

**ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ  
МВ и ССО СССР  
РАДИОЭЛЕКТРОНИКА**

**ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК**

**КИЕВ — 1986**

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кейсесент Д., Псалтис Д. Новые методы оптических преобразований для распознавания образов.— ТИИЭР, 1977, т. 65, № 1, с. 92—100.

2. Kiss J., Zwicke E. A new implementation of the mellin transform and its application to radar classification of ships.— IEEE Trans., 1983, v. PAMI-5, N 2, p. 191—199.

Поступило в редакцию после переработки 09.12.85.

УДК 621.382.82.001

### ДИАЛоговая СИСТЕМА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ ИС

С. Г. РУСАКОВ, С. Л. УЛЬЯНОВ

Распространенный способ определения параметров моделей по данным эксперимента заключается в решении задачи на наилучшее совпадение экспериментальных и рассчитанных по модели внешних характеристик полупроводникового прибора. Применение на этом этапе численных методов оптимизации позволяет автоматизировать процедуру определения параметров моделей [1—3] и использовать методики идентификации, свободные от недостатков, присущих прямым измерениям.

Для решения задачи параметрической идентификации целесообразно использовать диалоговую систему, представляющую собой аппаратно-программный комплекс с необходимыми в сеансе работы сервисными средствами. Функциональные возможности системы должны обеспечивать разработчика схем гибкостью в выборе методов и средств идентификации, обработку исходной информации, расчет параметров модели, графическое отображение результатов расчета. Структурная схема разработанной системы АРИС-ПИМ приведена на рис. 1. Программное обеспечение системы включает: монитор системы 1; библиотеку методов оптимизации 2; библиотеку элементов ИС 3; программы обработки исходных данных 4; программы графического отображения результатов расчетов на алфавитно-цифровом (АЦД) и графическом дисплеях 5. Монитор системы осуществляет интерактивное взаимодействие с разработчиком и вызывает отдельные программы системы. Диалог в программе «Монитор» построен по двухуровневому принципу: сначала пользователь задает ключевое слово (команду монитора), затем выбирает необходимый режим работы из предложенного списка («меню»). Командами монитора являются следующие ключевые слова: ИЗМЕНИТЬ, ПРОСМОТР,

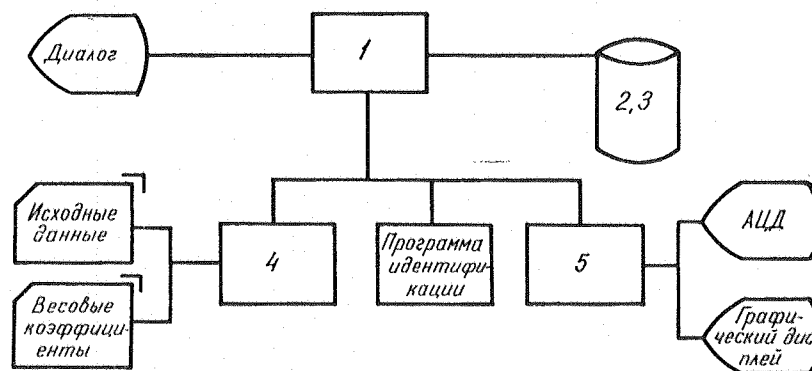


Рис. 1

ЗАПУСК, ГРАФИК, ДИАГРАММА, ПОМОЩЬ. Команда ИЗМЕНИТЬ предназначена для задания и модификации информации, необходимой для проведения идентификации. На экране АЦД появляется список возможных ответов: 1 — модель; 2 — начальная точка; 3 — ограничения; 4 — метод; 5 — вычислительные константы; 6 — исходные данные; 7 — весовые коэффициенты. При ответах 1—3 задаются номер модели, начальные, минимальные и максимальные значения искомого параметра модели. При ответах 4—5 вводится номер и вычислительные константы метода, с помощью которого проводится идентификация. При ответе 6 выполняется ввод исходных экспериментальных данных с магнитной ленты, диска или с клавиатуры АЦД в память ЭВМ, статистическая обработка информации. Имеются возможности слайд-аппроксимации введенных экспериментальных характеристик, сглаживания и численного дифференцирования. При идентификации моделей биполярного транзистора в качестве исходной экспериментальной

информации используются входные и выходные ВАХ, зависимости коэффициента усиления от тока, зависимости постоянной времени от режима и зависимости емкости перехода от напряжения на нем [4]. При идентификации моделей МДП-транзистора используются выходные ВАХ и для моделей, предназначенных для расчета аналоговых схем, зависимости выходной проводимости от режима (напряжений сток — исток, затвор — исток, подложка — исток) [7]. При ответе 7 пользователь вводит весовые коэффициенты, изменяющие вклад отдельных точек настраиваемой зависимости в целевую функцию. Команда ПРОСМОТР позволяет получить информацию о текущих значениях вычислительных констант метода, начальной точке и границах изменения

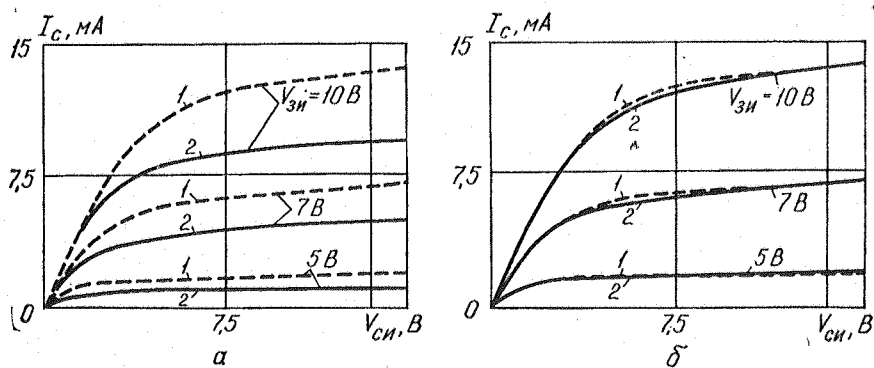


Рис. 2

параметров модели, а также осуществляет просмотр каталога библиотеки методов оптимизации и библиотеки моделей. Команда ЗАПУСК формирует для выполнения рабочую программу идентификации, настроенную на конкретную задачу. В процессе решения через заданное пользователем количество итераций на экран АЦД выдается значение целевой функции и искомых параметров модели. Пользователь имеет возможность прервать поиск на любой итерации. При этом управление передается на уровень команд монитора, а полученное решение запоминается. Команды ГРАФИК, ДИАГРАММА позволяют отобразить результаты расчетов соответственно на графическом и алфавитно-цифровом дисплеях. При этом выводятся графики экспериментальных и рассчитанных по модели зависимостей, проводится оценка точности их совпадения. Примеры графического отображения результатов расчета в сеансе работы приведены на рис. 2: ВАХ МДП-транзистора до проведения идентификации а и после идентификации параметров модели б (цифрами 1, 2 обозначены соответственно экспериментальные и рассчитанные по модели характеристики). Команда ПОМОЩЬ выводит справочную информацию о командах монитора и предназначена для консультации пользователя во время сеанса работы с системой. Библиотека моделей элементов ИС содержит модификации модели Эберса — Молла биполярного транзистора, учитывающие зависимость коэффициента усиления от тока коллектора, эффект Эрли, объемные сопротивления диффузионных областей, уточненные аппроксимации барьерных емкостей  $p-n$ -переходов [4] и ряд моделей МДП-транзисторов, различающихся по сложности и позволяющих проводить моделирование как цифровых так и аналоговых схем. Программа связи метода и модели служит для формирования целевой функции в терминах наименьших квадратов. В библиотеку методов поиска включены методы оптимизации нулевого, первого и второго порядков: 1 — метод деформируемого многогранника (M1) [5]; 2 — метод Пауэлла (M2) [5]; 3 — метод Давидона — Флетчера — Пауэлла (M3) [5]; 4 — метод Бройдена (M4) [5]; 5 — метод минимизации обранных функций с помощью численного интегрирования жестких систем ОДУ (M5) [6].

Для сравнительного анализа эффективности методов поиска системы параметрической идентификации проводились расчеты параметров статических моделей МДП и биполярных компонентов. Идентификация моделей МДП-транзистора выполнялась с помощью методов нулевого порядка (M1, 2). Практические расчеты, проведенные для ряда конкретных примеров показали высокую надежность метода деформируемого многогранника и более низкую скорость сходимости в окрестности локального минимума по сравнению с методом Пауэлла. При этом на идентификацию модели МДП-транзистора в зависимости от размера экспериментального массива и требуемой точности затрачивалось 150—600 итераций для M1 и 15—20 итераций для M2 при примерно одинаковых затратах машинного времени. Для модели биполярного транзистора исследовались методы 1, 3, 4, 5, причем градиентные методы 3, 4 использовались в двух модификациях — с аналитическим расчетом производных, с численной оценкой производных методом приращений, а метод 5, использующий матрицу вторых производных функции цели по параметрам модели в трех модификациях, — с аналитическим вычислением производных, с численной оценкой первых и вторых производных, с численной оценкой только вторых производных. Практические расчеты, проведенные для различных экспериментальных массивов, показали, что вычислительные затраты методов 3, 4 зависят от задания вычислительных констант метода при неизменной точности поиска и составляют 1000—3000 эквивалентных вычислений целевой функции. Метод 5 с ана-

литическим вычислением производных не требовал специального определения вычислительных констант и приводил к оптимальному решению при той же точности поиска за 250—350 эквивалентных вычислений целевой функции. Оценка области сходимости метода 5 показала, что оптимальную точку удавалось получить практически из любой начальной точки поиска, удовлетворяющей физическим ограничениям на параметры модели, причем задание более жесткого интервала изменения параметров модели, позволяло ускорить процесс поиска. Идентификация с использованием методов 3, 4, 5 с численной оценкой производных не приводила к расчету оптимальной точки, за исключением модификации метода 5 с численным расчетом только вторых производных.

Таким образом, для идентификации модели биполярного транзистора возможно применение методов 3, 4 с аналитическим вычислением производных однако наиболее эффективным и надежным является метод 5 с аналитическим вычислением первых и вторых производных функции цели по параметрам модели. Практическое применение системы параметрической идентификации подтвердило ее эффективность для определения параметров моделей активных приборов для системы автоматизации схемотехнического проектирования [8].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аврашков П. П., Баталов Б. В., Соколов А. Г. Определение параметров модели транзистора.— *Электрон. техника. Сер. Микроэлектроника*, 1975, вып. 3(57), с. 63—70.
2. Коган В. Л., Котульский М. А., Фролкин В. Т. Автоматизированное определение параметров моделей полупроводниковых приборов.— *Изв. вузов МВ и ССО СССР. Радиоэлектроника*, 1982, т. 25, № 1, с. 47—51.
3. Бубенников А. Н., Гуснин С. Ю., Садовников А. Д. Определение параметров модели высокочастотного транзистора с помощью машинных методов оптимизации.— *Техника средств связи. Сер. Микроэлектронная аппаратура*, 1980, вып. 1, с. 75—80.
4. Шагурин И. И., Петросянц К. О. Проектирование цифровых микросхем на элементах инжекционной логики.— М.: Радио и связь, 1984.— 232 с.
5. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование.— М.: Мир, 1975.— 535 с.
6. Артемьев С. С., Демидов Г. В., Новиков Е. А. Минимизация овражных функций численным методом для решения жестких систем уравнений.— Новосибирск, 1980.— 13 с.— Препринт / ВЦСО АН СССР; № 74.
7. Стуканов В. П., Ульянов С. Л. Идентификация параметров математических моделей для схемотехнического моделирования МДП аналоговых схем.— *Техника средств связи. Сер. Микроэлектронная аппаратура*, 1985, вып. 1—2 (6—7), с. 58—63.
8. Баталов Б. В., Русаков С. Г., Фролов В. В. Комплекс программ автоматизированного расчета электрических характеристик интегральных схем на мини-ЭВМ (мини-АРИС).— В сб.: *Микроэлектроника и полупроводниковые приборы*.— М.: Радио и связь, 1984, вып. 9, с. 157—174.

Поступило в редакцию после переработки 26.11.85.