

УДК 621.372

А.Н. Сычёв

## Общие подходы к оптимальному проектированию интегральных СВЧ-устройств. Обзор

Рассматриваются основные подходы к оптимальному проектированию СВЧ-устройств. Приводится схема итерационного процесса синтеза интегральных СВЧ-устройств с разбивкой на схемный и топологический шаги. Подробно рассмотрен экспериментально-расчётный метод проектирования.

**Ключевые слова:** микроэлектроника СВЧ, интегральные СВЧ-устройства, методы оптимального проектирования, экспериментально-расчётный метод проектирования.

**Постановка задачи** [1]. Методы и методологии автоматизированного проектирования (САПР) являются важнейшим инструментарием СВЧ-проектировщиков при разработке оптимальных проектов в сжатые сроки. Огромный прогресс в САПР за прошедшие несколько десятилетий позволил проектировать весьма сложные устройства более эффективно, чем когда-либо прежде. Наблюдается развитие методологии в направлении от САПР, основанных на эквивалентных схемах, к физически обоснованным электродинамическим САПР.

Движение в направлении «успеха с первого прохода» (first pass success) вместе с тенденцией к более жестким проектным спецификациям требует более высокой точности компьютерного моделирования и проектирования. В то же время освоение во всё более высокочастотных диапазонах создает новые вызовы САПР. Продолжают разрабатываться новые технологии, новые материалы и новые приборы. Требуются не только новые модели, но также и новые компьютерные методологии моделирования, такие, чтобы разработка моделей смогла стать более систематизированной и эффективной.

Тенденция в увеличении точности и масштабируемости проектов системного уровня также создает захватывающие возможности в развитии САПР, включая методы точного нелинейного моделирования на поведенческом уровне, моделирование систем и крупномасштабного электромагнитного моделирования. Оптимизация, вовлекающая повторное моделирование поведения устройств и систем, также крайне важна для качества проектирования. Передовые проектные задачи, такие как оптимизация количества выхода годных изделий, требуют дополнительных итераций повторного электродинамического моделирования со случайно изменяющимися параметрами. Это один из трудных вызовов для САПР.

**Общая структура процесса проектирования конструкции (топологии) интегральных схем и устройств СВЧ (ИС СВЧ) по заданным частотным зависимостям  $S$ -параметров и/или другим рабочим характеристикам** состоит из: 1) собственно проектирования и 2) выполнения точного анализа конструкции или поверочных измерений макета (эксперимента) (рис. 1).

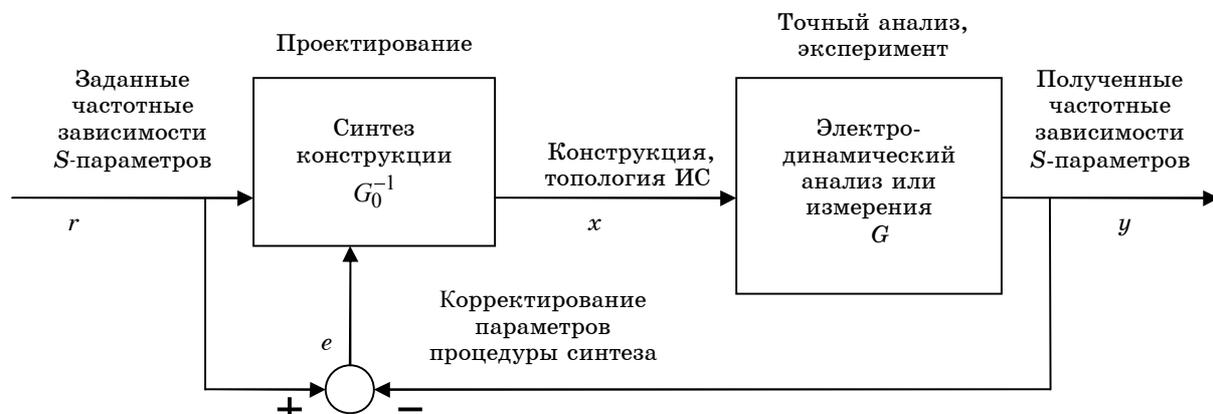


Рис. 1. Общая структура процесса проектирования конструкции СВЧ-устройств

Важно заметить, что процесс проектирования можно рассматривать как обращение (инверсию) процедуры анализа (см. рис. 1), при этом

$$x = G_0^{-1}(r); \quad y = G(x); \quad e = r - y,$$

где  $G_0^{-1}$  – процедура синтеза;  $G$  – процедура анализа;  $x$  – параметры конструкции интегральной схемы;  $r$  – заданные технические требования (характеристики);  $y$  – экспериментально полученные характеристики;  $e$  – совокупная погрешность (ошибка) проектирования и измерений. Исходя из этого, процедуру синтеза (проектирования) зачастую называют обратной задачей, а процедуру анализа (верификации) – прямой задачей.

Общая схема итерационного процесса синтеза (проектирования) интегральных СВЧ-устройств с разбивкой на шаги показана на рис. 2. Из него видно, что на этапе синтеза следуют вначале схемный, а затем топологический шаги; а на этапе анализа наоборот – вначале топологический, затем схемный шаги. При электродинамическом анализе топологии непосредственно рассчитываются частотные характеристики, а шаг схемного анализа становится излишним и исчезает. Хотя при необходимости облечь частотные зависимости в схемный образ можно извлечь схемные параметры и восстановить (синтезировать) схему.

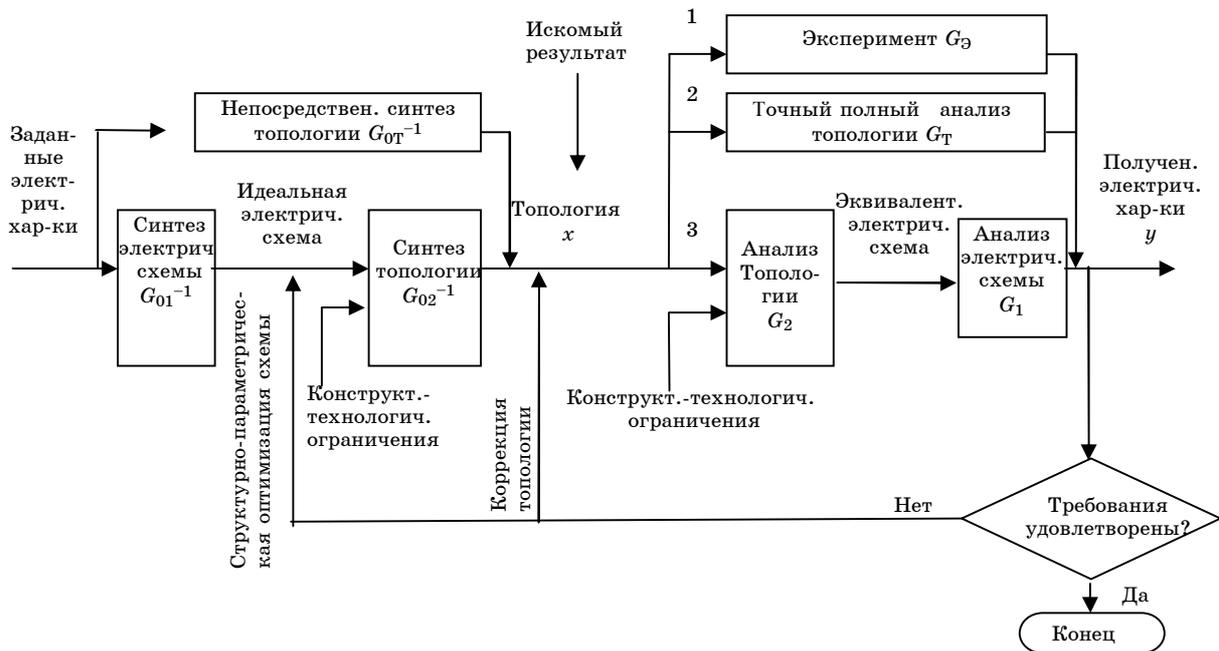


Рис. 2. Общая схема итерационного процесса синтеза интегральных СВЧ-устройств с разбивкой на схемный и топологический шаги

Одной из основных трудностей, возникающих при решении задачи синтеза устройства СВЧ, является создание его математической модели. Тем не менее оптимальная организация процесса синтеза устройства СВЧ должна базироваться на **использовании как минимум двух математических моделей устройства – основной (приближенной) и вспомогательной (уточненной)**. Указанным моделям будут соответствовать «быстрый» и «поверочный» (по терминологии Н.Н. Моисеева [2]) алгоритмы решения соответствующих задач оптимизации. При использовании согласующих процедур удается обеспечить вполне удовлетворительную близость основной и вспомогательной моделей. Итак, операция параметрической оптимизации является двухэтапной, при этом первый этап (приближенный) будет формировать «облик устройства», в то время как второй (уточняющий) – обеспечивать коррекцию параметров, если она необходима [3]. К этим идеям, известным в Советском Союзе еще в начале 80-х годов прошлого века, на Западе пришли лишь 13 лет спустя – в 1994 г. [4].

Также заметим, что поскольку основной этап процесса синтеза (рис. 3) – решение задачи оптимизации – сводится к многократному анализу, то перед исследователем возникает задача разработать такую модель устройства СВЧ, которая обеспечивала бы необходимым компромисс между ее точностью и временем анализа и, соответственно, временем решения задачи оптимизации. В [2] отмечено, что «для успеха исследования необходимо, чтобы операция оптимизации была достаточно быстрой и достаточно экономной». Методология замещающего моделирования позволяет в большинстве случаев решать эту проблему.

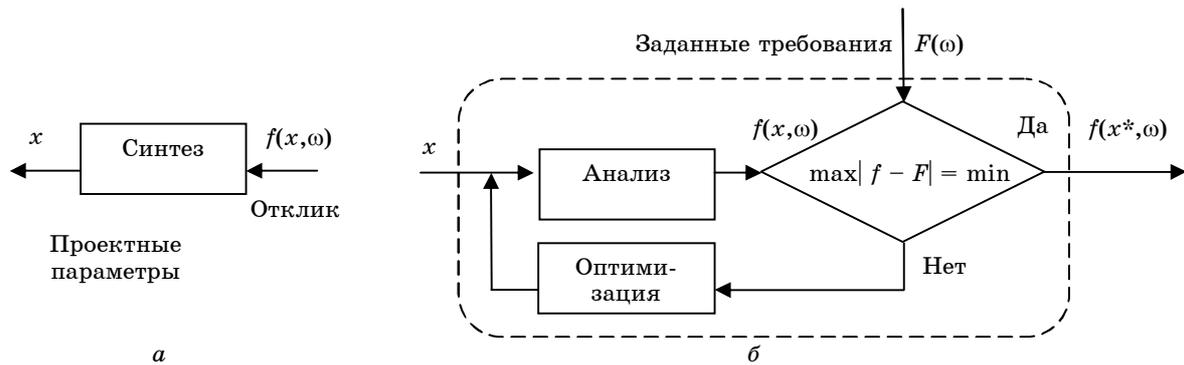


Рис. 3. Варианты синтеза: *a* – непосредственный синтез проектных параметров из заданного отклика; *б* – оптимизационный синтез на основе процедуры анализа проектных параметров.

**Экспериментально-расчетный метод оптимального проектирования (ЭРМ)** [3]. Может оказаться, что применение замещающих моделей не обеспечит требуемой малости погрешности

$$\max_{\omega \in [\omega_I, \omega_{II}]} |F(\omega) - F_{\partial}(\omega)|, \quad (1)$$

где  $F(\omega)$  – заданная, а  $F_{\partial}(\omega)$  – экспериментальная характеристики устройства;  $\omega_I$ ,  $\omega_{II}$  – границы рабочей полосы частот. Для ряда подобных случаев разработан *экспериментально-расчетный метод* оптимизации, позволяющий минимизировать погрешность (1), не уточняя самой модели.

Предварительно заметим, что физическая реализация, являясь самым универсальным и надежным средством определения характеристик устройства (решения задачи его анализа), продолжает оставаться обязательным элементом современного процесса проектирования. Вместе с тем возможности её как одного из этапов процесса синтеза зачастую используются далеко не полностью: физическая реализация устройства СВЧ рассматривается как конечный этап процесса синтеза, роль которого сводится к экспериментальной проверке полученных результатов.

ЭРМ-метод позволяет использовать заведомо упрощенную математическую модель и получить гарантированно точный результат. Это достигается тем, что физическая реализация устройства рассматривается не как конечный этап процесса синтеза, а как промежуточный этап более сложного процесса (рис. 1, 2). Полученное оптимальное решение задачи оптимизации рассматривается как первое приближение для дальнейшего более точного её решения.

В качестве примера рассмотрим однокритериальную задачу чебышевской аппроксимации

$$\mathbf{x} = \arg \min_{\mathbf{x}} g(\mathbf{x}), \quad g(\mathbf{x}) = \max_{\omega \in [\omega_I, \omega_{II}]} |f(\mathbf{x}, \omega) - F(\omega)|, \quad (2)$$

где  $\mathbf{x}$  – вектор варьируемых параметров;  $\omega_I$ ,  $\omega_{II}$  – границы рабочей полосы частот (области аппроксимации);  $F(\omega)$  – заданная аппроксимируемая функция;  $f(\mathbf{x}, \omega)$  – аппроксимирующая функция.

Суть ЭРМ-метода заключается в том, что после первого изготовления устройства измеряют его электрическую характеристику и строят в одной и той же системе координат графики следующих функций (рис. 4): 1) аппроксимируемой  $F(\omega)$ ; 2) расчетной (аппроксимирующей)  $f(\mathbf{x}, \omega)$  в точке ее оптимума  $\mathbf{x}^*_0$  и 3) экспериментальной  $f_{\partial}(\omega)$ . Рабочую полосу частот разбивают далее на сетку из  $m$  точек, число которых равно числу точек сетки при решении задачи аппроксимации (2).

В каждой точке находят разность (см. рис. 4)  $\Delta f(\omega) = f(\mathbf{x}^*_0, \omega) - f_{\partial}(\omega)$  вследствие приближенности модели и строят новую аппроксимируемую функцию  $F_1(\omega) = F(\omega) + \Delta f(\omega) = F(\omega) + [f(\mathbf{x}^*_0, \omega) - f_{\partial}(\omega)]$ . Таким образом, на предварительном этапе с использованием калиброванного искажения  $\Delta f(\omega)$  исходных требований  $F(\omega)$  (при этом  $\Delta f(\omega)$  зеркально отображается относительно  $F(\omega)$ ) получаем новые предсказанные требования  $F_1(\omega)$  (рис. 5).

На следующем этапе проектирования по приближенной модели с использованием новой аппроксимируемой функции, т.е. предсказанных требований  $F_1(\omega)$ , решается задача аппроксимации (см. рис. 5):

$$\mathbf{x} = \arg \min_{\mathbf{x}} g(\mathbf{x}), \quad g(\mathbf{x}) = \max_{\omega \in [\omega_I, \omega_{II}]} |f(\mathbf{x}, \omega) - F_1(\omega)|, \quad (3)$$

для которой решение  $\mathbf{x}_0^*$  является хорошим первым приближением.

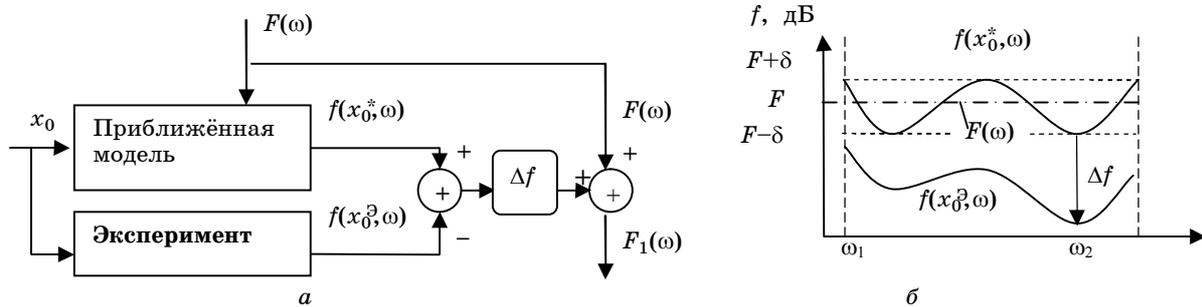


Рис. 4. Получение предсказанных требований  $F_1(\omega)$  для приближённой модели: а – схема первого этапа ЭРМ-метода; б – соответствующие частотные отклики

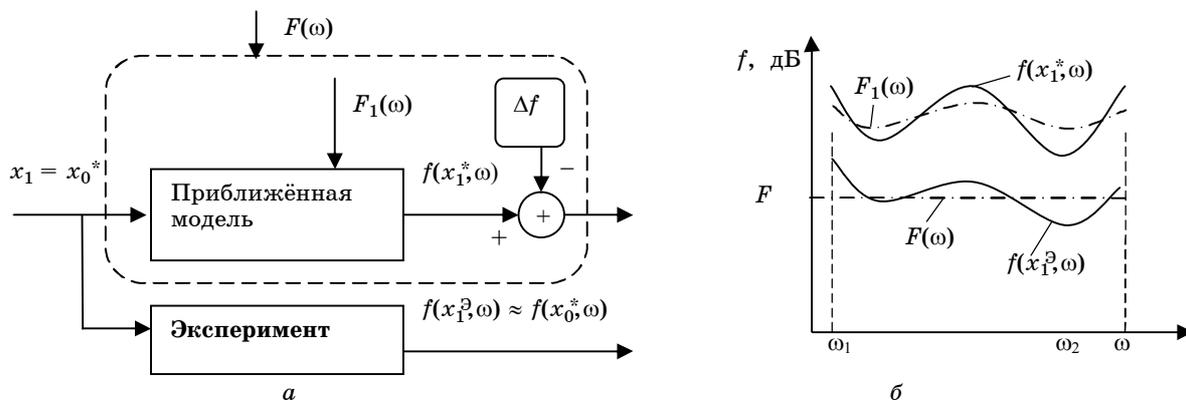


Рис. 5. Проектирование с использованием предсказанных требований  $F_1(\omega)$  по приближённой модели: а – схема второго этапа ЭРМ-метода; б – соответствующие частотные отклики

Найденное в результате решение (3) новое оптимальное значение вектора параметров  $\mathbf{x}_1^*$  берется за основу построения следующей натурной модели устройства, после чего проводят второй экспериментальный анализ его характеристики, т.е. строят новую характеристику  $f^{\beta}_1(\omega)$  (см. рис. 5).

При необходимости весь экспериментально-расчетный цикл может быть повторен. Однако в большинстве случаев достаточно одного экспериментально-расчетного цикла для удовлетворительного совпадения  $f(\mathbf{x}_0^*, \omega)$  с  $f^{\beta}_1(\omega)$  (см. рис. 5).

Таким образом, не зная точной математической модели устройства, выявляем из первого эксперимента, как искажаются его характеристики вследствие приближенности модели. Зеркально отобразив найденное искажение относительно исходных требований  $F(\omega)$ , получаем предсказанные требования (т.е. новую аппроксимируемую функцию  $F_1(\omega)$ ). На втором этапе проектирования по приближённой модели с использованием предсказанных требований находим оптимальные проектные параметры конструкции (топологии), и результаты второго эксперимента, как правило, удовлетворительно согласуются с исходными требованиями  $F(\omega)$ .

Итак, приближенная модель, оптимизируемая по предсказанным требованиям, позволяет получить действительно оптимальные проектные параметры конструкции, а дополненная процедурой коррекции результата может интерпретироваться как точная модель (см. рис. 5).

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ по ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг., проект П669 «Проведение поисковых НИР по направлению «Микроэлектроника» в рамках мероприятия 1.2.1».

*Литература*

1. Kabir H. Smart modeling of microwave devices / H. Kabir, L. Zhang, M. Yu, et al. // IEEE Microwave Magazine. – 2010. – Vol. 11, № 3. – P. 105–118.

2. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. – М.: Наука, 1981. – 487 с.
  3. Оптимальный синтез устройств СВЧ с Т-волнами / под ред. В.П. Мещанова. – М.: Радио и связь, 1984. – 288 с.
  4. Bandler J.W. Space mapping technique for electromagnetic optimization J.W. Bandler, R.M. Biernacki, S.H. Chen et al. // IEEE Trans. – 1994. – Vol. MTT-42, № 12. – P. 2536–2544.
- 

**Сычёв Александр Николаевич**

Д-р техн. наук, ст. науч. сотрудник,  
проф. каф. компьютерных систем в управлении и проектировании ТУСУРа  
Тел.: 8 (382-2) 41-44-68.  
Эл. почта: ans@main.tusur.ru

Sychev A.N.

**General approaches to optimal designing of microwave integrated circuits: The state of the art**

The basic approaches to optimal designing microwave circuits are considered. The flow-chart of iterative synthesis process of integrated microwave circuits divided by circuitry and topological stages is presented. The experimental and numerical technique for designing is considered in details.

**Keywords:** microwave microelectronics, microwave integrated circuits (IC), optimal design methods, experimental and numerical technique for designing.

---