

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 681.3.01 : 621.38

Г. П. БЕЗНОСОВ, В. В. ЕФИМЕНКО, А. С. ЗАГОРУЙКО,
 Ю. А. СТУКАЛИН
 (Новосибирск)

**АНЕЛИНА — АЛГОРИТМ АНАЛИЗА
 НЕЛИНЕЙНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ**

Комплекс программ АНЕЛИНА (алгоритм нелинейного анализа) предназначен для автоматического расчета на ЭВМ статических и динамических характеристик нелинейных интегральных схем с МОП-или биполярными транзисторами.

Модели исследуемых интегральных схем могут включать в себя, кроме транзисторов, произвольно соединенные двухполюсники (резисторы, емкости, диоды, независимые и зависимые источники напряжения и тока) и библиотечные подсхемы. Подсхема — это любая схема (в том числе модель транзистора или какого-либо другого элемента), состоящая из указанных выше двухполюсников и записанная в библиотеку на магнитной ленте.

Получение математических моделей (систем дифференциальных уравнений первого порядка) исследуемых схем осуществляется методом переменных состояний. С целью выделения линейной части модели схемы нелинейные проводимости (резистивности) заменялись фиктивными нелинейными источниками тока (напряжения). Для формирования этой линейной части модели использовались пять первых программ разработанного комплекса АЛИНА [1].

Для удобства подготовки исходных данных о схеме в сочетании с комплексом АЛИНА применялась специальная программа ввода топологии схемы и формирования библиотечных моделей — программа АНЕЛЮ. Эта программа подготавливает исходную информацию для первой программы комплекса АЛИНА. Пятая программа комплекса записывает коэффициенты линейной части математической модели схемы на магнитную ленту. Далее работает программа интегрирования системы нелинейных дифференциальных уравнений (NEDIIN) вида

$$C\dot{x} = Ax + B_1 E_{л} + B_2 E_{н.л}, \quad (1)$$

где x — вектор переменных, характеризующих состояние схемы (напряжения на емкостных ветвях дерева); A , B_1 , B_2 — матрицы, получаемые из первых пяти программ комплекса АЛИНА при задании параметров емкостей, равными единице; C — матрицы линейных и нелинейных, зависящих от x емкостей; $E_{л}$ — вектор линейных источников напряжения и тока, которые могут зависеть только от времени; $E_{н.л}$ — вектор нелинейных источников, зависящих от x .

В программе реализован неявный метод интегрирования с автоматическим выбором шага интегрирования и переменным порядком (первым или вторым), в основу которого положен метод Гира [2]. Этот метод обеспечивает достаточную точность и сохраняет численную устойчивость при больших изменениях шага интегрирования.

Последующее решение x_{n+1} для $n+1$ -й временной точки в этом методе получается из решений в двух предыдущих точках:

$$x_{n+1} = z_1 x_{n-1} + z_2 x_n + z_3 \dot{x}_{n+1}, \quad (2)$$

где z_1 , z_2 , z_3 — коэффициенты, характеризующие соотношение между текущим и предыдущим шагами интегрирования.

Подставив выражение для производной \dot{x}_{n+1} (из (2)) в (1), сводим систему нелинейных дифференциальных уравнений к системе нелинейных алгебро-трансцендентных уравнений, которая решается обобщенным методом хорд [3]. При этом отпадает необходимость в многократном определении и обращении матрицы Якоби.

Сходимость решения обеспечивается обычно за несколько итераций благодаря хорошему прогнозу x_{n+1}^p , полученному экстраполяцией предыдущих решений. В слу-

чае плохой сходимости (за заданное количество итераций) предусматривается возможность ее улучшения путем уменьшения шага интегрирования.

Численные эксперименты показали, что при отсутствии информации о типе нелинейностей необходимую для метода хорд матрицу S начальных приближений целесообразно генерировать случайным образом из ϵ -окрестности точки x_{n+1}^p .

Обращение матрицы невязок осуществляется методом Гаусса (одно на каждый временной шаг). В процессе итераций обратная матрица уточняется. В последней реализации метода обращение матрицы заменено решением системы линейных уравнений, что значительно упрощает вычислительный процесс.

Заметим, что с точки зрения учета разреженности структуры алгебро-трансцендентных уравнений при использовании обобщенного метода хорд необходимо генерировать такую матрицу S , чтобы ее векторы-столбцы отличались друг от друга только одной компонентой. Тогда, зная априори расположение компонент вектора x в каждом уравнении рассматриваемой системы уравнений, можно получить существенную экономию при формировании матрицы невязок.

Подпрограмма обращения матрицы (решения системы линейных уравнений) выполнена в машинных кодах и записана в библиотеку стандартных программ. Остальные программы комплекса написаны на языке АЛГАМС. Задачи анализа статики и динамики решались на ЭВМ «Минск-22» и в режиме совместимости на ЭВМ «Минск-32».

Анализ статического режима возможно провести путем решения системы нелинейных алгебро-трансцендентных уравнений, описывающих поведение схемы в статическом режиме. Упомянутую систему уравнений можно получить из уравнений состояния схемы, если учесть, что токи через емкости в статическом режиме равны нулю. Но указанный метод не всегда обеспечивает успешное решение задачи, так как из-за отсутствия хорошего начального приближения нельзя гарантировать сходимость итерационного процесса решения системы нелинейных уравнений.

Другой подход к решению статической задачи заключается в представлении статического режима в качестве предельного, к которому стремятся переходные процессы в схеме, возникающие при включении источников питания, рассматриваемых в данном случае как внешние возбуждения схемы (предполагается, что другие типы источников возбуждения отсутствуют). Большое время вычислений — основной недостаток этого способа.

Более эффективным является поиск установившихся значений комбинированным методом, а именно переходным процессом улучшают начальное приближение и потом решают систему нелинейных алгебраических уравнений. В случае если итерационный процесс не сойдется, можно с помощью переходного процесса приблизиться к стационарному еще ближе и т. д. Такой метод заложен в двух программах, предназначенных в основном для решения динамической задачи.

Для решения только статической задачи реализованы две другие программы, в которых применен указанный комбинированный метод с построением такой упрощенной динамической модели (нелинейные емкости заменяются линейными), решение которой при $t \rightarrow \infty$ совпадает с решением статической задачи.

Полученные в результате интегрирования системы нелинейных дифференциальных уравнений напряжения на емкостных ветвях дерева как функции времени записываются на магнитную ленту. После этого начинает работать отдельная вспомогательная программа, определяющая требуемые переменные (напряжения между заданными узлами схемы), графики которых выводятся на АЦПУ.

В заключение отметим, что при создании данного комплекса программ был проведен ряд экспериментов, позволивших сделать следующие выводы.

1. Обобщенный метод хорд работает даже для тех нелинейностей, которые описываются функциями, имеющими разрывные частные производные.

2. При исследовании влияния полноты модели МОП-транзистора на характер переходных процессов в схеме выяснилось, что для ряда практических случаев нет смысла стремиться к усложнению модели. Это может значительно увеличить затраты машинного времени без существенного увеличения точности расчета.

3. При определении целесообразности введения в процессе интегрирования дифференциальных уравнений автоматического изменения порядка на ряде примеров было показано, что интегрирование с порядком выше четвертого нецелесообразно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ефименко В. В., Безносков Г. П., Загоруйко А. С., Стукалин Ю. А. АЛИНА — алгоритм линейного анализа электронных схем. — «Упр. сист. и маш.», 1974, № 5, с. 57—59.
2. Shichman H. Integration system of a nonlinear network analysis program. — "IEEE Trans. on Circuit Theory", 1970, vol. CT-17, N 3, p. 378—386.
3. Безносков Г. П., Ефименко В. В., Загоруйко А. С., Стукалин Ю. А. Обобщенный метод хорд в задачах моделирования на ЭВМ статики и динамики нелинейных схем. — В кн.: Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ. Новосибирск, изд. ИАН СО АН СССР, 1974.

Поступило в редакцию 3 октября 1978 г.