УДК 621.372.061

И. С. КАШИРСКИЙ, канд. техн. наук

КООРДИНАТНЫЙ МЕТОД АНАЛИЗА СХЕМ НА НАИХУДШЕЕ СОЧЕТАНИЕ ДОПУСКОВ

Важным показателем качества схемы является чувствительность ее характеристик к разбросу параметров элементов. Хотя вероятностные методы расчета дают более верную оценку этого показателя, для построения вероятностных моделей транзисторов, интегральных схем и т. д. необходимо выполнить такой объем измерений, который не всегда осуществим на практике.

Нами предлагается метод анализа наихудшего случая, в основу которого положена вычислительная процедура координатного поиска, приспособленная к свойствам решаемой задачи.

Представим функцию качества схемы как многомерную функцию параметров $Q(x_1, \ldots, x_n)$ и укажем предполагаемые границы распределения параметров $x_1, \ldots, x_n$, определенные допуском — $(x_{i0} \pm \Delta x_i)$. При анализе наихудшего случая закон распределения значений параметров x_i на интервале $(x_{i0} \pm \Delta x_i)$ не учитывается. Сформулируем задачу анализа как задачу нелинейного программирования: найти значения переменных $x_1, \ldots, x_n$, обеспечивающих максимальное (или минимальное) значение функции $Q(x_1, \ldots, x_n)$ при условии $x_{i0} - \Delta x_i \leqslant x_i \leqslant x_{i0} + \Delta x_i$ $(i = 1, \ldots, n)$.

В координатном методе на i-м шаге варьируется только одна i-я переменная, для которой можно подобрать оптимальное значение с помощью методов одномерного поиска [1]. Учитывая особые свойства задачи, процесс поиска можно существенно ускорить. В отличие от случая минимизации функций общего вида в данной задаче известны пределы изменения i-й переменной, причем в большинстве случаев ее оптимальное значение $x_{i\,\mathrm{opt}}$ равно граничному значению. Это означает, что в начале одномерного поиска достаточно просмотреть три значения x_i: начальное $x_{i\,\text{нач}}$ (оно может не совпадать с x_{i0}) и два граничных $x_{i0} \pm \Delta x_i$. Возможные вычислительные ситуации при поиске минимального значения Q представлены на рис. 1. По алгоритму координатного метода для кривых *1*, *2*, *3* дополнительные проверки не выполняются и из трех значений x_i сразу выбирается наихудшее. Для кривых 4 *а*, *б* необходимы дальнейшие проверки, которые выполняются с помощью аппроксимации найденных точек кривой полиномом степени m, причем степень m можно повышать по мере усложнения кривой. Для кривой 4 *б* переход от квадратичной аппроксимации $m=2$ к кубической целесообразно осуществлять только в случае, когда после расчета для кривой 4 *а* обнаружена аномалия вида $Q(x_{i\,\mathrm{opt}}) > Q(x_{i0} + \Delta x_i)$, $Q(x_{i0} - \Delta x_i)$. Найденное значение $x_{i\,\mathrm{pot}}$ сохраняется для x_i при поиске экстремума Q по переменной x_{i+1}.

Многократное циклическое изменение переменных приводит к решению задачи анализа. Практический опыт расчета показывает, что при отсутствии аномалий объем расчетов не превышает $(2—3)\ n$, что намного меньше, чем 2^n для методов перебора, и меньше, чем $(10—15)\ n$ для методов нелинейного программирования.

Приведенный алгоритм позволяет для выбранной функции качества найти максимальное и минимальное значения. В опи-

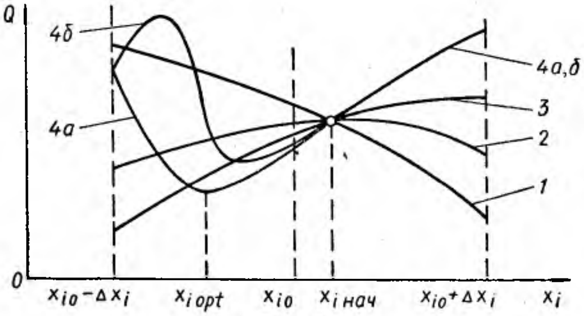

Рис. 1

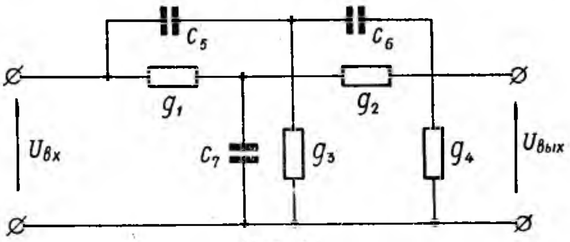

Рис. 2

сание его не внесены формулы расчета $x_{i\ \mathrm{opt}}$ для аппроксимации $m=3$ и $m=4$, реализующие решение квадратного или кубического уравнений.

Исходные данные: функция качества схемы $Q(x_1, ..., x_n)$ (в общем случае ее заменяет подпрограмма анализа характеристик схемы); номинальные значения параметров $x_{10}, ..., x_{n0}$; допуски на параметры $\Delta x_1, ..., \Delta x_n$.

0. Полагаем коэффициент $t=1$ (он определяет выбор минимального значения Q) и $x_i=x_{i0}$ $(i=1, ..., n)$.

1. Вычисляем $F_H=Q(x_1, ..., x_n)$ и полагаем $F=F_H$.

2. Полагаем $i=1$.

3. Если $x_i=x_{i0}$, то полагаем $F_0=F$, $x_i'=x_i-\Delta x_i$, $x_i''=x_{i0}+$ $+\Delta x_i$ и вычисляем $F_1=Q(x_i')$ и $F_2=Q(x_i'')$. Переходим к п. 6.

4. Если $x_i=x_{i0}-\Delta x_i$, то полагаем $F_1=F$, $x_i'=x_{i0}$, $x_i''=x_{i0}+$ $+\Delta x_i$ и вычисляем $F_0=Q(x_i')$ и $F_2=Q(x_i'')$. Переходим к п. 6.

5. Если $x_i = x_{i0} + \Delta x_i$, то полагаем $F_2 = F$, $x_i' = x_{i0}$, $x_i'' = x_i - \Delta x_i$ и вычисляем $F_0 = Q(x_i')$ и $F_1 = Q(x_i'')$.

6. Если $tF_1 < tF_0 < tF_2$ или $tF_1 > tF_0 > tF_2$ или $tF_1, tF_2 < tF_0$, то выбираем $tF = \min\{tF_0, tF_1, tF_2\}$ и соответствующий этому минимальному значению параметр x_i. Переходим к п. 9.

7. Если tF_1, $tF_2 > tF_0$, то полагаем $x_{i\,\text{opt}} = x_{i0} + \frac{\Delta x_i}{2} \frac{F_2 - F_1}{F_1 + F_2 - 2F_0}$ и вычисляем $F_A = Q(x_{i\,\text{opt}})$.

8. Если $tF_A > tF_1$, tF_2, то повышаем порядок аппроксимации вычисляем $x_{i\,\text{opt}}$ и переходим к п. 10.

9. Если $t \cdot F_0 < tF_A$, то полагаем $F = F_0$ и $x_i = x_{i0}$, иначе полагаем $F = F_A$ и $x_i = x_{i\,\text{opt}}$.

10. Полагаем $i = i + 1$.

11. Если $i \leqslant n$, то возвращаемся к п. 3.

12. Если $tF < tF_H$, то полагаем $F_H = F$ и возвращаемся к п. 2.

13. Если $t = 1$, то полагаем $Q_{\min} = F$; $x_{i\min} = x_i$; $x_i = x_{i0}$ $(i = 1, \ldots, n)$; $t = -1$ (такой выбор t определяет максимальное значение Q) и возвращаемся к п. 1.

14. Полагаем $Q_{\max} = F$ и $x_{i\max} = x_i$ $(i = 1, \ldots, n)$.

Для примера проанализируем наихудший случай для схемы двойного Т-образного моста (рис. 2), номинальные нормированные значения параметров которого выбраны равными: $g_1 = g_2 = 2{,}12$; $g_3 = 5{,}16$; $g_4 = 1{,}00$; $C_5 = C_6 = 2{,}00$; $C_7 = 0{,}40$. Номинальная амплитудно-частотная характеристика коэффициента передачи схемы по напряжению $K_U = |V_{\text{вых}}/V_{\text{вх}}$ изображена кривой *1* на рис. 3. Для практической реализации схемы выбраны элементы с допусками 5%. Расчет наихудшего сочетания допусков координатным методом для 15 точек частотной оси от $\omega = 0$ до 2,8 с шагом 0,2 потребовал 198 расчетов коэффициента передачи и занял 67 с машинного времени на ЭВМ БЭСМ-6. Рассчитанные максимальное и минимальное значения частотных характеристик представлены кривыми *2 а, б* на рис. 3. Эти кривые образуют несимметричный «коридор», внутрь которого попадают все амплитудно-частотные характеристики K_U для любых случайных значений параметров элементов в пределах допуска.

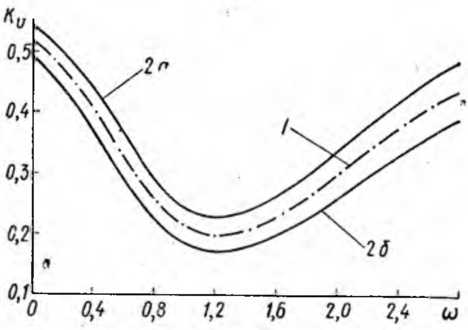

Рис. 3

Описанный координатный метод пригоден для анализа наихудшего сочетания допусков схем любого класса (линейных резистивных и частотно-зависимых, нелинейных в статическом и динамическом режимах и т. д.).

Список литературы: 1. *Трохименко Я. К., Каширский И. С., Ловкий В. К.* Проектирование радиотехнических схем на инженерных ЭЦВМ. Киев, Техніка, 1976. 424 с.

I. S. Kashirsky

COORDINATE METHOD FOR WORST-CASE ANALYSIS OF CIRCUITS BY DIGITAL COMPUTER

The new method for worst case analysis based on optimization procedure is proposed. It is shown the method offered is more effective than the existing methods for worst-case analysis of circuits.