

УДК 681.142.2:621.3.061

МЕТОДИКА И ПРОГРАММА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА МДП ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Н.И.Назаров

Интегральные схемы на основе МДП-транзисторов (МДП ИС) вызывают значительный интерес благодаря их технологичности и высоким эксплуатационным характеристикам. Сфера применения МДП ИС непрерывно расширяется, увеличивается их сложность, повышаются требования к срокам, стоимости и качеству проектирования. Все это определяет необходимость разработки математических методов и программ, которые позволяли бы решать с помощью ЭВМ наиболее трудоемкие задачи на всех этапах проектирования, в том числе на одном из самых важных — этапе электрического анализа.

Для того, чтобы программа электрического анализа стала эффективным инструментом разработчика интегральных схем, она должна характеризоваться простотой и удобством подготовки исходной информации, использованием в качестве исходных данных геометрических и электрофизических параметров транзисторов, учетом в моделях транзисторов особенностей интегральной технологии и точностью моделей, достаточно широким классом исследуемых схем; программа должна обеспечивать проведение необходимых видов анализа на доступных пользователю ЭВМ с возможно меньшей затратой машинного времени.

В работе описаны методы и программа электрического анализа МДП ИС. Программа удовлетворяет современным требованиям и разрабатывалась как с целью создания математического обеспечения процесса проектирования с помощью ЭВМ "Минск-32", так и с целью создания необходимой базы для исследования новых методов и алгоритмов.

1. Назначение программы

Программа электрического анализа МДП ИС написана на языке ФОРТРАН для ЭВМ "Минск-32" и предназначена для анализа фрагментов ИС сложностью до 30 транзисторов. В большей степени программа приспособлена для исследования схем с комплементарными МДП-транзисторами. С помощью программы можно выполнять расчет начальных условий и переходных процессов путем численного интегрирования систем дифференциальных уравнений и расчет передаточной характеристики путем решения систем нелинейных алгебраических уравнений. Для повышения удобства работы с программой и уменьшения числа возможных ошибок в исходных данных сведено к минимуму число перфокарт, меняющихся от задачи к задаче, и число манипуляций с пишущей машинкой пульта оператора, реализована возможность повторного анализа с однократной или автоматической многократной модификацией параметров.

Программа на исходном языке состоит из подпрограмм перехода к математической модели МДП ИС, вычисления правых частей и матриц частных производных систем уравнений, численного решения систем уравнений, головной и различных вспомогательных подпрограмм.

Рабочая программа является результатом трансляции всех подпрограмм и их сборки.

2. Класс исследуемых схем и модель МДП-транзистора

С помощью программы можно исследовать схемы, содержащие МДП-транзисторы p -типа и n -типа, постоянные сопротивления, постоянные и зависящие от напряжения емкости, источники постоянного и зависящего от времени напряжения (рис.1).

Среди узлов принципиальной схемы будем различать заземленный узел, независимые узлы, напряжения в которых зависят только от состояния схемы, и внешние узлы, напряжения в которых определяются источниками питания. Предполагается, что с каждым независимым узлом соединена емкость; это автоматически обеспечивается, если с узлом соединен какой-либо из транзисторов. Число независимых узлов определяет порядок системы уравнений N и не должно превышать 15.

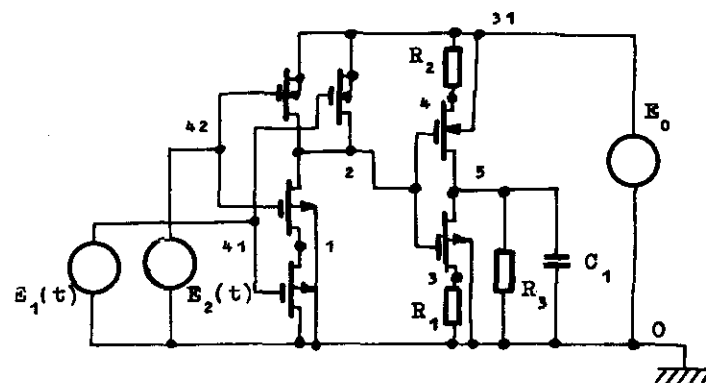


Рис. 1

Нумерация узлов осуществляется следующим образом:

- 1) заземленный - 0;
- 2) независимые - 1, 2, 3, ..., N;
- 3) внешние, соединенные с источниками постоянного напряжения, - 31, ..., 35;
- 4) внешние, соединенные с источниками переменного напряжения, - 41, ..., 45.

Подобная нумерация позволяет автоматически определять такие параметры, как число независимых узлов, транзисторов, источников каждого типа, типы транзисторов и свести до минимума количество информации, зависящей от конкретной схемы.

Модель МПТ-транзистора показана на рис. 2. Емкости затворного оксида и перекрытия затвора и диффузионных областей C_1 и C_2 предполагаются постоянными, диффузионные емкости C_3 и C_4 -

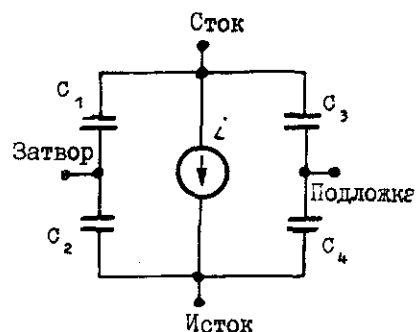


Рис. 2

зависимыми от напряжения. Величина тока источника i определяется по модели Фромана-Бентчковского [1], в которую внесены некоторые изменения для повышения скорости вычислений и облегчения согласования с экспериментальными данными.

Параметры элементов модели каждого из транзисторов определяются по такой исходной информации, как задаваемые на фотошаблонах геометрические размеры областей канала, затвора и диффузии, толщина затворного оксида, глубина диффузии, пороговое напряжение, подвижность носителей и т.д. Предполагается, что транзисторы одного типа имеют одинаковые геометрические и электрофизические параметры, за исключением ширины каналов и длин диффузионных областей, которые определяются исходными данными индивидуально. В программе предусмотрены несколько эмпирических параметров, необходимых для облегчения согласования характеристик модели и реальных транзисторов.

Используемая модель хорошо отражает топологию ИС и является одной из наиболее точных [2]; дополнительные емкостные и резистивные ветви вводятся в принципиальную схему для учета таких факторов, как нагрузка, длинные шины, внутренние сопротивления источников и т.д.

3. Переход к математической модели схемы

Математической моделью исследуемой схемы является система уравнений вида

$$C\dot{y} = Ay + BE + DE + KI, \quad (I)$$

где A, B, C, D, K - матрицы коэффициентов, $y, \dot{y}$ - векторы напряжений и их производных по времени в независимых узлах, $E, \dot{E}$ - векторы напряжений внешних источников и их производных по времени, I - вектор источников токов в схемах замещения транзисторов (рис. 2). Все напряжения отсчитываются от заземленного узла. При формировании математической модели осуществляется последовательный переход от исходного описания в виде матрицы соединения транзисторов, перечня дополнительных ветвей, геометрических и электрофизических параметров к системе уравнений вида (I).

В процессе перехода от исходного описания к (I) составляется полный список емкостных и резистивных ветвей, в котором ука-

заны узлы присоединения, типы и номиналы элементов, признаки зависимости емкостей от напряжения. Параметры элементов модели вычисляются автоматически. Емкостные ветви схем замещения, которые согласно месту транзистора в схеме оказываются закороченными или включенными между источниками питания, в список не включаются.

Матрицы коэффициентов строятся непосредственно по матрице соединений транзисторов и списку ветвей; любая из них может быть построена независимо от других. Строятся также массивы, необходимые для работы только с ненулевыми элементами матриц A , B , K при решении системы уравнений (I). Отметим, что матрица емкостей C в (I) зависит от узловых напряжений, тогда как все остальные матрицы постоянны в пределах исследуемого класса схем.

4. Методы численного решения уравнений

Основными подпрограммами, обеспечивающими решение широкого круга задач проектирования переключательных электронных схем, являются подпрограммы решения систем нелинейных алгебраических уравнений и систем нелинейных дифференциальных уравнений. Для решения систем алгебраических уравнений в программе реализованы два метода: метод Ньютона [3] и метод Ньютона-Бройдена [4]. Для решения систем дифференциальных уравнений реализован неявный метод [5].

Надежная работа и быстродействие методов Ньютона и Ньютона-Бройдена обеспечиваются контролем максимального из модулей приращений переменных и контролем нормы вектора ошибки в процессе итераций. Условием сходимости итераций является достаточно малость приращений переменных, причем в задачах, где дополнительный контроль точности полученного решения не может быть выполнен, используется более жесткое условие.

Неявные методы интегрирования позволяют решить систему дифференциальных уравнений за небольшое число шагов, однако каждый шаг требует выполнения относительно большого количества вычислений. Ниже мы отметим некоторые особенности реализованного алгоритма, которые позволили получить высокую эффективность программы.

В процессе интегрирования неявным методом возникает необходимость решения на каждом шаге систем алгебраических уравнений. В программе для этой цели используется как метод Ньютона, так и метод Ньютона-Бройдена, что позволило существенно уменьшить затраты машинного времени на интегрирование. Выбор метода и шага интегрирования производится в зависимости от характера сходимости итераций и погрешности ограничения. Опыт показывает, что необходимость в использовании метода Ньютона возникает сравнительно редко, например, 3-4 раза при расчете переходного процесса в схеме из 6-8 транзисторов.

Для повышения вероятности получения решения на данном шаге с заданной точностью величина шага выбирается с таким расчетом, чтобы изменения как входных напряжений, так и напряжений в независимых узлах не превышали определенной границы. Подобный контроль также позволяет обращаться к методу Ньютона в процессе интегрирования более редко.

После получения решения на каком-либо шаге интегрирования производится его дополнительная коррекция путем вычитания из значений достаточно быстро меняющихся переменных их погрешностей ограничения, что повышает точность решения. Это объясняется постоянством знака погрешности ограничения в течение достаточно большого числа шагов интегрирования.

Реализованный метод не является одношаговым, и для его запуска необходимо знание первых трех точек решения, которые обычно получают явным методом. В первых вариантах программы для этой цели использовался метод Рунге-Кутты четвертого порядка. В дальнейшем была реализована более эффективная методика: решения в первых точках предполагаются одинаковыми и равными начальному условию, а сами точки располагаются во времени на расстоянии, малом по сравнению с предполагаемыми длительностями фронтов.

В первых вариантах программы была реализована возможность интегрирования системы (I) методом Рунге-Кутты с автоматическим выбором шага. Однако метод Рунге-Кутты не смог конкурировать с неявным методом ни по быстродействию, ни по надежности.

5. Виды и методика анализа

Реализованные в программе алгоритмы и входной язык позволяют выполнять такие виды анализа, как расчет начальных условий, переходного процесса, логических уровней, передаточной характеристики. Повышению эффективности программы способствует возможность проведения повторного анализа при измененных значениях параметров.

Расчет начальных условий выполняется один раз для всех модификаций параметров исследуемой схемы путем интегрирования системы уравнений до стабилизации переходного процесса. При желании начальные условия могут не рассчитываться, а вводиться как исходные данные.

Расчет переходного процесса выполняется путем интегрирования системы уравнений в заданном интервале времени с заданной точностью. Переходный процесс можно рассчитывать в предположении постоянства емкостей или с учетом их зависимости от напряжения; расчет в первом случае выполняется в несколько раз быстрее, хотя результаты различаются только на 10-20%. При интегрировании на печать выводятся узловые напряжения через заданное количество шагов, а также, если нужно, токи транзисторов.

Величина логического уровня при заданных напряжениях на входах может быть определена как результат расчета начальных условий или переходного процесса. Первый способ предпочтительнее, так как не выводятся промежуточные результаты интегрирования и не нужно заботиться о величине интервала интегрирования.

Расчет передаточной характеристики выполняется с помощью специальной подпрограммы. В процессе расчета решается последовательность статических задач при ступенчатом изменении напряжения на входе, причем начальное приближение для каждой из задач определяется по результатам в двух последних точках; при обнаружении расходимости итераций приращение входного напряжения уменьшается, и определяется новое начальное приближение. Процедура неэффективна для расчета многокаскадных схем из-за обычно большой крутизны передаточных характеристик каждого из каскадов.

Однократная модификация параметров позволяет повторить заданные виды анализа при измененных значениях параметров без ввода всей информации о схеме. Модифицироваться могут поро-

вое напряжение, длина и ширина канала, толщина затворного оксида.

Многократная модификация позволяет повторить анализ несколько десятков раз при автоматическом изменении параметров по желаемому правилу. Модифицироваться могут пороговое напряжение, длина канала, толщина затворного оксида.

Реализация в программе современных методов численного решения уравнений, учет разреженности матриц коэффициентов и свойств исследуемого класса схем позволили получить достаточно высокое быстродействие программы. Например, расчет переходного процесса в схеме счетчика, содержащей 26 транзисторов, в предположении постоянства емкостей - 5 минут, в предположении зависимости емкостей от напряжения - 13-15 минут; расчет передаточной характеристики и переходного процесса в двухходовой схеме НЕ-ИЛИ - более 30 вариантов в течение часа.

Разработанная программа в настоящее время находится в эксплуатации и, как показал опыт, является удобным инструментом и при проектировании МДП ИС, и при их изготовлении для выяснения факторов, способствующих повышению процента выхода годных ИС. Предполагается дальнейшее совершенствование программы: уточнение модели, повышение быстродействия, расширение класса исследуемых схем, включение новых видов анализа.

Л и т е р а т у р а

1. FROHMAN-BENTCHKOVSKY Vadasz L. Computer-aided design and characterization of digital MOS integrated circuits. - "IEEE J. of Solid State Circ.", 1969, v. SSC-4, N 2, p. 57-64.
2. Зарубежная электронная техника. Обзор ЦНИИ "Электроника", 1972, № 7.
3. McCALLA W.T., PEDERSON D.O. Elements of computer-aided circuit analysis. - "IEEE Trans. on Circ. Th.", 1971, v. CT-18, N 1, p. 14-26.
4. BROYDEN G.G. A class of methods for solving nonlinear simultaneous equations. - "Math. of Comp.", 1965, v. 19, N 92, p. 577-593.
5. SHICHMAN H. Integration system of a nonlinear network analysis program. - "IEEE Trans. on Circ. Th.", 1970, v. CT-17, N 3, p. 378-386.

Поступила в ред.-изд. отд.
3 февраля 1975 года