

# Подсистема параметрической оптимизации КМОП операционных усилителей

М.М. Гурарий, М.М. Жаров, С.Г. Русаков, С.Л. Ульянов, А.А. Лялинский

Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН (ИППМ РАН), [iprm@iprm.ru](mailto:iprm@iprm.ru)

**Аннотация** — В статье рассмотрены вопросы разработки подсистемы параметрической оптимизации КМОП операционных усилителей. В подсистеме применяется оптимизационный подход и методы схемотехнического моделирования для расчета показателей схем. Рассмотрены структура подсистемы, выбор методов оптимизации, формирование целевой функции и ограничений, входные и выходные данные. Приведен пример применения подсистемы для синтеза схемы дифференциального КМОП усилителя.

**Ключевые слова** — КМОП операционные усилители, параметрический синтез, методы оптимизации, схемотехническое моделирование.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Достигнутый к настоящему времени прогресс в области технологии изготовления полупроводниковых ИС позволяет создавать схемы, которые содержат большое число элементов с характерными размерами в глубоко субмикронной и нанометровой области, а также системы на кристалле, которые имеют аналоговые, цифровые и механические компоненты. Вследствие уменьшения размеров элементов и значительного увеличения их числа возрастает сложность проектирования. Аналоговые компоненты играют важную роль в системе на кристалле. Известные оценки показывают, что хотя аналоговые компоненты занимают не более 20% площади кристалла, их проектирование требует значительно большей трудоемкости по сравнению с проектированием цифровых блоков.

При проектировании схем и систем на кристалле широко применяются средства автоматизированного проектирования. САПР известных производителей (Cadence, Synopsys, Mentor Graphics), включающие различные программные инструменты, объединенные в единую систему, обеспечивают поддержку процесса проектирования от постановки требований до получения топологии схемы. Вместе с тем сам процесс проектирования основан, в первую очередь, на квалификации и опыте разработчика, а применяемые инструменты обеспечивают лишь удобство выполнения отдельных задач. В результате имеющиеся системы проектирования значительно уступают по уровню автоматизации известным средствам проектирования цифровых схем [1]. Поэтому требуются средства нового поколения, которые

позволят полностью автоматизировать решение наиболее трудоемких задач.

Операционные усилители (ОУ) являются широко применяемыми компонентами для построения систем на кристалле, обеспечивающими реализацию различных функций, включая цепи смещения, усиления и фильтрации сигналов. При проектировании ОУ необходимо удовлетворить многим техническим требованиям на показатели качества схемы, включая коэффициент усиления, полосу частот, запас по фазе, уровень шума, скорость нарастания сигнала, потребляемую мощность и ряд других. Так как многие требования взаимно-противоречивы, а зависимости показателей схемы от параметров пассивных и активных элементов имеют нелинейный характер, задача определения наилучшего решения является сложной и трудоемкой.

В работе предлагается подсистема параметрической оптимизации, которая позволяет автоматизировать процесс определения параметров активных и пассивных элементов КМОП ОУ.

## II. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АНАЛОГОВЫХ СХЕМ

### A. Маршрут проектирования

Маршрут проектирования включает шаги проектирования «сверху-вниз» и «снизу-вверх», которые выполняются на системном, блочном, схемном и топологическом уровнях абстракции [2]. На схемном уровне шаги проектирования «сверху-вниз» включают: выбор структуры схемы (структурный синтез), определение параметров активных и пассивных элементов схемы (параметрический синтез) и верификацию. Шаги «снизу-вверх» включают получение топологии схемы, экстракцию паразитных элементов и верификацию схемы с учетом влияния топологии. При необходимости шаги повторяются в итерационном цикле до достижения заданных требований.

При традиционном подходе задачи выбора структуры схемы и параметрического синтеза решаются вручную, в итерационном цикле. При этом каждое новое решение (структура схемы или параметры схемы) создается на основе опыта и знаний проектировщика. Схемные симуляторы используются для оценки полученного решения и верификации проекта. Процесс характеризуется высокой

трудоемкостью и не гарантирует получение оптимального результата.

#### В. Средства параметрического синтеза

К настоящему времени разработаны средства автоматизации проектирования аналоговых схем, которые позволяют автоматизировать наиболее трудоемкие операции маршрута проектирования. Ряд работ посвящен разработке средств параметрического синтеза аналоговых схем. Можно выделить два основных подхода к построению таких средств:

- подход на основе базы знаний (knowledge-based approach) [3-6],
- оптимизационный подход (optimization-based approach) [7-19].

Системы на основе базы знаний [3-6] обладают удобным для пользователя интерфейсом, позволяющим достаточно просто подстраивать параметры известной схемы под изменяющиеся требования. Однако эти системы малоэффективны при разработке новых типов схем, а также при существенном изменении технологии [13-17]. Кроме того они требуют существенных затрат на поддержание информационной базы в актуальном состоянии [13, 16, 17, 19]. Поэтому более перспективными следует считать системы, построенные на основе оптимизационного подхода, которые обладают существенно большей гибкостью. При оптимизационном подходе задача синтеза формулируется как задача параметрической оптимизации, для решения которой используются методы оптимизации. Кроме алгоритмов оптимизации важным компонентом системы является процедура расчета характеристик схемы. В свою очередь оптимизационный подход может быть разделен на несколько подклассов в зависимости от применяемого способа расчета характеристик:

- расчет на основе уравнений [7-10],
- расчет с помощью модели [11-13],
- расчет с помощью моделирования [13-19].

Системы, построенные на основе моделирования схем, используют схемный симулятор для расчета необходимых характеристик в процессе оптимизационного поиска. Основным преимуществом этих систем является точность расчета характеристик, которую обеспечивает моделирование. Основное ограничение – высокие временные затраты, особенно при расчете сложных схем. Различные системы, основанные на моделировании для расчета характеристик схем, используют различные методы оптимизации, а также комбинации методов. Наиболее популярными применяемыми методами глобальной оптимизации являются метод отжига [15, 16], эволюционные или генетические алгоритмы [13, 15, 17-19].

### III. ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ

#### А. Формулировка задачи

Целью параметрической оптимизации является определение параметров схемы (длина и ширина транзисторов, номиналы пассивных элементов), при которых обеспечиваются наилучшие значения показателей схемы (коэффициент усиления, полоса пропускания и т.д.) и выполняются условия ограничений (геометрических, проектных и т.п.). Частные критерии формируются на основе технических требований на показатели схемы. Так как число показателей больше 1, то задача оптимизации оказывается многокритериальной: требуется найти минимум вектор-функции

$$\min_{X \in D} F(X) \quad (1)$$

при наличии функциональных ограничений

$$g_i(X) \geq 0 \quad i = 1, \dots, K \quad (2)$$

и ограничений на параметры оптимизации

$$x_i^L \leq x_i \leq x_i^U \quad i = 1, \dots, N. \quad (3)$$

Здесь  $X = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T$  - вектор параметров оптимизации,  $F(X) = [f_1(X), f_2(X), \dots, f_M(X)]^T$  - вектор-функция частных критериев оптимизации,  $D$  - область значений параметров, заданная неравенствами (2), (3).

#### В. Целевая функция

Задача многокритериальной оптимизации может быть сведена к задаче однокритериальной оптимизации с помощью определения единого скалярного критерия. Наиболее часто используется метод взвешенных сумм [20]

$$\min_{X \in D} \Phi(X) = \sum_{i=1}^M \omega_i f_i(X), \quad (4)$$

где  $\omega_i$  - весовые коэффициенты ( $\sum_{i=1}^M \omega_i = 1$ ).

Частный критерий отражает степень влияния данного показателя  $y_i(X)$  на качество схемы. Эта функция преобразует значение показателя к безразмерной величине и имеет фиксированное (обычно нулевое) значение при предельно-допустимом значении показателя. Чаще всего эта функция выбирается линейной и имеет вид

$$f_i(X) = \left| \frac{y_i(X) - \tilde{y}_i}{\tilde{y}_i} \right|. \quad (5)$$

Здесь  $\tilde{y}_i$  - предельно-допустимое значение показателя.

Эффективность решения задачи зависит от выбора весовых коэффициентов. Эти коэффициенты должны

приводить все частные критерии к общей единице измерения и задавать относительную значимость требований к различным показателям.

В ряде работ вместо задания весовых коэффициентов используется методика определения частных критериев на основе опыта разработчика [14, 15]. Разработчик схемы задает для каждого показателя два значения, которые условно называются "хорошее"  $\tilde{y}_i^{good}$  и "плохое"  $\tilde{y}_i^{bad}$ . Предполагается, что "хорошее" значение соответствует желательному для данного показателя, а "плохое" - определенному ухудшению качества схемы, причем уровень этого ухудшения одинаков для "плохого" значения каждого показателя. Тогда частный критерий для  $i$ -го показателя запишется в виде:

$$f_i(X) = \left| \frac{y_i(X) - \tilde{y}_i^{good}}{\tilde{y}_i^{bad} - \tilde{y}_i^{good}} \right|. \quad (6)$$

Распространение этой методики на случай требования максимального сближения показателя с заданным заключается во введении двух "плохих" значений, соответствующих отклонениям показателя от "хорошего" значения в большую и меньшую стороны.

В работе [14] все показатели разбиты на три группы: цели проекта, мягкие ограничения, жесткие ограничения. Показатели, относящиеся к жестким ограничениям, не участвуют в формировании целевой функции, а только определяют ограничения задачи оптимизации. Все остальные показатели участвуют в формировании целевой функции, а особенность мягких ограничений состоит в том, что когда такой показатель достигает своего "хорошего" значения, процедура оптимизации исключает его из критерия до тех пор, пока он снова не перейдет это значение. Это эквивалентно тому, что для такого показателя частный критерий задан в виде:

$$f_i(X) = \max\left(\frac{y_i(X) - \tilde{y}_i^{good}}{\tilde{y}_i^{bad} - \tilde{y}_i^{good}}, 0\right). \quad (7)$$

Кроме целей и функциональных ограничений, комплексный скалярный критерий должен учитывать также результаты анализа при разных внешних условиях или вариациях технологического процесса [13]. С этой целью в скалярный критерий заносится максимальное значение показателя, соответствующего цели проекта, полученное при вариациях

$$f_i(X) = \max_c(f_i^c(X)) \quad (8)$$

и суммарное значение показателя, соответствующего мягким ограничениям

$$f_i(X) = \sum_{c=1}^C f_i^c(X). \quad (9)$$

Здесь  $C$  – количество расчетов показателя при вариации внешних условий.

### С. Методы оптимизации

Рассматривается задача оптимизации (минимизации) целевой функции, определенной в некоторой ограниченной области значений аргументов. Рассматривается случай, когда производные целевой функции неизвестны и не могут быть легко вычислены. Кроме того, предполагается возможность существования нескольких локальных минимумов. Задача имеет важное практическое значение, так как часто в схемных симуляторах производные целевой функции чрезвычайно трудно получить, вследствие чего известные методы оптимизации, использующие информацию о производных, оказываются неприменимы.

Следует отметить, что невозможно указать какой-либо один метод оптимизации, пригодный для решения всех возникающих задач параметрической оптимизации. Поэтому в подсистеме необходимо иметь несколько методов различных классов. При выборе методов для подсистемы параметрической оптимизации использовались следующие основные критерии:

- необходимость иметь несколько различных методов, включая локальные методы, а также комбинированные процедуры оптимизации, использующие глобальные и локальные методы,

- результаты сравнительных исследований методов и рекомендации по их применению [21, 22],

- доступность программного кода или пригодность описания алгоритма для его программной реализации.

В результате для подсистемы параметрической оптимизации были выбраны следующие алгоритмы:

- алгоритм локального поиска Нелдера-Мида NM [23] для отдельного использования и применения в составе комбинированных процедур оптимизации,

- алгоритм глобального поиска MAGPM [24] из класса асимптотически полных методов,

- алгоритм моделируемого отжига SA [25], алгоритм дифференциальной эволюции DE [26] и модифицированный алгоритм дифференциальной эволюции DE-I, учитывающий ограничения переменных.

Сравнительные исследования алгоритмов выполнялись на системе тестовых функций, включающей 41 функцию, широко применяемых при тестировании программ глобальной оптимизации. Размерность задач варьировалась от 1 до 10. Все функции за исключением функции Розенброка (№ 35) являются многоэкстремальными в области их определения. Число локальных минимумов от 3 до нескольких тысяч. Большинство функций имеет один глобальный минимум, но есть ряд функций с числом

глобальных минимумов от 2 до 4. Функции имеют сложную поверхность.

Численные эксперименты дали следующие результаты. Алгоритм MAGPM позволил найти с заданной точностью минимум 38 функций из 41. Алгоритм SA находит верное значение минимума лишь в 18 случаях из 41. Алгоритм DE находит верное значение минимума для 33 функций из 41. Алгоритм DE-I находит минимум 40 функций из 41. Алгоритм NM, запущенный после выполнения глобального алгоритма MAGPM, позволил уточнить ранее найденное решение в 23 случаях, причем в 22 случаях получено существенное уточнение. На рис. 1 показана трудоемкость решения оптимизационных задач, оцениваемая по количеству вычислений целевой функции. Из рис. 1 видно, что алгоритм SA уступает по этому показателю остальным алгоритмам на 1-2 порядка. Алгоритм MAGPM эффективнее DE-I в среднем на порядок для всех функций за исключением функций, имеющих овражный характер (6, 35, 39) или функций, имеющих острые гребни (20, 29, 36). По результатам исследований в библиотеку методов оптимизации подсистемы включены алгоритм локального поиска Нелдера-Мида NM, алгоритм глобального поиска MAGPM, модифицированный алгоритм дифференциальной эволюции DE-I.

#### D. Схемный симулятор

В качестве схемного симулятора может быть использован любой схемный симулятор типа Spice, который удовлетворяет следующим требованиям:

- а) обеспечивает чтение текстового файла стандартного Spice-описания схемы,
- б) имеет необходимые для решения оптимизационных задач виды анализа,
- в) обеспечивает расчет необходимых показателей.

Необходимые виды анализа для оптимизации параметров КМОП операционных усилителей: анализ по постоянному току, малосигнальный в частотной области, анализ S параметров, шумовой анализ, анализ переходных процессов.

Основное требование к схемному симулятору заключается в расчете показателей. Ряд Spice-симуляторов позволяет записать задание на расчет показателей на входном языке с помощью команды .MEASURE. Имеется два основных типа этой команды - команда для вычисления в точке абсциссы и команда для вычисления на отрезке абсциссы. Команда для вычисления в точке абсциссы позволяет вывести значение переменной или вычислить выражение в указанной точке абсциссы. Команда для вычисления на отрезке абсциссы позволяет вывести значение переменной или вычислить выражение при выполнении условия. Использование этих команд позволяет рассчитывать практически все необходимые показатели.

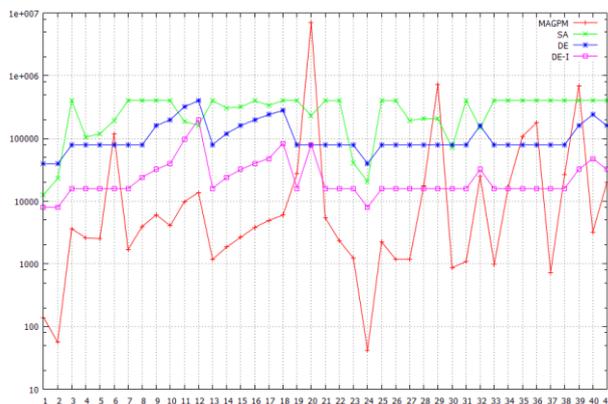


Рис. 1. Затраты минимизации тестовых функций 1-41

## IV. ОПИСАНИЕ ПОДСИСТЕМЫ

### A. Структура подсистемы

Структура подсистемы представлена на рис. 2. Описание схемы и задание на расчет поступают на вход управляющей программы. Описание схемы должно соответствовать используемому схемному симулятору. Задание на расчет содержит описание целевой функции, включая частные критерии и ограничения, команды расчета показателей, оптимизируемые параметры схемы и методы оптимизации. Управляющая программа вызывает метод оптимизации. В процессе оптимизации вызываются процедуры расчета целевой функции, которые обращаются к процедурам расчета показателей. Процедуры расчета показателей формируют входные данные для моделирования с помощью схемного симулятора. После завершения моделирования полученные результаты передаются в процедуру расчета целевой функции. По окончании процесса оптимизации выдаются полученные значения целевой функции, показателей и параметров схемы.

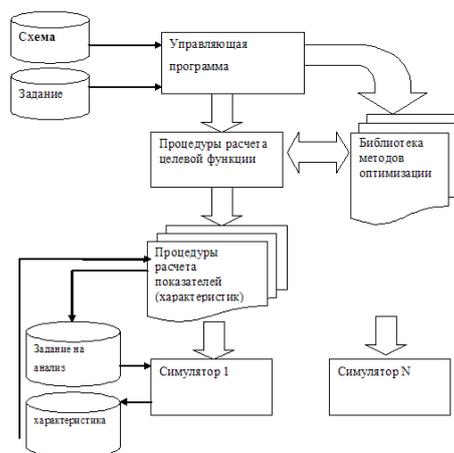


Рис. 2. Структура подсистемы параметрической оптимизации

### B. Входные данные

Входными данными для подсистемы являются файл описания схемы и файл задания на расчет. На

рис. 3 представлен фрагмент файла описания схемы. Описание схемы соответствует стандартному синтаксису языка описания схем программы Spice, за исключением задания значений длины и ширины канала транзисторов M1-M4. Эти величины заданы с помощью директивы .PARAM. В процессе оптимизации символические значения этих величин заменяются на числовые значения.

```
* CKT1 - CMOS differential OpAmp
.PARAM W_M1M2 = #W_M1M2#
.PARAM W_M3M4 = #W_M3M4#
.PARAM L_M1M2 = #L_M1M2#
.PARAM L_M3M4 = #L_M3M4#
VDD N6 0 5.0
VIN Nin1 N2 ac 1
VCM N2 0 2.5
Ibias Nbias 0 200e-6
R1 out Nin2 1e9
C1 Nin2 0 1.0
CL out 0 10pF
XX1 Nin1 Nin2 out N6 Nbias dopamp
.subckt dopamp in1 in2 out NVDD Nbias
M1 5 in1 Nbias 0 NM W=W_M1M2 L=L_M1M2
M2 out in2 Nbias 0 NM W=W_M1M2 L=L_M1M2
M3 5 5 NVDD NVDD PM W=W_M3M4 L=L_M3M4
M4 out 5 NVDD NVDD PM W=W_M3M4 L=L_M3M4
.ends
```

Рис. 3. Фрагмент файла описания схемы

Фрагмент файла задания на расчет показан на рис. 4. Файл содержит директивы .parameter, .metric, .goal, .constraint, .corner и команды оптимизации.

Директива .parameter позволяет задать оптимизируемые параметры схемы и имеет вид

```
.parameter name =(init_val min_val max_val [step]).
```

Здесь name – символическое имя параметра, init\_val, min\_val, max\_val – начальное, минимальное, максимальное значение параметра, step – шаг изменения параметра. Если величина step задана, то параметр может принимать дискретные значения. В противном случае параметр принимает любые значения из интервала [min\_val, max\_val].

Директива .metric содержит команды симулятора, обеспечивающие расчет показателей. На рис. 4 приведены примеры директивы с командами симулятора HSpice.

Директива .goal позволяет задать частные критерии оптимальности и функциональные ограничения. Для задания критерия директива имеет вид

```
.goal metric_name min value
или
.goal metric_name max value.
```

Здесь metric\_name – имя показателя, который нужно минимизировать в первом случае или максимизировать во втором, value – соответствующее значение.

Для задания функционального ограничения директива имеет вид

```
.goal metric_name relation value,
```

где relation может принимать одно из значений LT, GT, EQ.

Директива .constraint имеет аналогичный вид и служит для задания режимных ограничений.

Директива .corner обеспечивает при оптимизации учет внешних условий или вариаций технологического процесса и имеет вид

```
.corner name =(val1 val2 ... valn).
```

Здесь «val1 val2 ... valn» – список значений, которые принимает величина с именем name при расчете целевой функции.

Команда .DE задает оптимизацию с помощью метода дифференциальной эволюции. В строке команды на рис. 4 заданы параметры этого метода.

```
* CKT1 - Job
.parameter W_M1M2 = (10.0e-6 1.0e-6 500.0e-6 1.0e-6)
.parameter W_M3M4 = (10.0e-6 1.0e-6 500.0e-6 1.0e-6)
.parameter L_M1M2 = (1.0e-6 0.35e-6 15.0e-6 0.1e-6)
.parameter L_M3M4 = (1.0e-6 0.35e-6 15.0e-6 0.1e-6)
.metric GAIN
+ ".MEASURE AC GAIN MAX VDB(OUT)"
.metric POWER
+ ".MEASURE AC POWER rms (i(vdd)*5.0)"
.metric BW
+ ".MEASURE AC 'BW' when VDB(OUT)=0 FALL=1"
.metric vov_m1
+ ".measure AC vov_m1 = param('VGS(xx1.m1) - VTH(xx1.m1)')"
.metric vov_m2
+ ".measure AC vov_m2 = param('VGS(xx1.m2) - VTH(xx1.m2)')"
.goal POWER MIN
.goal GAIN GT 50.0
.constraint vov_m1 GT 50e-3
.constraint vov_m2 GT 50e-3
.DE strategy=3 maxiter=100 np=100 f=0.7 CR=0.9
```

Рис. 4. Фрагмент файла задания на расчет

### С. Выходные данные

По завершении процесса оптимизации выдаются полученные значения показателей и параметров схемы, соответствующие оптимуму целевой функции, а также статистика процесса оптимизации.

## V. ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Процесс параметрической оптимизации иллюстрируется на примере тестовой схемы КМОП операционного усилителя [13]. Операционный усилитель изготавливается по технологии с проектными нормами 0,35 мкм, параметрами оптимизации являются длина и ширина каналов транзисторов. Пределы изменения параметров и шаг изменения приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры оптимизации

Параметр	мин.	макс.	шаг
Длина канала L, мкм	0,35	15	0,1
Ширина канала W, мкм	1	500	1

В табл. 2 представлены требования к схеме, с помощью которых формируются частные критерии и функциональные ограничения, в табл. 3 приведены режимные ограничения.

Таблица 2

*Технические требования*

Показатель	значение
Коэффициент усиления, GAIN (дБ)	GAIN > 50
Полоса частот, BW (МГц)	BW > 20
Запас по фазе, PM (°)	60 < PM < 90
Мощность, P (Вт)	Min

Таблица 3

*Режимные ограничения*

Элемент	Ограничение	мин.	макс.
M1, M2	Vgs-Vt, В	0,050	0,200
M3, M4	Vgs-Vt, В	0,100	0,300
M1, M2	Vds-Vdsat, В	0,050	-
M3, M4	Vds-Vdsat, В	0,050	-

Вначале проводился синтез номинальных значений параметров (номинальный синтез). Полученные значения параметров приведены в табл. 4, значения показателей – в табл. 5. Затем выполнялся параметрический синтез с учетом вариации температуры. Для каждого набора параметров проводилось моделирование схемы и вычислялись значения показателей для трех значений температуры - 50, 25 и 125 °С. При этом целевая функция рассчитывалась в соответствии с выражениями (8), (9). Полученные значения параметров приведены в табл. 4, значения показателей – в табл. 5.

Таблица 4

*Параметры элементов*

Параметр	Нач. значение	Номинальный синтез	Синтез с учетом температуры
L M1, M2, мкМ	1	3,65	2,95
W M1, M2, мкМ	10	385	493
L M3, M4, мкМ	1	1,45	1,05
W M3, M4, мкМ	10	364	156

Таблица 5

*Показатели при температуре 25 °С*

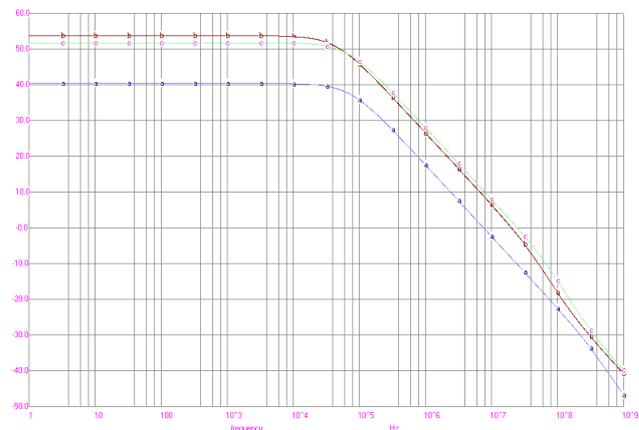
Показатель	Нач. значения	Номинальный синтез	Синтез с учетом температуры
GAIN, дБ	40,286	53,696	51,731
BW, МГц	7,5355	20,004	24,381
PM, °	90,011	77,766	80,915
P, Вт	36,776E-03	0,783E-3	0,875E-3

Таблица 6

*Показатели при различной температуре*

Показатель	-50 °С	25 °С	125 °С
GAIN, дБ	54,591	53,696	52,771
BW, МГц	24,638	20,004	16,480
PM, °	77,446	77,766	78,172
P, Вт	0,97186E-03	0,783E-03	0,6456E-03

На рис. 5 приведены зависимости коэффициента усиления от частоты, полученные с различными наборами параметров схемы. Из рисунка можно заметить, что учет температуры при параметрическом синтезе приводит к некоторому снижению коэффициента усиления по сравнению с номинальным синтезом. Однако, как показано в табл. 6, некоторые ограничения на показатели схемы, рассчитанные с номинальными значениями параметров, оказываются нарушенными при температуре 125 градусов Цельсия.



**Рис. 5. Зависимость коэффициента усиления от частоты: начальное значение параметров (а), номинальные значения параметров (б), синтез с учетом температуры (с)**

ЛИТЕРАТУРА

- [1] URL: <http://www.itrs.net>
- [2] Gielen, G., Rutenbar, R.A.: Computer-aided design of analog and mixed-signal integrated circuits // IEEE Proceedings. - 2000. - 88 (12). - P. 1825-1854.
- [3] F. El-Turky, E.E. Perry, BLADES: An Artificial Intelligence Approach to Analog Circuit Design // IEEE Trans. on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, - 1989. - vol. 8 - no. 6. - P. 680-692.
- [4] R. Harjani, R. Rutenbar, L. Richard Carley, OASYS: A Framework for Analog Circuit Synthesis // IEEE Trans. on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, - 1989. - vol. 8. - no. 12. - P. 1247-1266.
- [5] Degrauwe, M., et al.: IDAC: An interactive design tool for analog CMOS circuits // IEEE J. Solid-State Circuits - 1987. - vol. 22. - P. 1106-1115.
- [6] T. Murayama, Y. Gendai, A Top-Down Mixed-Signal Design Methodology Using a Mixed-Signal Simulator and Analog HDL // Proc. of European Design Automation Conf. - 1996. - P. 59-64.
- [7] H.Y. Koh, C.H. Seqin, P.R. Gray, OPASYN: A Compiler for CMOS Operational Amplifiers // IEEE Trans. on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, - 1990. - vol. 9. - no. 2. - P. 113-125.
- [8] Harvey, J.P., Elmasry, M.I., Leung, B.: STAIC: An interactive framework for synthesizing CMOS and BICMOS analog circuits // IEEE Trans. Computer-Aided Design - 1992. - 11(11). - P. 1402-1417.
- [9] Maulik, P.C., Carley, L.R.: Automating analog circuit design using constrained optimization techniques // In Proc. IEEE Int. Conf. Computer-Aided Design. -1991. - P. 390-393.

- [10] Ochotta, E.S., Rutenbar, R.A., Carley, L.R.: Synthesis of high-performance analog circuits in ASTRX/OBLX // IEEE Trans. Computer- Aided Design. - 1996. - 15(3). - P. 273–294.
- [11] Bernardinis, F., Jordan, M.I., Sangiovanni-Vincentelli, A. Support vector machines for analog circuit performance representation // In Proc. ACM/IEEE Design Automation Conf. - 2003. - P. 964–969.
- [12] Gaspar-Cunha, A., Vieira, A. A Multi-Objective Evolutionary Algorithm Using Neural Networks To Approximate Fitness Evaluations // Int. J. of Computers, Systems and Signals. - 2005. - 6(1). - P. 18–36.
- [13] M.F.M. Barros, J.M.C.Guilherme and N.C.G.Horta Analog Circuits and Systems Optimization Based on Evolutionary Computation Techniques. - Berlin: Springer-Verlag, 2010.
- [14] Nye, W., Riley, D.C., Sangiovanni-Vincentelli, A., Tits, A.L. DELIGHT.SPICE: An optimization-based system for the design of integrated circuits // IEEE Trans. Computer-Aided Design. - 1988. - vol. 7. - No 4. - P. 501–519.
- [15] Krasnicki, M., Phelps, R., Rutenbar, R.A., Carley, L.R. MAELSTROM: Efficient simulation-based synthesis for custom analog cells // In Proc. ACM/IEEE Design Automation Conf. - 1999. - P. 945–950.
- [16] Sonmez O., Dundar G., Simulation-based analog and RF circuit synthesis using modified evolutionary strategies algorithms // Integration, the VLSI Journal. - 2011. - 44. - P. 144–154.
- [17] Liu B., Wang Y., Yu Z. et al., Analog circuit optimization system based on hybrid evolutionary algorithms // Integration, the VLSI Journal. – 2009. - 42(2). - P. 137–148.
- [18] Nicosia G., Rinaudo S. and Sciacca E., An evolutionary algorithm-based approach to robust analog circuit design using constrained multi-objective optimization. // Knowledge-Based Systems. - 2008. - 21: - P. 175-183.
- [19] Lourenço N., Horta N., GENOM-POF: multi-objective evolutionary synthesis of analog ICs with corners validation // Proc.of the 14th annual conf. on genetic and evolutionary computation. - 2012. - P. 1119-1126.
- [20] Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования. М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2009.
- [21] Neumaier A. Complete Search in Continuous Global Optimization and Constraint Satisfaction // In Iserles A., Ed. Acta Numerica / Cambridge: Cambridge University Press, 2004. - P. 271-369.
- [22] Rios L. M., Sahinidis N. V. Derivative-free optimization: a review of algorithms and comparison of software implementations // J. Glob Optim. - 2013. - No 56. - P. 1247–1293.
- [23] Numerical Recipes in C: the art of scientific computing / W.H. Press et al - 2 edition, Cambridge: Cambridge University Press, 2002. - 1178 p.
- [24] Стронгин Р.Г. Численные методы в многоэкстремальных задачах. М.: Наука, 1978. – 240 С.
- [25] Numerical Recipes Software 2007. “Code for Minimization with Simulating Annealing”. Numerical Recipes Webnote 15, at <http://www.nr.com/webnotes15>.
- [26] K. Price, R.M. Storn, J.A. Lampinen Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization. Springer, 2005.

## Parameter optimization subsystem of CMOS operational amplifiers

M.M. Gourary, M.M. Zharov, S.G. Rusakov, S.L. Ulyanov, A.A. Lyalinsky

Institute for Design Problems in Microelectronics of RAS (IPPM RAS), [ippm@ippm.ru](mailto:ippm@ippm.ru)

**Keywords** — CMOS operational amplifier, circuit synthesis, optimization methods, circuit simulation.

### ABSTRACT

The problems of development of parameter optimization subsystem of CMOS operational amplifiers are discussed. The simulation based approach is applied in the subsystem. A circuit simulator is used to obtain circuit performance measures. The structure of subsystem, choice of optimization methods, input and output data are considered. The application example of CMOS operational amplifier circuit sizing is given.

### REFERENCES

- 1] URL: <http://www.itrs.net>
- [2] Gielen, G., Rutenbar, R.A.: Computer-aided design of analog and mixed-signal integrated circuits. IEEE Proceedings, 2000, 88 (12), P. 1825–1854.
- [3] F. El-Turky, E.E. Perry, BLADES: An Artificial Intelligence Approach to Analog Circuit Design. IEEE Trans. on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 1989, vol. 8, no. 6, P. 680-692.
- [4] R. Harjani, R. Rutenbar, L. Richard Carley, OASYS: A Framework for Analog Circuit Synthesis. IEEE Trans. on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 1989, vol. 8, no. 12, P. 1247-1266.
- [5] Degrauwe, M., et al.: IDAC: An interactive design tool for analog CMOS circuits. IEEE J. Solid-State Circuits, 1987, vol. 22, P. 1106–1115.
- [6] T. Murayama, Y. Gendai, A Top-Down Mixed-Signal Design Methodology Using a Mixed-Signal Simulator and Analog HDL. Proc. of European Design Automation Conf., 1996, P. 59-64.
- [7] H.Y. Koh, C.H. Seqin, P.R. Gray, OPASYN: A Compiler for CMOS Operational Amplifiers. IEEE Trans. on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 1990, vol. 9, no. 2, P. 113-125.
- [8] Harvey, J.P., Elmasry, M.I., Leung, B.: STAIC: An interactive framework for synthesizing CMOS and BICMOS analog circuits. IEEE Trans. Computer-Aided Design, 1992, 11(11), P. 1402–1417.
- [9] Maulik, P.C., Carley, L.R.: Automating analog circuit design using constrained optimization techniques. In Proc. IEEE Int. Conf. Computer-Aided Design, 1991, P. 390–393.
- [10] Ochotta, E.S., Rutenbar, R.A., Carley, L.R.: Synthesis of high-performance analog circuits in ASTRX/OBLX. IEEE Trans. Computer- Aided Design. 1996, 15(3), P. 273–294.
- [11] Bernardinis, F., Jordan, M.I., Sangiovanni-Vincentelli, A. Support vector machines for analog circuit performance representation. In Proc. Design Automation Conference, 2003, P. 964–969.

- [12] Gaspar-Cunha, A., Vieira, A. A Multi-Objective Evolutionary Algorithm Using Neural Networks To Approximate Fitness Evaluations. *Int. J. of Computers, Systems and Signals*, 2005, 6 (1), P. 18–36.
- [13] M.F.M. Barros, J.M.C.Guilherme and N.C.G.Horta Analog Circuits and Systems Optimization Based on Evolutionary Computation Techniques. - Berlin: Springer-Verlag, 2010.
- [14] Nye, W., Riley, D.C., Sangiovanni-Vincentelli, A., Tits, A.L. DELIGHT.SPICE: An optimization-based system for the design of integrated circuits. *IEEE Trans. Computer-Aided Design*, 1988, vol. 7, No 4, P. 501–519.
- [15] Krasnicki, M., Phelps, R., Rutenbar, R.A., Carley, L.R. MAELSTROM: Efficient simulation-based synthesis for custom analog cells. In *Proc. ACM/IEEE Design Automation Conf.*, 1999, P. 945–950.
- [16] Sonmez O., Dundar G., Simulation-based analog and RF circuit synthesis using modified evolutionary strategies algorithms. *Integration, the VLSI Journal*, 2011, 44, P. 144–154.
- [17] Liu B., Wang Y., Yu Z. et al., Analog circuit optimization system based on hybrid evolutionary algorithms. *Integration, the VLSI Journal*, 2009, 42 (2), P. 137–148.
- [18] Nicosia G., Rinaudo S. and Sciacca E., An evolutionary algorithm-based approach to robust analog circuit design using constrained multi-objective optimization. *Knowledge-Based Systems*, 2008, 21, P. 175-183.
- [19] Lourenço N., Horta N., GENOM-POF: multi-objective evolutionary synthesis of analog ICs with corners validation. *Proc.of the 14th annual conf. on genetic and evolutionary computation*, 2012, P. 1119-1126.
- [20] Norenkov I.P. *Osnovi avtomatizirovannogo proektirovaniya*. Moscow.:Baumann MSTU Publ., 2009 (in Russian).
- [21] Neumaier A. Complete Search in Continuous Global Optimization and Constraint Satisfaction. In Iserles A., Ed. *Acta Numerica / Cambridge: Cambridge University Press*, 2004, P. 271-369.
- [22] Rios L. M., Sahinidis N. V. Derivative-free optimization: a review of algorithms and comparison of software implementations. *J. Glob Optim.*, 2013, No 56, P. 1247–1293.
- [23] *Numerical Recipes in C: the art of scientific computing / W.H. Press et al - 2 edition*, Cambridge: Cambridge University Press, 2002. - 1178 p.
- [24] Strongin R.G. *Chislennie metodi v mnogoekstremalnih zadachah*, Moscow: Nauka, 1978. – 240 p. (in Russian).
- [25] *Numerical Recipes Software 2007*. “Code for Minimization with Simulating Annealing”. *Numerical Recipes Webnote 15*, at <http://www.nr.com/webnotes15>.
- [26] K. Price, R.M. Storn, J.A. Lampinen *Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization*. Springer, 2005.