

М 79862
Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н. Э. Баумана

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

В. В. ШЕРСТНЕВ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПТИМАЛЬНОГО РАСЧЕТА
ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ С АВТОМАТИЧЕСКИМ ВВОДОМ
ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ В ЦВМ**

(№ 252. «Вычислительная техника»)

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Работа выполнена в Московском высшем техническом училище им. Н. Э. Баумана.

Научный руководитель — доктор технических наук, профессор Анисимов Б. В.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Рязанкин В. Н.

кандидат технических наук, доцент Трунов Ю. А.

Ведущее предприятие — указано в решении Ученого Совета.

Автореферат разослан «22» ноября 1969 г.

Защита диссертации состоится «22» декабря . 1969 г.
на заседании Ученого Совета факультета «П» Московского
высшего

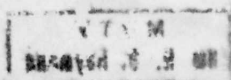
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ
им. Баумана по адресу: Москва, ул. Бауманская, д. 5.

На правах рукописи
Наименование диссертации: Расчет оптимального
расчета оптимального
информационного
степени исходной
ание ученой

Ваше предложение
су: Москва
Совета
М 79862
по адре-
у секретарю

ка

Карабанов





1079862

Шерстнев В. В. Разработка

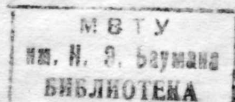
Существенной стороной современного научно-технического прогресса является все возрастающее использование цифровых вычислительных машин (ЦВМ) в различных отраслях народного хозяйства. Это приводит к разработке универсальных ЦВМ повышенной сложности. Однако, чем сложнее ЦВМ, тем более трудоемкой становится ее разработка. Возможные сроки выпуска таких ЦВМ начинают отставать от темпов технического прогресса.

Основными доводами, определяющими необходимость совершенствования методов проектирования ЦВМ, являются требования сокращения сроков проектирования, повышение его качества, а также возможность сокращения роста численности коллективов разработчиков.

Этап разработки принципиальных электрических схем является одним из важнейших этапов проектирования ЦВМ, во многом определяющим качество создаваемой машины. Проектирование элементов ЦВМ по электрическим параметрам до недавнего времени выполнялось методом экспериментального подбора посредством последовательного приближения к требуемым характеристикам и частичного расчета. Однако, подобный метод проектирования очень трудоемок, не всегда приводит к оптимальным результатам, и, что главное, часто бывает вообще неосуществим в нужные сроки с приемлемой затратой средств. Поэтому в последнее время для расчета электронных схем стали использовать ЦВМ.

Задача оптимального проектирования электронных схем может быть сформулирована как задача стохастического нелинейного программирования. Подобный подход позволяет при проектировании использовать современные методы оптимизации многопараметрических систем.

Задачу оптимального проектирования целесообразно решать с использованием метода математического моделирования. Метод позволяет оценивать выходные параметры с погрешностью не хуже 10—15%. Математической моделью электронной схемы является система обыкновенных дифференциальных уравнений.



M49862

Трудоемкость получения математических моделей схем является одной из причин, тормозящих широкое применение ЦВМ в практике проектирования электронных схем. Желательно использовать такие математические модели, которые бы позволили подготовку задачи к моделированию схем на ЦВМ в значительной степени или полностью поручить самой машине.

В настоящей работе ставится задача исследования и разработки методики оптимального расчета электронных схем. Рекомендуемая методика является основой для автоматического проектирования элементов ЦВМ с помощью цифровых вычислительных машин.

В первой главе показано, что задача оптимального расчета элементов ЦВМ сводится к задаче стохастического нелинейного программирования. Наиболее общим критерием качества (целевая функция) элементов ЦВМ является вероятность удовлетворения схемой заданных технических требований (ТТ) на выходные параметры. Для оценки критерия качества разработан метод ускоренных статистических испытаний схемы.

Электрические процессы в электронных переключательных схемах описываются системой обыкновенных дифференциальных уравнений в нормальной форме:

$$\frac{dV_j}{dt} = f_j(V_1, V_2, \dots, V_j, \dots, V_n, t), \quad (j=1, 2, \dots, n), \quad (1)$$

где V_j — исследуемая функция (напряжение и токи реактивных элементов);

t — независимая переменная (текущее время).

К проектируемой электронной схеме предъявляется определенная совокупность требований, выполнение которых является необходимым и достаточным условием ее безотказной работы. Данная совокупность требований, выраженная в виде системы неравенств, называется системой условий работоспособности схемы, которая в общем случае имеет следующий вид:

$$y_j = \varphi_j(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n) \{<, >\} y_{j\text{ТТ}} \quad (j=1, 2, \dots, m), \quad (2)$$

где y_j — значение j -го выходного параметра схемы;

$y_{j\text{ТТ}}$ — значение j -го выходного параметра по ТТ;

φ_j — функция работоспособности;

x_i — входные параметры (параметры компонентов и внешние условия).

Вследствие производственного разброса компонентов схемы и воздействия дестабилизирующих факторов заданные условия работоспособности удовлетворяются схемой не абсолютно, а с определенной вероятностью P . Поскольку любая проектируемая схема прежде всего должна удовлетворять заданным ТТ, то вероятность P следует рассматривать как наиболее общий и важный критерий, характеризующий качество выполненного проекта. Такой подход позволяет сформулировать задачу проектирования электронных переключательных схем как задачу стохастического нелинейного программирования.

Требуется определить k переменных $x_1, x_2, \dots, x_k$, которые удовлетворяют m неравенствам

$$\varphi_j(x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_n) \{<, >\} y_{j\text{ТТ}} \quad (j=1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

и максимизируют функцию

$$P=f(x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_n), \quad (4)$$

где $(x_1, x_2, \dots, x_k)$ — управляемые (изменяемые в процессе оптимизации) параметры схемы;

$x_{k+1}, x_{k+2}, \dots, x_n$ — неуправляемые (неизменяемые в процессе оптимизации) параметры схемы.

В общей задаче нелинейного программирования функции (3) и (4) предполагаются известными. При описании электрических процессов системой уравнений вида (1) функциональные зависимости вида (3) и (4) отсутствуют.

Работоспособность и целевая функция схемы на каждом шаге поиска экстремума оцениваются путем многократного интегрирования системы дифференциальных уравнений. Вычисление вероятности P методом статистических испытаний на ЦВМ приводит к чрезмерно большим затратам машинного времени. Предлагаемый в работе метод ускоренных статистических испытаний, являющийся комбинацией методов статистических испытаний и наихудшего случая, позволяет устранить этот недостаток.

С помощью метода ускоренных статистических испытаний вычисление допуска δ_j j -го выходного параметра выполняется по формуле:

$$\delta_j = A_j \cdot \gamma_j, \quad (5)$$

где γ_j — допуск j -го выходного параметра, вычисленный методом наихудшего случая.

Коэффициенты A_j определяются следующим образом: в исходной точке пространства параметров производится расчет допусков δ_j' методом Монте-Карло и определяются значения допусков γ_j . Отношения δ_j' к γ_j позволяют определить коэффициенты A_j . Коэффициенты A_j значительно слабее, чем величины γ_j и δ_j' зависят от совокупности значений внутренних параметров. Полагая в дальнейшем постоянными коэффициенты A_j и знаки коэффициентов влияния, допуски δ_j вычисляются по формуле (5).

Метод ускоренных статистических испытаний рекомендуется использовать при необходимости многократного расчета допусков δ_j выходных параметров в различных точках пространства параметров. По методу ускоренных статистических испытаний вероятность P можно вычислять лишь в том случае, когда известны законы распределений выходных параметров. В противном случае оптимизацию электронных схем предлагается выполнять по критерию запаса работоспособности схемы. Запас работоспособности Z_j на j -й выходной параметр схемы определяется соотношением:

$$Z_j = \frac{y_{j\text{тт}} - y_{j\text{ном}}}{\delta_j}, \quad (6)$$

где $y_{j\text{ном}}$ — номинальное значение j -го выходного параметра, вычисленного при номинальных значениях входных.

Задача оптимизации в этом случае сводится к максимизации минимального запаса Z_j , который и будет являться целевой функцией.

Вторая глава посвящена выбору и исследованию метода поиска экстремума функции многих переменных применительно к задаче оптимального расчета параметров электронных схем. Отличительной особенностью целевой функции электронных схем (P или Z_j) является наличие гребней. Поиск экстремума целевой функции, обладающей подобным свойством, выполняется с использованием метода оврагов (метод разработан для получения минимума целевой функции, находящейся на дне оврага). В качестве локальных методов рекомендуется использовать или разновидность метода статистического градиента или метод случайного поиска «наказание случайностью».

В методе статистического градиента изменение управляемых параметров осуществляется вдоль направлений, определяемых знаками коэффициентов влияния ρ_{ij} . При постоянстве знаков ρ_{ij} в определенном диапазоне изменения управляемых параметров отпадает необходимость определения направления увеличения целевой функции на каждом шаге поиска. Данный алгоритм поиска пригоден в том случае, когда в качестве критерия оптимизации выбран запас работоспособности схемы Z_j .

Рабочий шаг $\Delta X = (\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_k)$ в пространстве параметров делается в сторону увеличения минимального значения запаса работоспособности в соответствии со знаками коэффициентов влияния и ТТ на выходной параметр схемы

$$\Delta x_i = \begin{cases} a_i \cdot \text{sign} [\rho_{ij}] & \text{при ограничении } y_j \text{ по ТТ сверху} \\ -a_i \cdot \text{sign} [\rho_{ij}] & \text{при ограничении } y_j \text{ по ТТ снизу} \end{cases} \quad (7)$$

$i=1, 2, \dots, k,$

где a_i — величина шага для i -го управляемого параметра. Этот метод можно считать наиболее эффективным по быстродействию, ибо каждый шаг приближает систему к гребню целевой функции.

В шаговом алгоритме случайного поиска «наказание случайностью» в качестве целевой функции можно использовать как вероятность P , так и запас работоспособности. Для этого алгоритма характерно введение элемента случайности после неудачного шага.

Оценка эффективности метода случайного поиска выполняется на моделях целевой функции, которые определяют наиболее характерные ее черты. Оптимизация многопараметрических систем в линейном поле при $k \geq 3$, где k — число управляемых параметров схемы, более эффективно чем регулярным методом градиента, выполняется методом случайного поиска. Для центральной модели при больших числах степеней свободы метод градиента оказывается выгоднее метода случайного поиска «наказание случайностью».

Эффективность рассмотренных методов поиска выполняется на тестовой функции двух переменных, поверхности постоянного уровня которой имеют вид оврага с искривленным дном. Для отслеживания оврага приблизительно одной и той же длины при использовании метода статистического

градиента понадобилось выполнить 41 локальный шаг, при использовании метода случайного поиска — 98 шагов. С точки зрения потерь на поиск использование метода статистического градиента в методе оврагов более эффективно, чем использование метода случайного поиска «наказание случайностью».

В третьей главе излагаются разработанные алгоритмы автоматического составления математических моделей электронных схем.

Количество дифференциальных уравнений в нормальной форме, при помощи которых описываются электрические процессы в схеме, зависит от числа реактивных элементов C и L и их связи между собой.

Система дифференциальных уравнений будет получена в нормальной форме, если «особенным» образом построить дерево графа. Построение «особенного» дерева графа должно производиться таким образом, чтобы в дерево входило максимально возможное число емкостных и минимально возможное число индуктивных ветвей. Токи индуктивных хорд (хорда — ветвь, не вошедшая в дерево), напряжения емкостных ветвей дерева являются определяющими координатами схемы. Напряжения и токи емкостных хорд, индуктивных ветвей дерева, а также резистивных ветвей графа являются нежелательными переменными, которые в процессе получения системы уравнений вида (1) могут быть исключены. Матричные методы являются удобными способами записи как алгебраических, так и дифференциальных уравнений, позволяющими уменьшить время подготовки задачи к решению на ЦВМ и в значительной степени упростить программирование.

Для описания электрической цепи применяются несколько видов матриц. Наиболее важными из них являются $\|M\|$ и $\|Q\|$ матрицы. Два закона Кирхгофа и закон Ома позволяют рассчитать любую электрическую цепь. Законы Кирхгофа можно объединить в матричной форме в следующей записи:

$$\begin{pmatrix} I_v \\ U_x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \|Q\| \\ \|M\| \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_v \\ I_x \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где I_v, I_x — токи ветвей и хорд графа;
 U_v, U_x — напряжения ветвей и хорд графа.

Исключение нежелательных резистивных переменных (токи и напряжения на сопротивлениях схемы) осуществляется в два этапа. Первоначально исключаются нежелательные резистивные переменные хорд:

$$a_{ij_{k+1}} = a_{ij_k} + \frac{R_j \cdot Q_i}{R_x}, \quad (9)$$

где a_{ij_k} и $a_{ij_{k+1}}$ — элемент i -й строки и j -го столбца обобщенной матрицы на k -м и $(k+1)$ -м шаге исключения нежелательных переменных;
 R_j и Q_i — j -й элемент строки и i -й элемент столбца исключаемой переменной;
 R_x — сопротивление исключаемой переменной.

Затем исключаются нежелательные резистивные переменные ветвей дерева графа:

$$a_{ij_{k+1}} = a_{ij_k} + \frac{R_j \cdot Q_i}{Y_b - a_{ij}^*}, \quad (10)$$

где a_{ij}^* — значение элемента матрицы, находящегося на пересечении исключаемой i -й строки и j -го столбца;
 Y_b — величина проводимости исключаемой переменной ветви дерева графа.

Общий вид системы дифференциальных уравнений в матричной форме для схемы, содержащей нежелательные емкостные и индуктивные переменные, будет:

$$\begin{Bmatrix} \dot{U} \\ I \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} C_M^{-1} & 0 \\ 0 & L_M^{-1} \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} Z_1^* & Z_2^* \\ Z_3^* & Z_4^* \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} U \\ I \end{Bmatrix}, \quad (11)$$

где $\begin{Bmatrix} U \\ I \end{Bmatrix}$ — матрица-столбец независимых переменных;

$\begin{Bmatrix} Z_1^* & Z_2^* \\ Z_3^* & Z_4^* \end{Bmatrix}$ — обобщенная матрица, полученная после удаления нежелательных резистивных переменных;

$\begin{Bmatrix} C_M^{-1} & 0 \\ 0 & L_M^{-1} \end{Bmatrix}$ — матрица реактивных элементов (C_M и L_M — емкостная и индуктивная матрицы схемы).

При наличии независимых емкостных контуров (индуктивных звезд) матрицу C_M (равно как и матрицу L_M) предлагается рассматривать как клеточную. Обращение матрицы по клеткам позволяет в значительной степени сократить затраты машинного времени.

Использование выражений (9) и (10) при исключении нежелательных резистивных переменных накладывает на топологию схемы следующие ограничения:

— при подключении к дереву графа резистивной хорды в образовавшемся контуре не должно быть более двух сопротивлений;

— при подключении индуктивной хорды в контур не должно входить более одного сопротивления.

Для автоматического составления математических моделей схем предложены алгоритмы построения особенного дерева графа и алгоритм получения $\|M\|$ матрицы. Для ЦВМ «Минск-2» разработаны эффективные программы анализа электронных переключательных схем, реализующие предложенные алгоритмы и позволяющие рассчитывать переходные процессы в схемах, а также допуски выходных параметров методами статистических испытаний, ускоренных статистических испытаний и наихудшего случая.

Глава четвертая посвящена разработке и практическому использованию алгоритма оптимального расчета электронных переключательных схем по электрическим параметрам.

Оптимизация параметров электронных схем выполняется с использованием метода ускоренных статистических испытаний.

Первым этапом алгоритма является полный статистический анализ схемы и расчет допусков методом наихудшего случая в исходной для оптимизации точке пространства параметров. Результатом анализа являются значения коэффициентов влияния ρ_{ij} и значения коэффициентов A_j .

На втором этапе осуществляется поиск экстремума целевой функции (вероятности P удовлетворения схемой заданных ТТ или запаса работоспособности Z_j) овражным методом.

На третьем этапе алгоритма после получения экстремума целевой функции повторно выполняется полный статистический анализ схемы с целью проверки справедливости принятых предположений (постоянстве знаков ρ_{ij} и коэффициентов A_j). При изменении знаков ρ_{ij} и значений коэффициентов A_j производится дальнейшая оптимизация.

Если изменением только управляемых параметров нельзя получить значение целевой функции больше заранее заданной величины, то оптимизация повторяется с новыми улучшенными значениями качественных показателей входных параметров схемы (использование более эффективных типов

активных компонентов, использование пассивных компонентов более высоких классов точности и т. д.). В том случае, когда невозможно улучшить качественные показатели входных параметров необходимо изменить саму схему. И в том и в другом случае поиск оптимальных значений управляемых параметров необходимо начинать с расчета значений ρ_{ij} и A_j , так как указанные изменения могут привести к изменению знаков ρ_{ij} и величин A_j .

Предложенные алгоритмы и методика расчета проверялись при оптимальном расчете параметров электрических и электронных схем различной сложности. На примере схемы делителя напряжения проиллюстрировано выполнение отдельных этапов методики оптимального расчета и дан анализ полученных результатов. На этом примере, а также на примере оптимизации схемы полупроводникового инвертора подробно исследована степень выполнения принятых в методе ускоренных статистических испытаний предположений. В широком диапазоне изменения управляемых параметров (в 2—5 раз) погрешность определения допуска δ_j по формуле (5) не превышает 26% (в худшем случае). Знаки коэффициентов влияния ρ_{ij} , имеющие коэффициенты корреляции $|r_{ij}| > 0,196$, в рассматриваемом диапазоне изменения управляемых параметров оставались постоянными.

В исходной для оптимизации точке пространства параметров инвертор не удовлетворял заданным ТТ ($P=0$). После оптимального расчета вероятность удовлетворения схемой заданных ТТ стала равной 0,99.

По предлагаемой методике была оптимизирована схема низкочастотного триггера системы элементов «Элемент 2», который до оптимизации в одном из критических режимов по внешним параметрам (внешние параметры отклоняются в сторону наименее благоприятную для одного из выходных параметров) удовлетворял ТТ с вероятностью, равной $P=0,75$. После оптимизации при новых значениях внутренних параметров эта схема позволила увеличить значение вероятности и получить ее не хуже 0,96.

В работе получены следующие основные результаты:

1. Задача оптимального проектирования электронных переключательных схем сведена к задаче стохастического нелинейного программирования.
2. Наиболее общим критерием, оценивающим качество выполненного проекта при известных законах распределений

внутренних и выходных параметров схемы является вероятность удовлетворения схемой заданных условий работоспособности. В случае, когда законы распределений выходных параметров схемы неизвестны, за критерий оптимизации принимается запас работоспособности схемы.

3. Для вычисления значений вероятности удовлетворения схемой заданных условий работоспособности или запаса работоспособности разработан метод ускоренных статистических испытаний.

4. Метод оврагов является наиболее приемлемым методом для решения задачи оптимального проектирования электронных переключательных схем. В качестве локальных методов рекомендуется использовать случайные методы поиска.

5. Разработан и исследован алгоритм автоматического составления системы дифференциальных уравнений (математическая модель схемы), описывающий электрические процессы в электронной схеме и позволяющий свести к минимуму затраты времени на подготовку задачи к решению.

6. Разработан алгоритм оптимального расчета электронных переключательных схем, позволяющий учитывать изменения внешних условий и производственный разброс параметров компонентов. С целью экспериментальной проверки основных положений диссертационной работы был выполнен оптимальный расчет делителя напряжения, инвертора и триггера.

По теме диссертации сделаны доклады на шести конференциях, семинарах и сессиях союзного и республиканского значения.

*
* *

Основные результаты диссертаций изложены в следующих работах:

1. Анисимов Б. В., Норенков И. П., Шерстнев В. В., Автоматическое составление на ЦВМ системы дифференциальных уравнений, описывающих электрические процессы в электронных схемах, «Вычислительная техника», изд. БГУ имени В. И. Ленина, Минск, 1969.

2. Анисимов Б. В., Норенков И. П., Шерстнев В. В., Анализ работы генератора на туннельном диоде на ЦВМ, «Вычислительная техника», изд. БГУ им. В. И. Ленина, Минск, 1969.

3. Норенков И. П., Шерстнев В. В., Статистический анализ и оптимизация параметров электронных переключательных схем, В сб. «Труды МИЭТ», Москва, 1969 (в печати).

