

# Выбор точек моделирования при построении поверхности отклика для задачи проектирования аналоговой схемы

М.М. Гурарий, М.М. Жаров, А.А. Лялинский, А.Л. Стемповский

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
“Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук” (ИППМ РАН), г. Москва, Россия

**Аннотация.** Предложен алгоритм формирования макромодели аналоговой схемы в виде загруженных в базу данных результатов моделирований схемы для выбранного множества точек в пространстве ее параметров. Алгоритм ориентирован на минимизацию количества моделируемых точек при заданной точности представления поверхности отклика для показателей схемы. Численные эксперименты подтвердили преимущества предложенного подхода по сравнению с использованием равномерных сеток.

**Ключевые слова:** автоматизация проектирования, аналоговая схема, аппроксимация, база данных, оптимизация, схемотехническое моделирование, суррогатная модель, поверхность отклика.

DOI 10.14357/20718632180201

## Введение

Несмотря на то, что системы автоматизации проектирования (САПР) аналоговых интегральных схем (ИС) развиваются уже в течение нескольких десятилетий, они по-прежнему находятся в зачаточном состоянии по сравнению с подобными средствами для цифровых схем. Поэтому актуальной проблемой является поиск новых подходов к решению этой задачи.

Существующие подходы к построению САПР аналоговых схем можно классифицировать следующим образом.

1. Наиболее ранние экспертные системы основывались на плане вычислений, разработанном опытными проектировщиками [1, 2]. Такие методы требуют малых затрат времени при выполнении, но разработка плана и его актуализация по мере развития технологий являются

очень затратными задачами, существенно ограничивающими применимость подхода.

2. Оптимизация на базе уравнений [3, 4]. Использует аналитические выражения, связывающие показатели схемы с параметрами проектирования для решения классической оптимизационной задачи, формирующей требуемое проектное решение. Основным недостатком связан с отсутствием аналитических выражений для характеристик большинства реальных схем.

3. Оптимизация на базе схемного моделирования [5-7]. Наиболее универсальный подход, использующий обращение к симулятору типа SPICE для получения характеристик схемы. Недостаток заключается в высоких вычислительных затратах на этапе выработки проектного решения.

4. Методы суррогатного моделирования (мета-модели, поверхность отклика) [8-10] подразумевают замену вычислительно сложной функции (SPICE-модель) более простой и менее затратной аппроксимацией. Такой подход существенно снижает затраты процесса проектирования при высоких затратах построения суррогатной модели, которые не являются критическими, так как могут выполняться заранее, до получения проектного задания.

Построение суррогатных моделей включает такие методы как регрессия (линейная, квадратичная, полиномиальная), крикинг (основан на использовании гауссовских функций), радиальные базисные функции (различные функции от расстояния до начала координат), нейронные сети и другие. Большое количество различных методов аппроксимации свидетельствует о трудностях задания единого подхода для разных объектов и необходимости индивидуального подхода к каждой задаче проектирования. Это требует поддержки разнохарактерного программного обеспечения задач поиска проектных решений для разнообразных типов схем, что представляется существенным недостатком суррогатного моделирования.

Этот недостаток может быть исключен, если представить модель в виде достаточно плотного множества точек в пространстве параметров, для которых найденные значения показателей схемы отображают соответствующую поверхность с требуемой точностью. Если подобная модель загружена в базу данных (БД), то решение многих задач проектирования не требует специального программного обеспечения, а может быть реализовано с использованием лишь стандартного языка структурированных запросов SQL [11], входящего во все современные реляционные СУБД, например, MySQL [12]. Такой подход на основе прямого отображения поверхности качественных показателей часто называется исчерпывающей выборкой (exhaustive sampling), но он в рамках суррогатного моделирования используется только для тестирования других методов, так как считается, что он неприменим для практических высокоразмерных задач из-за недопустимо высоких затрат компьютерных ресурсов [13].

Однако в настоящее время стоимость вычислительных ресурсов ежегодно резко снижается, что наряду с возможностью использования распределенной обработки информации позволяет рассчитывать на реализацию весьма ресурсоемких проектов. Другим важным источником реализуемости подобных задач является разработка программных средств, обеспечивающих требуемую точность представления показателей при минимальном количестве точек моделирования из пространства параметров, хранимых в БД.

Разработке алгоритма решения этой задачи посвящена данная статья. Надо отметить, что в методах суррогатного моделирования отбор точек обычно осуществляется на основе методов планирования эксперимента (латинский гиперкуб, ортогональные массивы) [14], которые обеспечивают достаточно равномерное заполнение области параметров, но не учитывают форму поверхности отклика. Наше предложение состоит в последовательном отборе точек с максимальной оценкой погрешности кусочно-линейной аппроксимации, создаваемой поверхности качественных показателей схемы.

Работа выполнялась в ИППМ РАН в рамках разработки информационно-поисковой системы (ИПС) Ассистент Разработчика Схемотехника (АРС) для автоматизации проектирования аналоговых ИС в режиме веб-доступа.

## 1. Характеристика алгоритма

### 1.1. Представление результатов работы алгоритма

Макромодель аналоговой схемы представляется в БД набором точек в действительном пространстве размерностью  $N+M$ , где  $N$  – число параметров схемы,  $M$  – число ее качественных показателей. Каждая многомерная точка определяется вектором

$$DB\_point = [P, R] = [p^{(1)}, p^{(2)}, \dots, p^{(N)}, r^{(1)}, r^{(2)}, \dots, r^{(M)}], \quad (1)$$

где  $P = [p^{(1)}, p^{(2)}, \dots, p^{(N)}]$ ,

$R = [r^{(1)}, r^{(2)}, \dots, r^{(M)}, r^{(1)}, r^{(2)}, \dots, r^{(M)}]$  – вектора параметров ( $P$ ) или качественных показателей ( $R$ ) соответственно.

При генерации макромодели значение вектора качественных показателей схемы определяется с помощью моделирования схемы с заданным вектором параметров  $P$  симулятором типа SPICE:

$$R = SPICE(P) \quad (2)$$

### 1.2. Требования к алгоритму и принцип его построения

Алгоритм должен обеспечивать требуемую точность макромодели при минимальном количестве точек, в которых выполняется SPICE-моделирование. Этого можно приближенно достигнуть построением пошагового алгоритма на основе следующего принципа.

После инициализации данных на каждом шаге имеются два множества точек:

- актуальные точки, для которых проведено моделирование (2), определен полный вектор (1) и проведена запись в БД;
- возможные точки, для которых определен только вектор параметров  $P$  и проведена предварительная оценка интерполяционной погрешности.

На шаге производятся две основные операции.

1. Из множества возможных точек выбирается точка с наибольшей оценкой погрешности (текущая точка), для нее проводится моделирование (2) и запись в БД полного вектора (1). Эта точка исключается из множества возможных точек и включается в множество актуальных точек. По найденным значениям показателей в текущей и соседних актуальных точках определяется фактическая интерполяционная

погрешность в текущей точке, которая затем (п. 2) используется для предварительной оценки интерполяционной погрешности в соседних возможных точках.

2. Определяются точки, равноудаленные от текущей точки и соседних к ней актуальных точек. Эти точки включаются в множество возможных точек и для них определяется оценка интерполяционной погрешности на основе значения фактической погрешности в текущей точке. После этого осуществляется переход к п. 1 следующего шага.

Выполнение алгоритма заканчивается, когда не остается возможных точек с оценкой интерполяционной погрешности, превышающей заданный пользователем допуск. Блок-схема, отражающая основной принцип работы алгоритма представлена на Рис. 1.

### 2. Генерация точек в одномерном случае

Мы предполагаем, что значения параметра  $p$  находятся в интервале  $[0, 1]$ . Это не ограничивает общности рассмотрения, так как, если пользователем задан некоторый иной интервал  $[p_{\min}, p_{\max}]$ , то всегда можно получить реальное значение  $p'$  (например, при обращении к процедуре моделирования) линейным преобразованием  $p' = p_{\min} + (p_{\max} - p_{\min}) \cdot p$ .

Рассмотрим основные выражения, необходимые для описания алгоритма в одномерном случае (1 параметр и 1 показатель).

Для получения возможных точек будем использовать метод последовательного деления пополам исходного интервала. То есть каждой

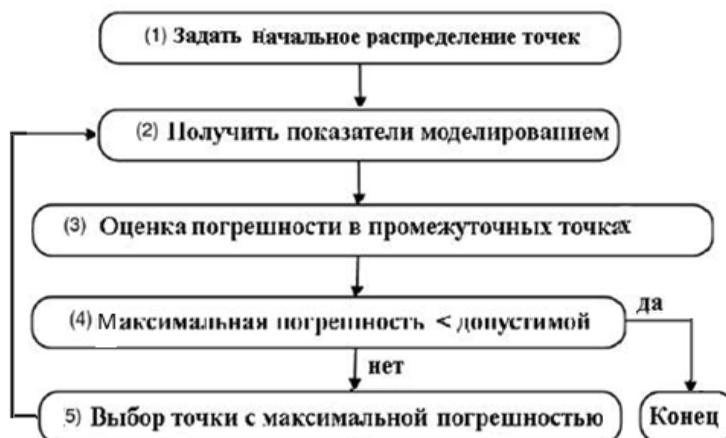


Рис. 1. Принципиальная блок-схема алгоритма генерации точек для макромодели аналоговой схемы

$n$ -й точке  $p_n$  соответствует уровень  $l_n$ , показывающий, какое количество делений пополам нужно для получения этой точки. Поэтому после создания актуальной точки  $n$  рядом с ней формируются 2 возможные точки, которые назовем левый ребенок и правый ребенок точки  $n$ . Значения точек-детей определяются принципом половинного деления

$$\bar{p}_n = p_n - 2^{-(l_n+1)} \quad \text{- левый ребенок} \quad (3)$$

$$\bar{p}_n = p_n + 2^{-(l_n+1)} \quad \text{- правый ребенок} \quad (3')$$

Для обозначения индексов этих точек будем также использовать принцип обозначений в  $(3, 3')$  для левого ( $\bar{n}$ ) и правого ( $\bar{n}'$ ) ребенка соответственно. Иногда удобно также ввести обозначение для любой из этих точек в виде  $\bar{n}$ , т.е.  $\bar{n} = \bar{n}$  или  $\bar{n} = \bar{n}'$ . Значения уровня детей увеличивается на 1 по отношению к родительской точке:

$$\bar{l}_n = l_n + 1 \quad (4)$$

### 3. Точность аппроксимации

Предполагается, что значения показателя в точке  $n$ , между точками  $n-1$  и  $n+1$  до проведения моделирования может быть оценено с помощью линейной интерполяции

$$\tilde{r}_n = r_{n-1} + \frac{r_{n+1} - r_{n-1}}{p_{n+1} - p_{n-1}} (p_n - p_{n-1}). \quad (5)$$

Здесь  $\tilde{r}_n$  - аппроксимированное значение показателя в точке  $n$ . Если точка  $n$  находится посередине ( $p_n - p_{n-1} = p_{n+1} - p_n$ ), то

$$\tilde{r}_n = \frac{r_{n+1} + r_{n-1}}{2}. \quad (6)$$

Фактическая погрешность аппроксимации определяется как отклонение промоделированного значения показателя от его аппроксимации

$$d_n = |\tilde{r}_n - r_n|, \quad (7)$$

а нормированная ошибка определяется как отношение (6) к допуску

$$e_n = d_n / tol_n, \quad (8)$$

Здесь допуск  $tol_n$  в точке  $n$  определяется на основе заданных пользователем значений абсолютной ( $abs$ ) и относительной ( $rel$ ) погрешностей  $tol_n = (abs + rel \cdot r_n)$ .

Для оценки прогнозируемой ошибки в возможных точках рассмотрим погрешность линейной аппроксимации, когда реальная зависимость определяется кривой второго порядка

$$\hat{r}(p_n) = r_{n-1} + \frac{r_{n+1} - r_{n-1}}{p_{n+1} - p_{n-1}} (p_n - p_{n-1}) + a(p_n - p_{n-1})(p_{n+1} - p_n), \quad (9)$$

где  $a = \frac{1}{2} \frac{d^2 \hat{r}(p)}{dp^2}$  предполагается постоянной на интервале.

Для случая средней точки (5) легко поучить из (9) отклонение (7) в виде

$$d_n = |a| \cdot h^2, \quad \text{где } h = p_n - p_{n-1} = p_{n+1} - p_n. \quad (10)$$

Учитывая, что для ребенка точки  $n$  шаг  $h$  снижается в 2 раза по отношению к шагу самой точки и, предполагая вторую производную постоянной на интервале  $[p_{n-1}, p_{n+1}]$ , можно записать

$$\vec{d}_n = |a| \cdot h^2 / 4 = d_n / 4. \quad (11)$$

Выражения (10), (11) позволяют получить оценку прогнозируемой ошибки в точке ребенка по фактической погрешности  $d_n$  в точке родителя, после чего можно определить нормированную ошибку  $\vec{e}_n$  по формуле (8).

### 4. Описание алгоритма в одномерном случае

Ниже приводится принципиальный вид алгоритма формирования макромоделей схемы без углубления в множество технических деталей. Рассматривается простейший одномерный случай, когда имеется один параметр и один показатель.

Выполнение алгоритма включает следующие шаги.

1. Инициализация. Задать начальное распределение актуальных точек и их детей

$$p_0 = 0, p_1 = 0.5, p_2 = 1, \\ l_0 = -1, l_1 = 1, l_2 = 0, \quad (12)$$

$$\bar{p}_1 = 3/4, \bar{p}_1 = 1/4, \bar{l}_1 = \bar{l}_1 = 2.$$

2. Поиск в списке детей ребенка с максимальной нормированной ошибкой

$$\bar{n} = \arg \max_{\bar{k}} (\bar{e}_k). \quad (13)$$

3. Если  $\bar{e}_n < 1$  (достигнут требуемый уровень точности), то

*Завершение выполнения алгоритма*

4. Создание новой актуальной точки ( $m$ ) из найденного ребенка  $\bar{n}$  (12)

4.1. Определение значения параметра и уровня точки  $m$  по (3, 3', 4).

4.2. SPICE-моделирование схемы и определение значения показателя  $r_m$ .

4.3. Загрузка результатов моделирования (точка  $p_m, r_m$ ) в БД

4.4. Вычисление фактического отклонения показателя в точке  $m$  по (6)

4.5. Оценка ошибки для правого и левого ребенка точки  $m$  по (11, 7)

5. Перенумерация актуальных точек таким образом, чтобы

- при  $\bar{n} = \bar{n}$  (точка (12) была левым ребенком) новая точка  $m$  должна быть между точками со старыми номерами  $n-1$  и  $n$ , т.е.  $p_{m-1} = p_{n-1}, p_{m+1} = p_n$ ;

- при  $\bar{n} = \bar{n}$  (точка (12) была правым ребенком) новая точка  $m$  должна быть между точками со старыми номерами  $n$  и  $n+1$ :  $p_{m-1} = p_n, p_{m+1} = p_{n+1}$ .

6. Пополнение списка детей результатами оценок 4.4.

7. Переход к п. 2.

Если схема характеризуется вектором из  $N > 1$  показателей, то для выполнения данного алгоритма необходимо распространить скалярные оценки точности из раздела 3 на векторный случай. Для этого запишем выражения (6-8, 10, 11) для каждого компонента вектора показателей.

Аппроксимированное значение  $k$ -го показателя в средней точке  $n$  (6) запишется как  $\tilde{r}_n^{(k)} = (r_{n+1}^{(k)} + r_{n-1}^{(k)})/2$ . Фактическая ошибка аппроксимации  $k$ -го показателя в точке  $n$  (7) и оценка ошибки у ребенка точки  $n$  (11) представляются соответственно в виде:

$$d_n^{(k)} = \left| \tilde{r}_n^{(k)} - r_n^{(k)} \right|, \quad (14)$$

$$\tilde{d}_n^{(k)} = d_n^{(k)} / 4. \quad (14')$$

Нормированная ошибка определяется как максимальное значение из величин вида (14),

соответствующих всем компонентам вектора показателей:

$$e_n = \max_k \left( d_n^{(k)} / tol_n^{(k)} \right), \quad (15)$$

а оценка нормированной ошибки у ребенка точки  $n$  находится аналогичным образом из (14')

$$\tilde{e}_n = \max_k \left( \tilde{d}_n^{(k)} / tol_n^{(k)} \right), \quad (15')$$

Таким образом, величины нормированных как фактической (15), так и прогнозируемой (15') ошибок являются скалярами, что позволяет использовать операцию поиска максимальной оценки (13), подразумевая оценку  $\tilde{e}_n$  в виде (15'). Других изменений в алгоритме производить не требуется.

## 5. Алгоритм для многомерного пространства параметров

Случай, когда схема определяется вектором из  $M$  параметров, является наиболее сложным, так как и обработанные, и возможные точки необходимо генерировать в многомерном пространстве. Здесь мы рассмотрим упрощенный алгоритм, генерирующий одномерные наборы точек вдоль каждой из координатных осей (выбирая наихудшую точку из всех осей), а затем формирующий искомые многомерные точки с полученными координатами.

Этот алгоритм строится на базе одномерного (раздел 4) с учетом модификаций для множественности показателей.

1. Инициализация. Для всех параметров  $i = 1, 2, \dots, M$ . Задать начальное распределение трех актуальных точек и их детей по координате  $i$

$$\begin{aligned} p_0^{(i)} &= 0, p_1^{(i)} = 0.5, p_2^{(i)} = 1, \\ l_0^{(i)} &= -1, l_1^{(i)} = 1, l_2^{(i)} = 0, \\ \bar{p}_0^{(i)} &= 3/4, \bar{p}_1^{(i)} = 1/4, \bar{l}_1^{(i)} = \bar{l}_1^{(i)} = 2. \end{aligned} \quad (16)$$

2. Поиск в списке детей точки (и соответствующего ей параметра) с максимальной оценкой нормированной ошибки

$$[\bar{n}, I] = \arg \max_{\bar{k}, i} (\tilde{e}_k^i), \text{ т.е. } \tilde{e}_n^I = \max_{\bar{k}, i} (\tilde{e}_k^i). \quad (17)$$

3. Если  $\tilde{e}_n^I < 1$  (достигнут требуемый уровень точности), то

*Завершить выполнения алгоритма*

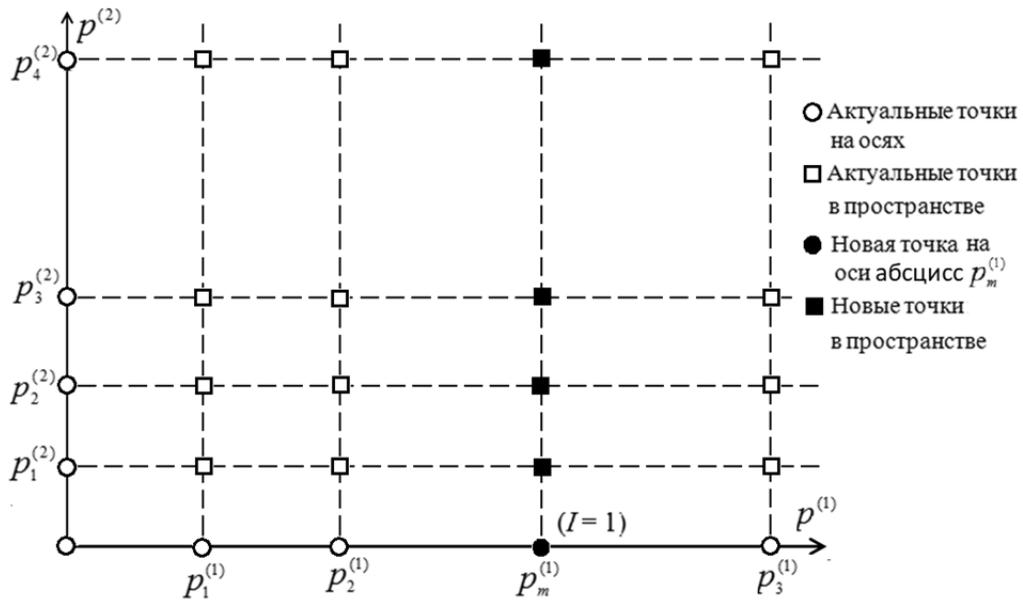


Рис. 2. Пример генерации новых точек на плоскости после получения очередной ( $m$ -й) точки на оси абсцисс (первого параметра)

4. Создание новой актуальной точки (16) с номером  $m$  того же параметра  $I$  из ребенка  $\vec{n}$ , определенного в (17).

4.1. Определение значения параметра и уровня точки  $m$  по (3, 3', 4)

4.2. Генерация новых многомерных точек в пространстве параметров (пополнение неравномерной прямоугольной сетки)

4.2.1. Для всех параметров (кроме  $I$ ):  $j = 1, 2, \dots, I-1, I+1, \dots, M$

Для всех актуальных точек  $n_j$  параметра  $j$ :

Формирование вектора

$$P = p_{n1}^{(1)}, p_{n2}^{(2)}, \dots, p_{nl}^{(l)}, p_m^{(l)}, p_{nl'}^{(l')}, \dots, p_{nM}^{(M)}$$

(здесь введены обозначения  $l' = I - 1$ ,  $l'' = I + 1$ )

4.2.2. Определение вектора показателей  $R$  проведением необходимого количества SPICE-моделирований схемы с параметрами  $P$  (2)

4.2.3. Загрузка вектора  $[PR]$  в БД

4.3. Вычисление фактического отклонения показателя в точке  $m$  по (6)

4.4. Оценка ошибки  $\vec{\epsilon}_m^I$  для правого и левого ребенка точки  $m$  по (11, 7).

5. Перенумерация актуальных точек параметра  $I$  так, чтобы

- при  $\vec{n} = \vec{n}$  (точка (17) была левым ребенком) новая точка  $m$  находилась между точками со старыми номерами  $n-1$  и  $n$ :

- при  $\vec{n} = \vec{n}$  (точка (17) была правым ребенком) новая точка  $m$  находилась между точками со старыми номерами  $n$  и  $n+1$ :

6. Пополнение списка детей результатами оценок 4.4.

7. Переход к п. 2.

На Рис. 2 проиллюстрирован шаг 4.2 генерации новых точек на плоскости после получения очередной ( $m$ -й) точки на координатной оси первого параметра. В данном примере при наличии трех точек на оси  $x$  и четырех точек на оси  $y$  (20 актуальных точек на плоскости) создается новая точка  $m$  на оси  $x$  ( $I = 1$ ) и генерируются дополнительно четыре точки на плоскости.

## 6. Программная реализация алгоритма

Программная реализация предложенного алгоритма имеет ряд технических отличий от блок-схемы, представленной в разделе 3. Помимо большого количества опущенных деталей вычислительного процесса имеются отличия, связанные с удобством и простотой задания программного кода, организацией памяти и т.п. К наиболее существенным отличиям относятся

Табл. 1. Входные параметры программы

Наименование	Имя переменной	Размерность переменной
Количество параметров схемы	nparam	1
Количество показателей	nfactor	1
Нижние границы параметров	low	nparam
Размах границ параметров	delta	npar
Абсолютные погрешности показателей	tolabs	nfactor
Относительные погрешности показателей	tolrel	nfactor
Максимально-допустимое количество точек генерации	maxrec	1

пп. 5, 6 в разделе 3. Чтобы избежать процедуры перенумерации точек (п. 5 в разделе 3), программа для хранения информации об актуальных точках использует списковые структуры, содержащие помимо параметров точки также ссылки типа родитель-ребенок, следующий, предыдущий и т.д. Это позволяет поддерживать упорядоченность данных, не прибегая к процедурам сортировки. Информация о возможных точках (детях) хранится в структуре типа “очередь”, отсортированной по величине оценки погрешности для соответствующего ребенка. В Табл. 1 представлен список входных параметров программы и их размерность (часть параметров являются массивами).

Помимо перечисленных параметров в качестве входных данных задается информация о режимах моделирования.

## 7. Вычислительные эксперименты

Предложенный адаптивный алгоритм формирования точек моделирования был протестирован на примере высокоскоростного операционного усилителя (ОУ), схема которого показана на Рис. 3.

В процессе тестирования были получены зависимости коэффициента усиления ОУ от двух параметров схемы – ширины каналов транзисторов M0 и M1. При задании допуска на погреш-

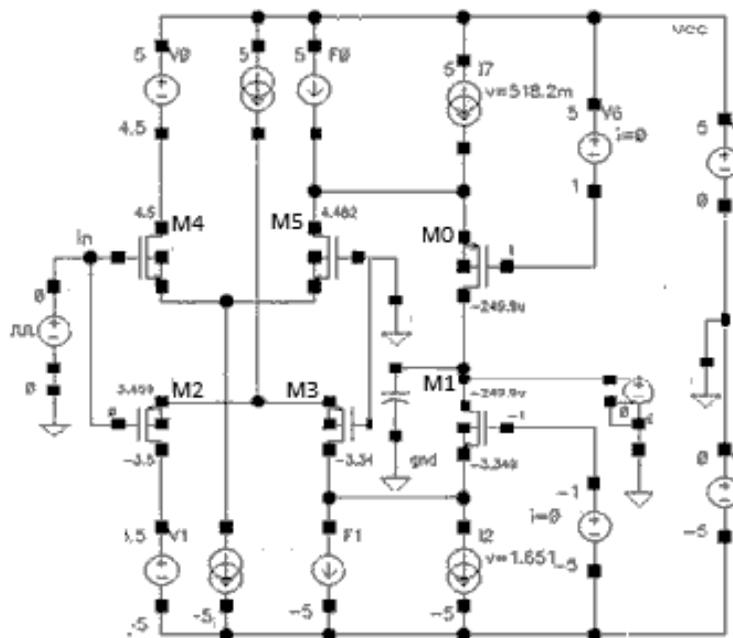


Рис. 3. Принципиальная схема высокоскоростного ОУ

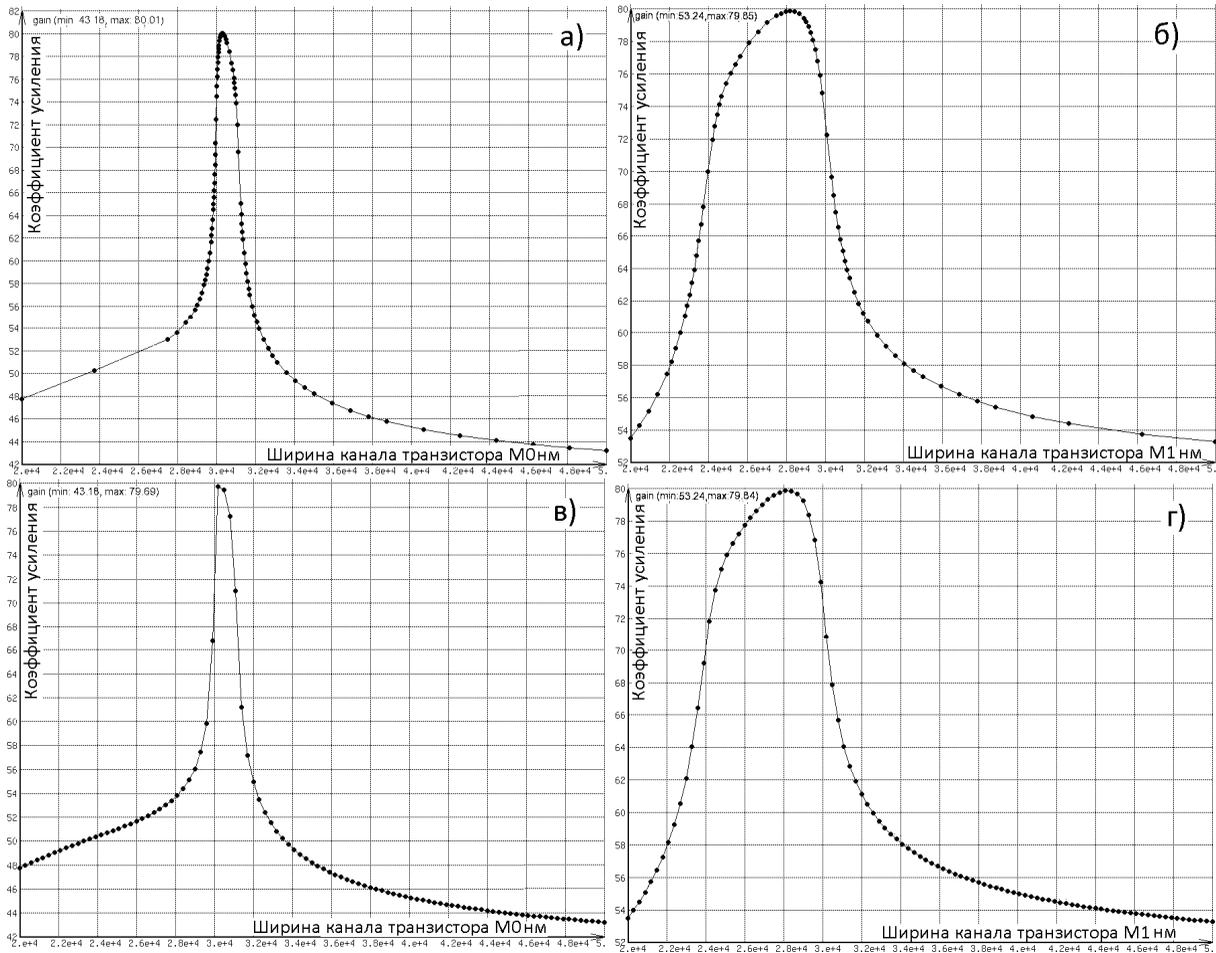


Рис. 4. Зависимости коэффициента усиления ОУ от ширины каналов транзисторов

а) M0 и б) M1 при адаптивном распределении точек; в, г) – те же зависимости на равномерной сетке

ность 0.05% было сгенерировано  $89 \cdot 73 = 6497$  точек, для которых на Рис. 4 а, б показаны графики зависимостей коэффициента усиления вдоль каждой координатной оси. Для сравнения на Рис. 4 в, г приведены аналогичные графики, сформированные при задании равномерной сетки с тем же количеством (89·73) точек. Из Рис. 4 видно, что предложенный алгоритм создает повышенную концентрацию точек на участках высокой кривизны поверхности за счет снижения концентрации на участках, близких к линейности. Это свидетельствует о повышении эффективности предложенного алгоритма по сравнению с равномерной сеткой.

Зависимость количества сгенерированных точек ( $N$ ) и полного времени моделирования ( $T$ , с) от количества параметров схемы и заданной допустимой погрешности представления

показателя показана в Табл. 2, из которой видна нелинейная зависимость затрат от размерности задачи и точности аппроксимации.

### Заключение

В работе предложен алгоритм отбора точек моделирования аналоговой схемы в пространстве ее параметров для генерации поверхности отклика в виде набора качественных показателей схемы. Результаты генерации загружаются в БД и в дальнейшем используются для выработки проектных решений.

Разработанный алгоритм основан на минимизации количества точек моделирования при заданных требованиях к погрешности поверхности отклика, которая оценивается разностью линейной и квадратичной аппроксимаций показателя

Табл. 2. Зависимость количества точек моделирования ( $M$ ) и затрат времени ( $T$ ) от количества параметров схемы и задаваемой точности

Количество параметров схемы	Допуск на погрешность							
	4%		3%		2%		1%	
	$N$	$T, c$	$N$	$T, c$	$N$	$T, c$	$N$	$T, c$
4	9	15	9	15	211	32	774	143
5	214	31	537	79	1498	180	5075	549
6	706	59	1501	112	4674	280	15574	867

вдоль координатных осей. Погрешность векторного показателя определяется наибольшей погрешностью его компонент. Очередная точка моделирования определяется точкой-кандидатом с максимальной оценкой погрешности. В многомерном случае выбор очередной точки осуществляется среди всех координатных осей, а остальные точки пространства генерируются на основе полученной неравномерной прямоугольной сетки. Проведенные вычислительные эксперименты показали эффективность предложенного алгоритма по сравнению с выбором равномерной сетки.

Следует отметить, что проведенные тестирования использовали схемы с малым количеством параметров. Для определения узких мест предложенного алгоритма необходимо проведение дополнительных экспериментов с использованием высокоразмерных моделей. Предварительно можно указать следующие направления дальнейшего совершенствования алгоритма.

1. Организация полноценного многомерного режима, при котором очередная точка определяется не на одной из координатных осей, а в произвольном месте пространства.

2. Использование распараллеливания при выполнении моделирований.

3. Организация фонового режима работы алгоритма и его работы в режиме пополнения БД.

Таким образом, предложенный в статье подход показал первые обнадеживающие результаты, и он имеет потенциал для дальнейшего совершенствования с точки зрения применимости к высокоразмерным задачам.

## Литература

1. Toumazou, C., Makris, C.A. Analog IC design automation. I. Automated circuit generation: new concepts and methods // IEEE Trans. Comput. Aided Des. Integr. Circuits Syst. 1995. 14(2), pp. 218–238.

2. Degrauwe, M.G.R., et al. IDAC: an interactive design tool for analog CMOS circuits // IEEE J. Solid-State Circuits, 1987. 22(6), pp. 1106–1116.

3. Hershenson, M.D.M., Boyd, S.P., Lee, T.H.: GPCAD: a tool for CMOS op-amp synthesis // IEEE/ACM Int. Conf. on Computer-Aided Design, 1998.

4. Kuo-Hsuan, M.: Po-Cheng, P., Hung-Ming, C. Integrated hierarchical synthesis of analog/RF circuits with accurate performance mapping // International Symposium on Quality Electronic Design, Santa Clara, 2011.

5. Nye W., Riley D.C., Sangiovanni-Vincentelli A. et al., DELIGHT.SPICE: an optimization-based system for the design of integrated circuits // IEEE Trans. Comput. Aided Des. Integr. Circuits Syst. 1988. 7(4), pp. 501–519.

6. Krasnicki M., Phelps R., Rutenbar R.A. et al., MAELSTROM: efficient simulation-based synthesis for custom analog cells, in Design Automation Conference, 1999. pp. 945–950

7. Massier T., Graeb H., Schlichtmann U., The sizing rules method for CMOS and bipolar analog integrated circuit synthesis // IEEE Trans. Comput. Aided Des. Integr. Circuits Syst. 2008. 27(12), pp. 2209–2222.

8. Koziel, Slawomir, Leifsson, Leifur (Eds.), Surrogate-Based Modeling and Optimization: Applications in Engineering, Springer Science & Business Media, Springer New York Heidelberg Dordrecht London, 2013. P. 412

9. Garitselov O., Mohanty S.P., Kougianos E., A Comparative Study of Metamodels for Fast and Accurate Simulation of Nano-CMOS Circuits // IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 2012, V. 25, no. 1

10. Бурнаев Е.В., Зайцев А.А., Суррогатное моделирование разноточных данных в случае выборок большого размера, Информационные процессы, 2015 Т. 15, № 1, С. 97–100

11. Date C. J., Darwen H. «A Guide to the SQL standard: a user's guide to the standard database language SQL»// 4th ed., Addison Wesley, USA 1997, ISBN 978-0-201-96426-4

12. MySQL 5.6 Reference Manual // <https://dev.mysql.com/doc/refman/5.6/en/> (проверено 2.11.17)

13. Johnston T, Alsulmi M. Cicotti P. Taufer M., Performance Tuning of MapReduce Jobs Using Surrogate-Based Modeling // Procedia Computer Science Vol. 51, 2015, Pages 49–59. ICCS 2015 International Conference on Computational Science

14. KK Vu, C D'Ambrosio, Y Hamadi, L Liberti, Surrogate-based methods for black-box optimization // International Transactions in Operational Research, 2017, 24 (3), pp. 393-424.

**Гурарий Марк Моисеевич.** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук (ИППМ РАН), г. Москва. Старший научный сотрудник, кандидат технических наук. Количество печатных работ: 135. Область научных интересов: вычислительная математика, схемотехническое моделирование. E-mail: gourary@yandex.ru

**Жаров Михаил Михайлович.** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук (ИППМ РАН), г. Москва. Ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук, доцент. Количество печатных работ: 97. Область научных интересов: вычислительная математика, схемотехническое моделирование. E-mail: zarov@ippm.ru

**Лялинский Алексей Анатольевич.** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук (ИППМ РАН), г. Москва. Старший научный сотрудник. Количество печатных работ 23. Область научных интересов: информационные технологии, схемотехническое моделирование. E-mail: ippm@ippm.ru

**Стемпковский Александр Леонидович.** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук (ИППМ РАН), г. Москва. Научный руководитель ИППМ РАН, доктор технических наук, профессор. Количество печатных работ: 211. Область научных интересов: вычислительная математика, схемотехническое моделирование, информационные технологии. E-mail: ippm@ippm.ru

## Simulation Points Sampling in Response Surface Construction for Analog Design Problem

M.M. Gourary, M.M. Zharov, A.A. Lialinsky, A.L. Stempkovsky

Federal State Budgetary Institution of Science Institute for Design Problems in Microelectronics (IPPM RAS), Moscow, Russia

The paper considers the response surface construction of analog circuit. Each surface point is represented by circuit performances and can be obtained by simulating the circuit with corresponding parameters (simulation point). Surface and simulation points loaded in the Data Base (DB) can provide effective tools for analog design. However, high computational efforts of the simulation require effective sampling algorithm that is presented in the paper. The algorithm is based on minimizing the number of simulation points under the given requirements for response surface error tolerance. The error is estimated as the difference between linear and quadratic approximations of the surface in the intermediate points of the coordinate axes. The error of the vector performance is defined as maximal error of its components. The next simulation point is taken as the candidate point with maximal error estimate. In multidimensional case the next point is choose between candidate points in all coordinate axes, and other points of parameter space are generated by obtained uneven rectangular grid. Numerical example presented in the paper (high-speed operational amplifier) demonstrated the improvement of simulation points distribution due to the proposed algorithm in the comparison with the distribution obtained by the uniform grid.

**Keywords:** computer-aided design, analog circuit, approximation, Data Base, optimization, circuit simulation, response surface, surrogate model

DOI 10.14357/20718632180201

### References

1. Toumazou, C., Makris, C.A. Analog IC design automation. I. Automated circuit generation: new concepts and methods // IEEE Trans. Comput. Aided Des. Integr. Circuits Syst. 1995. 14(2), pp. 218–238.
2. Degrauwe, M.G.R., et al. IDAC: an interactive design tool for analog CMOS circuits // IEEE J. Solid-State Circuits, 1987. 22(6), pp. 1106–1116.
3. Hershenson, M.D.M., Boyd, S.P., Lee, T.H.: GPCAD: a tool for CMOS op-amp synthesis // IEEE/ACM Int. Conf. on Computer-Aided Design, 1998.

4. Kuo-Hsuan, M.; Po-Cheng, P., Hung-Ming, C. Integrated hierarchical synthesis of analog/RF circuits with accurate performance mapping // International Symposium on Quality Electronic Design, Santa Clara, 2011.
5. Nye W., Riley D.C., Sangiovanni-Vincentelli A. et al., DELIGHT.SPICE: an optimization-based system for the design of integrated circuits // IEEE Trans. Comput. Aided Des. Integr. Circuits Syst. 1988. 7(4), pp. 501–519.
6. Krasnicki M., Phelps R., Rutenbar R.A. et al., MAELSTROM: efficient simulation-based synthesis for custom analog cells, in Design Automation Conference, 1999, pp. 945–950
7. Massier T., Graeb H., Schlichtmann U., The sizing rules method for CMOS and bipolar analog integrated circuit synthesis // IEEE Trans. Comput. Aided Des. Integr. Circuits Syst. 2008. 27(12), pp. 2209–2222.
8. Koziel, Slawomir, Leifsson, Leifur (Eds.), Surrogate-Based Modeling and Optimization: Applications in Engineering, Springer Science & Business Media, Springer New York Heidelberg Dordrecht London, 2013. P. 412
9. Garitselov O., Mohanty S.P., Kougianos E., A Comparative Study of Metamodels for Fast and Accurate Simulation of Nano-CMOS Circuits // IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 2012, V. 25, no. 1
10. Burnaev E.V., Zaytsev A.A., Surrogatnoe modelirovanie raznotochnyh dannyh v sluchae vyborok bol'shogo razmera [Surrogate modeling of multifidelity data for large samples], Informacionnye processy, 2015 V. 15, no. 1, pp. 97–100
11. Date C. J., Darwen H. «A Guide to the SQL standard: a user's guide to the standard database language SQL»// 4th ed., Addison Wesley, USA 1997, ISBN 978-0-201-96426-4
12. MySQL 5.6 Reference Manual // <https://dev.mysql.com/doc/refman/5.6/en/> (accessed November 2, 17)
13. Johnston T, Alsulmi M. Cicotti P. Taufer M., Performance Tuning of MapReduce Jobs Using Surrogate-Based Modeling // Procedia Computer Science Vol. 51, 2015, Pages 49–59. ICCS 2015 International Conference on Computational Science
14. KK Vu, C D'Ambrosio, Y Hamadi, L Liberti, Surrogate-based methods for black-box optimization // International Transactions in Operational Research, 2017, 24 (3), pp. 393-424

**Gourary M.M.** Division of CAD Systems, Federal State Budgetary Institution of Science Institute for Design Problems in Microelectronics (IPPM RAS), Moscow, Russia. E-mail: [gourary@yandex.ru](mailto:gourary@yandex.ru)

**Zharov M.M.** Division of CAD Systems, Federal State Budgetary Institution of Science Institute for Design Problems in Microelectronics (IPPM RAS), Moscow, Russia. E-mail: [zarov@ippm.ru](mailto:zarov@ippm.ru)

**Lialinsky A.A.** Division of CAD Systems, Federal State Budgetary Institution of Science Institute for Design Problems in Microelectronics (IPPM RAS), Moscow, Russia. E-mail: [v7lyal@ippm.ru](mailto:v7lyal@ippm.ru)

**Stempkovsky A.L.** Federal State Budgetary Institution of Science Institute for Design Problems in Microelectronics (IPPM RAS), Moscow, Russia. E-mail: [ippm@ippm.ru](mailto:ippm@ippm.ru)