

УДК 621.375.4

Д.А. Жабин, И.М. Добуш, Л.И. Бабак, А.А. Калентьев

## Автоматизированный синтез принципиальных схем и топологий малошумящих СВЧ-усилителей на основе генетического алгоритма

Впервые представлена методика автоматизированного синтеза линейных и малошумящих СВЧ-транзисторных усилителей (ТУ) на основе генетического алгоритма, позволяющая получить как принципиальную схему, так и первоначальный вариант топологии. Усилители могут выполняться по технологиям печатных плат, гибридных или монолитных (МИС) интегральных схем, при их синтезе используются модели реальных пассивных компонентов, а также соединительных линий, сквозных отверстий и других элементов топологии. Методика реализована в программной среде, объединяющей программу автоматизированного синтеза СВЧ ТУ Geneamp и универсальную САПР СВЧ-устройств Microwave Office. Эффективность методики продемонстрирована на примере синтеза 0,15 мкм GaAs-pHEMT МИС однокаскадного малошумящего СВЧ ТУ диапазона частот 36–40 ГГц.

**Ключевые слова:** СВЧ, транзисторный усилитель, принципиальная схема, топология, синтез, САПР, генетический алгоритм.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2017-20-3-132-143

СВЧ-полупроводниковые устройства (ППУ), входящие в состав большинства радиоэлектронных систем, могут быть изготовлены по технологиям печатных плат (ПП), гибридных (ГИС) и монолитных (МИС) интегральных схем. Однако особенностью современного этапа развития радиоэлектронных средств (РЭС) является все более широкое внедрение именно СВЧ МИС, ведущее к появлению качественно новых систем. Это связано с тем, что использование СВЧ МИС позволяет значительно улучшить основные технические параметры РЭС, кардинально снизить массу и габариты аппаратуры, повысить надежность ее функционирования, уменьшить трудоемкость и себестоимость изготовления в серийном производстве.

В связи с переходом РЭС на современную элементную базу (МИС) и освоением все более высокочастотных диапазонов в мире резко возросло количество разрабатываемых СВЧ ППУ. Однако это вошло в противоречие с высокой трудоемкостью и стоимостью проектирования СВЧ ППУ, а также дефицитом квалифицированных проектировщиков.

В частности, важнейшей проблемой является разработка принципиальной схемы и топологии СВЧ ППУ с использованием элементов выбранной технологии. Этот этап требует значительных затрат времени и труда разработчика и во многом определяет качественные характеристики устройств. В то же время сейчас он наименее формализован и автоматизирован. В настоящее время отсутствуют практически эффективные систематические подходы, позволяющие выполнить одновременно структурный (схемный) и топологический синтез СВЧ ППУ с учетом комплекса характеристик и точных моделей элементов. В нашей стране и за рубежом отсутствуют программные продукты, разрешающие не только моделировать, но и синтезировать СВЧ ППУ.

Для эффективного проектирования библиотеки элементов, а также алгоритмы и программные моду-

ли синтеза СВЧ ППУ должны быть интегрированы в существующие распространенные системы автоматизированного проектирования (САПР) СВЧ-устройств. Это позволит использовать имеющиеся в составе таких систем быстродействующие алгоритмы моделирования и оптимизации, средства отображения схем, топологий и характеристик устройств, библиотеки стандартных элементов и т.д. и в конечном счете упростить создание специализированных САПР СВЧ ППУ. Однако вопросы построения интегрированных программных систем (сред), сочетающих возможности моделирования и синтеза СВЧ-устройств, в литературе не исследованы.

В настоящей статье впервые представлена методика, которая позволяет автоматически получить, наряду с принципиальной схемой, также и топологию для важного класса СВЧ ППУ – линейных и малошумящих СВЧ-транзисторных усилителей (ТУ), выполняемых по технологиям ПП, ГИС или МИС. Методика основана на генетическом алгоритме (ГА) и разрешает учесть при синтезе параметры как реальных пассивных компонентов, так и элементов топологии (соединительных линий и т.д.). Описана реализация методики в программной среде, которая объединяет программу автоматизированного синтеза СВЧ ТУ Geneamp и универсальную САПР СВЧ-устройств Microwave Office. Работоспособность методики демонстрируется на примере синтеза схемы и топологии МИС однокаскадного малошумящего СВЧ ТУ диапазона частот 36–40 ГГц, изготавливаемой по 0,15 мкм GaAs-pHEMT-технологии.

### Анализ методов синтеза принципиальных схем и топологий СВЧ ППУ

Задачи автоматического синтеза принципиальных схем и топологий в настоящее время успешно решены применительно к цифровым устройствам. Однако СВЧ ППУ относятся к классу аналоговых устройств. В последние два десятилетия задача

структурного синтеза аналоговых радиоэлектронных устройств (РЭУ) привлекла значительный интерес специалистов. Здесь были предложены новые подходы к решению общей задачи синтеза таких РЭУ, базирующиеся на современных достижениях в области искусственного интеллекта (применение баз знаний, эволюционного поиска, глобальных методов оптимизации и др.). На основе этих подходов и экспериментальных программ синтезированы различные аналоговые интегральные устройства при использовании моделей активных и идеальных пассивных элементов, в том числе активные фильтры, операционные усилители, широкополосные усилители, автогенераторы и др.

Однако в целом автоматически синтезированные РЭУ пока не могут конкурировать с результатами «ручного» проектирования. Это объясняется большой сложностью задачи структурного синтеза аналоговых РЭУ, которую весьма трудно формализовать. Многие эксперты рассматривают эту задачу скорее как искусство, а не как науку. Что же касается существующих САПР аналоговых устройств, то они в подавляющем большинстве случаев выступают только в роли инструмента для расчета характеристик уже построенных схем (исключение составляют иногда входящие в состав САПР модули синтеза для узкого круга простых устройств, в основном пассивных и активных фильтров). В связи со сказанным при проектировании аналого-цифровых систем на кристалле порядка 80% времени тратится на аналоговую часть.

Задача синтеза принципиальных схем и топологий СВЧ ППУ является тем более трудной в связи со сложностью моделей СВЧ-элементов, взаимным влиянием отдельных элементов и блоков друг на друга, в том числе на электромагнитном уровне, зависимостью характеристик устройства от большого числа факторов и т.д. В частности, характерной особенностью проектирования СВЧ-устройств является необходимость учета потерь и паразитных параметров пассивных элементов.

Основные этапы процесса проектирования СВЧ ППУ с применением существующих САПР:

- выбор элементной базы, технологии изготовления и разработка структурной схемы ППУ (например, для СВЧ усилителей – тип усилителя, число каскадов, структурные схемы каскадов и др.), исходя из комплекса требований к характеристикам устройства;

- разработка первоначальной принципиальной схемы СВЧ ППУ при моделировании с использованием идеализированных моделей пассивных элементов;

- замена идеализированных моделей на модели реальных элементов (например, в виде  $S$ -параметров или эквивалентных схем замещения) для выбранной технологии изготовления ППУ, моделирование и уточнение принципиальной схемы;

- разработка первоначального варианта топологии СВЧ ППУ по принципиальной схеме (простран-

ственно-геометрическое размещение элементов и связей между ними);

- моделирование СВЧ ППУ с учетом всех особенностей топологии при использовании моделей реальных элементов либо электромагнитного (ЭМ) анализа, уточнение принципиальной схемы и топологии;

- подготовка конструкторской документации для запуска СВЧ ППУ в производство.

В частности, для разработки принципиальных схем СВЧ ТУ были предложены различные методики: графический метод, основанный на диаграмме Вольперга–Смита [1]; аналитический метод, базирующийся на представлении активных элементов (АЭ) физическими эквивалентными схемами (ЭС) [2]; численно-аналитический метод реальной частоты [3]; численный метод случайного перебора [4]; декомпозиционный метод [5] и др.

Все указанные методы реализованы в экспериментальных или коммерческих программных продуктах и позволяют в той или иной степени автоматизировать решение задачи получения (синтеза) принципиальных схем усилителей. Однако им свойственны два значительных недостатка: 1) использование при синтезе СВЧ ТУ, как правило, идеализированных моделей пассивных элементов (т.е. идеальных резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности и линий передачи); 2) невозможность осуществить также автоматический или автоматизированный синтез топологии СВЧ ТУ.

Важно отметить, что для точного моделирования СВЧ ТУ на этапе разработки топологии требуется использовать модели соединительных линий и элементов, в том числе линий передачи (ЛП) и их неоднородностей, сварных проволочных соединений, сквозных отверстий, контактных площадок и др. Учет этих элементов, а также замена идеализированных моделей моделями реальных пассивных элементов приводят к тому, что параметры устройства, первоначально синтезированного на основе методов [1–5], изменяются и могут не укладываться в предъявляемые требования. В связи с этим некоторые из этапов или же весь процесс проектирования приходится повторять.

В связи с отмеченными трудностями на практике процесс получения схемы и топологии СВЧ ППУ в большинстве случаев осуществляется на основе эвристического подхода с использованием опыта разработчика, упрощенных инженерных методик, многократного моделирования и оптимизации различных вариантов полученных решений. Указанный подход является весьма трудоемким, результаты его применения сильно зависят от опыта и квалификации разработчика.

Перспективным подходом к решению задач синтеза СВЧ-устройств можно полагать применение эволюционных алгоритмов (ЭА) и в том числе генетических алгоритмов (ГА) и генетического программирования [6]. Методики автоматической генерации на базе ГА принципиальных схем некоторых типов

пассивных СВЧ-цепей и активных СВЧ-устройств, включая СВЧ ТУ, были рассмотрены в работах [7–12]. В частности, в работах авторов настоящей статьи предложены базирующиеся на ГА практически эффективные методики автоматического синтеза схем линейных и малошумящих СВЧ ТУ при использовании моделей как идеальных [9], так и реальных (интегральных) [10–12] пассивных элементов. Однако все указанные подходы не позволяют выполнить синтез топологии СВЧ ТУ.

Что касается общей проблемы автоматизации проектирования топологии аналоговых схем, она исследуется достаточно давно [13–17]. Здесь, как правило, решаются проблемы размещения элементов и трассировки соединений на подложке для устройств с уже известной принципиальной схемой. При этом в подавляющем большинстве существующих работ не учитываются паразитные параметры и потери в пассивных компонентах схемы и соединительных элементах топологии, а также другие особенности СВЧ-устройств.

Тематике автоматического построения топологий СВЧ-устройств на базе ГА и других подходов посвящено только небольшое число статей [15–17], опубликованных в последние годы. Представим их краткий обзор.

В работе Т. Цанга и др. [15] рассматривается метод автоматического построения топологии МИС СВЧ малошумящего ТУ. При этом решаются две задачи – размещения элементов МИС ТУ на площади кристалла и трассировки ЛП, последней задаче уделяется особое внимание. В СВЧ-диапазоне любой изгиб или изменение сечения ЛП приводит к искажению электромагнитного (ЭМ) поля и соответственно, к изменению электрических параметров линии. При разработке топологии СВЧ ППУ линию часто требуется изгибать под углом  $90^\circ$ , в этом случае для минимального искажения ЭМ поля сочленение двух линий под прямым углом обычно сглаживается. Однако такое сглаживание приводит к изменению общей длины ЛП и соответственно характеристик СВЧ ППУ. Для решения указанной проблемы в [15] был предложен и реализован новый метод трассировки на основе линейного программирования, который при автоматической генерации топологии позволяет минимизировать число изгибов ЛП.

Исходными данными метода для построения топологии МИС ТУ являются: список соединений элементов (т.е. принципиальная схема ТУ); размеры площади кристалла; размеры активных и пассивных элементов; ширина и длина всех ЛП; минимальное расстояние между элементами; величина компенсации длины при сглаживании.

Предложенный метод состоит из двух этапов. На первом этапе решается задача первоначального (грубого) построения топологии МИС путем представления всех элементов в виде квадратов и размещения их на кристалле. При этом все ЛП представляются в виде прямых линий, соединяющих центры квадратов, такой подход позволяет уменьшить раз-

мерность поискового пространства при решении задачи размещения элементов. На втором этапе происходит уточнение полученной топологии, решается задача трассировки ЛП с минимизацией числа изгибов. Алгоритм автоматического построения топологии пытается найти такую компоновку элементов ТУ, при которой размеры МИС укладываются в нужные габариты, а размеры всех ЛП после трассировки равны исходно заданным значениям.

Эффективность метода демонстрируется на примере синтеза топологии МИС малошумящего усилителя (МШУ) диапазона 90–104 ГГц на основе 90 нм CMOS-технологии, содержащего 34 активных и пассивных элемента, а также 25 ЛП. При «ручном» проектировании опытным специалистом для построения топологии МИС МШУ с привлечением ЭМ-моделирования потребовалось порядка 2 нед. В результате были получены размеры кристалла МИС  $890 \times 615$  мкм при общем числе изгибов ЛП в топологии, равном 59. С использованием программы на основе предложенного алгоритма была автоматически построена топология МИС с размерами кристалла  $800 \times 555$  мкм (уменьшение площади на 10%) и общим числом изгибов, равным 30. Решение получено за 14 мин 40 с, при этом характеристики МИС МШУ незначительно изменились по сравнению с «ручным» вариантом.

Результаты работы свидетельствуют об эффективности рассмотренного подхода в плане качества построения топологии СВЧ ТУ при заданных в постановке задачи условиях. Однако метод имеет значительные недостатки, которые сильно сужают его практическое применение. Главный недостаток состоит в том, что сами условия в исходной постановке задачи, предполагающие необходимость знать окончательную принципиальную схему СВЧ ППУ, а также точные значения длин и ширины ЛП до построения топологии, часто являются невыполнимыми и не соответствуют реальной практике проектирования. Особенно это касается случая СВЧ ППУ с рабочими частотами выше нескольких гигагерц, когда точные характеристики устройства с учетом всех топологических и конструктивных особенностей можно рассчитать только с применением ЭМ-анализа или моделей неоднородностей ЛП.

При разработке таких СВЧ ППУ приходится параллельно (часто итеративно) решать задачи построения топологии устройства и ее уточнения путем моделирования с помощью ЭМ-анализа или моделей неоднородностей, а иногда по результатам такого моделирования корректировать и принципиальную схему.

Таким образом, для возможности использования рассматриваемого метода требуется фактически вначале разработать принципиальную схему СВЧ ТУ, создать *вручную* и затем скорректировать с использованием точных методов моделирования первоначальный вариант топологии ТУ. Только после этого станут известны точные размеры ЛП и можно будет осуществить уже автоматическое построение

топологии с помощью предложенного метода. В работе [15] первоначальный вариант топологии МИС МШУ тоже был разработан вручную.

Даже в такой ситуации метод не позволяет обеспечить характеристики СВЧ-устройства, абсолютно идентичные первоначальному варианту, так как наличие прямоугольных изгибов ЛП учитывается только приближенно путем соответствующего изменения (компенсации) общей длины ЛП. Метод не учитывает более сложные неоднородности ЛП, влияние конкретной конфигурации сочленений линий, наличие других соединительных элементов (отверстий, контактных площадок) и др. Очевидно, в рассматриваемом реальном случае полезность и сфера практического применения метода значительно уменьшаются. На практике он может быть использован для генерации «с нуля» топологии СВЧ ТУ с рабочими частотами не выше 2–3 ГГц, а также для автоматического построения и оптимизации нескольких альтернативных вариантов топологии ТУ более высокочастотных диапазонов при имеющемся исходном «ручном» варианте.

В следующих двух работах [16, 17] решается только задача параметрического синтеза, т.е. оптимизации физических размеров некоторых пассивных элементов СВЧ ТУ (катушек индуктивности и ЛП) при заданной принципиальной схеме и топологии остальной части схемы. Таким образом, представленные в этих работах подходы не могут претендовать на полное решение задачи автоматического построения топологии СВЧ ППУ.

В работе Е. Афакана и Г. Дундара [16] представлено проектирование МИС однокаскадного узкополосного МШУ с центральной частотой 2,4 ГГц, выполненной по 0,13 мкм CMOS-технологии. Так как требовалась оптимизация не только линейных (коэффициент усиления  $|S_{21}|$ , коэффициент шума  $F$ , входной коэффициент отражения  $|S_{11}|$ , развязка  $|S_{12}|$ ), но и нелинейных характеристик устройства (точка сжатия по входу 3-го порядка  $IP_3$ ), для моделирования МШУ на каждой итерации использовался внешний симулятор HSPICE-RF, реализующий метод гармонического баланса.

В качестве оптимизируемых переменных выступали сопротивления двух резисторов и геометрические размеры трех спиральных круглых катушек индуктивности. Резисторы при этом были представлены идеальными моделями, а катушки индуктивности – параметрическими (масштабируемыми) моделями в виде эквивалентных схем, элементы которых зависят от геометрических размеров катушек (число витков, ширина проводника и внешний диаметр). Для оптимизации использовался подход, основанный на сочетании генетического программирования и метода отжига. Синтез усилителя с заданными характеристиками на компьютере с частотой процессора 3,2 ГГц был выполнен в течение полутора часов. Основной недостаток данного подхода – то, что на этапе синтеза не учитываются параметры и неоднородности соединительных ЛП,

которые неизбежно будут присутствовать в топологии МШУ. Кроме того, задача построения параметрических моделей сосредоточенных пассивных элементов (резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности) является достаточно трудоемкой.

В работе Бо Лиу и др. [17] рассмотрено проектирование МИС дифференциального трехкаскадного усилителя диапазона 80–100 ГГц на основе 90 нм CMOS-технологии. В усилителе, помимо трех одинаковых транзисторов, используются входная, выходная и две межкаскадные СЦ. При этом в каждой СЦ включены холостходные шлейфы на отрезках ЛП, а также трансформатор импедансов, образованный двумя помещенными друг в друга связанными круглыми катушками индуктивности.

Задача оптимизации решается в пространстве физических параметров указанных пассивных элементов усилителя – геометрических размеров трансформаторов и ЛП, общее число оптимизируемых параметров составляет 51. Для параметрической оптимизации применяется усовершенствованный вариант одного из ЭА – метод дифференциальной эволюции с машинным обучением.

Точность моделирования характеристик МИС усилителя обеспечивается за счет применения ЭМ-анализа. Оптимизируемые переменные разделены на две группы – переменные, определяющие характеристики фрагментов МИС, которые необходимо моделировать с помощью ЭМ-анализа, и переменные, описывающие фрагменты, моделируемые с помощью обычного линейного ВЧ-симулятора. При этом благодаря уменьшению размерности задач оптимизации значительно сокращаются общие затраты машинного времени. В результате оптимизации были найдены оптимальные параметры трансформаторов и ЛП, обеспечивающие необходимый уровень коэффициента усиления в заданной полосе частот при плоской форме амплитудно-частотной характеристики. Число ЭМ-анализов составило только 48 при общих затратах времени 25 ч. Для сравнения заметим, что при использовании исходного алгоритма дифференциальной эволюции без обучения для получения таких же результатов было необходимо число ЭМ-анализов, равное 4 000, а время оптимизации – 9 сут.

Следует обратить внимание на то, что в работах [16, 17] фактически использовались специально разработанные для решения задач проектирования МИС ТУ программные среды. Они включают созданные разработчиками специализированные программы оптимизации, учитывающие особенности задачи и объекта проектирования, и стандартные симуляторы – автономные или входящие в состав универсальных САПР СВЧ-устройств (симулятор HSPICE-RF в работе [16], линейный и ЭМ-симулятор в работе [17]).

Исходя из анализа представленных работ, можно сделать определенные заключения по созданию эффективных методов и алгоритмов автоматического или автоматизированного построения топологии СВЧ ППУ:

1. Как уже отмечалось, последовательный синтез вначале окончательной принципиальной схемы СВЧ ППУ, а затем топологии по этой схеме имеет много недостатков. Эффективный алгоритм должен одновременно (параллельно) синтезировать принципиальную схему и топологию СВЧ ППУ (иначе говоря, на каждой итерации синтеза или оптимизации одновременно генерируются очередной вариант принципиальной схемы ППУ и топология для этой схемы). В отличие от [15], при реализации точного моделирования (с учетом топологии) это позволит сразу с высокой степенью достоверности рассчитать СВЧ-характеристики текущего варианта ППУ. Указанный подход к автоматическому созданию топологии СВЧ ППУ близок к тому, который сейчас использует проектировщик при «ручной» разработке топологии (см. выше).

2. На каждой итерации моделирование СВЧ ППУ должно точно учитывать по возможности все конструктивные и топологические особенности текущего варианта, т.е. использовать либо точные модели активных и пассивных элементов, ЛП и их неоднородностей, соединительных элементов и т.д., либо ЭМ-анализ фрагментов ППУ.

3. Реализация такого (параллельного) подхода проще всего может быть выполнена при разработке программной среды, состоящей из программы синтеза, реализующей определенные алгоритмы генерации принципиальных схем и топологий СВЧ ППУ заданного класса, и коммерческой универсальной САПР СВЧ-устройств, обеспечивающей точное моделирование ППУ и подключение необходимых моделей или библиотек компонентов для выбранной технологии изготовления ППУ. В этом случае можно использовать целый комплекс развитых средств универсальной САПР, включая линейный и нелинейный симуляторы, схемный и топологический редакторы, встроенные модели элементов, механизмы подключения специальных библиотек компонентов для определенных технологий изготовления СВЧ-устройств и др. Применение таких возможностей значительно повышает эффективность, облегчает и ускоряет разработку специализированных программных сред для синтеза СВЧ ППУ.

#### Методики синтеза принципиальных схем линейных и малошумящих СВЧ ТУ на основе ГА

Ранее в статьях авторов [9–12] был разработан ряд методик на основе ГА, обеспечивающих автоматизированный структурно-параметрический синтез (генерацию принципиальных схем) линейных и малошумящих СВЧ ТУ по комплексу требований к характеристикам устройства в заданной полосе частот, включая коэффициент усиления ( $G$ ), коэффициент шума ( $F$ ), входной и выходной коэффициенты отражения ( $|S_{11}|$ ,  $|S_{22}|$ ) и коэффициент устойчивости ( $K$ ). Методики синтеза были реализованы в различных версиях программы Geneamp [9–11]. Программа позволяет синтезировать узкополосные и широкополосные, одно- и многокаскадные усилители с реактивными и диссипативными четырехполюсными

согласующе-корректирующими цепями (СКЦ), а также двухполюсными цепями коррекции и обратной связи (ОС).

Для примера на рис. 1 показана структурная схема двухкаскадного СВЧ ТУ. Она представляет собой каскадное соединение активных блоков (АБ) и СКЦ. Каждый из АБ содержит транзистор, а также подключаемые к нему пассивные блоки (ПБ), в данном случае это цепи коррекции и ОС. СКЦ лестничного типа образованы включением последовательных и параллельных ветвей, в качестве которых также используются ПБ. В свою очередь, в каждый из ПБ входят базовые пассивные элементы (резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, ЛП) либо определенные их соединения.

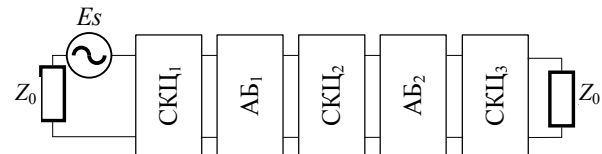


Рис. 1. Структурная схема двухкаскадного СВЧ ТУ

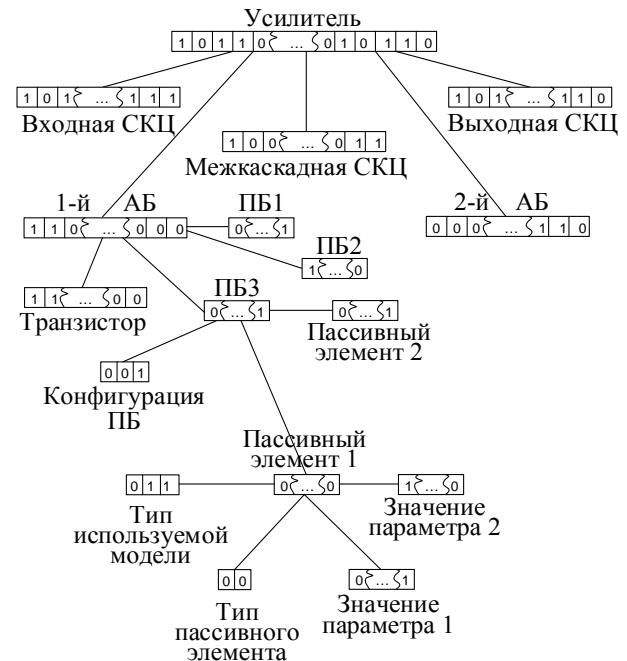


Рис. 2. Схема кодирования СВЧ ТУ в виде хромосомы

Подобная структура ТУ была получена на основании морфологического анализа большого числа схем СВЧ-усилителей различных частотных диапазонов [9]. В программе конкретная структура ТУ описывается с помощью И-ИЛИ дерева, последнее позволяет удобно декомпонировать общую структуру на набор базовых схем, которые могут быть кодированы и декодированы в ГА с помощью бинарной строки [9]. Каждый из блоков СВЧ ТУ кодируется по иерархическому принципу (рис. 2). Например, при кодировании активного блока (АБ) в хромосому записываются номер используемого транзистора и информация о пассивных блоках. Код ПБ содержит тип блока и используемые в нем пассивные элементы или их соединения. При кодировании пассивного

элемента записываются тип элемента, способ включения, тип модели и параметры элемента. Использование И-ИЛИ дерева позволяет также при синтезе контролировать вид генерируемых принципиальных схем усилителя, это дает возможность получать удобные для практической реализации варианты ТУ.

Для осуществления синтеза был выбран бинарный ГА, так как он обеспечивает хорошую сходимость в ограниченном поисковом пространстве. Особенностью используемой реализации ГА является повышение эффективности за счет проведения генетических операций одновременно с несколькими популяциями.

На предварительном этапе при определении основных параметров алгоритма задается количество популяций и особей для каждой популяции. Далее в каждой популяции выполняются следующие операции:

- 1) формирование начального набора особей в популяции;
- 2) получение множества вариантов принципиальных схем ТУ путем декодирования всех особей в популяции, моделирование СВЧ-характеристик и вычисление целевой функции (ЦФ) для каждого варианта ТУ (т.е. для каждой особи);
- 3) выборка и скрещивание особей согласно оператору селекции;
- 4) мутация особей-потомков согласно выбранному оператору мутации;
- 5) декодирование особей-потомков, моделирование соответствующих схем ТУ и вычисление для них ЦФ;
- 6) отбор особей для следующего поколения в соответствии со значениями ЦФ;
- 7) переход к п. 3;
- 8) алгоритм прекращает работу в случае прерывания его пользователем или при достижении требуемого значения ЦФ.

При завершении очередной итерации для всех популяций производится миграция лучшей особи из популяции 1 в популяцию 2 на место худшей особи; аналогично из популяции 2 в популяцию 3 и т.д., из популяции  $N$  в популяцию 1. Применение данного метода уменьшает возможность сходимости популяции к локальному оптимуму.

Первоначальный подход к синтезу ГА был описан в [9]. Первая версия алгоритма и программы [9] предполагала применение только идеализированных моделей пассивных сосредоточенных элементов. Вследствие этого на каждой итерации невозможно было получить точные характеристики ТУ, нельзя было также синтезировать усилители с распределенными элементами. Для устранения указанных недостатков в [10] была предложена методика, позволяющая использовать параметрические модели пассивных сосредоточенных элементов в виде ЭС, а также модели ЛПП с учетом потерь. В результате появилась возможность учесть при синтезе ТУ потери и паразитные параметры пассивных элементов. Однако к значительным недостаткам такого способа относятся трудоемкость и большие временные за-

траты на построение параметрических моделей элементов в виде ЭС для каждой выбранной технологии изготовления ТУ.

Следующим этапом развития рассматриваемого подхода к синтезу ТУ является использование моделей пассивных элементов в виде набора  $S$ -параметров на фиксированных частотах ( $S$ -моделей) [11, 12]. Этим обеспечивается целый ряд достоинств:

- 1)  $S$ -модели являются универсальными, их можно использовать при синтезе СВЧ ТУ и других ППУ, выполняемых по технологиям ПП, ГИС и МИС;
- 2) получение  $S$ -моделей пассивных элементов достаточно быстрое и простое: их можно, во-первых, непосредственно измерить в необходимом диапазоне частот; во-вторых, рассчитать по ЭС-моделям, если таковые имеются; в-третьих, для навесных пассивных компонентов (SMD-компонентов), которые применяются в СВЧ ТУ, изготавливаемых по технологиям ПП и ГИС – взять из справочных данных фирм-изготовителей;
- 3) использование  $S$ -моделей позволяет увеличить скорость синтеза схем СВЧ-усилителей по сравнению с параметрическими ЭС-моделями.

Применение методики синтеза СВЧ ТУ с использованием  $S$ -моделей пассивных элементов показало его высокую эффективность, примеры синтеза принципиальных схем усилителей на этой основе представлены в работах [11, 12].

Однако с точки зрения практического использования указанный подход также обладает существенным ограничением. Именно, в ходе синтеза не учитываются такие элементы, реально присутствующие в топологии ТУ, как неоднородности ЛПП (короткозамкнутый и холостой шлейфы, изгиб линии, скачок ширины, Т-соединение, перекрестное соединение и др.), сквозные отверстия, контактные площадки, сварные проволочные соединения и др. Как правило, данные элементы оказывают значительное влияние на характеристики устройства и должны учитываться при разработке топологии. В связи со сказанным полученные с помощью методики [11, 12] принципиальные схемы могут потребовать дополнительной оптимизации и доработки со стороны инженера-проектировщика, чтобы удовлетворять изначально поставленным техническим требованиям. В некоторых случаях приходится повторять процесс синтеза схемы ТУ заново, все это затрудняет и замедляет процесс проектирования.

Устранение вышеописанного недостатка возможно только в том случае, если на основе ГА реализовать одновременный (параллельный) синтез принципиальной схемы и топологии СВЧ ТУ. Предлагаемая для этой цели методика описана в следующем разделе.

#### **Методика одновременного синтеза принципиальной схемы и топологии СВЧ ТУ**

*Общее описание.* Предлагаемая методика основана на идее использования при синтезе ТУ на основе ГА описания отдельных частей схемы в виде наборов  $S$ -параметров [11, 12]. Основное ее отличие от

методики, описанной в статьях [11, 12], заключается в использовании  $S$ -параметров целых фрагментов цепей вместо  $S$ -параметров отдельных пассивных компонентов (резисторов, конденсаторов и др.). Фрагменты цепи представлены в виде произвольного соединения сосредоточенных элементов, неоднородностей ЛП, сквозных отверстий и других компонентов. Использование при синтезе  $S$ -параметров фрагментов цепей позволяет учесть влияние элементов, отсутствующих на этапе построения первоначальной принципиальной схемы, но добавляемых на этапе построения топологии, на характеристики ТУ в целом. В конечном итоге методика позволяет выполнить точный синтез СВЧ-усилителей и получить первый вариант их топологии.

Методика реализуется в специально разработанной программной среде, предназначенной для синтеза схем и топологий линейных и малошумящих СВЧ ТУ. Она представляет собой интеграцию модифицированной версии программы Geneamp и универсальной САПР СВЧ-устройств (в данном случае САПР Microwave Office).

Опишем сперва в общих чертах взаимодействие программы Geneamp и САПР Microwave Office (далее просто САПР) в процессе синтеза ТУ (рис. 3). Вначале разработчик в программе Geneamp, как обычно, задает требования к СВЧ-характеристикам, а также ограничения на структуру и элементы усилителя (число каскадов, наличие входной, выходной и межкаскадных СКЦ, использование определенных видов цепей коррекции и ОС в каскадах, возможные типы базовых элементов, ограничения на величины параметров пассивных элементов и др.) [9].



Рис. 3. Схема взаимодействия программ Geneamp и Microwave Office

Если задание на проектирование предполагает синтез топологии СВЧ ТУ, тогда программа Geneamp автоматически вызывает САПР. Разработчик в схемном редакторе САПР вручную формирует фрагменты (подсхемы) принципиальной схемы ТУ, которые могут встречаться при синтезе усилителя и будут отражать особенности топологии. Многие фрагменты являются типовыми (базовыми) – например, это последовательное или параллельное включение пассивных дискретных или интегральных элементов либо ЛП. Некоторые фрагменты цепи являются неизменными в процессе синтеза (например, цепи подачи питания на транзисторы). Другие

фрагменты в ходе синтеза изменяются. В этом случае отдельно указываются параметры входящих в такие фрагменты элементов, которые в процессе синтеза могут дискретно с заданным шагом варьироваться (например, сопротивления резисторов, длины и ширины интегральных МДМ-конденсаторов или ЛП и т.д.).

Заметим, что для выбранной конкретной технологии изготовления усилителя на основе ПП, ГИС или МИС этап формирования фрагментов принципиальных схем ТУ выполняется фактически один раз. При синтезе однотипных (например, похожих по схемам и топологиям, но различающихся частотными диапазонами) ТУ может быть сформировано некоторое подмножество фрагментов схем, которые используются в этих усилителях. По мере того, как проводится синтез других разновидностей усилителей, подмножество необходимых фрагментов схем ТУ постепенно расширяется, образуя в конечном счете библиотеку фрагментов СВЧ ТУ для выбранной технологии.

Следует отметить также, что библиотека фрагментов цепей, сформированная, например, для одной технологии МИС, может быть просто отредактирована, обеспечивая проектирование СВЧ ТУ по другой технологии МИС. В этом случае схемы фрагментов цепи остаются практически такими же и должны быть изменены только описания элементов (ссылки на библиотеки, параметры подложки и т.д.). То же самое касается и технологий ПП и ГИС.

После выполнения описанного этапа САПР возвращает в программу Geneamp список имен сформированных фрагментов цепи и список возможных варьируемых параметров. Затем последний список отображается в специальном модуле генерации  $S$ -параметров, входящем в Geneamp. Здесь разработчик выбирает из списка те параметры элементов, которые действительно будут варьироваться, и указывает пределы и шаг их изменения. Указанная информация вновь передается в САПР, которая с использованием внутреннего линейного симулятора и подключенных библиотек, содержащих точные модели всех имеющихся в фрагментах элементов для выбранной технологии, автоматически рассчитывает и формирует наборы (файлы) параметров рассеяния фрагментов для всех возможных сочетаний дискретных значений варьируемых параметров.

Эти наборы, представляющие собой разновидность параметрических моделей фрагментов схемы, возвращаются в программу Geneamp, которая теперь осуществляет синтез принципиальных схем и топологий СВЧ ТУ. При этом, как и в случае синтеза схем с идеальными пассивными элементами [9], на каждом шаге генерируется множество вариантов (популяция) принципиальных схем ТУ.

Однако теперь вместо определенным образом включенных идеальных пассивных элементов в схемах используются соответствующие фрагменты цепи (подсхемы), описываемые наборами  $S$ -параметров. Например, при синтезе МИС ТУ вместо парал-

тельно включенного идеального конденсатора подключается фрагмент цепи, содержащий, помимо модели самого МДМ-конденсатора, также модели подводящих ЛП и их неоднородностей, при необходимости – сквозного заземляющего отверстия и т.д. Вариация емкости идеального конденсатора заменяется последовательным перебором четырехполюсников, представляющих собой описанный фрагмент цепи с  $S$ -параметрами, рассчитанными при различных значениях длины и ширины МДМ-конденсатора, и т.д. Механизм реализации на основе ГА синтеза СВЧ ТУ с использованием  $S$ -параметров фрагментов цепей практически такой же, как и при применении  $S$ -параметров пассивных компонентов [11, 12].

В результате синтеза генерируются один или несколько вариантов принципиальных схем СВЧ ТУ, реализующих поставленные требования или близких к ним [9–12]. Так как в САПР присутствует информация не только о порядке соединения отдельных элементов в каждой схеме, но и геометрических размерах (топологии) всех составляющих элементов, в топологическом редакторе САПР может быть автоматически выведена первоначальная топология полученных вариантов ТУ. Проектирование заканчивается выбором наиболее подходящего варианта усилителя и окончательным редактированием его топологии в ручном режиме средствами топологического редактора (зачастую это редактирование сводится просто к перемещению уже автоматически сформированных фрагментов топологии ТУ).

Далее рассмотрим основные этапы предлагаемой методики более подробно.

*Первый этап.* На этом этапе инженер-проектировщик с помощью САПР подготавливает фиксированные и изменяемые фрагменты цепи, используемые в усилителе. На рис. 4, *a, б* приведены примеры базовых (типовых) фрагментов цепей для последовательного и параллельного включения пассивных элементов ТУ (резистора, конденсатора и катушки индуктивности), а на рис. 4, *б, в* – ЛП. Указанные фрагменты могут использоваться при синтезе усилителей, выполняемых по всем технологиям, – ПП, ГИС и МИС.

В программе Geneamp применен контекстно-независимый алгоритм синтеза, т.е. параметры одного пассивного элемента в схеме не зависят от параметров других элементов. Поэтому при необходимости нужно принять меры по синхронизации (согласованию) параметров (например, геометрических размеров) отдельных элементов между собой в пределах одного фрагмента. Например, в МИС обычно ширина МДМ-конденсатора равна ширине подводящих ЛП, т.е. в процессе синтеза ширина конденсатора и ширина линий должны изменяться синхронно. Также следует осуществить синхронизацию ширины соединительных ЛП у каждого из соединяемых между собой фрагментов цепи. Для этого на соединяемых зажимах таких фрагментов целесообразно добавить ЛП одинаковой, заранее выбранной ширины. Это позволит исключить необходимость

использовать на стыках фрагментов цепи модели неоднородностей ЛП, что неудобно.

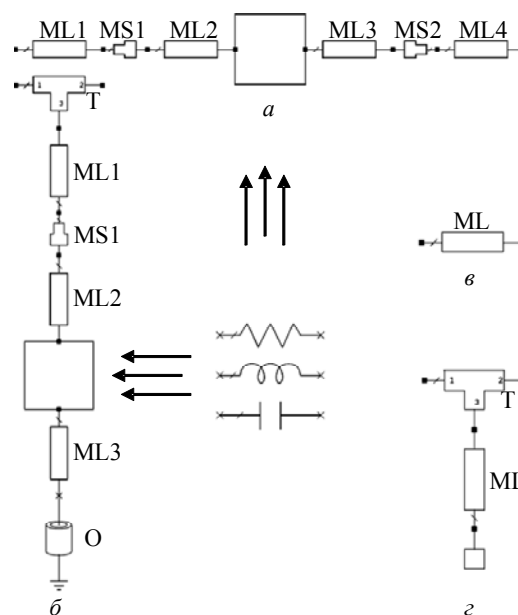


Рис. 4. Типовые фрагменты цепи: последовательное включение сосредоточенных пассивных элементов (*a*) и ЛП (*в*); то же, параллельное включение (*б, з*)

Рассмотрим фрагмент цепи пассивного элемента на примере конденсатора. При последовательном включении (см. рис. 4, *a*) к конденсатору добавляются ЛП ML2 и ML3. Так как ширина ЛП у различных фрагментов цепи может различаться, для согласования с другими фрагментами вводятся также ЛП ML1 и ML4 с заранее выбранной шириной. Линии ML1, ML2 и ML3, ML4 могут иметь различные ширины, поэтому используются модели неоднородностей линий MS1 и MS2, учитывающие скачок ширины ЛП. В данном фрагменте при синтезе могут варьироваться длина и ширина конденсатора, а также ширина ЛП ML2, ML3, все остальные параметры элементов имеют заранее фиксированные значения.

При технологиях ПП и ГИС навесной (дискретный) конденсатор выбирается из предварительно подключенной библиотеки SMD-компонентов, которые часто непосредственно характеризуются измеренными  $S$ -параметрами и приводятся в справочных данных фирм-изготовителей. В этом случае линии ML1 и ML2 могут описывать площадки для монтажа конденсатора, и их ширина необязательно должна совпадать с шириной конденсатора. В случае МИС модель МДМ-конденсатора берется из библиотеки элементов для выбранной полупроводниковой технологии, здесь, как уже отмечалось, ширина линий ML1 и ML2 должна быть согласована с шириной конденсатора.

При параллельном включении конденсатора (см. рис. 4, *б*) необходим элемент Т-образного соединения Т, который также имеет заранее заданную ширину для согласования с другими фрагментами цепи. Модель этого соединения учитывает неоднородности ЭМ-поля в месте стыка трех ЛП. Для за-



земления цепи в данном случае используется элемент сквозного отверстия  $O$ , описываемый своей моделью. Если ширина линий Т-образного соединения не совпадает с шириной конденсатора, вводится модель скачка ширины ЛП MS1.

Варьируемыми параметрами последовательно и параллельно включенной ЛП (рис. 4, в, г) могут быть длина и ширина. При параллельном включении для соединения с остальной схемой используется Т-образное соединение. При необходимости в эти фрагменты цепи также могут быть добавлены модели неоднородностей типа скачка ширины ЛП.

Для соединения МИС ППУ с корпусом, другими МИС и т.д. могут использоваться контактные площадки, они также оказывают влияние на СВЧ-характеристики устройства и должны быть учтены при синтезе. Пример соответствующего фрагмента цепи показан на рис. 5, а.

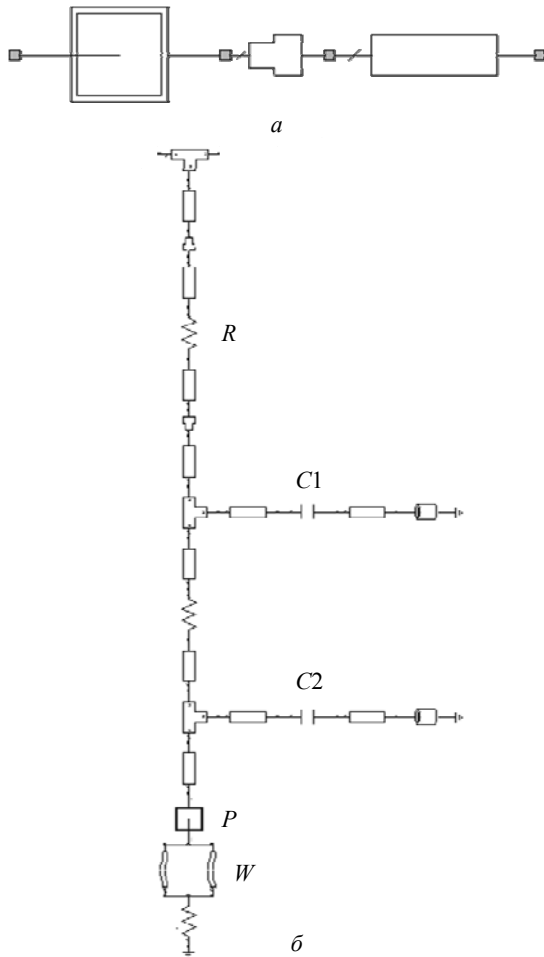


Рис. 5. Фрагменты цепи:

а – контактная площадка; б – схема подачи напряжения питания на затвор транзистора

Для работы транзисторов на них требуется подать напряжения смещения. На рис. 5, б представлен пример фрагмента цепи подачи напряжения смещения на затвор СВЧ-полевого транзистора, он содержит резистор  $R$  и блокировочные конденсаторы  $C1$  и  $C2$ . Также фрагмент цепи содержит площадку  $P$ , на которую в дальнейшем будут распаяны проволочки,

представленные своими моделями  $W$ , для подключения источника питания.

Второй этап. Для указания возможных варьируемых параметров элементов в определенном фрагменте цепи инженер-проектировщик в САПР Microwave Office использует инструмент Equation, который вызывается соответствующей кнопкой (рис. 6, сноска 1).

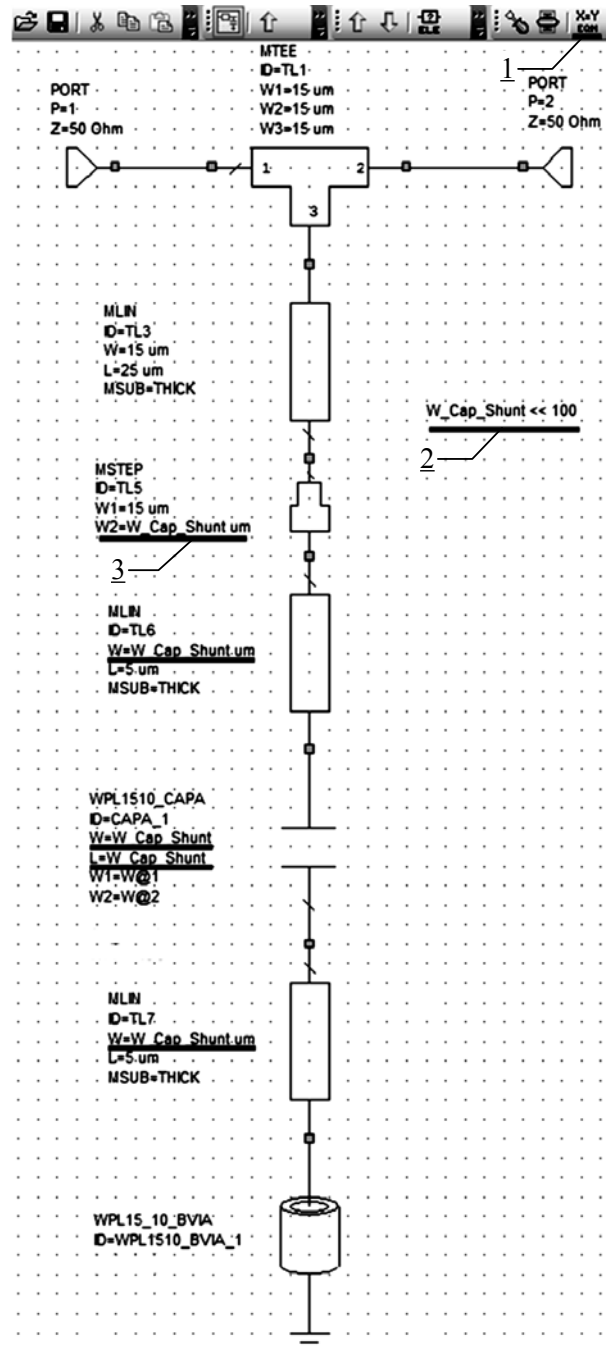


Рис. 6. Фрагмент цепи: параллельно включенный МДМ-конденсатор

С помощью этого инструмента разработчик создает локальную переменную с определенным именем, которая используется для обозначения варьируемого параметра (см. рис. 6, сноска 2). В данном случае – это переменная  $W\_Cap\_Shunt$  для обозна-

чения ширины конденсатора. Далее эта локальная переменная используется в списке параметров одного или нескольких элементов, указывая, что соответствующий параметр элемента варьируется (см. рис. 6, сноска 3).

**Третий этап.** В программе Geneamp запускается модуль генерации  $S$ -параметров. При подключении к САПР Microwave Office модуль производит поиск подготовленных в ней подсхем с фрагментами цепи. Далее в интерфейсной форме этого модуля (рис. 7) отображается список имен подсхем (фрагментов) с возможными для варьирования параметрами, которые ранее были отмечены проектировщиком. В частности, на рис. 7 приведен список имен фрагментов для некоторой схемы ТУ, в этом списке описанный выше фрагмент, соответствующий параллельно включенному МДМ-конденсатору, имеет имя `1_Cap_Shunt` и один потенциально варьируемый параметр `W_Cap_Shunt`. Далее проектировщик в интерфейсной форме (см. рис. 7) отмечает галочкой этот параметр как действительно варьируемый в процессе синтеза, задает диапазон и шаг изменения параметра. При этом необходимо контролировать, чтобы значения параметров всех элементов могли быть реализованы в выбранной технологии изготовления СВЧ ТУ, а также находились в диапазонах адекватности используемых моделей элементов.

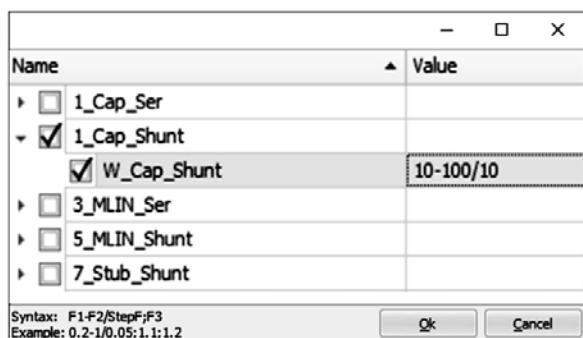


Рис. 7. Интерфейсная форма модуля генерации  $S$ -параметров

В нашем случае параметр `W_Cap_Shunt` варьируется в пределах от 10 до 100 мкм с шагом 10 мкм. В фрагменте на рис. 6 переменная `W_Cap_Shunt` используется не только для обозначения ширины МДМ-конденсатора, но и его длины (т.е. конденсатор будет квадратной формы), а также ширины подводных линий. Поэтому при синтезе все эти параметры будут синхронно изменяться при синтезе ТУ.

Далее в модуле генерации  $S$ -параметров на основе введенной в форме (см. рис. 7) информации генерируется список устанавливаемых значений всех варьируемых параметров для каждого фрагмента цепи. После передачи этого списка в САПР последняя осуществляет расчет  $S$ -параметров всех фрагментов схемы ТУ при полном переборе значений варьируемых параметров.

Например, если в определенном фрагменте схемы есть два изменяемых параметра, каждый из

которых может принимать 10 дискретных значений, то для этого фрагмента будут рассчитаны 100 наборов параметров рассеяния. Каждый набор сохраняется в отдельном `s2p`-файле, т.е. будет сгенерировано всего 100 файлов. Далее файлы  $S$ -параметров, относящиеся к одному фрагменту схемы, объединяются в один `mdif`-файл, т.е. число `mdif`-файлов равно числу фрагментов схемы.

**Четвертый этап.** Сформированные `mdif`-файлы загружаются в программу Geneamp в качестве параметрических моделей фрагментов схемы ТУ. Далее синтез СВЧ ТУ выполняется аналогично синтезу с применением  $S$ -параметров пассивных элементов, представленному в [11]. Первоначальные топологии для полученных вариантов ТУ выводятся в топологическом редакторе САПР.

#### Синтез МИС однокаскадного МШУ диапазона 36–40 ГГц

Для демонстрации эффективности предложенной методики рассмотрим задачу синтеза МИС однокаскадного МШУ диапазона частот 36–40 ГГц на основе 0,15 мкм GaAs-pHEMT-технологии компании Win Semiconductors. К усилителю предъявляются следующие требования: коэффициент усиления  $G = 7,3 \pm 0,35$  дБ; коэффициент шума  $F \leq 2,5$  дБ; модули входного и выходного коэффициентов отражения  $|S_{11}| \leq -10$  дБ,  $|S_{22}| \leq -10$  дБ; усилитель должен быть безусловно устойчивым во всем диапазоне частот ( $K > 1$ ).

В качестве активного элемента выбран транзистор с шириной затвора  $W_g = 4 \times 50$  мкм в рабочей точке  $V_{ds} = 3$  В,  $I_{ds} = 20$  мА. На частоте 40 ГГц он имеет минимальный коэффициент шума  $F_{min} \approx 1,52$  дБ и максимальный коэффициент усиления  $G_{max} \approx 8,15$  дБ. В рабочей полосе частот транзистор является абсолютно устойчивым ( $K > 1$ ), однако есть частотные интервалы за пределами этой полосы, где транзистор потенциально неустойчив ( $K < 1$ ). Анализ усилительных возможностей транзистора в выбранном режиме работы показывает, что для обеспечения необходимого коэффициента усиления в усилителе достаточно использовать один каскад.

На структуру усилителя были наложены следующие ограничения: используются входная и выходная СКЦ; в цепи истока транзистора разрешено использование индуктивной последовательной ОС; СКЦ должны обеспечить подачу напряжений питания и смещения на транзистор, а также развязку входа и выхода ТУ по постоянному току. На входе и выходе МИС усилителя должны присутствовать сигнальные контактные площадки,

В соответствии с изложенной методикой при использовании библиотеки элементов для выбранной монолитной GaAs-pHEMT-технологии в САПР Microwave Office были подготовлены фрагменты цепи для пассивных сосредоточенных элементов и ЛП, а также площадок, и далее для каждого фрагмента сгенерированы наборы  $S$ -параметров в диапазоне частот до 60 ГГц при различных сочетаниях варьируемых параметров.

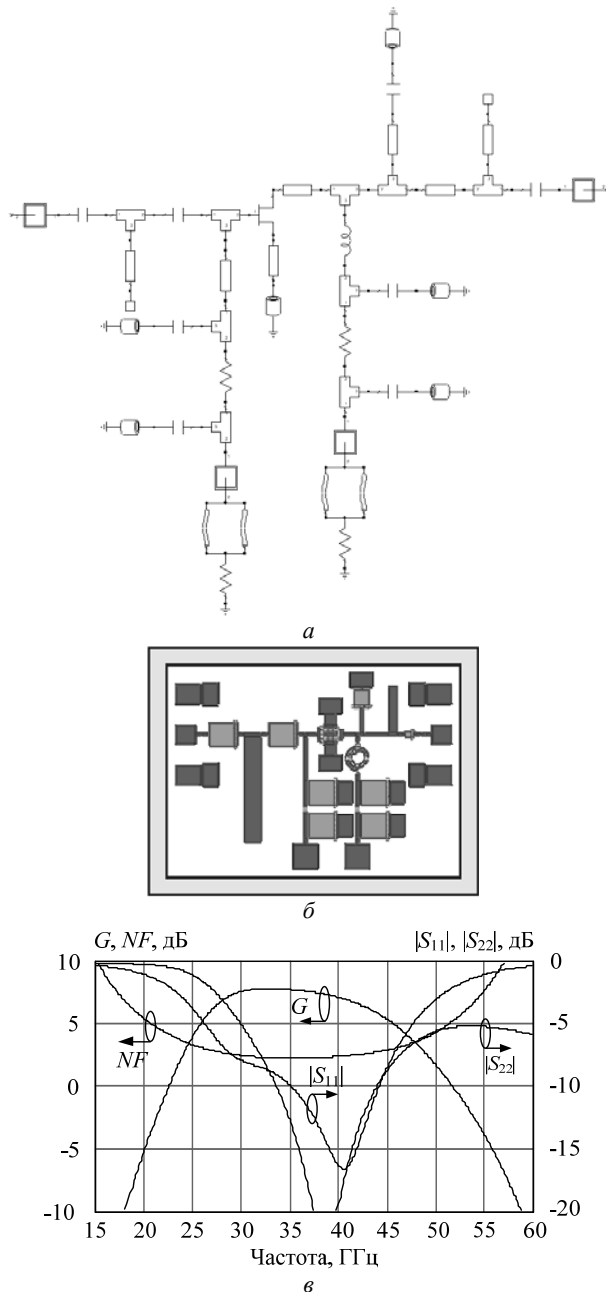


Рис. 8. Синтезированная МИС МШУ:  
 а – принципиальная схема; б – топология ( $1 \times 1,3 \text{ мм}^2$ );  
 в – частотные характеристики

Опишем используемые при синтезе основные фрагменты цепи:

1. Последовательно и параллельно включенный интегральный резистор. Изменяемые параметры: ширина и длина в диапазоне 10–100 мкм. Для каждого типа включения получено по 100 наборов  $S$ -параметров.

2. Последовательно и параллельно включенный интегральный МДМ-конденсатор. Изменяемые параметры: ширина и длина в диапазоне 10–100 мкм. Для каждого типа включения получено по 50 наборов  $S$ -параметров.

3. Последовательно и параллельно включенная спиральная круглая катушка индуктивности. Ис-

пользовались три различных типоразмера катушки, отличающихся величиной индуктивности. Для каждого типа включения получено три набора  $S$ -параметров.

4. Последовательно и параллельно включенная ЛП. Изменяемыми параметрами являются ширина и длина линии. Для каждого типа включения получено по 100 наборов  $S$ -параметров.

При осуществлении синтеза в результате 10 запусков программы Geneamp получены 3 различные схемы и топологии МИС МШУ, удовлетворяющие поставленным требованиям. На рис. 8, а–в показаны результаты для лучшей из синтезированных МИС МШУ. На рис. 8, а представлена упрощенная принципиальная схема ТУ, в общем схема состоит из 87 элементов, а на рис. 8, б – топология. При этом геометрические размеры всех пассивных компонентов, включая ЛП, были получены в автоматическом режиме, доработка топологии заключалась в ручном размещении сгенерированных топологических рисунков фрагментов схемы на кристалле МИС. На рис. 8, в изображены смоделированные частотные характеристики МИС ТУ с учетом топологии.

В полосе частот 36–40 ГГц усилитель обеспечивает коэффициент усиления  $G = 7,2 \pm 0,2 \text{ дБ}$ , коэффициент шума  $F < 2,3 \text{ дБ}$ , модули входного и выходного коэффициентов отражения  $|S_{11}| \leq -11 \text{ дБ}$ ,  $|S_{22}| \leq -15 \text{ дБ}$ . В диапазоне частот от 15 до 60 ГГц усилитель является абсолютно устойчивым ( $K > 1$ ).

Коммерческих аналогов разработанной МИС однокаскадного МШУ диапазона 36–40 ГГц найдено не было. Ближайшим аналогом является МИС двухкаскадного МШУ СНА2391-99F фирмы UMS с рабочей полосой 36–40 ГГц, обладающая коэффициентом усиления  $G = 15 \pm 0,5 \text{ дБ}$ , коэффициентом шума  $F < 3 \text{ дБ}$ , модулями входного и выходного коэффициентов отражения  $|S_{11}| \leq -12 \text{ дБ}$ ,  $|S_{22}| \leq -8 \text{ дБ}$ . Сравнение показывает, что автоматически синтезированная нами МИС МШУ по параметрам (в расчете на один каскад) не уступает коммерческой микросхеме.

#### Заключение

В статье представлена методика автоматизированного синтеза линейных и малошумящих СВЧ ТУ на основе ГА, которая дает возможность получить одновременно практически реализуемое схемотехническое решение с учетом особенностей технологии изготовления и первоначальный вариант топологии. Описана программная среда для реализации методики. Представленный пример синтеза GaAs МИС однокаскадного МШУ диапазона частот 36–40 ГГц подтверждает ее эффективность.

Работа выполнена в рамках научного проекта № 16-47-700286 «Анализ, исследование и разработка перспективных радиотехнических систем и устройств силовой электроники для робототехнических комплексов космического, воздушного, морского и наземного базирования», получившего поддержку по результатам конкурса проектов фундаментальных научных исследований, проводимого РФФИ и субъектами Российской Федерации.

## Литература

1. Besser L. Practical RF circuit design for modern wireless systems: Passive circuits and systems / L. Besser, R. Gilmore. – London; Boston: Artech House, 2003. – Vol. 2. – 569 p.
  2. Mellor D.J. Synthesis of interstage networks of prescribed gain versus frequency slopes / D.J. Mellor, J.C. Linvill // IEEE Trans. – 1975. – Vol. MTT-23, № 12. – P. 1013–1020.
  3. Yarman B.S. A simplified real frequency technique applied to broadband multistage microwave amplifiers / B.S. Yarman, H.J. Carlin // IEEE Trans. – 1982. – Vol. MTT-30, № 12. – P. 2216–2222.
  4. Abrie P.L.D. Design of RF and microwave amplifiers and oscillators. – London; Boston: Artech House, 2000. – P. 480.
  5. Бабак Л.И. Теория, методы и алгоритмы автоматизированного синтеза СВЧ-транзисторных усилителей на основе декомпозиционного подхода: дис. ... д-ра техн. наук. В 2 т. – Томск: ТУСУР, 2012. – Т. 1. – 360 с.
  6. Курейчик В.М. Генетические алгоритмы. – Таганрог: ТРТУ, 1998. – 242 с.
  7. Potter A. HP RF compiler automates schematic capture and extends capabilities of circuit synthesis // Microwave & Wireless Magazine. – 1999. – № 6. – P. 109–117.
  8. Zhang G. Automatic synthesis of a 2.1 GHz SiGe low noise amplifier / G. Zhang, A. Dengi, L.R. Carley // In Radio Frequency Integrated Circuits (RFIC) Symposium IEEE. – 2002. – P. 125–128.
  9. A new genetic-algorithm-based technique for low noise amplifier synthesis / L.I. Babak, A.A. Kokolov, A.A. Kalentyev, D.V. Garays // 7-th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC). – 2012. – P. 381–384.
  10. Структурно-параметрический синтез СВЧ-транзисторных усилителей на основе генетического алгоритма с использованием моделей монолитных элементов / А.А. Калентьев, Д.В. Гарайс, И.М. Добуш, Л.И. Бабак // Доклады ТУСУРа. – 2012. – Т. 26, № 2. – С. 104–112.
  11. Структурный синтез СВЧ-транзисторных усилителей на основе генетического алгоритма с применением моделей пассивных элементов в виде наборов S-параметров / А.А. Калентьев, Д.А. Жабин, И.М. Добуш и др. // Сб. тр. 24-й Междунар. Крым. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь: Вебер, 2014. – Т. 1. – С. 117–118.
  12. Разработка МШУ диапазона 1...2 ГГц с использованием программы структурного синтеза СВЧ-транзисторных усилителей на основе генетического алгоритма / И.М. Добуш, А.А. Калентьев, Д.В. Гарайс, Л.И. Бабак // Доклады ТУСУРа. – 2015. – № 1 (35). – С. 47–51.
  13. Lin C. A new efficient method for substrate-aware device-level placement / C. Lin, D. Leenaerts // Proceedings 2000. Design Automation Conference. – Yokohama, Japan, 2000. – P. 533–536.
  14. Berkol G. A two-step layout-in-the-loop design automation tool // 2015 IEEE 13th International New Circuits and Systems Conference (NEWCAS). – Grenoble, 2015. – P. 1–4.
  15. An Efficient Two-Phase ILP-Based Algorithm for Precise CMOS RFIC Layout Generation / T. Tseng, B. Li, C. Yeh et al. // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. – 2016. – No. 99. – P. 1–14.
  16. Afacan E. A mixed domain sizing approach for RF circuit synthesis / E. Afacan, G. Dündar // 2016 IEEE 19th International Symposium on Design and Diagnostics of Electronic Circuits & Systems (DDECS). – Kosice, 2016. – P. 1–4.
  17. An efficient high-frequency linear RF amplifier synthesis method based on evolutionary computation and machine learning techniques / B. Liu, N. Deferm, D. Zhao, P. Reynaert, G. Gielen // Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, IEEE Transactions. – 2012. – Vol. 31, No. 7. – P. 981–993.
- 
- Жабин Дмитрий Александрович**  
Аспирант каф. компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП), мл. науч. сотрудник лаб. интеллектуальных компьютерных систем (ЛИКС) ТУСУРа  
Тел. (раб.): +7 (382-2) 41-47-17  
Эл. почта: zhabin91g@gmail.com
- Добуш Игорь Мирославович**  
Канд. техн. наук, доцент каф. КСУП  
Тел. (раб.): +7 (382-2) 41-47-17  
Эл. почта: igadobush@gmail.com
- Бабак Леонид Иванович**  
Д-р техн. наук, зам. директора НОЦ «Нанотехнологии» ТУСУРа, профессор каф. КСУП  
Тел. (раб.): +7-913-827-52-91  
Эл. почта: leonid.babak@mail.ru
- Калентьев Алексей Анатольевич**  
Канд. техн. наук, доцент каф. КСУП  
Тел. (раб.): +7 (382-2) 41-47-17  
Эл. почта: alexey.kalentyev@gmail.com
- Zhabin D.A., Dobush I.M., Babak L.I., Kalentyev A.A.  
**Automated synthesis of microwave LNA schematic and layout based on genetic algorithm**
- For the first time, a genetic-algorithm-based technique for the automated synthesis of linear and low-noise microwave transistor amplifiers is proposed that allows the generation of circuit schematic and initial layout. Amplifiers based on PCB, hybrid IC and MMIC technologies can be synthesized using exact models of real passive components, connection lines and other layout elements. The technique is implemented in a software environment that integrates the modified synthesis tool Geneamp and CAD tool Microwave Office. In order to demonstrate the efficiency of the technique, an example synthesis of 36–40 GHz single-stage MMIC LNA based on 0.15  $\mu\text{m}$  GaAs-pHEMT process is presented.
- Keywords:** microwave, transistor amplifier, schematic, layout, synthesis, EDA, genetic algorithm.