

СИНТЕЗ ЭЛЕМЕНТОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ ПРИ РАЗБРОСЕ ПАРАМЕТРОВ

Б.А. Доннер, А.В. Николаев, Г.М. Паратов
(Москва)

Наряду с большими перспективами, которые открылись перед разработчиками схем после возникновения интегральной электроники, появились специфические трудности, связанные с расчетом логических интегральных схем, так как функции схемотехников и технологов стали неразделимыми, что потребовало создания единого подхода к расчету интегральных схем, связывающего требования к их качественным показателям с требованиями на технологический разброс активных и пассивных компонентов.

Для обеспечения хороших качественных показателей схем желательно с точки зрения разработчиков схем иметь транзисторы и компоненты схемы с минимальными производственными допусками. С другой стороны, производственный разброс параметров активных и пассивных компонентов неизбежен, и их изготовители заинтересованы в расширении норм технологических допусков на эти изделия.

При применении метода статистического проектирования появляется возможность найти разумный компромисс между требованиями схемотехников и технологов, изготавливающих проектируемые схемы, предъявить разумные требования к технологическим разбросам активных и пассивных компонентов схем и в дальнейшем на основании этих требований построить управляемый технологический процесс.

Применение метода статистического проектирования для анализа обычных дискретных схем позволяет наиболее полно выявить их возможности и существенно повысить их качественные показатели.

можно из-за возникающих при этом трудностей математического характера. Поэтому расчет процента выхода наиболее целесообразно вести с помощью метода Монте-Карло на ЭЦВМ [1,2]. При этом расчет сводится к моделированию распределений параметров активных и пассивных компонентов схем, определению качественных показателей в соответствии с принятой математической моделью схемы и проверке попадания качественных показателей схемы в область работоспособности.

Реализацию метода статистического проектирования можно разбить на следующие этапы:

1. Определение характера и параметров законов распределения параметров активных и пассивных компонент схемы.
2. Выбор методов реализации с достаточной точностью найденных законов распределения на ЭЦВМ и проверка выбранных методов.
3. Построение и экспериментальное исследование математической модели анализируемой схемы, т.е. нахождение зависимости составляющих многомерного вектора, координатами которого являются качественные показатели, от параметров активных и пассивных компонент схемы.
4. Определение процента выхода с помощью метода Монте-Карло.
5. Составление системы тестов, позволяющих произвести отбраковку неработоспособных схем.
6. Выбор и использование метода движения в сторону увеличения процента выхода.
7. Выбор и реализация метода поиска глобального максимума процента выхода.

В настоящей статье будут коротко рассмотрены п.п. 1-5, которые достаточно подробно изложены [2], а основное внимание будет уделено рассмотрению п.п. 6-7.

Определение характера законов распределения, оценка их параметров и соответствия выбранного теоретического закона экспериментальным данным может быть сделано известными методами математической статистики с применением критериев согласия и функций правдоподобия. С целью облегчения расчетов на этом достаточно трудоемком этапе целесообразно иметь специально разработанные программы для ЭЦВМ, которые основаны на достаточно известных алгоритмах, рассматривать которые здесь нецелесообразно.

где h_1, h_2, \dots, h_n - случайные величины с заданными корреляционными связями,
 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ - независимые нормально распределенные случайные величины с математическим ожиданием $M=0$ и среднеквадратическим отклонением $\sigma=1$.

Коэффициенты $a_{11}, a_{21}, \dots, a_{nn}$ определяются по следующим формулам:

$$a_{11} = \sqrt{m_{11} - \sum_{k=1}^{i-1} a_{1k}^2} \quad k \neq 1, \quad (3)$$

$$a_{i\mu} = \frac{1}{a_{\mu\mu}} (m_{i\mu} - \sum_{k=1}^{\mu-1} a_{ik} \cdot a_{\mu k}) \quad k < \mu,$$

где: m_i - математическое ожидание i -ой составляющей,
 $m_{i\mu}$ - соответствующий корреляционный момент.

Под математической моделью понимается совокупность соотношений, связывающих качественные показатели схем с параметрами активных и пассивных компонент схемы. Для оптимизируемых в настоящей работе схем были использованы математические модели, которые приведены в работах [2,5] .

Отметим, что особенностью этих моделей является учет сдвига входных характеристик транзистора и остаточного напряжения на коллекторе в режиме насыщения.

Метод статистического проектирования предполагает 100% проверку изделий, что для интегральных схем не вызывает дополнительных трудностей, так как соответствует особенностям их производства. Тесты включают в себя совокупность подаваемых на схему и контролируемых токов и напряжений, проверка с использованием которых гарантирует работоспособность схемы. Величины токов и напряжений выбираются методом, аналогичным рассмотренному ниже.

Таким образом, моделируя заданные распределения параметров транзистора и компонентов схемы и используя математическую модель схемы, можно определить процент выхода схем при заданных требованиях к их качественным показателям. Отбраковав с помощью системы тестов небольшой процент неработоспособных схем, можно существенно повысить их качественные показатели по сравнению с расчетом для наихудшего случая.

Следующей задачей метода статистического проектирования является задача синтеза, которая может быть рассмотрена в 2-х аспектах.

В первом случае оптимизируются структуры схемы и параметры активных и пассивных компонент с целью получения наибольшего процента выхода. В такой постановке задача чрезвычайно сложна и в настоящей работе не рассматривается. Во втором случае структура схемы считается заданной и задачей оптимизации является нахождение оптимальных параметров активных и пассивных компонент с целью получения максимального процента выхода схем. Далее рассматривается последняя задача.

Задача оптимизации при заданной структуре схемы может быть сформулирована следующим образом: необходимо найти средние значения параметров схемы, определяющие её качественные показатели при заданной области работоспособности схемы, которые обеспечивают наибольший процент выхода логических схем.

Процент выхода логических схем можно представить как функцию некоторых параметров схемы, определяющих качественные показатели последней. Тогда задача оптимизации просто переходит в задачу нахождения экстремума функции многих переменных, которая может быть решена известными методами. Такими методами являются метод слепого поиска, методы локального поиска: градиентные методы, релаксационный метод, метод наискорейшего спуска и т.д. Так как в нашем случае оптимизируемая функция - процент выхода - является вероятностной функцией, то применение этих методов наталкивается на большие трудности, связанные в основном с большим количеством машинного времени, необходимого для процесса оптимизации.

Наиболее перспективным методом решения этой задачи является метод прямого определения градиента, предложенный Александровым В.М. (МИФИ), при использовании которого частные производные по координатам определяются одновременно с расчетом процента выхода, что дает существенную экономию машинного времени.

Частные производные находятся по следующим формулам:

$$\frac{\partial p}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \iiint \dots \int_D \frac{f(y_1, y_2, \dots, y_m)}{(2\pi)^{n/2} |\Theta|^{1/2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \Theta_{ij}^{-1} (x_i - \bar{x}_i) \cdot (x_j - \bar{x}_j) \right\} dx_1 \cdot dx_2 \cdot \dots \cdot dx_n \cdot dy_1 \cdot dy_2 \cdot \dots \cdot dy_m =$$

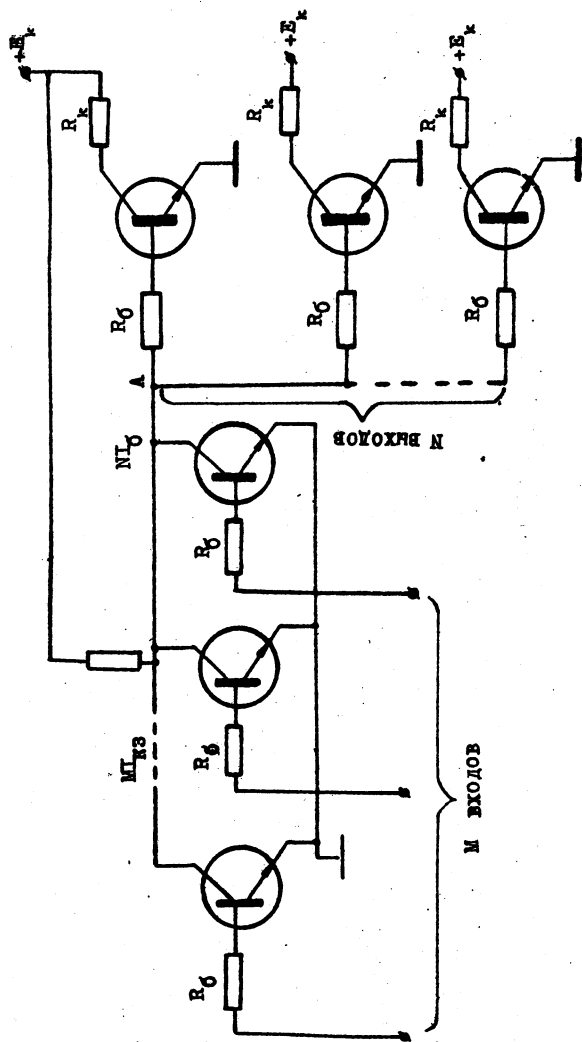


Рис. 1. Общая схема каскадов с резистивными связями, где
 М транзисторов (М входов) нагружаются на N тран-
 зисторов (N выходов)

$$= \iiint_D \frac{f(y_1, y_2, \dots, y_m)}{(2\pi)^{n/2} |\Theta|^{1/2}} \cdot \sum_{j=1}^n \Theta_{jj}^{-1} (x_j - \bar{x}_j) \exp \left\{ -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \Theta_{ij} \right. \\ \left. (x_i - \bar{x}_i)(x_j - \bar{x}_j) \right\} dx_1 \cdot dx_2 \cdot \dots \cdot dx_n \cdot dy_1 \cdot dy_2 \cdot \dots \cdot dy_m,$$

где: Θ^{-1} - матрица, обратная корреляционной матрице Θ ,
 p - процент выхода,
 n - размерность корреляционной матрицы.

Операция "-" означает получение математического ожидания от распределенного параметра.

Описанный метод был применен для оптимизации логических схем с резистивными связями и микросхем типа "Тропа". На рис.1 представлена схема обобщенного логического элемента с резистивными связями, пример оптимизации которого (поиск локального оптимума) в плоскости E_k , R_k показан на рис.2.

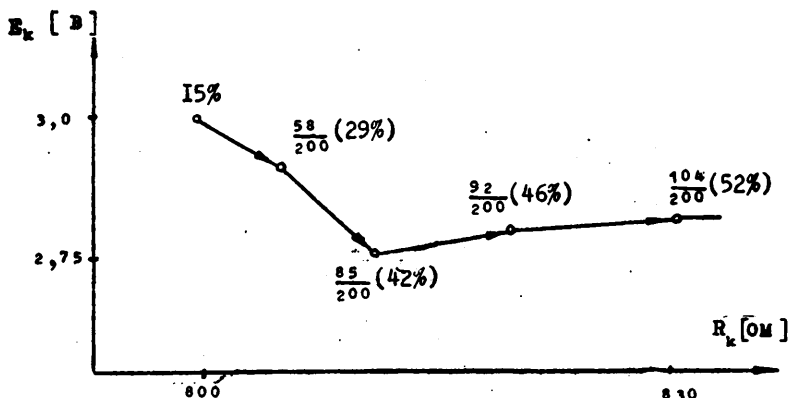


Рис. 2. Поиск локального максимума.

Метод прямого определения градиента не позволяет найти глобальный оптимум процента выхода оптимизируемых схем. Эту задачу можно решить, используя метод оврагов, иллюстрация которого приведена на рис.3.

Из точек X_{n-1} и X_n производится поиск локальных оптимумов (A_{n-1} и A_n). Для отыскания следующего оптимума A_{n+1} на прямой, соединяющей точки A_{n-1} и A_n , на расстоянии овражного шага h выбирается следующая точка X_{n+1} и из неё

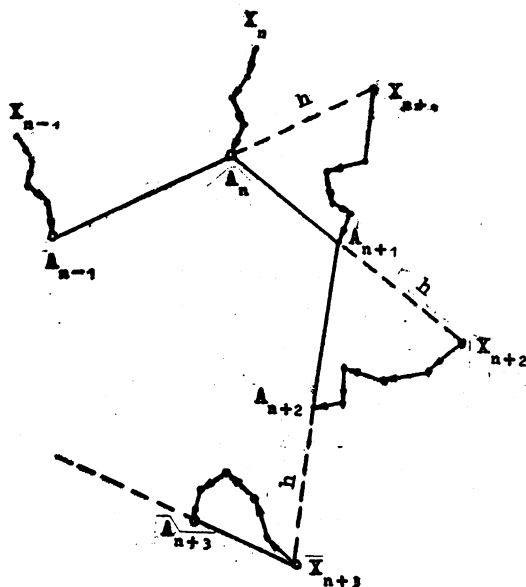


Рис. 3. Метод оврагов.

производится локальный спуск в точку A_{n+1} . Затем на прямой, соединяющей точки A_n и A_{n+1} , снова выбирается следующая точка отхода и описанный процесс повторяется.

Рассмотренный метод позволяет найти глобальный оптимум, максимально используя всю информацию о функции процента выхода, получаемую при оптимизации.

В ы в о д и

1. Метод статистического проектирования позволяет существенно улучшить качественные показатели логических схем на дискретных компонентах и является, по-видимому, единственным методом проектирования интегральных схем.

2. Рассмотрен полный комплекс вопросов, связанных с применением метода статистического проектирования для расчета и оптимизации конкретных логических микросхем.

3. Применение рассмотренного метода позволяет дать обоснованные рекомендации при проектировании интегральных схем, сократить сроки проектирования и предъявить требования к технологическому процессу их изготовления.

ЛИТЕРАТУРА

1. W.Dunnet, HoYu-Chi. Statistical analysis of transistor-resistor logic networks.- IRE Internat.Convection Rec.,1960,vol.8,N 2.
2. А.В. Николаев, Г.М.Паратов. К вопросу о статистическом методе расчета логических схем с непосредственной связью. В сб. "Полупроводниковые приборы и их применение", под редакцией Фетодова Я.А., вып. 15, Изд-во "Сов, радио", 1966.
3. Б.Л. Доннер: О законах распределения некоторых параметров транзистора.-Труды МИЭМ, вып.2, 1966 г.
4. Метод статистических испытаний (Метод Монте-Карло). СМБ, 1962 г.
5. А.В. Николаев, Г.М. Паратов, Г.С. Шульгина. Использование математической модели для расчета транзисторных схем. (см. статью в настоящем сборнике).