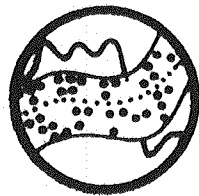


ИЗВЕСТИЯ
АКАДЕМИИ УЧЕНЫХ
ЗАВЕДЕНИЙ

Радиоэлектроника



ТОМ XVI

6

1973

СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК

МАШИННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

ИЗДАНИЕ
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО РАБОЧЕГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ
МАШИНЫ И МЕХАНИЗМОВ
ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ИЗДАНИЕ

УДК 621.372.061.681.142

С. Г. РУСАКОВ, Л. С. ХОДОШ

МАШИННЫЙ РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ МДП-БИПОЛЯРНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СТРУКТУР

Рассмотрены проблемы моделирования на ЭЦВМ статических режимов новых перспективных полупроводниковых интегральных схем — МДП-биполярных ИС. Предложен алгоритм, основанный на методе регуляризации квазиьютоновских итерационных процессов, который обеспечивает сходимость процесса из нулевого начального приближения, что делает этот алгоритм пригодным для применения в программах автоматизированного анализа ИС.

Задача анализа статических режимов МДП-биполярных ИС (как и любых других логических ИС) предполагает расчет статических передаточных характеристик и исследование влияния параметров компонентов и активных нагрузок на эти характеристики, а также определение потребляемой схемой в различных режимах мощности.

В настоящей работе для расчета статических режимов МДП-биполярных ИС на ЭЦВМ за основу был взят алгоритм решения систем трансцендентных уравнений [1]. Этот алгоритм основан на объединении методов Ньютона и спуска и позволяет выбирать нулевые начальные приближения для итерационного процесса. Математическая модель схемы представляется в этом случае системой трансцендентных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} f_1(x_1, \dots, x_n) &= 0 \\ \dots \dots \dots \dots \dots \\ f_n(x_1, \dots, x_n) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

или в векторной форме

$$F(X) = 0,$$

где $X = (x_1, \dots, x_n)$ — вектор узловых потенциалов схемы.

При расчете статических режимов МДП-биполярных ИС возникают дополнительные (по сравнению со случаем расчета биполярных ИС) проблемы, связанные со значительным различием характеристик биполярных и МДП-транзисторов: для биполярного прибора (в отличие от МДП-прибора) характерна сильная (экспоненциальная) зависимость токов от напряжений на выводах. Это приводит к дополнительному ухудшению обусловленности матрицы Якоби системы (1), которая используется для расчета поправки в ньютоновской итерации

$$(X^{(k+1)} - X^{(k)}) \frac{\partial F}{\partial X} \Big|^{(k)} = -F(X^{(k)}), \quad (2)$$

что увеличивает погрешность решения линейной системы (2) и ухудшает сходимость процесса в целом.

Специфической особенностью расчета статических режимов МДП ИС является возможное вырождение матрицы проводимостей (матрицы Якоби) $\partial F/\partial X$ системы (1). Оно имеет место, например, в тех узлах схемы, в которых соединяются выводы запертых МДП-транзисторов. При этом все коэффициенты соответствующих строк матрицы $\partial F/\partial X$ равны нулю. При использовании алгоритма с нулевым начальным приближением для МДП ИС такое вырождение всегда имеет место на первом шаге итерации.

Следовательно, при построении алгоритма машинного расчета статических режимов МДП-биполярных ИС необходимо учесть плохую обусловленность и возможное вырождение линейной системы (2). Для этого в настоящей работе был использован алгоритм, основанный на методе регуляризации вычислительных процессов ньютоновского типа [2]. Для решения системы (1) предлагается использовать следующий итерационный процесс:

$$(X^{(k+1)} - X^{(k)}) \left(\frac{\partial F}{\partial X} \Big|^{(k)} + Z^{(k)} \right) = -F(X^{(k)}). \quad (3)$$

В таком процессе, в отличие от процесса (2), снимается требование ограниченности по норме оператора, обратного $\partial F/\partial X \Big|^{(k)}$.

В работе [2] показано, что при выполнении ряда требований к оператору $Z^{(k)}$ процесс (3) сходится, т. е. существует

$$\lim X^{(k)} = X^*,$$

причем X^* является решением (1).

В настоящей работе оператор $Z^{(k)}$ определяется следующим образом:

$$z_{ii}^{(k)} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\left(\frac{\partial f_i}{\partial x_i} \Big|^{(k)} \right)^2 + c f_i(X^{(k)})} - \frac{\partial f_i}{\partial x_i} \Big|^{(k)} \right), \quad i = 1, \dots, n, \quad (4)$$

где c — некоторая константа.

Можно показать, что оператор (4) удовлетворяет условиям сходимости, приведенным в [2]. Объем дополнительных вычислений при реализации процесса (3) незначителен, так как пересчету подвергаются только диагональные элементы матрицы $\partial F/\partial X$.

На рис. 1 приведена блок-схема алгоритма модификации матриц $\partial F/\partial X$ и $F(X)$ перед вычислением ньютоновской итерационной поправки. В случае, если все элементы i -й строки и в $\partial F/\partial X$, и в $F(X)$ равны нулю, полагается $\partial f_i/\partial x_i = 1$ (блок 9); при этом изменения напряжения в i -м узле на данном шаге не произойдет. Кроме того, при $f_i(X^{(k)}) = 0$ диагональный элемент в блоке 7 умножается на 1,01 (этот способ предложен в работе [3]), что позволяет избежать вырождения матрицы $\partial F/\partial X$ при появлении линейно зависимых строк (при $f_i(X^{(k)}) \neq 0$ это вырождение исключается за счет оператора $Z^{(k)}$). Простейший пример участка схемы с линейно вырожденной в точке с нулевыми напряжениями матрицей

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{R} & -\frac{1}{R} & 0 & \dots \\ -\frac{1}{R} & \frac{1}{R} & 0 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

приведен на рис. 2. В алгоритме для улучшения обусловленности предусмотрено также нормирование матрицы $\partial F/\partial X$ (блоки 2, 3 и 4).

С помощью модифицированного согласно описанному алгоритму метода решения системы (7), основанного на объединении методов Нью-

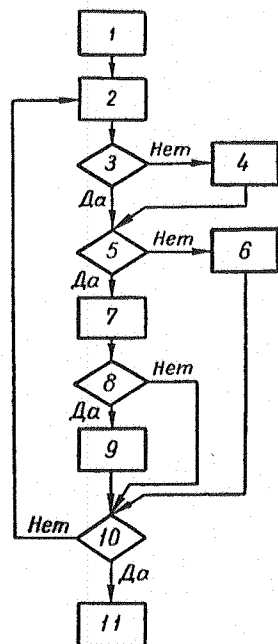


Рис. 1. Блок-схема модифицированного алгоритма вычисления поправки в ньютоновской итерации при расчете статических режимов МДП-биполярных ИС: 1 — заполнение матрицы $\partial F/\partial X$ и вектора $F(X)$ на k -м шаге с помощью обращения к моделям компонентов; 2 — вычисление суммы модулей элементов i -й строки матри-

цы $\partial F/\partial X$: $p_i = \sum_{j=1}^n \left| \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \right|$; 3 — про-

верка условия $p_i = 0$; 4 — деление элементов i -й строки матрицы $\partial F/\partial X$ и вектора $F(X)$ на p_i : $\partial f_i/\partial x_j = (1/p_i) \partial f_i/\partial x_j$, $f_i = f_i/p_i$; 5 — проверка условия $f_i = 0$; 6 — вычисление z_{ii} по формуле (5) и нового значения диагонального элемента $\partial f_i/\partial x_i = (\partial f_i/\partial x_i) + z_{ii}$; 7 — умножение $\partial f_i/\partial x_i$ на 1,01; 8 — проверка условия $p_i = 0$; 9 — вычисление $\partial f_i/\partial x_i = 1$; 10 — проверка условия $i < n$; 11 — решение системы линейных уравнений (3).

тона и спуска, был выполнен анализ статических режимов ряда МДП-биполярных ИС. При анализе использовалась модифицированная модель Эберса—Молла для биполярного транзистора и модель, учитывающая заряд подложки и зависимость подвижности от поперечного поля, для МДП-транзистора [4].

Результаты расчетов подтвердили, что МДП-биполярные ИС с логикой на комплементарных МДП-приборах и выходными биполярными

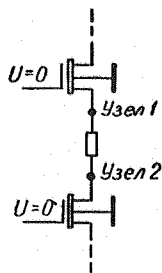


Рис. 2. Пример участка схемы с МДП-транзисторами, для которой матрица проводимостей имеет линейно зависимые строки в точке с нулевыми узловыми напряжениями.

каскадами действительно сочетают в себе свойства комплементарных МДП ИС (микромощность и высокую помехоустойчивость) с высокой нагрузочной способностью, что делает их весьма перспективными для построения различных логических схем среднего и высокого уровней интеграции, совместимых со стандартными биполярными ИС.

В заключение следует отметить, что предложенную модификацию алгоритма [1] целесообразно использовать и при расчете биполярных ИС. Очевидно, что его можно применить и для моделирования режима сопряжения МДП ИС с биполярными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зарудный Д. И., Русаков С. Г., Сыпчук П. П., Моделирование на ЭВМ системы выходного контроля логических интегральных схем, Электронная техника, Сер. VI «Микроэлектроника», 1971, № 5.
2. Александров Л., Регуляризованные вычислительные процессы Ньютона—Канторовича, ЖВМ и МФ, 1971, № 1.
3. Getmak I. A., DC Solution of nonlinear state-space equations in circuit analysis, IEEE Trans, 1971, CT-18, № 2.
4. Молчанов А. А., Ходош Л. С., Влияние зависимости подвижности от поперечного поля на характеристики МДП-транзисторов, Изв. вузов СССР — Радиоэлектроника, 1970, 13, № 7.

Поступила в редакцию
29 V 1972 г.