройств предоставляются следующие возможности:

1. использование примитивов цифровых устройств и их комбинаций;
2. использование моделей реальных цифровых устройств.

При моделировании аналого-цифровых устройств осуществляется их стыковка с применением аналого-цифрового (A/D) и цифроаналогового (D/A) интерфейсов, подключаемых автоматически.

Аналого-цифровой интерфейс предназначен для преобразования аналогового напряжения в логический уровень. Он имитирует входные каскады цифровых ИС. Pspice автоматически расщепляет узел, к которому подключены аналоговое и цифровое устройства. Аналоговый узел характеризуется электрическим напряжением, а цифровой – логическим состоянием. Аналого-цифровой интерфейс включается между вновь образованными узлами.

Цифроаналоговый интерфейс предназначен для преобразования логических сигналов на выходе цифровых устройств в аналоговое напряжение. Аналоговое напряжение образуется с помощью источника постоянного напряжения и резистивного делителя. Сопротивление нелинейных резисторов изменяется в соответствии с уровнем цифрового сигнала.

В библиотеках Pspice (SOURCSTM.lib) содержатся источники цифровых сигналов с широким набором функциональных свойств.

При использовании промышленно выпускаемых ТТЛ компонентов PSpice позволяет использовать стандартное напряжение питания (5 В).

Перечислим основные характеристики моделей цифровых устройств.

1. Функциональная зависимость: описывается уровнем затвора и цифровыми примитивами поведения, включенными в подсхему.
2. Зависимости вход-выход: описываются моделью вход-выход, интерфейсом подсхемы и источником питания, относящимися к семейству логических элементов.

3. Временные зависимости: описаны одной или более временными моделями, примитивами задержки между выводами или примитивами проверки состояния.

При моделировании аналого-цифровых устройств осуществляется их стыковка с применением стандартных A/D и D/A интерфейсов, подключаемых автоматически.

4. Заключение

Пик исследований по разработке алгоритмов компьютерного анализа электронных схем пришелся на 70-80 годы. Итогом этих исследований являются современные программы моделирования электронных цепей: PSpice, Micro-CAP, Multisim, Circuit Maker и др. Большинство из них является модификацией программы схемотехнического моделирования SPICE, разработанной в середине 70-х годов. Эта программа, созданная в эпоху IBM 360, де-факто стала эталонной программой анализа аналоговых устройств. Модели электронных компонентов, разработанные для SPICE, используются в большинстве других программ.

Перечисленные программы позволяют рассчитывать режим по постоянному току, переходные процессы при действии входных сигналов различной формы, частотные характеристики, спектральную плотность выходного шума и другие характеристики аналоговых цепей.

В последние годы центр исследований сместился в область разработки методов символьного анализа электрических цепей. Возрастание интереса к таким методам объясняется следующими причинами.

1. Символьный анализ позволяет глубже понять особенности функционирования исследуемой цепи, оценить влияние тех или иных параметров на ее характеристики.
2. Достигается значительная экономия машинного времени при оптимизации схем и многовариантных расчетах.
3. Наконец, программы символьного анализа целесообразно использовать в учебном процессе.

Развитию методов символьного анализа электронных схем посвящен ряд монографий, а также многочисленные журнальные публикации.

Известные методы можно разделить на следующие группы.

1. Методы, основанные на переборе ветвей сигнального графа.
2. Алгебраические методы, основанные на вычислении определителей.
3. Символьно-топологические методы анализа.