

*На правах рукописи*



**Горяинов Александр Евгеньевич**

**АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ  
ПАССИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ  
ПРИ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОМ СИНТЕЗЕ  
МАЛОШУМЯЩИХ СВЧ ТРАНЗИСТОРНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ**

Специальность 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР).

Научный руководитель: **Бабак Леонид Иванович**,  
доктор технических наук, профессор каф. Компьютерных систем в управлении и проектировании, ТУСУР, г. Томск

Официальные оппоненты: **Девятков Геннадий Никифорович**, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск.

**Усачев Николай Александрович**, кандидат технических наук, научный сотрудник, Акционерное общество «Экспериментальное научно-производственное объединение «Специализированные электронные системы», г. Москва

Ведущая организация: Акционерное общество «Институт микроволновых интегральных систем», г. Москва.

Защита состоится «27» декабря 2016 г. в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.268.01 при ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» по адресу: 634050 г. Томск, проспект Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте <https://tusur.ru/urls/kw1dlgrk> и в библиотеке Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники по адресу: 634045, г. Томск, ул. Красноармейская, 146.

Автореферат разослан «\_\_» ноября 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.268.01  
доктор физико-математических наук



А.Е. Мандель

## Общая характеристика работы

**Актуальность и состояние проблемы.** В настоящее время радиоэлектронные системы (РЭС) сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона получили широкое распространение в самых различных сферах, включая системы передачи данных, космической, спутниковой и мобильной связи, радиолокационные системы, телекоммуникации и т.д. В связи с развитием подобных систем постоянно ужесточаются требования к их техническим, эксплуатационным и экономическим характеристикам, таким, как электрические параметры, дальность действия, разрешающая способность, массогабаритные параметры, экономичность, надежность, себестоимость изготовления.

Современные РЭС строятся на базе СВЧ полупроводниковых устройств (ППУ). При этом одним из важных и самых распространенных типов СВЧ ППУ, во многом определяющих характеристики РЭС, является транзисторные усилители (ТУ). Для обеспечения растущих требований к РЭС развиваются технологии изготовления СВЧ ППУ, и, в частности, СВЧ ТУ - от технологий печатного монтажа и гибридных интегральных схем (ГИС) до технологий монолитных интегральных схем (МИС) и систем на кристалле. Так, большое распространение получили технологии изготовления СВЧ МИС на основе полупроводниковых материалов *GaAs*, *GaN*, *Si* и *SiGe*, включая технологии *GaAs* и *GaN* полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов (*HEMT*), *GaAs* псевдоморфных (*pHEMT*) и метаморфных (*mHEMT*) транзисторов, кремниевых КМОП-транзисторов (*Si CMOS*) и совместно КМОП- и биполярных транзисторов (*SiGe BiCMOS*). В частности, в последние 10 лет в России активно осваиваются 0,15-0,25 мкм *GaAs pHEMT* и *GaN HEMT* технологии изготовления МИС такими компаниями, как ФГУП НПП «Исток», НПП «Пульсар», НПФ «Микран», ОАО «НИИПП», ОАО «Октава» и др.

Проектирование СВЧ ППУ невозможно без использования специализированных систем автоматизированного проектирования (САПР) СВЧ-устройств. САПР упрощают моделирование характеристик проектируемых устройств и позволяют автоматизировать ряд этапов проектирования, таких, как ввод и анализ принципиальных схем, построение топологии, оптимизация параметров устройств и др. Однако этап выбора первоначального схемного решения (принципиальной схемы) СВЧ ППУ в существующих САПР до сих пор не автоматизирован. Поэтому решение этой задачи в настоящее время осуществляется на основе проб и ошибок, изучения литературы, опыта разработчика и требует его очень высокой квалификации.

В связи со сказанным активно развивается направление так называемых интеллектуальных подсистем САПР на основе применения принципов искусственного интеллекта (например, генетических алгоритмов - ГА), выполняющих автоматический или автоматизированный структурно-параметрический синтез (синтез принципиальных схем) отдельных типов СВЧ ППУ или их частей, в том числе согласующих (СЦ) и согласующе-корректирующих цепей (СКЦ), фильтров, линейных и малощумящих СВЧ ТУ и др.

Важным элементом САПР являются библиотеки компонентов (как дискретных, так и в монолитном исполнении), позволяющих осуществить моделирование

и разработку топологии СВЧ ППУ для конкретной технологии изготовления – печатного монтажа, ГИС или МИС. Библиотека содержит электрические и геометрические модели компонентов, а также сведения о технологии изготовления, необходимые для проектировщиков. Построение библиотек компонентов является сложной и трудоёмкой научно-практической задачей, требующей высокоточного измерительного оборудования, специализированного программного обеспечения для построения моделей, а также знаний и опыта разработчика. Зарубежные компании-изготовители СВЧ МИС разрабатывают такие библиотеки и постоянно стараются поддерживать их актуальность при модификациях технологического процесса. В России же систематическая работа по созданию верифицированных библиотек компонентов для отечественных технологий изготовления СВЧ МИС только началась.

Для успешного проектирования СВЧ устройств в состав библиотек должны входить точные и быстродействующие электрические модели компонентов. Широкое распространение в САПР получили математические модели в виде эквивалентных схем (ЭС), структура которых отражает особенности конструкции пассивных СВЧ компонентов и протекающих физических процессов. Следует отметить, что в СВЧ МИС часто используются такие пассивные компоненты, как тонкопленочные и полупроводниковые резисторы, МДМ-конденсаторы, спиральные катушки индуктивности. При геометрических размерах много меньше длины волны эти компоненты могут рассматриваться как сосредоточенные и соответственно описываются цепями (ЭС) со сосредоточенными параметрами. Дискретные навесные пассивные компоненты (резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности) также широко применяются при изготовлении СВЧ ППУ по технологиям печатного монтажа или ГИС и тоже могут описываться моделями со сосредоточенными параметрами.

Построение ЭС-моделей пассивных СВЧ компонентов включает три этапа – определение структуры ЭС, нахождение значений (*экстракция*) её элементов и верификация. Решению задачи экстракции элементов ЭС посвящено большое количество работ. Однако в настоящий момент нет эффективного формального способа определения структуры ЭС пассивного СВЧ компонента, с одной стороны, отражающей физический смысл процессов, и, с другой стороны, обладающей необходимой точностью и достаточной простотой для обеспечения быстродействия модели. В связи с этим сейчас построение адекватных моделей пассивных СВЧ компонентов является достаточно трудоёмкой задачей, требующей больших временных затрат.

При проектировании СВЧ МИС варьируются не электрические, а конструктивные параметры СВЧ компонентов (например, геометрические размеры, типы конструкции и т.д.). Данная особенность создаёт необходимость в *параметрических*, или масштабируемых, моделях пассивных СВЧ компонентов, электрические характеристики которых зависят от геометрических размеров и иных конструктивных параметров. Параметрические модели также могут выполняться в виде ЭС, элементы которых зависят от конструктивных параметров. Однако их построение сталкивается с еще большими проблемами, чем задача построения обычных (фиксированных) ЭС-моделей. Так, в настоящий момент нет эффективного подхода к определению структуры параметрической ЭС-модели, способной удовлетворительно

описать поведение компонента во всех допустимых конструктивных состояниях. Методы построения таких моделей для каждого типа компонента индивидуальны, слабо формализованы и еще более трудоёмки.

Таким образом, задача создания новых методик и автоматизации построения моделей дискретных и интегральных пассивных СВЧ компонентов в виде эквивалентных схем *является весьма актуальной*.

Большой интерес представляет также использование ЭС-моделей СВЧ компонентов в интеллектуальных подсистемах САПР СВЧ устройств. В настоящее время существующие методы, алгоритмы и программное обеспечение (ПО), как правило, разрешают синтезировать отдельные типы ППУ (в частности, линейные ТУ) и пассивные цепи (фильтры, СЦ и СКЦ) только на основе идеализированных моделей пассивных компонентов (т.е. моделей идеальных  $RCL$ -элементов и линий передачи). В СВЧ диапазоне получаемые схемы проектируемых устройств не учитывают потери и паразитные параметры пассивных компонентов. Как следствие, характеристики реальных СВЧ устройств могут сильно отличаться от результатов моделирования с идеализированными элементами. Всё это приводит к необходимости оптимизации и даже перепроектирования устройства, что увеличивает время и затраты на разработку. Осуществление автоматического или автоматизированного синтеза СВЧ устройств непосредственно на основе точных моделей пассивных СВЧ компонентов позволяет значительно упростить и ускорить проектирование СВЧ ППУ, так как дает возможность устранить этап перехода от идеализированных моделей к моделям реальных компонентов.

На основе вышеизложенного можно сформулировать цель и основные задачи исследования.

**Цель работы.** Разработка методик, алгоритмов и программного обеспечения, обеспечивающих автоматизированное построение моделей пассивных СВЧ компонентов, в том числе для отечественных библиотек; структурно-параметрический синтез и экспериментальное исследование малошумящих СВЧ транзисторных усилителей.

**Цель работы достигается решением следующих основных задач**

1. Анализ структур эквивалентных схем пассивных СВЧ компонентов.
2. Разработка методик автоматизированного синтеза моделей пассивных СВЧ компонентов в виде эквивалентных схем.
3. Разработка ПО для построения ЭС-моделей пассивных СВЧ компонентов по предложенным методикам.
4. Построение ЭС-моделей пассивных СВЧ компонентов с помощью разработанных методик и ПО, в том числе параметрических моделей, для отечественных и зарубежных технологий изготовления МИС на основе полупроводниковых материалов  $GaAs$ ,  $GaN$  и  $SiGe$ ; верификация и включение моделей в библиотеки компонентов для этих технологий.
5. Модификация программы структурно-параметрического синтеза линейных и малошумящих СВЧ ТУ с целью обеспечения синтеза усилителей на основе точных моделей СВЧ компонентов.

6. Проектирование, разработка и экспериментальное исследование СВЧ малошумящих транзисторных усилителей, изготавливаемых по монолитным технологиям и технологии печатного монтажа.

**Научная новизна работы** заключается в следующем.

1. Предложена новая методика, позволяющая осуществить синтез (определение структуры и параметров элементов) моделей пассивных сосредоточенных интегральных и дискретных СВЧ компонентов в виде эквивалентных схем, а также, в отличие от существующих методик, сохранить физическую обоснованность структуры модели и обеспечить необходимый компромисс между её сложностью и точностью.

2. Предложена новая методика автоматизированного синтеза параметрических моделей пассивных сосредоточенных СВЧ компонентов в виде эквивалентных схем, которая позволяет определить структуру моделей и автоматически рассчитать многомерные полиномы, отражающие зависимости параметров элементов ЭС от конструктивных параметров компонента (например, геометрических размеров).

3. Впервые осуществлен структурно-параметрический синтез СВЧ малошумящих транзисторных усилителей на основе генетического алгоритма с использованием параметрических моделей реальных пассивных СВЧ компонентов.

**Практическая значимость** полученных результатов:

1. Разработанные методики позволяют упростить и автоматизировать построение ЭС-моделей пассивных СВЧ компонентов, в том числе параметрических.

2. На основе предложенных методик разработана программа автоматизированного построения ЭС-моделей пассивных сосредоточенных СВЧ компонентов *Extraction-P*, позволяющая значительно ускорить и облегчить процесс разработки моделей и библиотек компонентов.

3. С использованием разработанных методик и ПО построены ЭС-модели пассивных компонентов СВЧ МИС, изготовленных по отечественным 0,15 мкм *GaAs pHEMT*, 0,15 мкм *GaN HEMT*, а также зарубежной 0,25 мкм *SiGe BiCMOS* технологиям. Модели верифицированы на основе измерений и включены в библиотеки компонентов для отечественных *GaAs* и *GaN* технологий.

4. Разработана модификация программы автоматизированного проектирования линейных и малошумящих СВЧ транзисторных усилителей *Geneamp*. Новая версия программы позволяет выполнить автоматический синтез (генерацию) принципиальных схем ТУ с использованием моделей реальных пассивных компонентов, это дает возможность значительно ускорить и упростить проектирование данного класса устройств.

5. С использованием модифицированной программы *Geneamp* и созданных параметрических ЭС-моделей пассивных СВЧ компонентов разработаны МИС МШУ диапазона 1-5 ГГц на основе 0,25 *SiGe BiCMOS* технологии, МШУ диапазона 1-3 ГГц на основе технологии печатного монтажа с нарастающей формой амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) для коррекции коэффициента передачи цифрового аттенюатора, МИС МШУ диапазона 3-20 ГГц на основе 0,15 мкм *GaAs pHEMT* технологии.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Декомпозиция модели на двухполюсные звенья, определение параметров элементов звеньев на основе прямой экстракции с использованием модифицированной статистической медианы и оптимальный выбор звеньев позволяют осуществить автоматизированный синтез моделей пассивных СВЧ компонентов в виде эквивалентных схем, обеспечивая наименьшую сложность модели при заданной погрешности, и на порядок ускорить построение модели.

2. Алгоритм оптимального выбора звеньев с учетом характеристик компонентов во всех конструктивных состояниях позволяет осуществить автоматизированный синтез параметрических моделей пассивных СВЧ компонентов с определением структуры эквивалентной схемы и нахождением полиномов, аппроксимирующих зависимости параметров элементов этой схемы от конструктивных параметров.

3. Использование параметрических моделей пассивных компонентов в виде эквивалентных схем при синтезе малошумящих СВЧ транзисторных усилителей на базе генетического алгоритма позволяет сразу получать принципиальные схемы и значения элементов устройств, учитывающие паразитные параметры компонентов.

**Степень достоверности.** Достоверность полученных результатов и положений диссертационной работы обеспечиваются качественным сопоставлением полученных результатов с имеющимися современными теоретическими и экспериментальными данными, выполнением моделирования на ЭВМ и экспериментального исследования разработанных устройств.

### **Апробация результатов**

Представленная работа выполнялась как составная часть НИР в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы» по направлению «Микроэлектроника» и федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» (мероприятия 1.1-1.5, государственные контракты П669, 14.740.11.0135, 14.740.11.1136, 14.740.11.1261, 14.В37.21.0462, 14.В37.21.0345, 02.Г25.31.0042, 14.577.21.0179).

Основные результаты исследований докладывались на следующих научно-технических конференциях: Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо), г. Севастополь, 2012-2013, 2016 гг.; Международная конференция "Инновации в информационных и коммуникационных науках и технологиях" ("*Innovations in Information and Communication Science and Technology*" - *ICST*), ТУСУР, г. Томск, 2012-2014 гг.; Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления», ТУСУР, г. Томск, 2012-2015 гг.; Международная научно-практическая конференция студентов и молодых учёных «Современные техника и технологии», ТПУ, г. Томск, 2012-2015 г.; Всероссийская научно-техническая конференция студентов и молодых ученых «Современные проблемы радиоэлектроники»,

КГТУ, г. Красноярск, 2012–2014 гг.; Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР», г. Томск, 2012–2016 гг.

**Реализация и внедрение результатов работы.** Результаты диссертационной работы использованы в рамках НИОКР, выполняемых с ООО «ЛЭМЗ-Т» (г. Томск) и НИИ полупроводниковых приборов (г. Томск), а также в учебном процессе на кафедре КСУП ТУСУРа.

**Личный вклад автора.** Все представленные в диссертации результаты исследований получены лично автором либо при его непосредственном участии. В работах, опубликованных в соавторстве, автором получены существенные теоретические и практические результаты.

**Публикации.** По результатам выполненных исследований опубликовано 34 работы, в том числе: в научных журналах, входящих в перечень ВАК (6 статей), в трудах Международных (13) и Всероссийских (13) научных конференций. Получены два свидетельства о регистрации программ для ЭВМ: №2013617141 от 01 августа 2013 г., №2014616912 от 08 июля 2014 г. Получено одно свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы №2015630032 от 22 мая 2015 г.

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, трёх разделов, заключения, списка литературы, списка сокращений и одного приложения. Общий объем работы составляет 168 страниц. Основная часть включает 137 страниц, в том числе 105 страниц текста, 76 рисунков и 24 таблицы. Список используемых источников содержит 87 наименований.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, отмечены недостатки существующих подходов к построению точных и быстродействующих моделей пассивных СВЧ компонентов, в том числе параметрических моделей. Отмечаются преимущества применения моделей реальных компонентов при автоматизированном синтезе СВЧ ППУ. Определены цель и задачи исследования, показаны научная новизна и практическая ценность работы, излагаются положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** приводится обзор моделей пассивных сосредоточенных компонентов СВЧ устройств и подходов к их построению. Подробно рассмотрены модели пассивных СВЧ компонентов в виде эквивалентных схем, в том числе параметрические. Представлен краткий обзор способов построения СВЧ транзисторных усилителей. Описан подход к структурно-параметрическому синтезу СВЧ ТУ с использованием генетических алгоритмов.

С точки зрения применения в САПР целым рядом преимуществ обладают компактные модели СВЧ компонентов, или модели в виде эквивалентных схем (ЭС-модели). Основой модели является электрическая эквивалентная схема, элементы которой отражают различные физические процессы, происходящие в компоненте. Это, с одной стороны, позволяет обеспечить необходимое для моделирования в

САПР быстрое действие, и, с другой, отразить внутреннюю структуру и конструкцию компонента. Физическая обоснованность моделей СВЧ компонентов важна с многих точек зрения – например, для оценки предельно возможных характеристик компонента, установления связи между его электрическими и конструктивными параметрами, оптимизации конструкции и технологии изготовления и др.

В начале главы рассмотрены конструкции (топологии), а также наиболее распространенные структуры ЭС-моделей пассивных сосредоточенных СВЧ компонентов (резисторов, конденсаторов, катушек индуктивностей) как в дискретном исполнении (так называемые компоненты поверхностного монтажа, или *SMD*-компоненты), так и в интегральном для полупроводниковых технологий *GaAs*, *GaN*, *Si* и *SiGe*. Указанная информация систематизирована в виде таблицы, отражающей использование определенных видов ЭС-моделей в конкретных применениях.

Далее рассмотрены способы построения моделей СВЧ компонентов в виде ЭС. Построение ЭС-модели сводится к выполнению трёх этапов: 1) определение структуры (схемы) ЭС-модели; 2) определение значений (параметров) элементов для выбранной структуры ЭС; 3) верификация модели.

Первая задача состоит в выборе оптимальной структуры ЭС, которая должна, с одной стороны, обеспечить необходимый компромисс между сложностью и точностью модели и, с другой стороны, правильно отразить протекающие в пассивном компоненте физические процессы – в частности, паразитные явления и параметры, имеющие место в конкретной конструкции компонента.

Сделанные в ряде работ попытки автоматической генерации ЭС-моделей пассивных СВЧ компонентов по измеренным данным на основе методов классического синтеза или численных подходов (К. Чой, Т. Манголд, П. Руссер, А. Баден-Фуллер и др.) приводят, к сожалению, к избыточно сложным и формальным ЭС, не отражающим реальных физических процессов в компоненте.

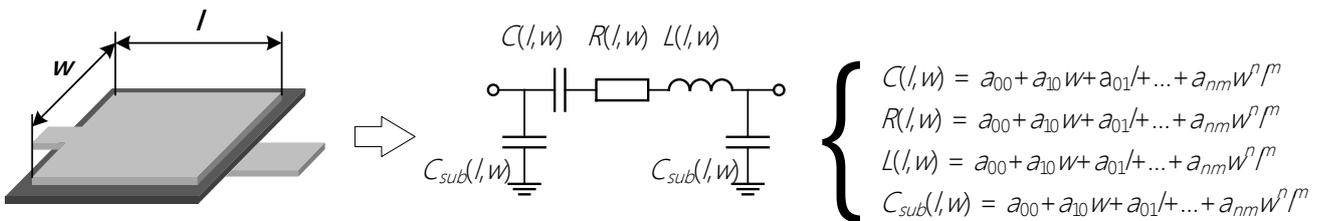
В связи со сказанным в настоящее время задача выбора структуры ЭС решается чаще всего эмпирически на основе литературных данных, рассмотрения конструкции компонента, а также метода проб и ошибок. В результате зачастую разработчику приходится выполнять построение нескольких разных моделей одного компонента, чтобы получить модель с нужным сочетанием сложности и точности. Однако такой процесс весьма трудоемок. Можно заключить, что в настоящий момент задача автоматического или автоматизированного **выбора оптимальной структуры ЭС** остается нерешенной.

Для определения значений элементов линейных ЭС активных и пассивных СВЧ компонентов чаще всего используется подход на основе прямой экстракции. В этом случае значения элементов рассчитываются непосредственно по результатам измерений компонента с помощью аналитических выражений; последние получаются путем решения системы уравнений, записанной для конкретной структуры ЭС. Преимуществами данного подхода являются простота и скорость вычислений

элементов модели, а также (при достаточной точности измерений и правильном выборе структуры модели) - физичность значений элементов ЭС. К недостаткам относится необходимость составления и решения системы уравнений для каждой отдельной модели.

Еще одним недостатком метода прямой экстракции является то, что расчет значений (параметров) элементов ЭС с помощью аналитических выражений обычно выполняется на основании данных измерений СВЧ компонента в одной или двух частотных точках. При этом значения элементов ЭС, рассчитанные для разных частотных точек, могут значительно отличаться. Это связано, во-первых, с ошибками измерений и, во-вторых, с тем, что выбранная структура ЭС-модели не всегда способна точно описать поведение компонента во всем рассматриваемом частотном диапазоне. Для преодоления указанной трудности в случае «ручного» построения модели распространение получил способ, при котором разработчик визуально определяет частотный поддиапазон с небольшим изменением экстрагированной величины элемента ЭС. Однако этот способ непригоден в случае автоматического решения задачи прямой экстракции.

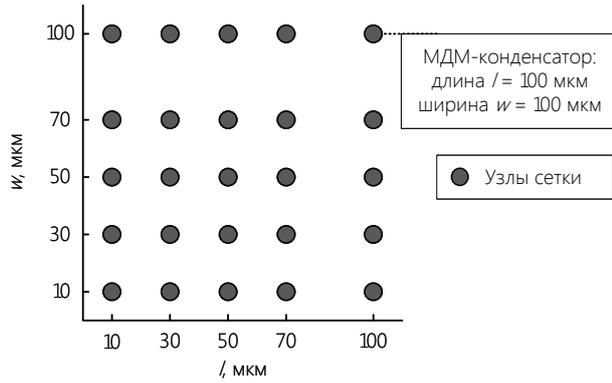
Для проектирования СВЧ МИС широко используются параметрические ЭС-модели. В таких моделях значения элементов ЭС обычно представляются в виде некоторых аналитических функций, зависящих от конструктивных параметров компонента. Таким образом, параметрическая ЭС-модель состоит из определенной структуры ЭС и системы аналитических выражений для расчета значений элементов в конкретном конструктивном состоянии (рис. 1). Параметрические ЭС-модели сохраняют такие достоинства ЭС-моделей, как быстродействие и физичность, а также легко встраиваются в современные САПР.



**Рис. 1 – Параметрическая модель МДМ-конденсатора**

Исходными данными для построения параметрической ЭС-модели являются измеренные характеристики компонента (в частности,  $S$ -параметры) на сетке конструктивных состояний (рис. 2) – наборе компонентов одного вида с разными значениями конструктивных параметров (геометрических размеров и т.д.). С этой целью изготавливаются и измеряются тестовые компоненты в различных конструктивных состояниях, например, МДМ-конденсаторы на полупроводниковой подложке с разными величинами длины  $w$  и ширины  $l$  обкладок.

Существующая методика построения параметрических ЭС-моделей пассивных компонентов СВЧ МИС (И.М. Добуш) включает три этапа: 1) выбор структуры ЭС-модели; 2) получение значений элементов выбранной структуры ЭС-модели с



**Рис. 2 – Сетка конструктивных состояний МДМ-конденсатора**

определения такой структуры отсутствуют, в связи с чем эта задача в настоящее время решается эвристически или путём перебора разных структур.

Аппроксимацию значений элементов ЭС целесообразно выполнять с помощью многомерных полиномов. Обозначим через  $e_t$  ( $t = 1, 2, \dots, T$ ) значения (параметры) сосредоточенных элементов ЭС;  $T$  – общее число элементов ЭС. Значение каждого элемента  $e_t$  как функцию конструктивных параметров СВЧ компонента  $x_1, x_2, \dots, x_n$  будем приближенно описывать соответствующим полиномом  $P_t$ :

$$e_t(x_1, x_2, \dots, x_n) \approx P_t(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (1)$$

Задачей аппроксимации является определение коэффициентов полинома  $P_t(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , аппроксимирующего зависимость  $e_t(x_1, x_2, \dots, x_n)$  по набору заданных значений  $e_{tq}$  элемента  $e_t$  во всех конструктивных состояниях  $K_q$ ,  $q = 1, 2, \dots, Q$ :

$$e_{tq} \equiv e_t(x_{1q}, x_{2q}, \dots, x_{nq}). \quad (2)$$

Для построения многомерных полиномов целесообразно использование метода наименьших квадратов (МНК). При этом требуется также задать порядки  $m_h$  полинома  $P_t$  по каждой переменной  $x_h$  ( $h = 1, 2, \dots, n$ ). Чем больше эти порядки, тем лучше точность воспроизведения зависимости  $e_t(x_1, x_2, \dots, x_n)$ . Однако, с другой стороны, при больших порядках  $m_h$  резко растет общее число членов полинома  $P_t$ , что ведет к увеличению времени расчета значений полинома, т.е. фактически к уменьшению быстродействия параметрической модели. Таким образом, необходимо найти полином, который обеспечивает нужный компромисс между точностью и быстродействием модели. В существующих подходах определение порядков полинома  $P_t$  по отдельным переменным выполняется самим разработчиком путём перебора определенных (выбираемых эмпирически) значений  $m_h$ , это увеличивает время и трудоемкость построения параметрической модели.

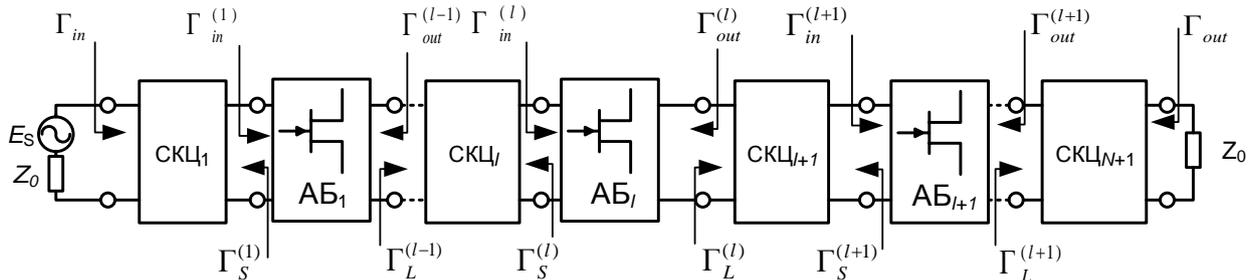
Далее в главе представлено краткое описание способов построения и характеристик СВЧ МШУ, а также методов их автоматизированного синтеза. Основными параметрами СВЧ МШУ являются диапазон рабочих частот, коэффициент усиления по мощности  $G$  и его неравномерность  $\Delta G$  в полосе пропускания, коэффициент шума  $F$ , модули коэффициентов отражения на входе  $|S_{11}|$  и выходе  $|S_{22}|$ , инвариантный коэффициент устойчивости  $k$ . В диссертации рассматриваются СВЧ ТУ каскадного типа (рис.

использованием методов прямой экстракции для каждого конструктивного состояния компонента; 3) аппроксимация этих значений некоторыми функциями в пространстве конструктивных параметров компонента.

Важным условием для построения параметрической ЭС-модели на основе этого подхода является необходимость единой структуры ЭС для всех возможных конструктивных состояний. Однако формализованные способы

3), структура которых состоит из каскадно включенных пассивных (реактивных или диссипативных) СКЦ и активных блоков (АБ). Последние, в свою очередь, содержат активный элемент (транзистор) и подключенные к нему цепи коррекции и ОС.

К традиционным методам проектирования СВЧ ТУ можно отнести графоаналитические методики, базирующиеся на использовании диаграммы Вольперта-Смита, аналитические методы на основе представления АЭ физическими эквивалентными схемами, методы реальной частоты и др. Однако все они обладают рядом недостатков, среди которых следует выделить сложность или невозможность учета всего комплекса требований к характеристикам усилителя, общую трудоёмкость расчета (особенно для широкополосных усилителей), получение избыточных или неоптимальных схем СВЧ ТУ, необходимость высокой квалификации разработчика и др.



**Рис. 3 – Структурная схема N-каскадного усилителя с СКЦ**

В работах Л.И. Бабака, А.А. Калентьева и др. развит подход к автоматизированному структурно-параметрическому синтезу линейных и малошумящих СВЧ транзисторных усилителей на базе ГА, позволяющий устранить многие из этих недостатков. В главе рассмотрены главные принципы, положенные в основу такого подхода. Для осуществления синтеза (генерации) принципиальной схемы СВЧ ТУ информация о схеме представляется в виде двоичной хромосомы, при этом двоичными числами определенной длины кодируются способы включения, типы и параметры пассивных элементов в АБ и СКЦ. Вначале случайным образом генерируется набор (популяция) хромосом. Далее на каждой итерации ГА популяция обновляется таким образом, чтобы оставались или появлялись хромосомы (варианты ТУ) с лучшими значениями характеристик. При обновлении популяции используются основные механизмы ГА – генерация новых хромосом, селекция, кроссовер (скрещивание хромосом) и мутация. В процессе работы ГА генерируются варианты усилителей, которые все в большей степени отвечают требованиям. Итерации ГА завершаются либо автоматически при достижении заданных значений характеристик или времени синтеза, либо при остановке программы пользователем.

Для получения практически реализуемых схем СВЧ ТУ авторами дополнительно применяется *морфологический подход*, предложенный Ф. Цвикки и развитый С.В. Акимовым. Он включает этапы морфологического анализа и морфологического синтеза. На первом этапе специалист, проводя морфологический анализ, выявляет основные применяемые на практике решения некоторого класса технических устройств, их общие и отличительные (например, структурные) особенности, а также используемые в них элементы. Найденные варианты классифицируются и образуют обобщенную модель данного класса устройств. Обобщенная модель используется при проектировании

других устройств данного класса, где в процессе морфологического синтеза определяется один или несколько вариантов устройства, в наибольшей степени отвечающих поставленным требованиям. Таким образом, морфологический подход позволяет учесть накопленный опыт в построении конкретных типов устройств с целью ограничения поискового пространства областью рациональных решений.

В рассматриваемом случае на основе морфологического анализа более 500 представленных в литературе схем каскадных СВЧ ТУ была построена обобщенная модель, которая описывает множество допустимых структур такого класса устройств.

Предложенный метод синтеза линейных и малошумящих СВЧ ТУ на базе ГА был реализован в программе *Geneamp*. Решение многочисленных тестовых и практических задач подтвердило его эффективность. К достоинствам подхода относятся возможность учета при синтезе целого комплекса характеристик СВЧ МШУ в заданной полосе частот, контроля получаемых структур и величин элементов усилителей. Программа *Geneamp* позволяет получать практически реализуемые принципиальные схемы СВЧ МШУ с достаточно высокими параметрами, а также обеспечить разнообразие схем, необходимое инженеру-проектировщику для выбора наиболее подходящих решений. При этом автоматизированный синтез схем однокаскадных СВЧ МШУ обычно выполняется за единицы минут, а двухкаскадных – за десятки минут, что значительно быстрее, чем при использовании других методов проектирования.

Однако представленные методика и программа реализуют синтез СВЧ ТУ с использованием только идеализированных моделей пассивных СВЧ компонентов. При переходе к точным моделям реальных пассивных компонентов характеристики усилителя изменятся и, как следствие, может возникнуть необходимость в дополнительной оптимизации и даже повторном проектировании устройства. Процесс проектирования СВЧ транзисторных усилителей может быть значительно упрощен и ускорен в случае использования при структурно-параметрическом синтезе на основе ГА непосредственно моделей реальных компонентов. Однако подобные исследования до настоящего времени не проводились.

В заключение главы приведён перечень задач исследования.

**Во второй главе** для автоматизированного синтеза структуры ЭС первоначально был выполнен морфологический анализ представленных в литературе ЭС-моделей пассивных компонентов СВЧ схем. Морфологический анализ позволяет представить в систематическом виде все возможные решения для создания технического объекта путем определения так называемого морфологического множества – пространства морфологических признаков исследуемого объекта. В случае построения ЭС-моделей такими морфологическими признаками могут выступать тип компонента, технология его изготовления, структура и сложность ЭС-модели и т.д. Таким образом, в результате морфологического анализа разработчик получает упорядоченное представление возможных ЭС для применения их при построении моделей.

Важно отметить, что приведенные в статьях и книгах ЭС-модели пассивных СВЧ компонентов являются в подавляющем большинстве случаев физически обоснованными, т.е. отражают реальные процессы и явления, происходящие в компоненте, а также особенности конкретных конструкций и технологий изготовления компонентов.

Поэтому осуществление синтеза на основе правильно выполненного морфологического анализа имеющихся в литературе ЭС (т.е. построение новых ЭС из фрагментов уже известных) приведет также к физически обоснованным моделям.

В ходе изучения литературы было рассмотрено свыше 40 различных ЭС-моделей для дискретных пассивных сосредоточенных СВЧ компонентов (резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности), а также интегральных компонентов, изготовленных на основе *GaAs* (*pHEMT*, *mHEMT*), *GaN* (*HEMT*), *Si* (*CMOS*) и *SiGe* (*BiCMOS*) технологий, в более чем 30 источниках. Частотный диапазон моделей охватывает от 0,1 ГГц до 60 ГГц. Для целей систематизации при морфологическом анализе оказалось целесообразным декомпозировать существующие модели пассивных СВЧ компонентов на отдельные звенья. Это позволило выявить наиболее распространенные структурные схемы моделей компонентов (рис. 4). Они могут иметь вид либо пассивного двухполюсника (рис. 4а), либо лестничного четырехполюсника, в последовательных и параллельных ветвях которого включены пассивные двухполюсники - звенья (рис. 4б-е). Двухполюсники в последовательных ветвях обычно описывают основной элемент ЭС ( $R$ ,  $C$ ,  $L$ ) и связанные с ним паразитные параметры, а двухполюсники в параллельных ветвях – паразитные ёмкости основного элемента на заземленную плоскость и паразитные параметры, связанные с подложкой (потери и др.).

Выявленные в литературе на основе морфологического анализа схемы на сосредоточенных элементах, которые используются в качестве звеньев в моделях пассивных СВЧ компонентов (рис. 4), изображены на рис. 5. Информация, обобщающая применение различных схем звеньев в ЭС-моделях пассивных СВЧ компонентов (рис. 4, 5) в зависимости от типа компонента, технологии изготовления и места конкретного звена, приведена в табл. 1.

Полученные в результате морфологического анализа типовые структурные схемы ЭС-моделей СВЧ пассивных компонентов (рис. 4) и схемы звеньев (рис. 5), включенные в соответствии с табл. 1, охватывают значительное большинство моделей, представленных в литературе. Определение морфологического множества ЭС (рис. 4, рис. 5, табл. 1) позволяет формализовать задачу структурного синтеза моделей СВЧ пассивных компонентов – в частности, на основе перебора структурных схем и звеньев моделей либо более сложных алгоритмов.

Далее в главе предлагается новая методика автоматизированного структурно-параметрического синтеза ЭС-моделей пассивных сосредоточенных СВЧ компонентов. Она основана на сочетании двух идей: а) свести задачу синтеза моделей со структурными схемами на рис. 4 к синтезу отдельных ветвей (двухполюсных звеньев); б) организовать автоматизированный расчет элементов сразу для некоторого допустимого множества схем звеньев из числа показанных на рис. 5, и отбор из этого множества тех звеньев, которые в наилучшей степени отвечают необходимому компромиссу между точностью и сложностью модели.

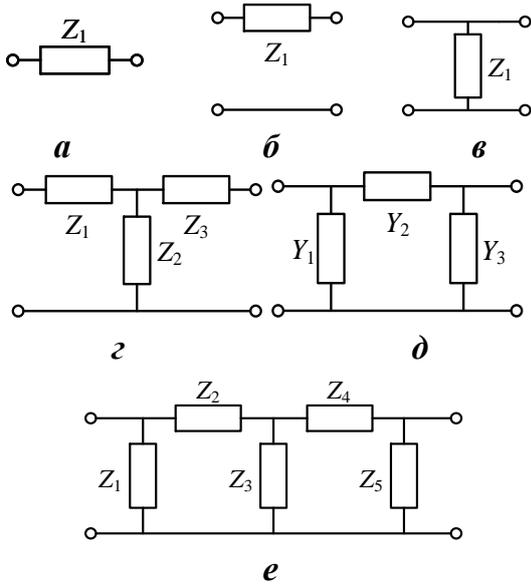


Рис. 4 – Типовые структурные схемы ЭС-моделей пассивных СВЧ компонентов

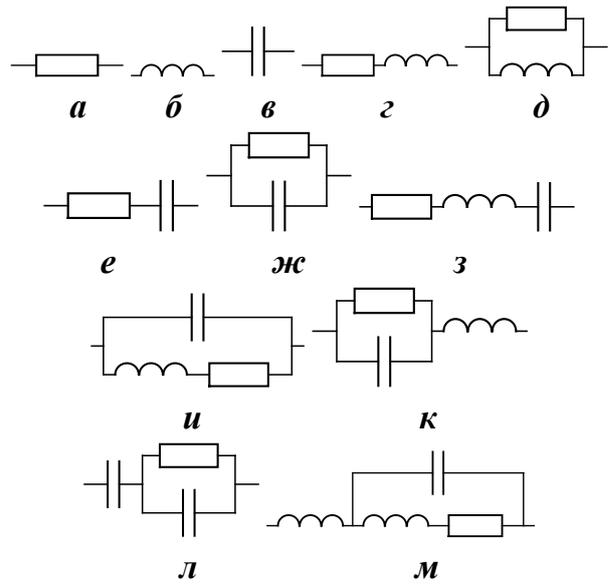


Рис. 5 – Типовые схемы звеньев, используемые в ЭС-моделях пассивных СВЧ компонентов

Таблица 1 – Использование типовых схем звеньев в ЭС-моделях пассивных сосредоточенных СВЧ компонентов

Структурная схема, звено	Используемые схемы для ЭС-модели резистора	Используемые схемы для ЭС-модели конденсатора	Используемые схемы для ЭС-модели индуктивных компонентов
рис. 4а (Z <sub>1</sub> ) рис. 4б (Z <sub>1</sub> ) рис. 4г (Z <sub>1</sub> , Z <sub>3</sub> ) рис. 4д (Y <sub>2</sub> ) рис. 4е (Z <sub>2</sub> , Z <sub>4</sub> )	рис. 5а (дискрет/GaAs/GaN) рис. 5г (дискрет/GaAs/GaN) рис. 5ж (дискрет/GaAs/GaN) рис. 5и (GaAs/GaN/Si/SiGe) рис. 5к (GaAs/GaN/Si/SiGe)	рис. 5в (дискрет/GaAs/GaN) рис. 5е (дискрет/GaAs/GaN) рис. 5з (GaAs/GaN/Si/SiGe)	рис. 5г (дискрет/GaAs/GaN) рис. 5и (GaAs/GaN/Si/SiGe) рис. 5к (GaAs/GaN/Si/SiGe) рис. 5м (GaAs/GaN/Si/SiGe)
рис. 4г (Z <sub>2</sub> ) рис. 4д (Y <sub>2</sub> , Y <sub>4</sub> ) рис. 4е (Z <sub>1</sub> , Z <sub>3</sub> , Z <sub>5</sub> )	рис. 5е	рис. 5в (GaAs/GaN) рис. 5е (GaAs/GaN/Si/SiGe) рис. 5ж (GaAs/GaN/Si/SiGe)	рис. 5в (GaAs/GaN) рис. 5е (GaAs/GaN) рис. 5ж (GaAs/GaN) рис. 5л (Si/SiGe)
рис. 4в (Z <sub>1</sub> )	рис. 5ж (GaAs/GaN/Si/SiGe) рис. 5и (GaAs/GaN/Si/SiGe)	рис. 5в (GaAs/GaN) рис. 5е (GaAs/GaN/Si/SiGe)	рис. 5и (Si/SiGe)

Для структурных схем моделей на рис. 4а-в сведение задачи синтеза модели к синтезу единственного двухполюсного звена тривиально. Для Т-образного и П-образного четырехполюсников (рис. 4г,д) сведение к синтезу отдельных двухполюсных звеньев выполняется на основе известных формул, связывающих Z- и Y-параметры четырехполюсников соответственно с импедансами и полными проводимостями звеньев. В частности, для П-образного четырехполюсника (рис. 4д):

$$Y_1 = Y_{11} + Y_{12}; Y_2 = Y_{22} + Y_{12}; Y_3 = -Y_{12}, \tag{3}$$

где  $Y_1, Y_2, Y_3$  – полные проводимости звеньев;  $Y_{ij}$  ( $i, j = 1, 2$ ) –  $Y$ -параметры четырехполюсника. Декомпозиция структуры модели (рис. 42,д) на отдельные звенья значительно облегчает задачу экстракции элементов ЭС, так как вместо весьма сложной задачи определения значений элементов полной модели компонента как четырехполюсника решаются три более простых задачи для двухполюсных звеньев.

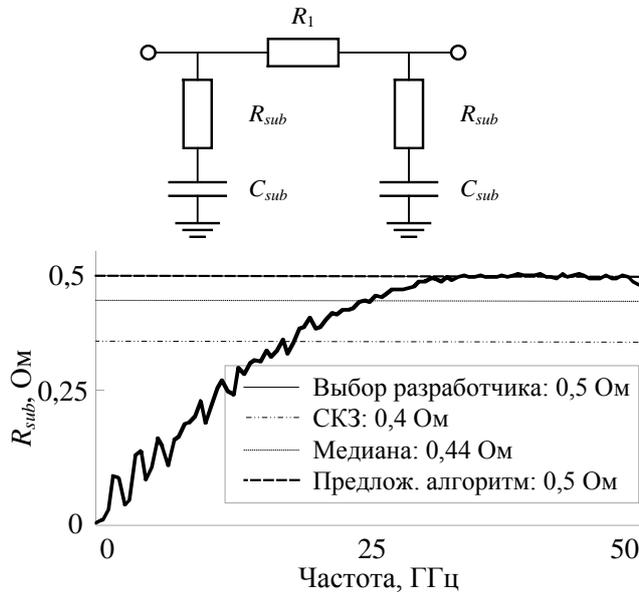
Методика автоматизированного синтеза ЭС-моделей СВЧ компонентов включает следующие этапы.

- 1) Выбор структурной схемы модели из числа структур на рис. 4.
- 2) Получение (измерение) параметров рассеяния пассивного СВЧ компонента на фиксированных частотах  $\omega_k$  ( $k=1, 2, \dots, m$ ) в заданном диапазоне частот  $[\omega_L, \omega_U]$ , где  $\omega_L$  и  $\omega_U$  – соответственно нижняя и верхняя частоты рассматриваемого диапазона.
- 3) Переход от измеренных параметров рассеяния к  $Z$ - или  $Y$ -параметрам и расчет (в частности, с помощью (3)) желаемых численных значений иммитанса  $W_d(\omega_k)$  двухполюсных звеньев на частотах  $\omega_k \in [\omega_L, \omega_U]$  для выбранной структурной схемы.
- 4) Определение множества допустимых схем (рис. 5) для каждого звена модели согласно табл. 1. Решение задачи прямой экстракции (т.е. определения значений элементов на основе аналитических выражений) для каждой из множества допустимых схем первого звена  $Z_1$  модели.
- 5) Расчет для каждой из множества допустимых схем звена  $Z_1$  частотной зависимости иммитанса  $W_c(\omega)$  и абсолютной среднеквадратичной ошибки (СКО)  $\varepsilon_W$  воспроизведения желаемой иммитансной характеристики  $W_d(\omega_k)$  зависимостью  $W_c(\omega)$  на частотах  $\omega_k \in [\omega_L, \omega_U]$ .
- 6) Определение «наилучших» схем для звена  $Z_1$  модели, обеспечивающих приемлемый компромисс между сложностью схемы звена и величиной СКО  $\varepsilon_W$ .
- 7) Если модель содержит несколько двухполюсных звеньев, повторение пп. 5-7 для остальных звеньев ( $Z_2, Z_3$ ).
- 8) Составление нескольких различных ЭС-моделей СВЧ компонента, которые образованы всеми возможными комбинациями «наилучших» схем для каждого звена.
- 9) Расчет параметров рассеяния полученных ЭС-моделей СВЧ компонента в диапазоне  $[\omega_L, \omega_U]$ , сравнение с измеренными параметрами и определение ошибок моделей.
- 10) Параметрическая оптимизация элементов полученных ЭС-моделей (при необходимости), выбор наилучшей модели.

Ранее были отмечены сложности автоматического определения значений элементов ЭС при прямой экстракции в силу частотных зависимостей этих значений. Указанные зависимости могут иметь как случайные выбросы из-за ошибок измерений, так и регулярный характер из-за погрешностей самой модели. Проведенные эксперименты показали, что использование в качестве искомой величины элемента ЭС среднеквадратичного или статистической медианы всех экстрагированных значений в заданном частотном диапазоне не приводит к положительным результатам (рис. 6).

Поэтому для надежного автоматического определения значений элементов ЭС нами предложен алгоритм, основанный на модификации понятия статистической медианы. Его идея состоит в разделении значений элемента  $e$ , экстрагированных на всех

частотных точках диапазона  $[\omega_L, \omega_U]$ , на 4 равных интервала, и поиске частотного поддиапазона с постоянным частотонезависимым значением элемента. Количество интервалов, равное 4, объясняется имеющимся опытом построения моделей – если в частотной зависимости экстрагированного элемента ЭС нет поддиапазона частот, в котором величина элемента меняется мало и который занимает четверть и более исходного диапазона  $[\omega_L, \omega_U]$ , высока вероятность неправильного выбора структуры ЭС-модели (т.е. эту структуру необходимо изменить).



**Рис. 6 – ЭС-модель GaAs тонкопленочного резистора и сравнение различных способов выбора значений элемента  $R_{sub}$**

очень близка к экспертной оценке разработчика. Это свидетельствует о возможности применения алгоритма для автоматического решения задач экстракции моделей.

Эффективность предложенной методики синтеза моделей продемонстрирована, в частности, на примере построения ЭС-модели квадратной спиральной катушки индуктивности величиной 1 нГн, выполненной на базе 0,25 мкм *SiGe BiCMOS* технологии. В соответствии с проведенным морфологическим анализом, для построения модели были выбраны следующие структурные ограничения:

- 1) П-образная типовая структура (рис. 4д).
- 2) Цепи рис. 5б,г,д,и для звена  $Z_2$  ( $Y_2$ ).
- 3) Цепи рис. 5в,е,ж,л для звеньев  $Z_1$  ( $Y_1$ ) и  $Z_3$  ( $Y_3$ ) с целью описания паразитных сопротивлений и ёмкостей кремниевой подложки.

В табл. 2 для всех схем, используемых в звеньях модели, представлены абсолютные СКО  $\varepsilon_{Zl}$  импедансов  $Z_l$  ( $l = 1, 2, 3$ ) в частотном диапазоне 0,3 – 17 ГГц. В соответствии с этими данными для звена  $Z_2$  выбрана схема рис. 5г, а для

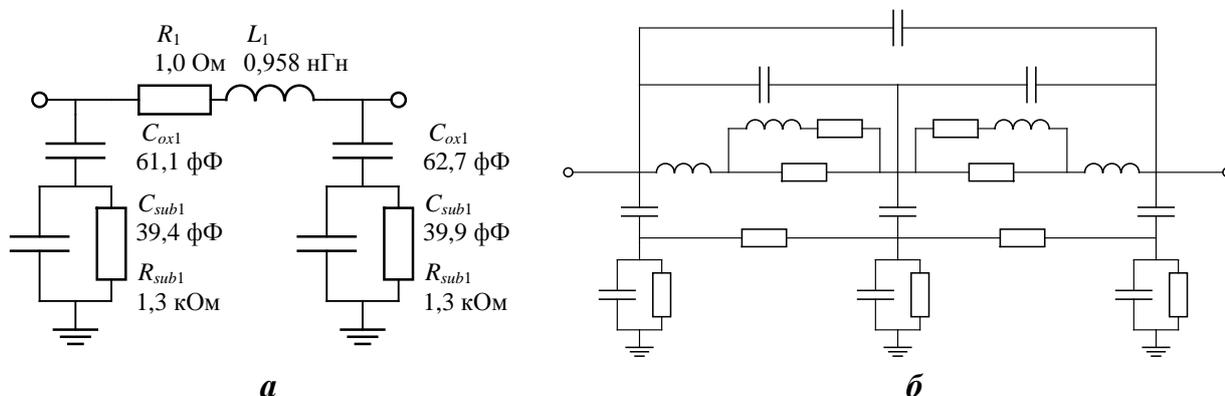
На рис. 6 представлено сравнение различных способов выбора значения элемента при прямой экстракции паразитного сопротивления  $R_{sub}$  в ЭС-модели GaAs тонкопленочного резистора в диапазоне частот 0,1-50 ГГц – с применением усреднения (среднеквадратичное значение – СКЗ), статистической медианы и предложенного алгоритма (*модифицированная статистическая медиана*). Здесь же показана оценка постоянного значения элемента, сделанная визуальным способом экспертом - разработчиком модели. Очевидно, что оценка, найденная с помощью предложенного алгоритма,

**Таблица 2 – Погрешности импеданса для схем звеньев  $Z_1, Z_2, Z_3$**

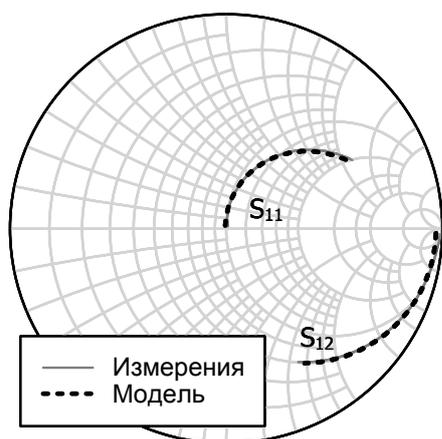
Звено	Цепь	$\varepsilon_{Zl}$
$Z_1$ ( $l = 1$ )	рис. 5в	0,1
	рис. 5е	0,019
	рис. 5ж	0,015
	рис. 5л	0,004
$Z_2$ ( $l = 2$ )	рис. 5б	0,11
	рис. 5г	0,057
	рис. 5д	0,10
	рис. 5и	н/з
$Z_3$ ( $l = 3$ )	рис. 5в	0,095
	рис. 5е	0,018
	рис. 5ж	0,016
	рис. 5л	0,004

для звена  $Z_3$  выбрана схема рис. 5ж.

звеньев  $Z_1$  и  $Z_3$  – схема рис. 5л. В результате получена ЭС-модель интегральной катушки индуктивности, показанная на рис. 7а. Рис. 8 иллюстрирует сравнение параметров рассеяния катушки индуктивности, полученных в результате измерения, с рассчитанными по модели, в диапазоне 0,3-17 ГГц. На частотах выше 2 ГГц максимальные ошибки параметров рассеяния модели не превышают 3,1% по модулю и  $2,3^\circ$  по фазе.



**Рис. 7 – Синтезированная ЭС-модель интегральной катушки индуктивности на основе технологии SiGe (а); модель катушки от компании-изготовителя (б)**



**Рис. 8 – Сравнение рассчитанных по модели и измеренных параметров рассеяния катушки индуктивности**

На рис. 7б для сравнения представлена ЭС-модель этой же катушки индуктивности, предложенная компанией-изготовителем. Она имеет сложную 2П-образную структуру и в диапазоне 0,3-17 ГГц характеризуется максимальными ошибками параметров рассеяния 4,9% по модулю и  $1,4^\circ$  по фазе (обе модели описывают катушку до частоты 1-го резонанса). Как видно, при близкой точности структура синтезированной нами ЭС гораздо проще и содержит намного меньше элементов. Это означает, что и время расчета по полученной модели будет значительно меньше. Кроме того, построение сложной 2П-образной модели индуктивности

весьма трудоёмко и требует больших затрат времени.

Далее на основе описанной выше методики предложена методика автоматизированного построения параметрических ЭС-моделей. Ее преимуществом является возможность определения единой структуры ЭС, способной с заданной точностью описать пассивный компонент на всем множестве конструктивных состояний (рис. 2).

1) Получение (измерение) параметров рассеяния  $S_{ij}(K_q)$  пассивного СВЧ компонента для всех требуемых конструктивных состояний  $K_q$  ( $q = 1, 2, \dots, Q$ );  $i, j = 1, 2, \dots, N$ ;  $N$  – число портов СВЧ компонента.

2) Задание единого морфологического множества допустимых структурных схем модели и структур (схем) звеньев, которые будут использоваться для всех конструктивных состояний  $K_q$  ( $q = 1, 2, \dots, Q$ ) пассивного СВЧ компонента.

3) Нахождение для каждого конструктивного состояния  $K_q$  согласно ранее описанной методике соответствующего множества  $\mathbf{S}_q$  возможных структур ЭС-модели, описывающих пассивный компонент с погрешностью не хуже заданной величины  $\varepsilon_0$ . В результате для  $Q$  конструктивных состояний будет получено  $Q$  таких множеств структур:  $\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2, \dots, \mathbf{S}_Q$ .

4) Выбор в полученных на шаге 3 множествах структур ЭС-моделей  $\mathbf{S}_q$  ( $q = 1, 2, \dots, Q$ ) общей структуры (структуры параметрической ЭС-модели), присутствующей в каждом множестве  $\mathbf{S}_q$ .

5) Если на шаге 4 не удалось определить структуру параметрической ЭС-модели, обеспечивающую ошибку не более  $\varepsilon_0$ , необходимо расширение морфологического множества допустимых структур либо увеличение величины  $\varepsilon_0$  и переход к шагу 3.

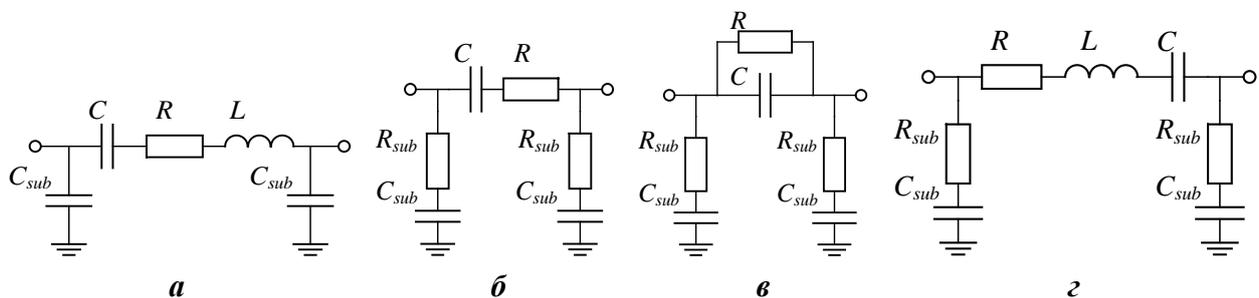
6) Построение полиномов, описывающих зависимости значений каждого элемента выбранной на шаге 4 ЭС от конструктивных параметров СВЧ компонента. Такое построение может быть выполнено на основе многомерной полиномиальной аппроксимации значений элементов ЭС на сетке конструктивных состояний.

7) Верификация параметрической модели компонента.

В качестве ошибки в процессе синтеза параметрической модели целесообразно использовать абсолютную СКО  $\varepsilon_s$  параметров рассеяния модели.

Для автоматизации п.6 предложен алгоритм автоматического определения оптимального аппроксимирующего полинома. Он обеспечивает минимальный суммарный порядок полинома для заданной величины ошибки аппроксимации значений элемента ЭС.

В качестве примера применения рассмотренной методики представлено построение параметрической ЭС-модели МДМ-конденсатора на базе  $0,15 \text{ GaAs } p\text{HEMT}$  технологии. Модель строится в диапазоне  $0,1\text{-}40$  ГГц на сетке конструктивных состояний (рис. 2) при изменении длины и ширины обкладок конденсатора в интервалах  $10 \text{ мкм} \leq l \leq 100 \text{ мкм}$  и  $10 \text{ мкм} \leq w \leq 100 \text{ мкм}$ . На рис. 9 показаны полученные в результате автоматизированного синтеза четыре возможных структуры параметрической ЭС-модели, которые описывают с нужной точностью МДМ-конденсатор во всех 25 конструктивных состояниях (рис. 2).



**Рис. 9 – Возможные структуры параметрической ЭС-модели МДМ-конденсатора**

Для наиболее простой модели (рис. 9а) получены полиномы, описывающие зависимости элементов ЭС от конструктивных параметров  $l$  и  $w$ :

$$C(w, l) = 1,12 \times 10^{-2} + 1,56 \times 10^{-4}w + 2,382 \times 10^{-4}l + 6,838 \times 10^{-7}w^2 + 4,23 \times 10^{-4}wl;$$

$$L(w, l) = 4,03 \times 10^{-2} + 3,01 \times 10^{-4}w + 7,932 \times 10^{-4}l + 3,174 \times 10^{-6}w^2 - 4,278 \times 10^{-6}wl - 1,478 \times 10^{-7}l^2;$$

$$R(w, l) = 0,1771 - 5,36 \times 10^{-3}w + 3,511 \times 10^{-3}l + 1,052 \times 10^{-4}w^2 - 7,489 \times 10^{-5}wl - 1,598 \times 10^{-6}l^2 - 6,014 \times 10^{-7}w^3 + 4,493 \times 10^{-7}w^2l + 1,515 \times 10^{-8}wl^2;$$

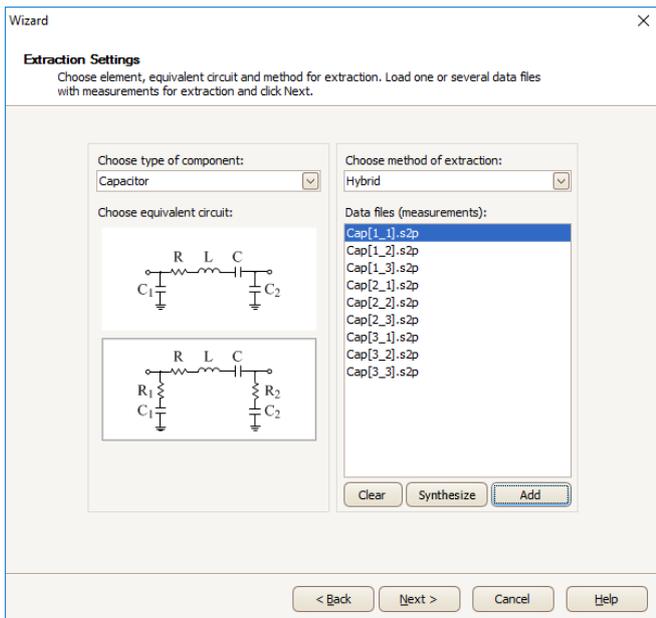
$$C_{sub}(w, l) = 1,43 \times 10^{-3} + 6,991 \times 10^{-5}w + 4,392 \times 10^{-5}l - 2,64 \times 10^{-7}w^2 + 7,308 \times 10^{-7}wl.$$

Максимальные ошибки параметров рассеяния модели для диапазона 0,1-40 ГГц в 25 исходных конструктивных состояниях составляют 3% по модулю и 4° по фазе, а в дополнительных состояниях (при верификации модели) - 4% и 6°.

В **третьей главе** описаны практические применения теоретических результатов диссертационной работы. Вначале приведено описание разработанной на основе предложенных методик и алгоритмов программы автоматизированного построения фиксированных ЭС-моделей пассивных СВЧ компонентов *Extraction-P* (рис. 10). К ее достоинствам можно отнести наличие базы эквивалентных схем пассивных компонентов с аналитическими формулами расчета характеристик моделей и экстракции элементов ЭС; наличие методики прямой экстракции и комбинированной методики; возможность одновременного построения множества моделей на основе пакетной обработки файлов измерений параметров рассеяния пассивных компонентов; возможность интеграции полученных моделей в САПР *AWR Microwave Office*.

Разработана также программа построения параметрических ЭС-моделей *Parametric*, написанная в вычислительной среде *Matlab*. Она предназначена для нахождения полиномов, аппроксимирующих зависимости элементов ЭС от конструктивных параметров пассивного СВЧ компонента. Построение параметрической ЭС-модели пассивного СВЧ компонента с использованием программ *Extraction-P* и *Parametric* выполняется примерно в течение 45 минут, в то время как ручное построение аналогичных параметрических ЭС-моделей опытным разработчиком может потребовать до 16 часов. Это свидетельствует о высокой степени автоматизации процесса построения ЭС-моделей пассивных СВЧ компонентов

Разработанные методики и программы были использованы при создании моделей и библиотек элементов для отечественных 0,15 мкм *GaAs pHEMT* и 0,15 мкм *GaN HEMT* технологий изготовления МИС. В частности, перечень основных элементов библиотеки для *GaN HEMT* технологии приведен в табл. 3. Библиотека предназначена для проектирования СВЧ МИС в копланарном исполнении, модели компонентов верифицированы в диапазоне частот 0,1-40 ГГц.



**Рис. 10 – Общий вид интерфейса программы *Extraction-P***

Построение параметрической ЭС-модели пассивного СВЧ компонента с использованием программ *Extraction-P* и *Parametric* выполняется примерно в течение 45 минут, в то время как ручное построение аналогичных параметрических ЭС-моделей опытным разработчиком может потребовать до 16 часов. Это свидетельствует о высокой степени автоматизации процесса построения ЭС-моделей пассивных СВЧ компонентов

Разработанные методики и программы были использованы при создании моделей и библиотек элементов для отечественных 0,15 мкм *GaAs pHEMT* и 0,15 мкм *GaN HEMT* технологий изготовления МИС. В частности, перечень основных элементов библиотеки для *GaN HEMT* технологии приведен в табл. 3. Библиотека предназначена для проектирования СВЧ МИС в копланарном исполнении, модели компонентов верифицированы в диапазоне частот 0,1-40 ГГц.

**Таблица 3 – Перечень основных элементов библиотеки для отечественной 0,15 мкм GaN HEMT технологии на подложке из карбида кремния (SiC)**

Группа	Элемент	Пояснение
<i>Active Elements</i>	<i>Linear 4×100</i>	Малосигнальная модель
	<i>Nonlinear 4×100</i>	Нелинейная модель транзистора
<i>Coplanar</i>	<i>CP_Line</i>	Отрезок линии передач
	<i>CP_AirBridge</i>	Воздушный мост
	<i>CP_TJunc</i>	Тройник
	<i>CP_Cross</i>	Перекрестие
	<i>CP_Bend</i>	Изгиб линии передач
	<i>CP_Tap</i>	Сужение линии
	<i>CP_Open</i>	Холостходный шлейф
	<i>CP_Short</i>	Короткозамкнутый шлейф
<i>Passive Elements</i>	<i>CP_RES</i>	Резистор
	<i>CP_MIM</i>	Конденсатор
	<i>DC_PORT</i>	Контактная площадка для постоянного тока
	<i>RF_PORT</i>	Контактная площадка для СВЧ зондов
	<i>CPDICE</i>	Границы кристалла

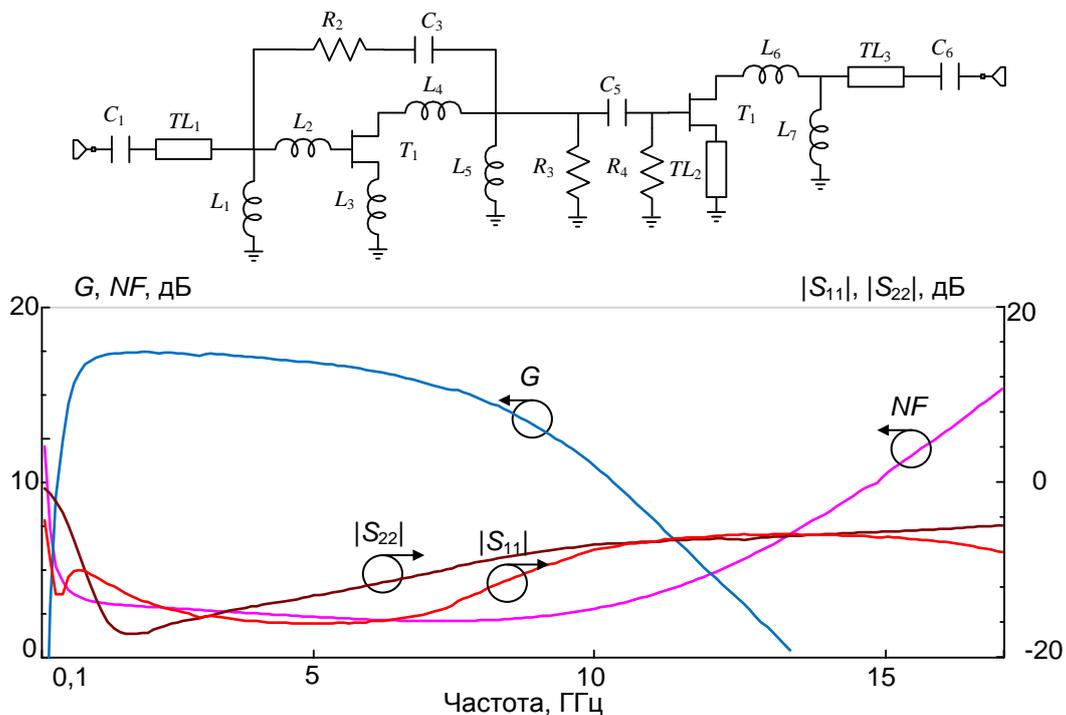
Также рассмотрена модификация исходной версии программы автоматизированного проектирования линейных и малошумящих СВЧ транзисторных усилителей *Geneamp* для обеспечения синтеза ТУ с использованием параметрических ЭС-моделей пассивных СВЧ компонентов. С этой целью был решен ряд задач, включая обновление механизмов моделирования частотных характеристик ТУ и декодирования хромосом, реализацию программного модуля параметрических моделей и модификацию пользовательского интерфейса. Новая версия программы осуществляет структурный синтез (генерацию) схем усилителей по требованиям к комплексу характеристик в полосе частот, включая коэффициент усиления, коэффициент шума, коэффициенты отражения на входе и выходе, коэффициент устойчивости; разрешает проектировать одно- и многокаскадные усилители с СКЦ и цепями ОС на сосредоточенных и распределенных элементах.

В заключение главы представлены примеры решения практических задач проектирования СВЧ МШУ с помощью программы *Geneamp* и разработанных моделей пассивных компонентов. В частности, выполнено проектирование МИС двухкаскадного МШУ диапазона 1-5 ГГц на основе 0,25 мкм *SiGe BiCMOS* технологии изготовления. Требования, предъявляемые к характеристикам МШУ, представлены в первой строке табл. 4. При синтезе использовалась, в частности, параметрическая ЭС-модель интегральной спиральной катушки индуктивности, построенная на основе зондовых измерений тестовых структур с катушками индуктивности величиной от 0,7 нГн до 14,7 нГн на полупроводниковой пластине. КМОП-транзисторы описывались параметрами рассеяния. На величины пассивных элементов усилителя были наложены ограничения, соответствующие используемой технологии изготовления МИС. Всего было проведено 10 запусков программы *Geneamp* длительностью по 20 минут каждый. В табл. 4 пред-

ставлены параметры нескольких различных полученных вариантов МИС двухкаскадных МШУ. На рис. 11 показаны схема и результаты моделирования синтезированного усилителя с лучшими характеристиками.

**Таблица 4. Параметры синтезированных МИС МШУ диапазона 1-5 ГГц**

Номер запуска	$G \pm \Delta G$ , дБ	$NF$ , дБ	$ S_{11} $ , дБ	$ S_{22} $ , дБ	$k$
Требов.	$17,5 \pm 0,5$	$< 3,5$	$< -10$	$< -10$	$> 1$
1	$17,72 \pm 0,24$	3,15	-7,25	-9,51	2,57
2	$17,16 \pm 0,35$	3,34	-10,02	-10,01	2,61
3	$18,00 \pm 0,45$	4,46	-11,59	-11,54	2,07
4	$17,5 \pm 0,7$	3,5	-10,07	-10,2	1,12
5	$17,32 \pm 0,24$	3,24	-9,68	-9,93	2,3
6	$17,71 \pm 0,17$	4,78	-9,38	-10,21	2,62
7	$16,00 \pm 2,39$	3,13	-8,97	-9,71	2,39
8	$17,78 \pm 0,7$	2,82	-10,06	-8,98	2,27
9	$17,69 \pm 0,48$	3,91	-7,55	-9,36	1,86
10	$17,34 \pm 0,37$	3,1	-9,79	-10,96	2,44



**Рис. 11 – Схема и результаты моделирования синтезированной МИС МШУ 1-5 ГГц**

Рассмотрено также проектирование однокаскадного МШУ диапазона 1-3 ГГц с наклонной АЧХ, выполняемого на дискретных элементах по технологии печатного монтажа. МШУ включается на входе пятиразрядного цифрового аттенуатора (ЦАТТ) и служит в том числе для коррекции частотной зависимости коэффициента передачи последнего. ЦАТТ при различных затуханиях обладает спадающей частотной характеристикой коэффициента передачи с неравномерностью около  $\Delta G = 3,7$  дБ. Для использования в приемопередающем тракте указанную неравномерность целесообразно скомпенсировать посредством включения линейного усилителя с обратной зависимостью коэффициента усиления от частоты.

В качестве активных элементов в усилителе использованы корпусированные *GaAs pHEMT* транзисторы фирмы *Avago Technologies*, в качестве дискретных пассивных компонентов – *SMD*-компоненты фирм *Coilcraft* и *Panasonic*, описываемые параметрическими моделями. Всего проведено 30 запусков процесса синтеза, критерием остановки являлось ограничение во времени одного запуска в 30 мин. В табл. 5 и на рис. 12 представлены требования к МШУ, а также параметры и схемы нескольких полученных вариантов усилителя (величина  $\Delta G$  характеризует максимальное отклонение коэффициента усиления синтезированного МШУ от заданной формы АЧХ). Во всех запусках в результате синтеза были получены оригинальные схемные решения МШУ (особенно выходной СКЦ), отсутствующие в литературе.

Таблица 5. Параметры синтезированных МШУ диапазона 1-3 ГГц с наклонной АЧХ

Номер решения	$\Delta G$ , дБ	$NF$ , дБ	$ S_{11} $ , дБ	$ S_{22} $ , дБ	$k$
Требов.	$\pm 0,5$	$< 3,0$	$< -12$	$< -12$	$> 1$
1	$\pm 0,2$	1,96	-11,98	-15,67	1,61
2	$\pm 0,25$	1,8	-10,6	-16,8	1,21
3	$\pm 0,3$	1,78	-8,93	-11,91	1,34
4	$\pm 0,3$	2,13	-11,56	-12,05	1,53

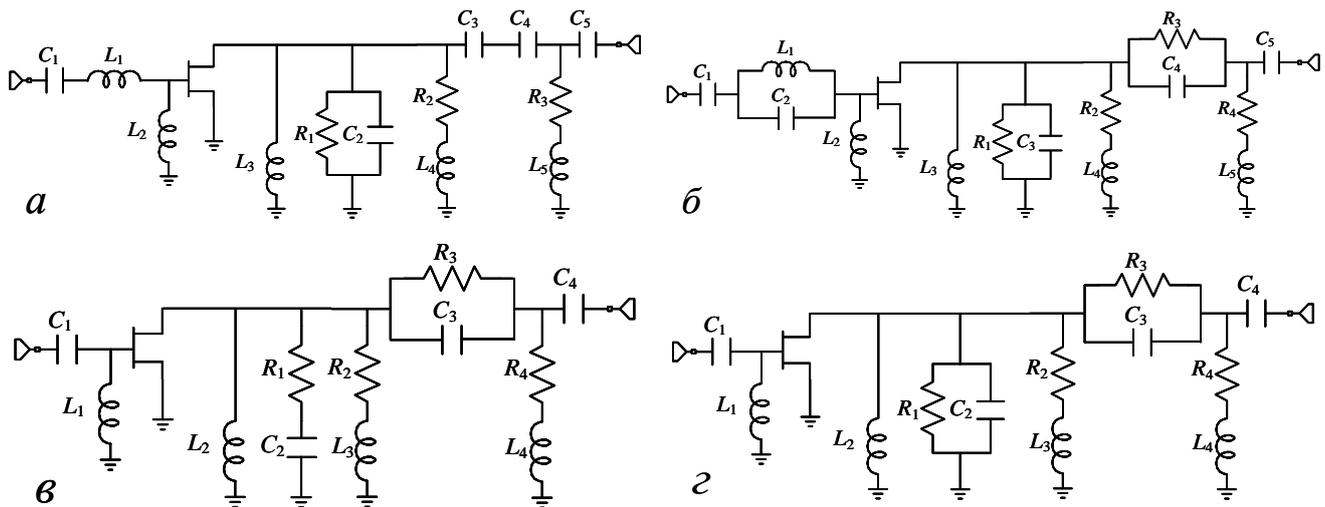
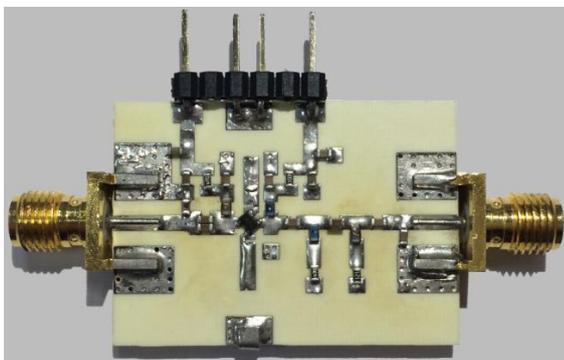
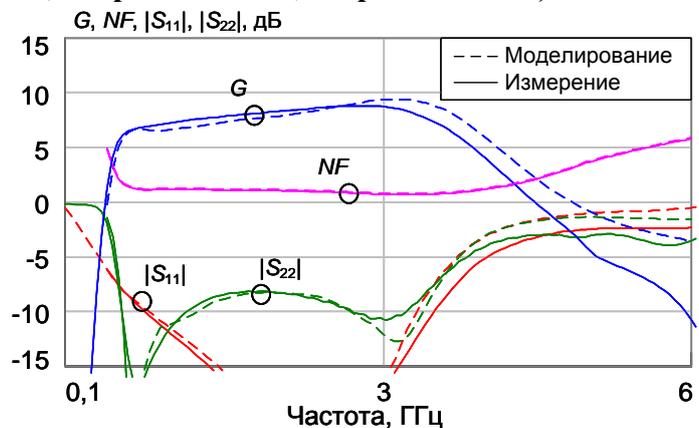


Рис. 12 – Схемы синтезированных МШУ диапазона 1-3 ГГц с нарастающей формой АЧХ (а – решение №1, б – решение №2, в – решение №3, г – решение №4)



а



б

Рис. 13 – Фотография изготовленного образца МШУ с наклонной АЧХ (а), его рассчитанные и экспериментальные частотные характеристики (б)

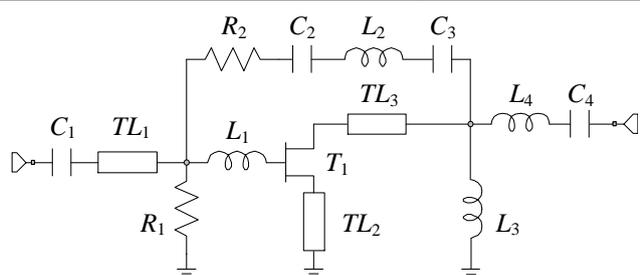
На базе дополнительно оптимизированной схемы (рис. 12а) был спроектирован и изготовлен образец усилителя. На рис. 13 приведены смоделированные и измеренные частотные характеристики МШУ. Как видно, эти характеристики хорошо совпадают, что говорит о достаточной точности моделей пассивных СВЧ компонентов.

Эффективность структурно-параметрического синтеза ТУ на основе ГА подчеркивается особенностями решенной задачи – в литературе отсутствуют примеры и систематические подходы к проектированию МШУ с заданной (произвольной) формой АЧХ. При этом все необходимые функции (реализация необходимой нарастающей формы АЧХ, хорошего согласования на входе и выходе, а также низкого коэффициента шума) удалось реализовать в единственном усилительном каскаде.

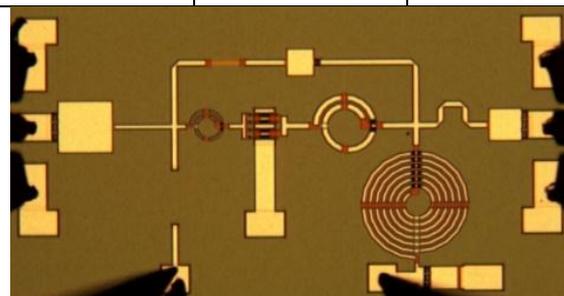
Представлена также разработка МИС однокаскадного сверхширокополосного МШУ диапазона 3-20 ГГц, выполняемого на основе 0,15 мкм GaAs рНЕМТ технологии компании Win Semiconductors. В процессе синтеза использованы параметрические модели тонкопленочного резистора, МДМ-конденсатора и катушки индуктивности, выполненных по данной технологии. Всего было проведено 10 запусков ГА и получено несколько различных вариантов усилителя. Наиболее удобная для практической реализации схема МШУ, удовлетворяющая поставленным требованиям, приведена на рис. 14. По ней разработана топология, затем МИС была изготовлена на фабрике (рис. 15). В табл. 6 сведены требования, а также параметры МШУ (моделирование и эксперимент).

**Таблица 6 – Параметры МИС МШУ 3-20 ГГц**

	$G$ , дБ	$F$ , дБ	$ S_{11} $ , дБ	$ S_{22} $ , дБ
Требования	$11 \pm 1$	$\leq 2,5$	$\leq -9,63$	$\leq -9,63$
Моделирование	$11,49 \pm 0,16$	$< 2,36$	$\leq -10,56$	$\leq -11,69$
Эксперимент	$10,7 \pm 0,7$	$\leq 2,6$	$< -9,98$	$< -9,82$



**Рис. 14 – Схема синтезированного МШУ диапазона 3-20 ГГц**



**Рис. 15 – Фотография кристалла МИС МШУ (1,3×0,7 мм<sup>2</sup>)**

Разработанная МИС МШУ по совокупности характеристик не уступает лучшим зарубежным коммерческим аналогам.

Таким образом, можно сделать вывод о возможности и эффективности синтеза СВЧ МШУ на базе ГА с непосредственным использованием параметрических ЭС-моделей пассивных компонентов. Реализованный метод дает возможность автоматически генерировать практически осуществимые схемы СВЧ МШУ с высокими параметрами. При этом время такого синтеза заметно (в несколько раз) пре-

вышает соответствующее время при применении идеализированных моделей пассивных компонентов, однако остается практически приемлемым. Значительным преимуществом является то, что устраняется необходимость после синтеза перехода от идеализированных моделей к моделям реальных пассивных компонентов, это значительно упрощает и ускоряет проектирование СВЧ МШУ.

**Заключение.** Основные результаты работы сводятся к следующему:

1) На основе изучения литературы выполнен морфологический анализ ЭС-моделей пассивных сосредоточенных интегральных и дискретных компонентов СВЧ схем по таким признакам, как тип компонента, технология изготовления, структура и сложность ЭС-модели. Это обеспечивает систематическую базу для осуществления синтеза структуры физически обоснованных моделей пассивных СВЧ компонентов.

2) Предложена новая методика автоматизированного структурно-параметрического синтеза ЭС-моделей пассивных сосредоточенных интегральных и дискретных СВЧ компонентов, основанная на декомпозиции модели, оптимальном выборе звеньев, применении алгоритмов прямой экстракции и модифицированной статистической медианы. Это позволяет, в отличие от существующих методик, сохранить физическую обоснованность структуры модели и обеспечить необходимый компромисс между её сложностью и точностью.

3) На основе разработанной методики структурно-параметрического синтеза, а также алгоритма автоматического нахождения многомерных полиномов, описывающих зависимости элементов ЭС от конструктивных параметров компонента, предложена методика автоматизированного построения параметрических ЭС-моделей пассивных СВЧ компонентов.

4) Разработана программа *Extraction-P* для автоматизированного построения ЭС-моделей пассивных сосредоточенных СВЧ компонентов, реализующая предложенную методику автоматизированного структурно-параметрического синтеза, а также методику прямой экстракции и комбинированную методику. На основе предложенной методики синтеза параметрических ЭС-моделей разработана программа *Parametric*, предназначенная для автоматизации определения полиномов, аппроксимирующих зависимости значений элементов ЭС от конструктивных параметров пассивных компонентов. Предложенные методики и разработанное ПО позволяют упростить и ускорить создание моделей и библиотек элементов для различных технологий изготовления СВЧ-устройств как на дискретных компонентах, так и в монолитном исполнении.

5) Методики и ПО были успешно использованы при построении ЭС-моделей пассивных СВЧ компонентов для отечественных 0,15 мкм *GaAs pHEMT* и 0,15 мкм *GaN HEMT*, а также зарубежной 0,25 мкм *SiGe BiCMOS* технологий изготовления МИС. Разработанные модели верифицированы на основе измерений и включены в созданные библиотеки компонентов для отечественных *GaAs* и *GaN* технологий.

6) С целью интеграции разработанных параметрических моделей пассивных СВЧ компонентов модифицирована программа автоматизированного структурно-

параметрического синтеза линейных и малошумящих СВЧ транзисторных усилителей *Geneamp*.

7) Впервые показана возможность и эффективность автоматизированного структурно-параметрического синтеза СВЧ линейных и малошумящих транзисторных усилителей каскадного типа на основе ГА с применением параметрических моделей реальных пассивных компонентов.

8) С использованием модифицированной программы *Geneamp* и созданных параметрических ЭС-моделей пассивных СВЧ компонентов разработаны МИС МШУ диапазона 1–5 ГГц на основе 0,25 *SiGe BiCMOS* технологии, МШУ с наклонной формой АЧХ диапазона 1–3 ГГц на основе технологии печатного монтажа для коррекции коэффициента передачи цифрового аттенюатора, МИС МШУ диапазона 3–20 ГГц на основе 0,15 мкм *GaAs pHEMT* технологии.

9) Практическое проектирование и экспериментальное исследование изготовленных образцов усилителей подтвердили точность построенных моделей СВЧ компонентов, а также эффективность разработанного программного обеспечения для автоматизированного синтеза линейных и малошумящих СВЧ транзисторных усилителей.

В **Приложении А** приведены акты об использовании программ *Extraction-P* и *Geneamp*, а также СВЧ усилителя диапазона 1–5 ГГц на основе 0,25 мкм *SiGe BiCMOS* технологии; представлены свидетельства о государственной регистрации ПО и топологии интегральной микросхемы.

Содержание диссертации отражено в 33 работах, в числе которых следующие основные:

1. Горяинов А.Е., Степачева А.В., Добуш И.М. Программный модуль для построения моделей пассивных компонентов СВЧ монолитных интегральных схем на основе комбинированной методики экстракции // Современные техника и технологии: сб. трудов XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Т2. – Томск, 2012. – С. 297-298.
2. Горяинов А.Е., Степачева А.В., Добуш И.М., Бабак Л.И. Программный модуль для экстракции моделей пассивных компонентов СВЧ монолитных интегральных схем на основе среды Indesys-MS // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. трудов. – Красноярск, 2012. – С. 312-318.
3. Kalentyev A.A., Dobush I.M., Garays D.V., Goryainov A.E., Kokolov A.A., Stepacheva A.V., Babak L.I. Automatic synthesis of MMIC amplifiers, using a genetic algorithm and parametric models of passive elements // Innovations in Information and Communication Science and Technology (IICST 2012): proceedings of Second Postgraduate Consortium International Workshop. – Tomsk, 2012. – pp. 146-153.
4. Горяинов А.Е., Добуш И.М., Бабак Л.И. Построение параметрических моделей пассивных компонентов СВЧ монолитных интегральных схем с использованием программы *Extraction-P* // Доклады ТУСУР. – 2012. – №2 (26), Ч. 2. – С. 98-103.
5. Добуш И.М., Калентьев А.А., Гарайс Д.В., Горяинов А.Е., Бабак Л.И. Проектирование монолитного малошумящего усилителя диапазона частот 1,2-1,8 ГГц с помощью программы синтеза согласующих цепей *Gmatch* // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. трудов. – Красноярск, 2013. – С. 278-283.

6. Горяинов А.Е., Добуш И.М. Исследование адекватности моделей пассивных элементов СВЧ монолитных интегральных схем // Научная сессия ТУСУР-2013: материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Ч.3. – Томск, 2013. – С. 21-24.
7. Калентьев А.А., Добуш И.М., Бабак Л.И., Гарайс Д.В., Горяинов А.Е. Автоматизированное проектирование малошумящего усилителя для приёмника ГНСС на основе генетического алгоритма // Доклады ТУСУР. – 2013. - №4 (30). – С. 45-49.
8. Добуш И.М., Самуилов А.А., Калентьев А.А., Горяинов А.Е., Черкашин М.В., Торхов Н.А., Бабак Л.И. Разработка GaAs-pHEMT-монолитного малошумящего усилителя диапазона 3-20 ГГц с использованием программ «визуального» проектирования // Доклады ТУСУР. – 2013. – №4 (30). – С. 39-44.
9. Сальников А.С., Добуш И.М., Горяинов А.Е., Бабак Л.И. Построение параметрической модели монолитного тонкопленочного резистора на основе СВЧ-измерений и электромагнитного моделирования // Доклады ТУСУР. – 2014. - №3 (33). – С. 109-117.
10. Гарайс Д.В., Калентьев А.А., Добуш И.М., Жабин Д.А., Горяинов А.Е., Сальников А.С., Бабак Л.И. Программа автоматизированного проектирования СВЧ транзисторных усилителей на основе генетического алгоритма // Автоматизация в промышленности. – 2015. - №9. – С. 39-44.
11. Калентьев А.А., Добуш И.М., Гарайс Д.В., Горяинов А.Е., Бабак Л.И. Структурно-параметрический синтез малошумящего усилителя диапазона частот 3-20 ГГц на основе генетического алгоритма с использованием моделей монолитных элементов // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. трудов. – Красноярск, 2014. – С. 360-364.
12. Горяинов А.Е., Степачева А.В., Добуш И.М., Бабак Л.И. Программа для экстракции параметров эквивалентных схем пассивных компонентов СВЧ монолитных интегральных схем // 22-ая Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2012): Материалы конференции. – Севастополь, 2012. – С.129-130.
13. Babak L.I., Vjushkov V.A., Dorofeev S.Y., Kalentyev A.A., Garays D.V., Goryainov A.E. Synthesis of matching networks for microwave active circuits based on genetic algorithm // Microwave and Optical Technology Letters. – 2014. – V.56, №11. – pp. 2720-2723.
14. Добуш И.М., Шеерман Ф.И., Сальников А.С., Калентьев А.А., Гарайс Д.В., Горяинов А.Е., Собянин Р.К., Бабак Л.И. Разработка SiGe СВЧ МИС цифрового аттенюатора и программно-аппаратного стенда для тестовых испытаний // 26-ая Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2016): Материалы конференции. – Севастополь, 2016. – С.2063-2068.
15. Горяинов А.Е. Методика синтеза моделей пассивных СВЧ компонентов в виде эквивалентных схем // Актуальные научные исследования в современном мире: Сб. науч. трудов., вып.9(17), Ч.1. – Переяслав-Хмельницкий, 2016. – С. 30-35.
16. Горяинов А.Е., Бабак Л.И. Методика построения параметрических моделей пассивных компонентов СВЧ монолитных интегральных схем в виде эквивалентных схем // Актуальные научные исследования в современном мире: Сб. науч. трудов., вып.9(17), Ч.1. – Переяслав-Хмельницкий, 2016. – С. 25-30.