

На правах рукописи



**Столяренко Алексей Андреевич**

**ШИРОКОПОЛОСНЫЕ СВЧ АТТЕНЮАТОРЫ НА ОСНОВЕ  
ФИЛЬТРОВЫХ СТРУКТУР С ДИССИПАТИВНЫМИ ПОТЕРЯМИ**

Специальность: 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Томск 2019

Работа выполнена в федеральном государственном образовательном бюджетном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: Рубанович Михаил Григорьевич, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», профессор кафедры Общей физики

Официальные оппоненты: Пальчун Юрий Анатольевич, доктор технических наук, старший научный сотрудник ФГУП «СНИИМ», г. Новосибирск

Балзовский Евгений Владимирович, кандидат физико-математических наук, ФГБУН Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН), старший научный сотрудник Лаборатории высокочастотной электроники, г. Томск

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет» (ОмГТУ) г. Омск

Защита диссертации состоится «23» декабря 2019 г. в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.268.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР) по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУР и на сайте: <https://postgraduate.tusur.ru/urls/rch0q4wu>

Автореферат разослан «\_\_» ноября 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.ф.-м.н., профессор



А.Е. Мандель

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Интенсивное развитие современных систем связи и передачи данных влечет за собой совершенствование и развитие контрольно-измерительной базы, используемой разработчиками и операторами таких систем. В связи с освоением новых частотных диапазонов, внедрением новых видов модуляции и использованием сигналов со сверхширокой полосой рабочих частот повышаются требования к техническим характеристикам выходного сигнала, которые необходимо регулярно контролировать с помощью соответствующей измерительной аппаратуры. В измерительных установках и системах для контроля параметров выходного сигнала радиопередающих устройств различного назначения в виду ограничения максимальной мощности входного сигнала для многих измерительных приборов на уровне не более +20..+35 дБм требуется применять мощные аттенюаторы с малой неравномерностью АЧХ и ФЧХ, а также хорошим уровнем согласования. Мощные аттенюаторы и нагрузки также широко используются в качестве эквивалента антенны. На сегодняшний день большинство современных высокоэнергетических радиопередающих СВЧ систем, эксплуатируемых как в наземных комплексах, так и в летательных и космических аппаратах различного назначения, работает в диапазоне частот 0 – 5 ГГц. Именно в этом диапазоне необходимы аттенюаторы и оконечные согласованные нагрузки, способные рассеивать в рабочем режиме мощность до нескольких киловатт.

Современные программные пакеты автоматизированного проектирования СВЧ устройств, предоставляют разработчику множество инструментов, позволяющих решать различные задачи, связанные с достижением требуемых характеристик разрабатываемых устройств. Такие САПР как Microwave Office, Ansys HFSS или CST Studio Suite, позволяют с использованием численного электромагнитного моделирования провести расчет характеристик аттенюаторов и плёночных резисторов с достаточной степенью соответствия и адекватности. Основная сложность применения этих программных пакетов состоит в том, что данные САПР позволяют анализировать и оптимизировать уже сформированные первоначальные структуры СВЧ устройств, эквивалентные схемы которых в сосредоточенном элементном базисе описываются ёмкостями, индуктивностями и резисторами. Ввиду этого, перед разработчиками становится актуальной задача поиска новых подходов к построению СВЧ аттенюаторов. Что не исключает также совершенствование существующих структурных, схмотехнических и конструктивно-технологических решений для широкополосных СВЧ аттенюаторов большой мощности.

Большой вклад в развитие теории и практики построения широкополосных СВЧ устройств с диссипативными потерями внесли известные зарубежные ученые, такие как: В. Ажа, S. Cohn, М. Meng, а также

русские ученые: В.И. Вольман, В.П. Мещанов, М.В. Давидович, А.А. Яшин, В.Д. Садков, Н.Ф. Попова, Е.П. Васильев, Н.Д. Малютин, Г.Г. Гошин, Б.А. Беляев, А.Н. Сычѳв, В.П. Кисмерешкин, Д.А. Кабанов, А.А. Лексиков, М.А. Евдокимов, С.Н. Григорьев, Ю.Н. Антонов, И.А. Корж, А.Н. Кузнецов, В.В. Кондрашов. Результаты, полученные этими и многими другими авторами, положены в основу исследований, выполненных в данной диссертационной работе.

Одним из перспективных направлений для построения мощных широкополосных СВЧ аттенуаторов и нагрузок, является использование пленочных микрополосковых резисторов, нанесенных на диэлектрическую подложку. Современная микрополосковая технология позволяет обеспечить хорошие массогабаритные параметры, долгий срок эксплуатации и высокую надежность для СВЧ устройств различного типа.

Следует отметить, что планарные плѳночные резисторы имеют ряд существенных преимуществ в конструктивном и технологическом плане по сравнению с другими типами диссипативных элементов при работе с высокими уровнями входной СВЧ мощности. Согласованные аттенуаторы и нагрузки на пленочных резисторах могут быть реализованы следующим образом:

- в виде одного или нескольких дискретных диссипативных элементов;
- в виде каскадного включения нескольких аттенуаторов и оконечной нагрузки малой или средней мощности;
- в виде полосковой линии передачи с распределенными диссипативными потерями;

Первый из отмеченных выше вариантов реализации нагрузок имеет преимущество в простоте реализации, но уровень поглощаемой СВЧ мощности и диапазон рабочих частот существенно ограничены площадью диэлектрической подложки диссипативного элемента и их количеством.

Основной идеей при каскадном построении аттенуаторов и оконечных нагрузок является выбор коэффициентов передачи каждого каскада с соблюдением условия рассеивания одинаковой мощности на каждом отдельном каскаде. Это позволяет повысить суммарный уровень рассеиваемой мощности и расширить рабочий диапазон частот всей системы, но этот подход имеет ограничение на максимальное количество каскадов при конкретной физической реализации.

Микрополосковая линия передачи с диссипативными потерями применяется в качестве аттенуатора в более высоком частотном диапазоне до 10 ГГц и выше. Это объясняется тем что, данная диссипативная система является распределенной. Основным недостатком такой системы является ограниченный уровень мощности входного сигнала.

Известные методы расчета распределенных СВЧ аттенуаторов и нагрузок и описание резистивных пленок в виде одномерной линии передачи с потерями не обеспечивают достаточного соответствия между расчѳтными и

экспериментально полученными характеристиками, особенно с повышением верхней границы рабочего диапазона частот. Это несоответствие увеличивается, с увеличением размеров резистивной плёнки и с усложнением её формы.

В существующей литературе также отсутствует описание методов получения равномерных амплитудно-частотных характеристик вносимого затухания в мощных многокаскадных и распределенных плёночных аттенюаторах.

Принимая во внимание изложенные выше аспекты, задача по разработке новых методов построения широкополосных мощных СВЧ аттенюаторов, выполненных на основе фильтровых структур с введенными диссипативными элементами, является современной и значимой.

**Цель диссертации.** Исследование, разработка и практическая реализация многоэлементных сверхширокополосных СВЧ аттенюаторов и нагрузок высокого уровня мощности, выполненных на основе сосредоточенных и распределенных фильтровых структур с диссипативными потерями различной величины.

**Задачи исследований.** Поставленная цель достигается решением следующих основных задач.

1. Обзор и анализ современных методов построения и технических характеристик аттенюаторов и нагрузок на основе различных поглощающих элементов.

2. Разработка новых методов построения, а также схмотехнической и конструктивной реализации мощных широкополосных пленочных СВЧ аттенюаторов и нагрузок, выполненных на основе полиномиальных и квазиполиномиальных фильтров с диссипативными потерями.

3. Численное электродинамическое моделирование частотных характеристик СВЧ аттенюаторов и оконечных нагрузок, выполненных в виде фильтра нижних частот, квазиполиномиального и ступенчатого фильтра гармоник с диссипативными потерями.

4. Разработка и исследование характеристик опытных образцов СВЧ аттенюаторов на уровень мощности до 200 Вт в диапазоне рабочих частот 0-5 ГГц.

**Предмет исследования.** Широкополосные свойства пленочных многоэлементных СВЧ аттенюаторов и нагрузок большой мощности в виде фильтров сосредоточенного и распределенного типа с различным уровнем потерь.

**Объект исследования.** Широкополосные СВЧ аттенюаторы и нагрузки большой мощности на основе фильтров нижних частот и полосовых фильтров с диссипативными потерями.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач в данной работе в качестве базового подхода используется теория линейных

электрических цепей, теория фильтров и теория согласования комплексных импедансов. Также перечисленные выше задачи решались с помощью теории функций комплексного переменного, аппарата матричного исчисления, численных методов электродинамического моделирования и оптимизации.

**Достоверность полученных результатов.** Достоверность научных результатов подтверждается корректными математическими выводами и большим объемом компьютерного моделирования в демонстрационной версии программы NI AWR Microwave Office. Экспериментальные измерения были проведены с помощью сертифицированного измерителя параметров цепей P2M-04 фирмы «Микран». Результаты измерений в достаточной степени соответствуют теоретическими расчетам и результатам компьютерного моделирования. Полученные результаты не противоречат данным других авторов.

**Научная новизна.** В данной работе впервые были получены следующие результаты.

1. Разработана трехэтапная методика синтеза широкополосных многоэлементных СВЧ аттенуаторов на основе микрополосковых резисторов, встроенных в фильтр нижних частот, и обосновано введение корректирующих и согласующих индуктивных элементов.

2. Разработан метод построения широкополосных СВЧ аттенуаторов и амплитудно-частотных корректоров на основе неискажающих линий с потерями в резистивном микрополоске и слаболегированной полупроводниковой подложке. Определены параметры резистивных микрополосков и полупроводниковых подложек для различных значений вносимого ослабления.

3. Разработаны широкополосные СВЧ аттенуаторы на основе ступенчатого фильтра гармоник и квазиполиномиального фильтра с введенными в них диссипативными потерями в виде микрополосковых пленочных резисторов.

4. Проведено экспериментальное исследование частотных свойств ряда разработанных СВЧ аттенуаторов, выполненных на основе фильтра гармоник с диссипативными потерями.

5. Предложены новые схемотехнические решения и разработаны экспериментальные образцы отдельных звеньев многокаскадных СВЧ аттенуаторов большой мощности на основе фильтровых структур с диссипативными потерями, обеспечивающие работу в полосе частот 0-4 ГГц на уровнях мощности до 1 кВт.

6. Предложены новые схемотехнические решения и разработаны экспериментальные образцы отдельных звеньев многокаскадных СВЧ аттенуаторов большой мощности на основе фильтровых структур с диссипативными потерями, обеспечивающие работу в полосе частот 0-4 ГГц на уровнях мощности до 1 кВт.

**Практическая ценность и значимость.** Разработанные в диссертационной работе теоретические положения и экспериментальные результаты использованы при выполнении Госзадания в рамках проекта «Разработка теоретических основ построения измерительного оборудования для телекоммуникационных систем, содержащего мощные СВЧ-аттенюаторы, полосовые фильтры с заданными частотами режекции и микрополосковые печатные антенны». Шифр: 8.6847.2017/БЧ. Результаты данной работы применяются в учебном процессе на кафедре теоретических основ радиотехники ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет» при проведении курса «Проектное обучение». Проект № РЭФ-5-2018 – Разработка декомпозиционных моделей и эквивалентных схем для широкополосных СВЧ устройств большой мощности. Данный курс входит в рабочие программы, составленные в соответствии с Государственным образовательным стандартом третьего поколения по направлениям подготовки 11.03.01 – Радиотехника и 11.03.02 – Инфокоммуникационные технологии и системы связи.

Практической ценностью и значимостью обладают следующие результаты.

1. Разработаны топологии и экспериментально исследованы широкополосные СВЧ аттенюаторы на основе фильтровых структур с введенными диссипативными потерями в виде резистивных микрополосков.

2. Проведено определение погонного сопротивления, погонной проводимости и концентрации легирующей примеси в полупроводниковой подложке для разных значений вносимого ослабления СВЧ аттенюаторов, выполненных в виде неискажающей линии Хэвисайда с различным уровнем потерь.

3. Практически реализован и экспериментально исследован ряд СВЧ аттенюаторов на уровень поглощаемой мощности 200 Вт с диапазоном вносимых ослаблений 0,5-3,0 дБ, что позволило в пятикаскадной структуре обеспечить максимально допустимый уровень входной мощности 1 кВт.

4. Выполнено экспериментальное исследование температурных режимов пленочных микрополосковых резисторов, входящих в состав СВЧ аттенюаторов большой мощности.

5. Разработаны и защищены патентами РФ и свидетельствами о регистрации топологии СВЧ аттенюаторов с расширенной полосой рабочих частот.

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

1. Предложенные в работе схемотехнические и конструктивные решения для пленочного микрополоскового СВЧ аттенюатора на основе фильтра нижних частот за счет применения корректирующих индуктивностей обеспечивают независимую регулировку качества согласования и формы АЧХ для аттенюаторов на уровень входной мощности 50 – 100 Вт в диапазоне частот до 10 ГГц.

2. Предложенный метод расчета СВЧ аттенюатора на диапазон частот до 10 ГГц в виде неискажающей микрополосковой линии с потерями с использованием полупроводниковой подложки по заданной величине вносимого ослабления позволяет определить погонное сопротивление, погонную проводимость и концентрацию легирующей примеси подложки толщиной 0,5 – 1,0 мм.

3. Предложенный метод расчета аттенюаторов, выполненных на основе фильтра гармоник с диссипативными потерями, позволяет рассчитывать отдельные звенья многокаскадного аттенюатора на уровень рассеиваемой мощности 200 Вт с полосой рабочих частот до 4-6 ГГц и вносимым ослаблением от 0,2 до 3-5 дБ.

4. Использование предложенных методов построения согласованных СВЧ аттенюаторов на основе фильтровых структур с потерями позволяет реализовать многокаскадные аттенюаторы для работы с высокочастотными сигналами мощностью до 2 кВт в диапазоне до 4 ГГц и выше.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах:

1. Международной научно-технической конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения", Новосибирск, 2012, 2014, 2016, 2018 гг.

2. 16 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2015, республика Алтай, Эрлагол.

3. VII общероссийской научно-технической конференции "Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем" (СВЧ-2016), Омск, 2016 г.

4. Международной научной конференции "Специальные вопросы фотоники: Наука. Оборона. Безопасность», Новосибирск, 2016 г.

5. 18 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2017, республика Алтай, Эрлагол.

6. Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и специалистов, Санкт-Петербург, 2017 г.

7. Международной научно-практической конференции «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации» (Сагиновские чтения № 11), Караганда, 2019 г.

8. Российской научно-технической конференции «Современные проблемы телекоммуникаций», Новосибирск, 2016, 2019 гг.

**Реализация и внедрение результатов работы.** Работа выполнена в рамках проведения госбюджетных НИР (ЭП1-16,17,18) на кафедре «Общей физики» Новосибирского государственного технического университета. Результаты практического характера, полученные в диссертационной работе, внедрены в ООО «НПП Триада – ТВ» (Новосибирск), ООО «Альфа



Инструментс» (Новосибирск), ООО «ИТЦ» «Контур» (Новосибирск), НГТУ (Новосибирск).

**Личный вклад автора.** Изложенные в диссертации результаты исследований получены лично автором. По теме диссертации опубликовано три научных работы без соавторов. В результате работы с соавторами и обсуждения схмотехнических и конструктивных решений автор лично получил основные расчетные соотношения и оформил 3 заявки на патент на изобретение и 3 заявки на регистрацию топологий ИМС. Все экспериментальные исследования проведены лично автором.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано **28** научных работ: **3** статьи соответствуют перечню периодических изданий, рекомендуемых ВАК; **16** статей и докладов опубликованы в сборниках и материалах международных и Российских конференций. Получено **2** патента РФ на изобретение, **3** свидетельства о регистрации топологии. **7** докладов индексируются в Web of Science и Scopus.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка использованной литературы. Объём работы составляет 155 страниц машинописного текста, включая 102 рисунка и список литературы из 115 наименований.

### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность диссертационного исследования. Определены цели и задачи исследования.

В **первой главе** проведен аналитический обзор литературных источников и сделан сравнительный анализ известных методов построения широкополосных мощных СВЧ аттенюаторов - многоэлементного, дендритного, многокаскадного и многоканального.

**Вторая глава** посвящена исследованию и разработке широкополосных аттенюаторов, выполненных в сосредоточенном и распределенном элементном базисе, на основе фильтров нижних частот (ФНЧ) с диссипативными потерями.

Показано, что в ФНЧ с однородными потерями малая неравномерность АЧХ поддерживается при уровне вносимых ослаблений до 4 дБ. На рисунке 1 приведены графики АЧХ, из которых видно, что с увеличением вносимого ослабления резко возрастает неравномерность АЧХ. Поэтому при уровне вносимых ослаблений свыше 4 дБ в работе предложено ввести в ФНЧ диссипативные потери в виде согласованной П-образной структуры на пленочных резисторах.

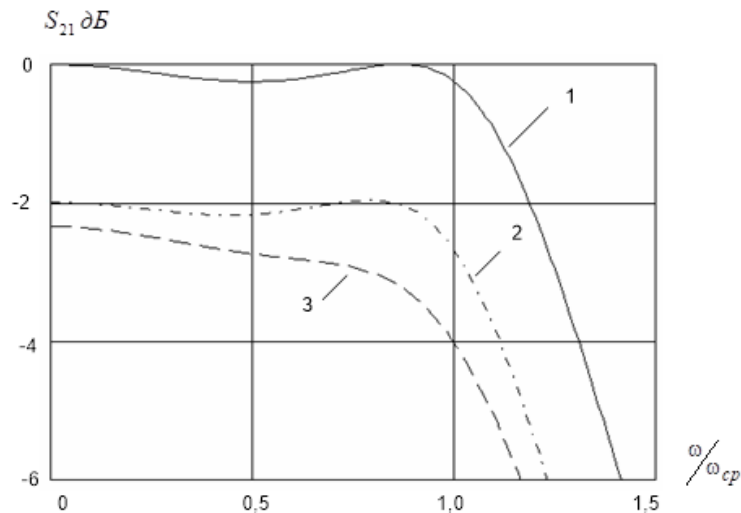


Рисунок 1 - ФНЧ с диссипативными потерями

В ходе исследований было установлено, что для области частот свыше 3-5 ГГц целесообразно использовать пленочные резисторы в виде резистивного микрополоска, волновое сопротивление которого соответствует 50-омной линии без потерь. Кроме того, **предложено** для обеспечения равномерности АЧХ в диапазоне вносимых ослаблений от 3 до 20 дБ необходимо последовательно с параллельными резисторами П-структуры включать корректирующие индуктивности, а на входе и выходе – согласующие индуктивности, как показано на рисунке 2. Описываемый аттенюатор обеспечивает рассеяние СВЧ мощности до 200 Вт на подложке из керамики ВеО толщиной 4 мм.

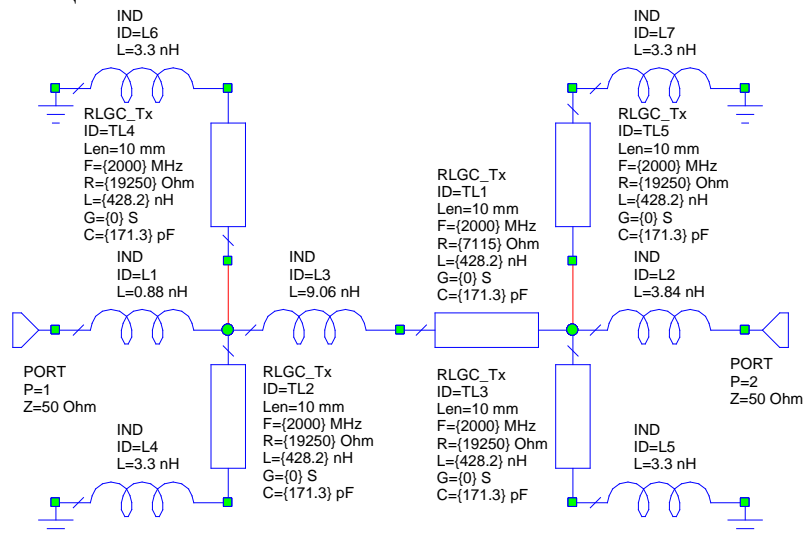


Рисунок 2 - Мощный СВЧ аттенюатор 10 дБ на линиях передачи с потерями

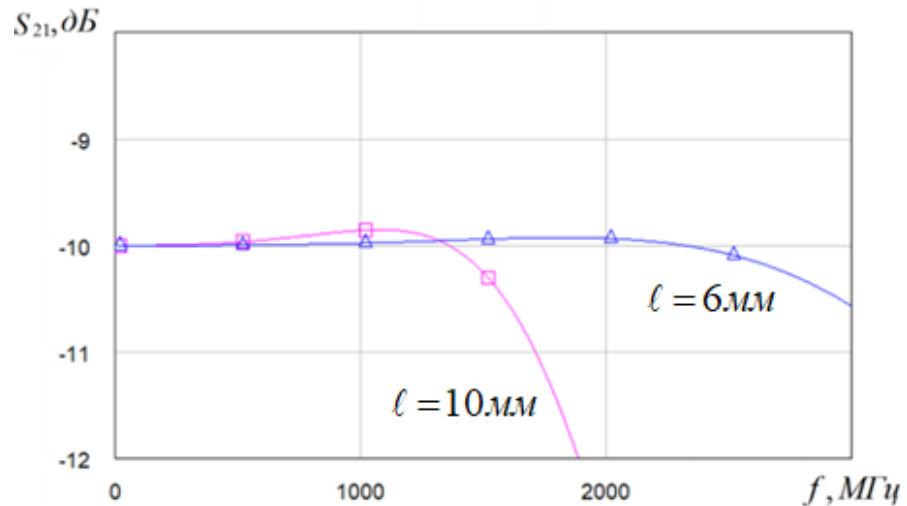


Рисунок 3 – АЧХ аттенюатора 10 дБ на линиях с потерями (длина 10 мм и 6 мм)

При уменьшении длины пленочного резистора (микрополосковой линии с потерями) от 10 мм до 6 мм уровень входной допустимой СВЧ мощности снижается в 1,5 раза и соответственно во столько же раз увеличивается полоса рабочих частот. Для работы в области частот до 10 ГГц и выше рекомендовано использовать диэлектрическую подложку из поликора толщиной 1 мм. Для получения малой неравномерности АЧХ порядка 0,1 дБ и высокого качества согласования ( $VSWR < 1,2$ ) была выполнена оптимизация с помощью симплексного метода. В качестве целевой функции использовалось наибольшее значение  $VSWR$  в заданной полосе частот.

Также во второй главе предложен еще один метод построения микрополосковых аттенюаторов, в котором резистивный микрополосок расположен на подложке из слабо легированного полупроводника, в котором обеспечивается требуемый уровень диэлектрических потерь. За счет введения найденного значения концентрации примеси и за счет выбора ширины резистивного микрополоска, соответствующей волновому сопротивлению идеальной линии 50 Ом при отсутствии потерь, выполняется условие Хэвисайда для любого значения вносимого ослабления. Результаты расчета частотной зависимости  $VSWR$  аттенюатора на полупроводниковой подложке из слаболегированного кремния толщиной 1 мм, представлен на рисунке 4. Теоретический анализ показывает, что неискажающая линия Хэвисайда теоретически идеально согласована на всех частотах. Это позволяет использовать её в качестве сверхширокополосного аттенюатора с любым требуемым значением вносимого ослабления.

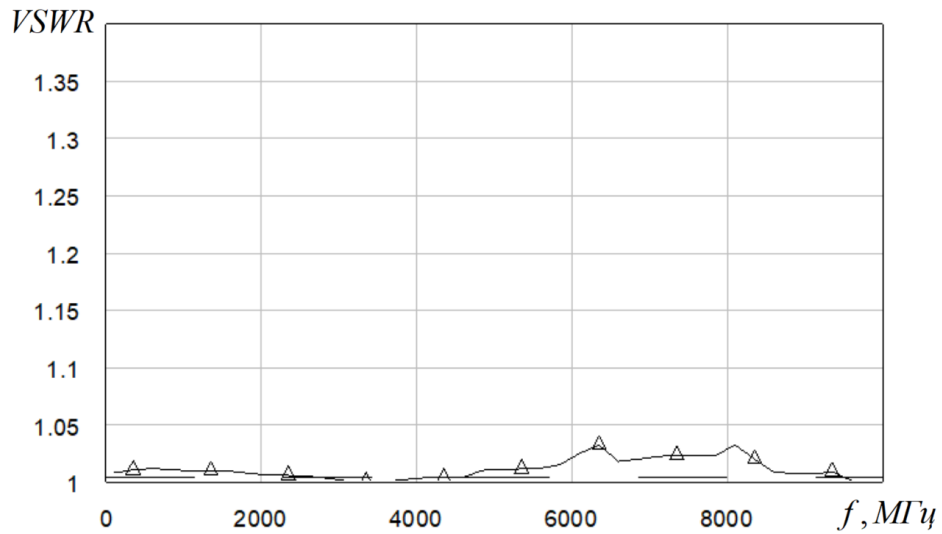


Рисунок 4 - Частотная зависимость VSWR аттенюатора на полупроводниковой подложке

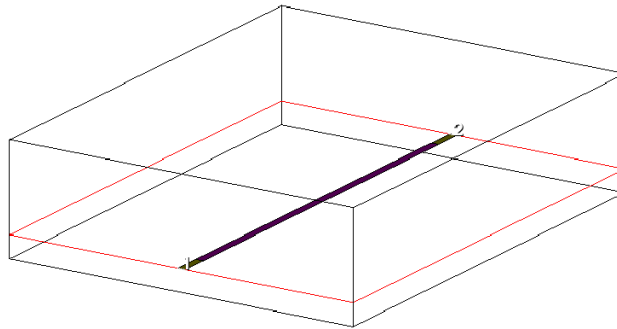


Рисунок 5 – 3D-модель аттенюатора на полупроводниковой подложке

Учитывая, что для легированного полупроводника  $p$  – типа удельная проводимость равна  $\sigma_p = q\mu_p N_a$ , получено выражение для концентрации легирующей примеси акцепторного типа  $N_a$  в следующем виде

$$N_a = \frac{G' \cdot w}{q \cdot h \cdot \mu_p}, \quad (1)$$

где  $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$  (кулон) – величина элементарного заряда;  $h$  - толщина диэлектрической подложки;  $\mu_p$  - подвижность дырки в кремнии, равная  $\mu_p = 0,048 \frac{\text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$ ,  $G' = \frac{\sigma_p \cdot w}{h}$  - погонная проводимость подложки.

Для резистивного микрополоска длиной  $\ell$  и шириной  $w$  определена эффективная погонная проводимость подложки, учитывающая не симметричную конструкцию микрополосковой линии передачи

$$G'_e = \frac{1}{R_p \cdot \ell} = \frac{\sigma_p w}{\int_0^h \frac{dx}{(1 + 2x/h)}}, \quad (2)$$

где  $R_p = 1/G_p = 1/(G'_e \cdot l)$  - сопротивление полупроводниковой подложки относительно её толщины  $h$  для площади электродов  $w \times \ell$ .

Выражение для погонной проводимости диэлектрической подложки с учетом (2) определяется соотношением:

$$G' = 0,5G'_e \ln(3) \quad (3)$$

С учетом условия Хэвисайда для неискажающей линии выражение для погонного сопротивления резистивного микрополоска имеет вид

$$R' = G'_e R^2, \quad (4)$$

где  $R$ - входное сопротивление аттенюатора.

Рассчитанные по соотношениям (3-4) значения  $R'$  и  $G'$  были использованы в качестве характеристик материала полупроводниковой подложки при численном электродинамическом моделировании. Для заданной величины коэффициента передачи аттенюатора  $|S_{21}|$  получено соотношение для расчета требуемой величины погонного сопротивления резистивного микрополоска

$$R' = \frac{R \cdot \ln(1/|S_{21}|)}{\ell}. \quad (5)$$

В заключении второй главы предложены схемотехнические решения для построения корректоров АЧХ на основе микрополосковой резистивной линии с потерями.

**В третьей главе** за основу построения мощных широкополосных СВЧ аттенюаторов предложено использовать структуры в виде квазиполиномиальных фильтров с диссипативными потерями. Исходная схема квазиполиномиального фильтра на сосредоточенных элементах приведена на рисунке 6. Целесообразность применения данной структуры обусловлена использованием только параллельно включенных емкостей, которые замещаются паразитными емкостями пленочных резисторов. После введения диссипативных потерь схема рисунок 6 преобразуется к виду, показанному на рисунке 7. Топология аттенюатора 10 дБ в микрополосковом исполнении, полученная на основе схемы рисунок 7, приведена на рисунке 8.

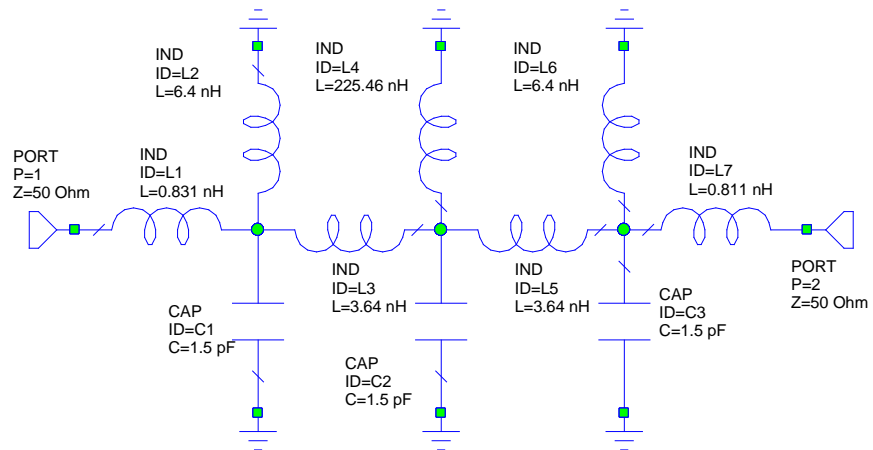


Рисунок 6 – Квазиполиномиальный полосовой фильтр третьего порядка

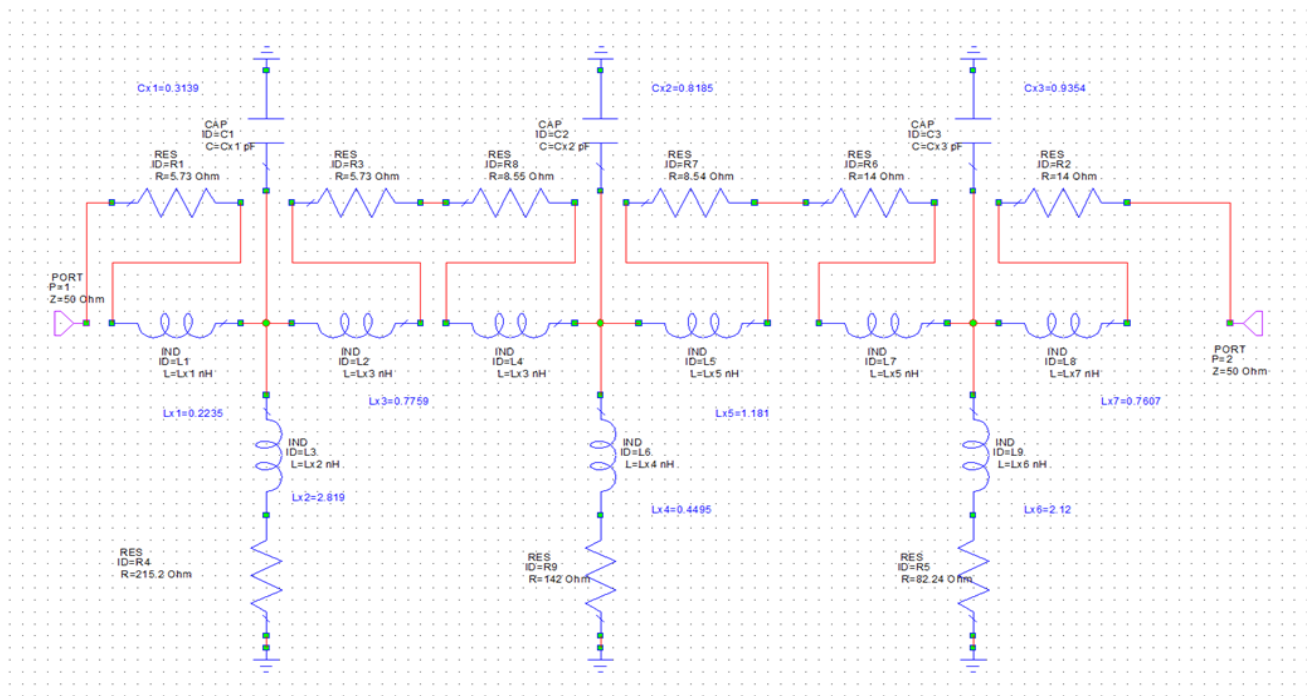


Рисунок 7 – Эквивалентная схема аттенюатора 10 дБ на основе квазиполиномиального фильтра третьего порядка с потерями

Далее на заключительном этапе синтеза было выполнено численное электромагнитное моделирование и покаскадная оптимизация топологии аттенюатора 10 дБ на одной общей подложке ВеО с габаритными размерами 20x20x4 мм. Для расширения полосы рабочих частот было предложено использовать микрополосковые резисторы трапецидальной формы, включенные параллельно. Графики АЧХ и VSWR приведены на рисунках 9.

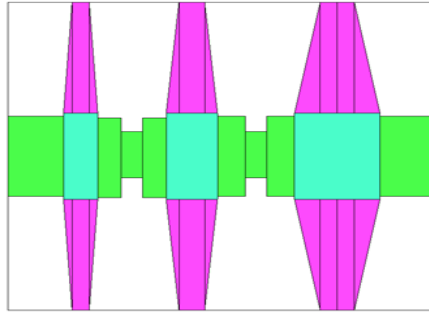


Рисунок 8 - Топология attenuатора 10 дБ на основе квазиполиномиального фильтра с потерями

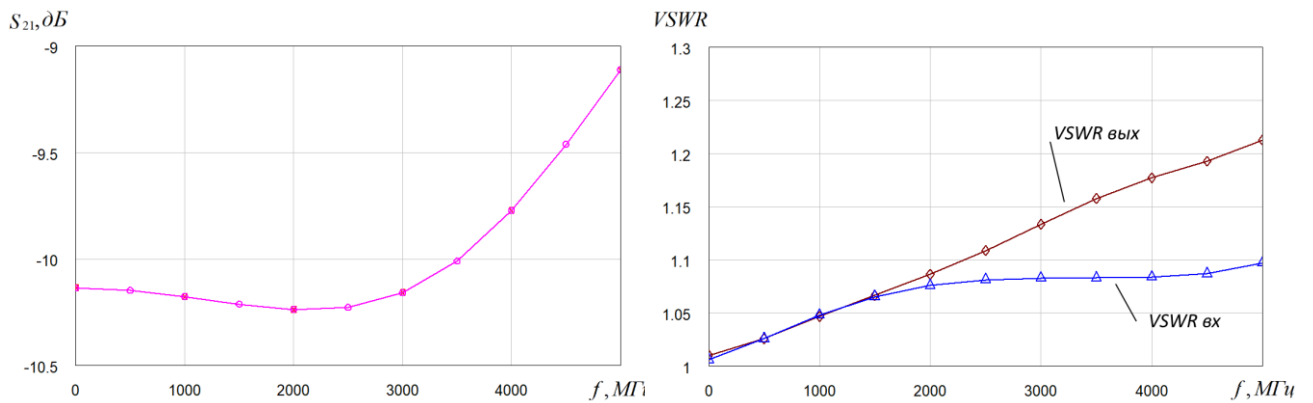


Рисунок 9 – АЧХ и VSWR attenuатора 10 дБ с микрополосковыми резисторами трапецеидальной формы

По результатам проведенного в данной главе исследования attenuаторов, выполненных на основе квазиполиномиальных фильтров с введенными диссипативными потерями, сформулировано следующее положение. При значительных диссипативных потерях в квазиполиномиальном фильтре обеспечивается согласование на нулевой частоте и происходит трансформация полосовой формы АЧХ в характеристику ФНЧ, что проиллюстрировано на рисунке 10.

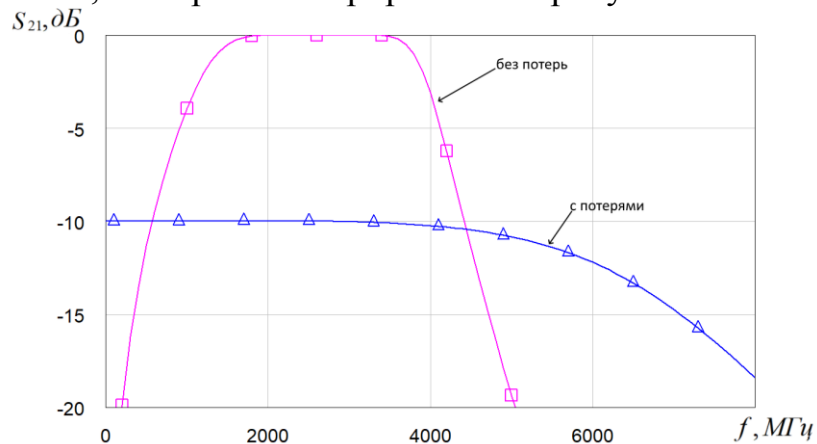


Рисунок 10 – Влияние диссипативных потерь на АЧХ квазиполиномиального фильтра

В четвертой главе предложен метод построения аттенюаторов с использованием фильтра гармоник с большим уровнем диссипативных потерь. Обоснована и составлена эквивалентная схема аттенюатора (рисунок 11) в сосредоточенном элементном базисе для области нижних частот.

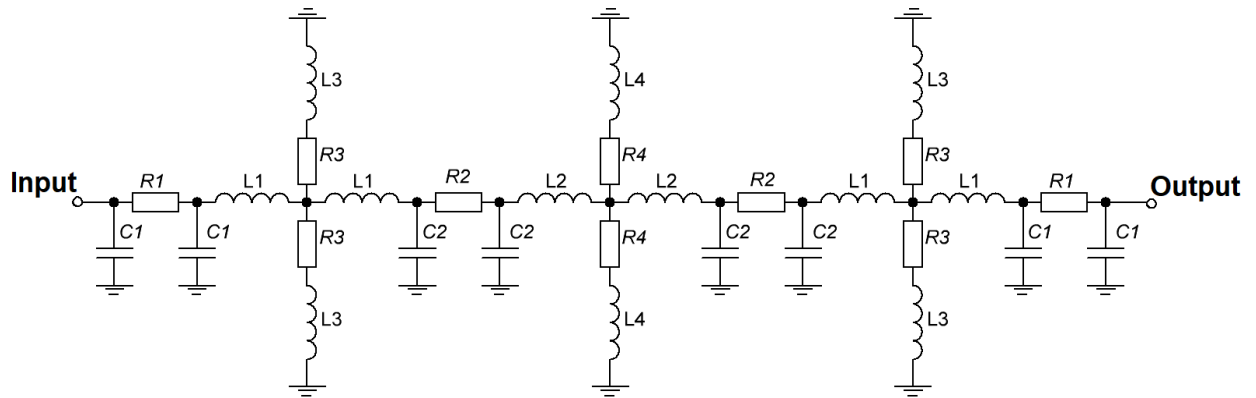


Рисунок 11 - Эквивалентная схема аттенюатора на основе фильтра гармоник

3D-модель микрополоскового аттенюатора 1,2 дБ на основе фильтра гармоник седьмого порядка с полосой рабочих частот до 6 ГГц, разработанная по эквивалентной схеме рисунок 11, представлена на рисунке 12. Частотные характеристики аттенюатора приведены на рис. 13.

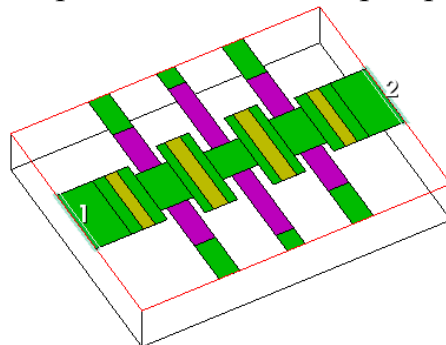


Рисунок 12 - 3D-модель аттенюатора 1,2 дБ с симметрично расположенными резистивными шлейфами

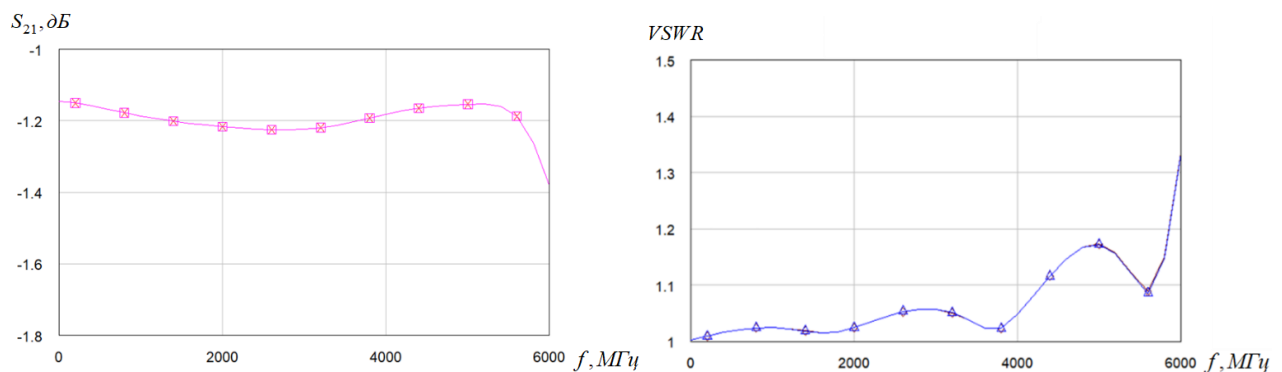


Рисунок 13 - Частотные характеристики аттенюатора 1,2 дБ



Также в четвертой главе приведены результаты моделирования частотных характеристик аттенуаторов на основе фильтров гармоник со следующими значениями вносимого ослабления: 0,45; 0,65; 1,0; 1,2; 1,8; 3,0 и 10 дБ. Кроме того, было проведено численное электродинамическое моделирование каскадного включения нескольких таких аттенуаторов с возрастающим уровнем вносимого ослабления для обеспечения допустимого уровня входной мощности до 1 кВт. Топология описываемого аттенуатора с суммарным вносимым ослаблением представлена на рисунке 14.

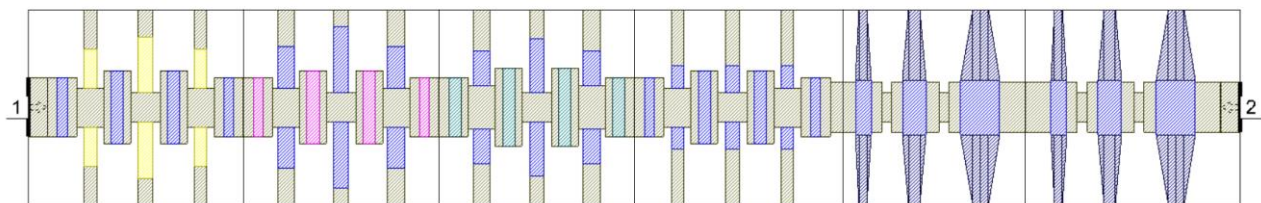


Рисунок 14 – Топология шестикаскадного аттенуатора

Таким образом, предложенная в данной главе эквивалентная схема фильтра гармоник с резистивными вставками на сосредоточенных элементах позволяет для любого уровня мощности определить первоначальную топологию аттенуатора и провести численное электродинамическое моделирование и оптимизацию его частотных характеристик.

В **пятой главе** приведены результаты экспериментальных исследований разработанных СВЧ аттенуаторов. Проведена оценка соответствия результатов компьютерного моделирования и экспериментальных измерений.

В соответствии с разработанной топологией (рисунок 12), был изготовлен экспериментальный образец аттенуатора 1,2 дБ, выполненного на диэлектрической подложке из бериллиевой керамики BeO с габаритными размерами  $20 \times 20 \times 4$  мм<sup>3</sup> (рисунок 15).

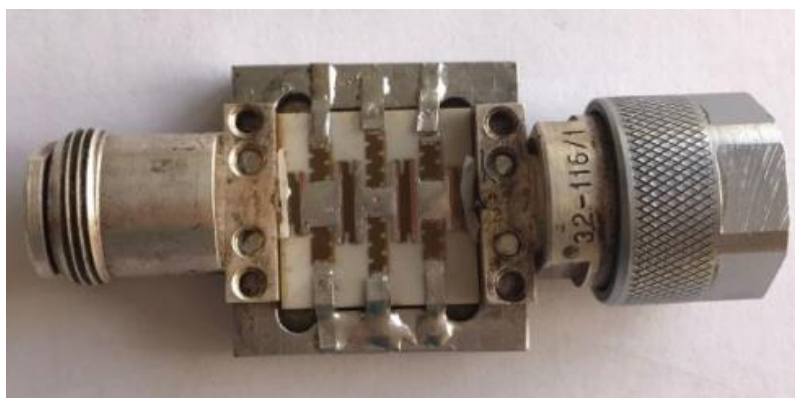


Рисунок 15 - Фотография конструкции аттенуатора 1,2 дБ (200 Вт)

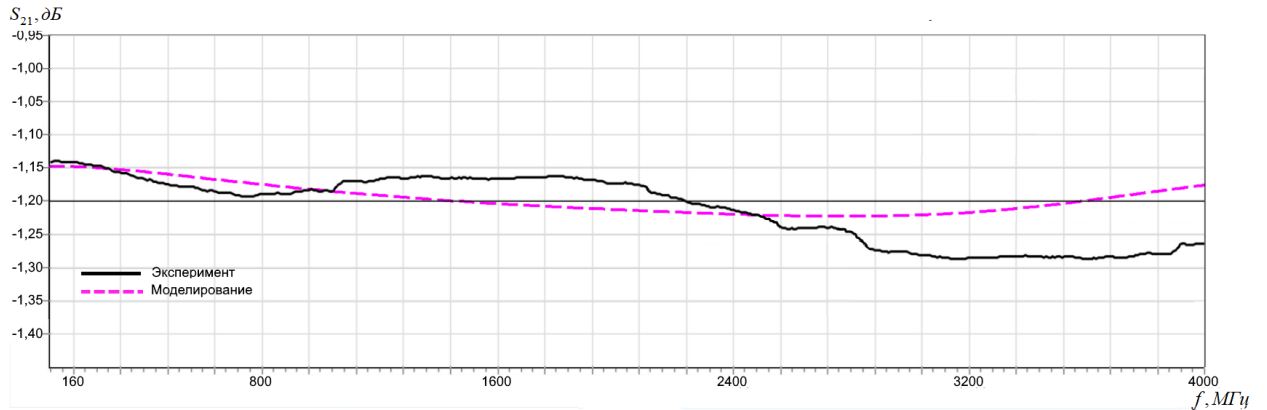


Рисунок 16 – АЧХ аттенюатора 1,2 дБ

Результаты измерения коэффициента передачи экспериментального образца аттенюатора 1,2 дБ на уровень входной мощности 200 Вт приведены на рисунке 16.

В данной главе также было выполнено экспериментальное исследование и измерение распределения температурного поля трехэлементной СВЧ нагрузки на уровень мощности 600 Вт без принудительного воздушного обдува, предназначенной для работы в полосе частот до 1 ГГц. Картина распределения теплового поля приведена на рисунке 17.

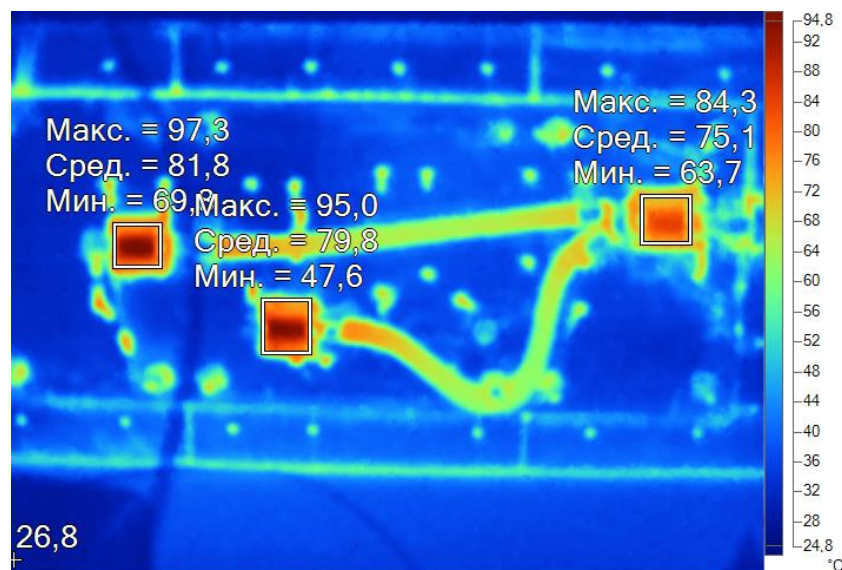


Рисунок 17 - Температурное поле трёхэлементной нагрузки 600 Вт

Проведенные исследования подтвердили, что разработанная конструктивно-технологическая реализация многоэлементных нагрузок и аттенюаторов обеспечивает при уровне входной мощности 600 Вт температуру нагрева пленочных резисторов не более 100°C. Такое значение температуры обеспечивает длительный режим эксплуатации в непрерывном режиме входного СВЧ сигнала.

### **Основные выводы и результаты работы**

1. Как показало проведенное исследование, наиболее перспективным методом расширения полосы рабочих частот микрополосковых пленочных СВЧ аттенуаторов является их реализация на основе фильтров нижних частот и полосовых фильтров с большими диссипативными потерями. В этом случае паразитные реактивные параметры пленочных резисторов замещают соответствующие реактивности фильтров и не требуются внешние согласующие цепи.

2. Разработка аттенуаторов на основе фильтровых структур с диссипативными потерями включает в себя формирование первоначального облика путем составления эквивалентной схемы на сосредоточенных элементах, раскрывающей физическую сущность электромагнитных процессов в планарных пленочных резисторах. На следующем этапе осуществляется переход к распределенной структуре с последующим схемотехническим анализом и численным электродинамическим моделированием с помощью компьютерных САПР. Такой подход позволяет осуществить настройку и оптимизацию параметров сложных многоэлементных и многокаскадных аттенуаторов, выполненных по микрополосковой технологии.

3. В работе показано что, для построения аттенуаторов применимы фильтры нижних частот, квазиполиномиальные фильтры и фильтры гармоник с большими диссипативными потерями. Установлено, что намеренное введение диссипативных потерь в указанные выше типы полосовых фильтров приводит к расширению полосы пропускания и обеспечению согласования на нулевой частоте, в результате чего происходит трансформации АЧХ к характеристике, по форме соответствующей фильтру нижних частот. При работе в области частот свыше 5 ГГц целесообразно применять последовательно включенные пленочные резисторы в виде микрополосковой линии передачи, волновое сопротивление которой соответствует значению 50 Ом при отсутствии потерь. При этом для обеспечения режима качественного согласования в области низких частот такого аттенуатора следует использовать дискретное включение параллельных резисторов. При работе в области частот свыше 10 ГГц предложено использовать полупроводниковую подложку для пленочных резисторов с указанным уровнем концентрации легирующей примеси.

4. Предложенные в данной работе широкополосные согласованные СВЧ аттенуаторы с большим вносимым ослаблением, выполненные на основе квазиполиномиальных фильтров, позволяют обеспечить допустимый уровень входной мощности 200 Вт в полосе рабочих частот 0 – 5 ГГц. Использование резистивных микрополосков клиновидной формы в структуре распределенного квазиполиномиального фильтра, позволило получить неравномерность АЧХ не более 1 дБ в указанной выше полосе частот.

5. Разработанные эквивалентные схемы фильтров гармоник с резистивными вставками на сосредоточенных элементах для области низких частот позволяют для любого уровня мощности определить первоначальную структуру в виде микрополосковой топологии аттенюатора и провести оптимизацию его частотных характеристик.

6. На основе структуры микрополоскового фильтра гармоник с введенными потерями в виде последовательных и параллельно включенных резистивных вставок в диссертации разработаны фиксированные аттенюаторы для следующих значений вносимого ослабления: 0,45; 0,65; 1,0; 1,2; 1,8; 3,0 и 10 дБ. Этот набор аттенюаторов позволяет реализовать многокаскадный аттенюатор с уровнем входной мощности до 2 кВт с полосой рабочих частот до 5 ГГц.

7. Экспериментальное исследование АЧХ и частотной зависимости VSWR основных блоков, разработанных в диссертации для серийно выпускаемых аттенюаторов на уровень входной СВЧ мощности до 2 кВт, качественно и количественно соответствует результатам расчета и проведенного компьютерного моделирования в демонстрационной версии САПР MWO.

8. Таким образом, предложенный в работе метод построения широкополосных СВЧ аттенюаторов большой мощности выполненных на основе фильтровых структур с диссипативными потерями, позволил получить существенное улучшение технических характеристик по сравнению с известными отечественными и зарубежными аналогами.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Журналы, рекомендованные ВАК РФ**

1. Столяренко А.А. Моделирование 50/75 Ом трансформатора с потерями в полосе 1,3 ГГц, на мощность 50Вт / А.А. Столяренко, М.Г. Рубанович, К.Я. Аубакиров, В.А. Хрусталева // Вопросы радиоэлектроники. Серия общетехническая. – 2015. – № 5. – С. 132–138.

2. Столяренко А.А. Использование метода конечных элементов для расчёта парциального распределения ёмкости микрополосковой линии / П.Г. Богомолов, Д.В. Вагин, М.Г. Рубанович, В.А. Хрусталева, А.А. Столяренко // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2014. – № 3 (33). – С. 75–81.

3. Столяренко А.А. Плёночные СВЧ аттенюаторы на основе фильтровых структур с диссипативными потерями / А.С. Митьков, А.А. Столяренко, М.Г. Рубанович // Вопросы радиоэлектроники. 2019. № 4. – С. 84-89.

### **Издания цитируемые в WoS и Scopus**

4. A. Stolyarenko Simulation of 50 to 75  $\Omega$  impedance transformer with losses in the frequency band up to 3.5 GHz for a 50 W input power / A.A. Stolyarenko, M.G. Rubanovish, V.P. Razinkin, V.A. Khrustalyov, K.Y. Aubakirov

// 16 International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM) : [proc.], Altai, Erlagol, 29 June – 3 July 2015. – IEEE, 2015. – P. 183 – 185.

5. Stolyarenko A. Broadband microwave attenuator of the higher lever power / M.G. Rubanovich, V.P. Razinkin, V. A. Khrustalev, G.G. Nikolaev, A.A. Stolyarenko, K.J. Aubakirov // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2014): тр. 12 междунар. конф., Новосибирск, 2–4 окт. 2014 г. : в 7 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. – Т. 1. – С. 390-392.

6. Stolyarenko A. Broadband microwave attenuators of the high level power / M.G. Rubanovich, V.P. Razinkin, V.A. Khrustalev, G.G. Nikolayev, A.A. Stolyarenko, K.J. Aubakirov // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2014): тр. 12 междунар. конф., Новосибирск, 2–4 окт. 2014 г. : в 7 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. – Т. 4. – С. 209-211.

7. Stolyarenko A. Elliptic filters with quarter-wave coupling / V.P. Razinkin, A.D. Mektiev, K.J. Aubakirov, A.G. Vihorev, A.A. Stolyarenko // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2014): тр. 12 междунар. конф., Новосибирск, 2–4 окт. 2014 г. : в 7 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. – Т. 4. – С. 206-208.

8. A. Stolyarenko Analysis of the transverse distribution of the microstripline capacitance / M. G. Rubanovich, A. A. Stolyarenko, V. A. Khrustalev, D. V. Vagin, A. S. Mitkov, K. Y. Aubakirov // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2016): тр. 13 междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск, 3–6 окт. 2016 г. : в 12 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – Т. 1, ч. 1. – С. 52–55.

9. Stolyarenko A. Calculation of capacitance for planar capacitors / M.G. Rubanovich, A.A. Stolyarenko, V.A. Khrustalev, D.V. Vagin, A.S. Mitkov // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2016): тр. 13 междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск, 3–6 окт. 2016 г. : в 12 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – Т. 1, ч. 1. – С. 48-51.

10. Stolyarenko A. Matched band-pass UHF filter / Y.V. Vostryakov, M.G. Rubanovich, A. A. Stolyarenko, V.A. Khrustalev, D.V. Vagin, A.S. Mitkov, A.S. Polovnikov // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2016): тр. 13 междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск, 3–6 окт. 2016 г. : в 12 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – Т. 1, ч. 1. – С. 101-103.

11. Stolyarenko A. The microwave attenuator / M.G. Rubanovich, V.P. Razinkin, V.A. Khrustalev, A.A. Stolyarenko, P.G. Bogomolov, Y.V. Vostryakov // The 18 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2017 : proc., Altai, Erlagol, 29 June – 3 July 2017. – Novosibirsk : NSTU, 2017. – P. 134-137.

#### **Патенты**

12. Патент РФ №2641625 Н01 Р1/22 СВЧ аттенюатор / К.Я. Аубакиров, П.Г. Богомолов, Ю.В. Востряков, В.П. Разинкин, М.Г. Рубанович, А.А. Столяренко, В.А. Хрусталёв. Опубл. 18.01.18. Бюл. №2.

13. Патент РФ № 2667348 РФ: H01 P1/24 Микрополосковая нагрузка / Г.Г. Савенков, В.П. Разинкин, А.А. Столяренко, А.С. Митьков. – Опубл. 18.09.18. Бюл. № 26.

14. Свидетельство о регистрации топологии интегральной микросхемы №2015630078, Широкополосный трансформатор сопротивлений 50-75 Ом. К.Я. Аубакиров, М.Г. Рубанович, А.А. Столяренко, В.А. Хрусталеv. Правообладатель: НГТУ; заяв. 23.03.15; опуб. 21.07.15.

15. Свидетельство о регистрации топологии интегральной микросхемы №2017630054 «Широкополосный аттенюатор с входным сопротивлением 50 Ом и затуханием 1,2 дБ в полосе частот 5 ГГц. К.Я. Аубакиров, П.Г. Богомолов, А.С. Митьков, М.Г. Рубанович, А.А. Столяренко, В.А. Хрусталеv. Правообладатель: НГТУ; заяв. 29.06.16; опуб. 20.03.17.

16. Свидетельство о регистрации топологии интегральной микросхемы №2017630073 «Широкополосный аттенюатор с входным сопротивлением 50 Ом и затуханием 1,8 дБ в полосе частот 5 ГГц. К.Я. Аубакиров, П.Г. Богомолов, А.С. Митьков, М.Г. Рубанович, А.А. Столяренко, В.А. Хрусталеv. Правообладатель: НГТУ; заяв. 29.06.16; опуб. 14.02.17.

#### **Статьи в материалах международных и всероссийских конференций**

17. Stolyarenko A. Film attenuators new generation / M. Rubanovich, V. Khrustalev, K. Aubakirov, V. Razinkin, A. Stolyarenko, P. Bogomolov // American Journal of Scientific and Educational Research. – 2014. № 1 (4). – P. 634-647.

18. Столяренко А.А. Определение распределения ёмкости на микрополосковой линии методом конечных элементов / К.Я. Аубакиров, Д. В. Вагин, М. Г. Рубанович, А.А. Столяренко // Материалы XI международной конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2012", Новосибирск. 2012. – Т.2. – С.114-116.

19. Столяренко А.А. Определение распределения емкости в поперечном сечении полоскового волновода с воздушным заполнением / Рубанович М. Г., Столяренко А. А., Хрусталеv В. А. // Современные проблемы телекоммуникаций : материалы Рос. науч.-техн. конф., Новосибирск, 22–25 апр. 2014 г. – Новосибирск : Изд-во Сиб ГУТИ, 2015. – С. 754-756.

20. Столяренко А.А. Мощные СВЧ аттенюаторы для радиопередающей и телевизионной аппаратуры / А. А. Столяренко, М. Г. Рубанович, В. А. Хрусталеv, А. С. Митьков, Д. Ю. Волков // Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем : материалы 6 Общерос. науч.-техн. конф., Омск, 19–20 апр. 2016 г – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2016. – С. 337–344.

21. Столяренко А.А. Широкополосные пленочные аттенюаторы = Broadband film attenuators / К.Я. Аубакиров, А.В. Макеев, А.А. Столяренко, М.Г. Рубанович, В.А. Хрусталеv // Интерэкспо ГЕО-Сибирь – 2016 : 12 междунар. науч. конгр. и выставка. Специальные вопросы фотоники: Наука.

Оборона. Безопасность : междунар. науч. конф., Новосибирск, 18–22 апр. 2016 г. : сб. материалов. – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. – С. 38–41.

22. Столяренко А.А. Атенюатор на основе фильтра гармоник с диссипативными потерями / Столяренко А.А. // Современные проблемы телекоммуникаций : материалы Рос. науч.-техн. конф., Новосибирск, 21–22 апр. 2016 г. – Новосибирск : Изд-во Сиб ГУТИ, 2016. – С. 798-800.

23. Столяренко А.А. Широкополосные многокаскадные СВЧ аттенюаторы / П.Г. Богомолов, В.П. Разинкин, Г.Г. Савенков, А.А. Столяренко // Старт в будущее – 2017 : тр. 4 Всерос. науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов, Санкт-Петербург, 19 апр. 2017 г. – Санкт-Петербург : КБСМ, 2017. – С. 408–412.

24. Столяренко А.А. Параметрический синтез согласующих и компенсирующих цепей с учетом диссипативных потерь / Столяренко А.А. // Современные проблемы телекоммуникаций : материалы Рос. науч. – техн. конф., Новосибирск, 25-26 апр. 2019 г. – Новосибирск : Изд-во СибГУТИ, 2019. – С. 621-626.

25. Столяренко А.А. Новые структуры резистивных аттенюаторов в тонкопленочном исполнении = The new structures of thin-film attenuators / А. С. Митьков, А. А. Столяренко, А. А. Азарный // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2018): тр. 14 междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск, 2–6 окт. 2018 г. : в 8 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. – Т. 4. – С. 147–150.

26. Столяренко А.А. Широкополосный СВЧ аттенюатор 10 дБ большой мощности / А.А. Столяренко // Современные проблемы телекоммуникаций : материалы Рос. науч. – техн. конф., Новосибирск, 25-26 апр. 2019 г. – Новосибирск : Изд-во СибГУТИ, 2019. – С. 627-630.

27. Столяренко А.А. Амплитудно-частотные корректоры на микрополосковых линиях с потерями / А.А. Столяренко, В.П. Разинкин, В.А. Хрусталева // Современные проблемы телекоммуникаций : материалы Рос. науч. – техн. конф., Новосибирск, 25-26 апр. 2019 г. – Новосибирск : Изд-во СибГУТИ, 2019. – С. 631-635.

28. Столяренко А.А. Мощный СВЧ аттенюатор на основе ФНЧ с однородными потерями / А.А. Столяренко, М.Г. Рубанович, В.П. Разинкин // «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации» (Сагиновские чтения №11): труды международной науч. – техн. практ. конф., Караганда, 14-15 июня 2019 г. – Караганда : Изд-во КарГТУ, 2019. – С. 242-244.