



Акционерное общество
«Экспериментальное
научно-производственное
объединение

**СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ
ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ»**

115409, Москва, Каширское шоссе, 31
тел./факс (499) 324-04-20

№ К1611/ 128

От 30 ноября 2016 г.

На № _____

Ученому секретарю диссертационного совета
Д212.268.01 на базе Томского государственного
университета систем управления и
радиоэлектроники, д.ф.-м.н., профессору
Манделю А.Е.

634050, г. Томск, пр. Ленина, 40

Уважаемый Аркадий Евсеевич!

Направляю Вам положительный отзыв официального оппонента по диссертации Горяинова Александра Евгеньевича «Автоматизированное построение моделей пассивных компонентов и их применение при структурно-параметрическом синтезе малошумящих СВЧ транзисторных усилителей» по специальности 05.12.07 – «Антенны, СВЧ устройства и их технологии» на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Приложение: Отзыв официального оппонента..., на 5 л, 2 экз.

Технический директор

А.В. Яненко

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

по диссертации Горяинова Александра Евгеньевича

«Автоматизированное построение моделей пассивных компонентов и их применение при структурно-параметрическом синтезе маломощных СВЧ транзисторных усилителей», на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии

Актуальность темы диссертации. В связи с постоянным увеличением степени интеграции, функционального состава, диапазона рабочих частот и уменьшением проектных норм полупроводниковых технологий успешное выполнение задачи проектирование СВЧ интегральных схем (ИС) невозможно без применения современных систем автоматизированного проектирования (САПР). Одним из наиболее важных этапов типового маршрута проектирования в САПР является схемно-топологическое проектирование и моделирование СВЧ ИС, который включает в т.ч. оптимизацию параметров отдельных пассивных и активных элементов (компонентов), что невозможно без использования соответствующих библиотек.

Одними из наиболее востребованных для проектирования СВЧ ИС с диапазоном рабочих частот до 50...60 ГГц и более являются полупроводниковые технологии на основе АЗВ5-соединений (GaAs и GaN НЕМТ, GaAs рНЕМТ) и кремний-германия (SiGe БиКМОП). Библиотеки СВЧ элементов для зарубежных технологий в большинстве своем содержат необходимый базовый набор активных и пассивных элементов и, как правило, периодически совершенствуются фабрикой-изготовителем СВЧ ИС, тогда как для отечественных АЗВ5-технологий подобные библиотеки находятся только на начальном этапе развития и зачастую недоступны разработчикам.

Задаче создания (построения и экстракции параметров) моделей как пассивных, так и активных СВЧ элементов посвящено множество работ отечественных и зарубежных авторов. Между тем постоянное совершенствование и усложнение технологий изготовления СВЧ ИС, а также растущая необходимость оперативного создания разработчиком собственных (уникальных) пассивных и, в ряде случаев, активных элементов, изначально отсутствующих в составе библиотеки, делает необходимым разработку новых методик и подходов для решения данной задачи.

Отдельной малоисследованной задачей является возможность автоматизированного синтеза СВЧ ИС с использованием моделей реальных элементов заданной технологии изготовления, что, несомненно, позволит улучшить достигаемые параметры и существенно (в разы) сократить общее время разработки.

В связи с вышесказанным, разработка новых методов и алгоритмов автоматизированного построения моделей пассивных элементов (компонентов), а также их применение в структурно-параметрическом синтезе маломощных СВЧ транзисторных усилителей (МШУ), являющихся одним из самых распространенных классов устройств, весьма актуальны и способствует развитию радиоэлектронной аппаратуры и систем на ее основе различного назначения.

Содержание диссертации. Диссертация состоит из введения, трёх разделов, заключения, списка литературы, списка сокращений и одного приложения.

Во введении обосновывается актуальность работы, формулируется ее цель, задачи, научная новизна, а также положения, выносимые на защиту.

В первом разделе проанализированы существующие модели СВЧ пассивных сосредоточенных элементов (компонентов), в частности, подробно рассмотрены модели в виде эквивалентных схем (ЭС), в т.ч. параметрические, и способы их построения. Рассмотрены типовые электрические схемы СВЧ МШУ и подходы к их автоматизированному проектированию, в т.ч. на основе генетических алгоритмов и морфологического анализа, определены ключевые задачи исследования.

Во втором разделе рассмотрены подходы к созданию моделей пассивных компонентов (резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности), проанализированы существующие методики автоматизированного построению моделей и определения их параметров. На основе данных научно-технических источников автором выполнен морфологический анализ моделей на основе ЭС, результаты которого представлены в виде структурных схем и звеньев, которые в свою очередь систематизированы по типу компонента и полупроводниковой технологии изготовления. На основе результатов морфологического анализа предложены методики автоматизированного построения моделей пассивных компонентов, успешная апробация которых продемонстрирована на примерах создания моделей для набора СВЧ резисторов, конденсаторов, индуктивностей выполненных по отечественной GaN HEMT технологии с проектной нормой 0,15 мкм.

В третьем разделе представлены наиболее значимые практические результаты, полученные в ходе выполнения работы. Представлены описания разработанных на основе предложенных автором методик программных продуктов Extraction-P и Parametric, а также разработанной с их использованием библиотеки компонентов для отечественной GaN HEMT технологии 0,15 мкм. Согласно результатам экспериментальных исследований разработанные автором модели пассивных компонентов обладают высокой степенью точности (относительная погрешность не более 4%) в диапазоне частот от 0,01 до 40 ГГц. Предложенные автором параметрические модели пассивных компонентов интегрированы в состав программного продукта Geneamp, предназначенного для автоматизированного синтеза СВЧ транзисторных усилителей по заданным требованиям к электрическим параметрам, что в свою очередь позволило повысить точность результатов синтеза и существенно упростить процедуру проектирования. Практическая апробация модифицированного автором Geneamp с интегрированными параметрическими моделями выполнена при разработке двухкаскадного СВЧ буферного усилителя (БУ) с диапазоном рабочих частот от 1 до 5 ГГц (коэффициент усиления (K_u) $17,5 \pm 0,7$ дБ, коэффициент шума ($K_{ш}$) не более 3,5 дБ), реализованного по SiGe БиКМОП технологии с проектной нормой 0,25 мкм; однокаскадного СВЧ БУ с диапазоном рабочих частот от 1 до 3 ГГц с наклонной АЧХ (K_u не менее 11,5 дБ, $K_{ш}$ не более 2 дБ), реализованного в виде гибридной ИС на основе технологии печатных плат;

сверхширокополосного СВЧ МШУ с диапазоном рабочих частот от 3 до 20 ГГц (K_u не менее 10 дБ, $K_{ш}$ не более 2,5 дБ), реализованного по GaAs pHEMT технологии 0,15 мкм. Существенно, что данные моделирования подтверждены результатами экспериментальных исследований изготовленных образцов СВЧ транзисторных усилителей, что позволяет сделать вывод о справедливости предложенных автором моделей и методик определения их параметров.

Заключение обобщает основные теоретические и практические результаты диссертационной работы.

В приложении представлены акты о внедрении (использовании) результатов диссертационной работы на ведущих отечественных предприятиях, в учебном процессе, а также свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ («Extraction-P», «Intelligent Design System v2») и топологии интегральной микросхемы.

Степень обоснованности и достоверность научных положений и результатов работы. Достоверность полученных результатов и положений диссертационной работы подтверждены экспериментальными и теоретическими исследованиями, сопоставлением полученных результатов с имеющимися современными теоретическими и экспериментальными данными, представлением основных результатов диссертации на конференциях.

Основные результаты работы опубликованы в 34 научных работах, в том числе в 6 изданиях, включенных в перечень ВАК России, в 3 изданиях, индексируемых Scopus, остальные статьи в сборниках трудов международных и всероссийских конференций.

Научная новизна работы определяется в первую очередь следующими результатами:

1. Предложена новая методика синтеза (определение структуры и параметров элементов) моделей пассивных СВЧ компонентов в виде эквивалентных схем, позволяющая определить структуру моделей и автоматически рассчитать многомерные полиномы, отражающие зависимости параметров элементов от конструктивных параметров компонента (например, геометрических размеров).

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

Практическая значимость работы в первую очередь заключается в следующем:

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 программного обеспечения построены ЭС-модели пассивных компонентов СВЧ монолитных ИС, изготовленных по отечественным GaAs pHEMT 0,15 мкм, GaN HEMT 0,15 мкм, а также зарубежной SiGe БикМОП 0,25 мкм 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 транзисторных усилителей с использованием моделей реальных пассивных компонентов, что 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 СВЧ ИС БУ с диапазоном рабочих частот от 1 до 5 ГГц на основе SiGe БикМОП технологии 0,25мкм, БУ с диапазоном от 1 до 3 ГГц на основе технологии печатного монтажа с нарастающей формой АЧХ для коррекции коэффициента передачи цифрового аттенюатора, МШУ с диапазоном от 3 до 20 ГГц на основе GaAs pHEMT технологии 0,15 мкм.

Замечания по диссертационной работе:

1. Автором не рассмотрены особенности построения моделей и методик определения их параметров для СВЧ пассивных компонентов, выполненных на связанных микрополосковых линиях передачи (направленные ответвители, симметрирующие трансформаторы импеданса и др.), которые в свою очередь являются необходимыми для построения широкого класса СВЧ ИС, таких как смесители, усилители, генераторы и др.

2. Не предусмотрена возможность использования разработанной автором библиотеки элементов для отечественной GaN HEMT технологии 0,15мкм в пакете САПР Advanced Design System, являющемся наравне с AWR Microwave Office стандартом де-факто для проектирования СВЧ монолитных и гибридных ИС, устройств и систем.

3. Представленные автором модели пассивных элементов охарактеризованы в диапазоне частот до 40 ГГц, тогда как для рассмотренных технологий граничные частоты единичного существенно выше (70...110 ГГц и более).

4. Используемый автором термин «компонент» по отношению к рассматриваемым в работе интегральным катушкам индуктивности, МИМ-конденсаторам, резисторам и др. с целью повышения общей наглядности представления материала может быть заменен на «элемент», что соответствует ГОСТ 17021-88 Микросхемы интегральные. Термины и определения.

5. В тексте рукописи присутствуют незначительные опечатки и неточности оформительского плана.

Указанные недостатки не снижают ценности полученных результатов, работа выполнена на высоком научном уровне и заслуживает положительной оценки. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации, которая является самостоятельной исследовательской работой.

Заключение. Диссертация является завершенной научной работой, соответствует критериям, установленным «Положением и порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к кандидатским работам, а ее автор Горяинов А.Е. заслуживает присуждения ему степени кандидата технических наук по специальности 05.12.07 – «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии».

Официальный оппонент,
кандидат технических наук, научный сотрудник НТК-1
Акционерное общество «Экспериментальное научно-
производственное объединение «Специализированные
электронные системы»
115409, Москва, Каширское ш., 31,
тел. (495) 984-67-44 доб.3073;
e-mail: nausach@spels.ru

Усачев Николай Александрович



Подпись Усачева Н.А. заверяю:
кандидат технических наук, технический директор
Акционерное общество «Экспериментальное научно-
производственное объединение «Специализированные
электронные системы»
115409, Москва, Каширское ш., 31,
тел. (495) 984-67-44 доб.5012;
e-mail: avyan@spels.ru



Яненко Андрей Викторович

м.п.

« 30 » ноября 2016 г.