

На правах рукописи



**Богомолов Павел Геннадьевич**

**МЕТОДЫ УВЕЛИЧЕНИЯ ПОЛОСЫ РАБОЧИХ ЧАСТОТ  
И УРОВНЯ ВХОДНОЙ МОЩНОСТИ В  
МНОГОКАСКАДНЫХ СВЧ АТТЕНЮАТОРАХ**

Специальность: 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Томск – 2016 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ).

Научный руководитель: Рубанович Михаил Григорьевич,  
доктор технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный  
технический университет», г. Новосибирск

Официальные оппоненты: Носков Михаил Федорович,  
доктор технических наук, профессор,  
Саяно-Шушенский филиал Федерального  
государственного автономного образовательного  
учреждения высшего образования «Сибирский  
федеральный университет», г. Саяногорск

Абросимов Артём Александрович, кандидат  
технических наук, ведущий инженер, ООО «Научно  
производственное предприятие Триада-ТВ»,  
г. Новосибирск

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие  
«Сибирский государственный ордена Трудового  
Красного Знамени научно-исследовательский  
институт метрологии», г. Новосибирск

Защита состоится «20» декабря 2016 г. в 11-30 часов на заседании диссертационного совета Д212.268.01 при Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники по адресу 634050, г. Томск, пр. Ленина 40, ауд. 201

С диссертацией можно ознакомиться на сайте <https://tusun.ru/ru/nauka-i-innovatsii/podgotovka-kadrov-vysshey-nauchnoy-kvalifikatsii/ob-yavleniya-o-zaschitah-dissertatsiy/dissertatsiya-metody-uvelicheniya-polosy-rabochih-chastot-i-urovnya-vhodnoy-moschnosti-v-mnogokaskadnyh-svch-attenyuatorah> и в библиотеке Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники по адресу: 634045, г. Томск, ул. Красноармейская, 146.

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

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д.212. 268.01  
доктор физико-математических наук,  
профессор



А.Е. Мандель

## **Общая характеристика работы**

Работа посвящена разработке и исследованию мощных многокаскадных СВЧ аттенюаторов с широкой полосой рабочих частот на планарных плёночных резистивных элементах. Обоснованы и выбраны методы расширения полосы рабочих частот и повышения уровня мощности. Предложены новые схемотехнические и конструктивные решения. Проведено исследование частотных свойств согласующих цепей с учетом диссипативных потерь. Проведено 3D электромагнитное моделирование на основе разработанных первоначальных структур многокаскадных СВЧ аттенюаторов и разработаны их экспериментальные конструкции.

## **Актуальность работы**

Для радиопередающих устройств СВЧ диапазона, применяемых в цифровых телекоммуникациях, системах связи и радиолокации необходимы широкополосные аттенюаторы высокого уровня мощности. Всё более высокие требования к радиоэлектронным системам стимулируют создание новых методов построения и проектирования СВЧ устройств различного назначения, в том числе с диссипативными потерями. Для этого необходимо совершенствование существующих структурных, схемотехнических и конструктивно-технологических решений для широкополосных СВЧ аттенюаторов на основе методик автоматизированного (компьютерного) проектирования, позволяющего, в том числе и с помощью методов оптимизации, решить актуальные задачи.

В настоящее время для построения мощных широкополосных аттенюаторов и нагрузок используют волноводные, коаксиальные и микрополосковые плёночные технологии. Как показывает анализ существующих типов аттенюаторов, наиболее перспективной технологией для их реализации является использование микрополосковых резисторов в пленочном исполнении, которые будем называть планарными пленочными резисторами. В настоящее время необходимы аттенюаторы и оконечные согласованные нагрузки, способные рассеивать в рабочем режиме мощность до нескольких киловатт. На высоких уровнях рассеиваемой СВЧ мощности планарные плёночные резисторы имеют ряд преимуществ в конструктивном и технологическом плане. Планарные плёночные резисторы позволяют реализовать согласованные нагрузки и аттенюаторы, предназначенные для работы в сверхширокой полосе частот. При этом широкополосные нагрузки малой и средней мощности в ряде случаев реализуются в виде линии передачи значительной длины с существенными диссипативными потерями.

Несмотря на простоту конструкции для одноэлементного варианта построения нагрузки, существует ряд ограничений по рассеиваемой мощности и полосе рабочих частот. Многоэлементное, в том числе дендритное (древовидное) включение диссипативных элементов, позволяет повысить рассеиваемую мощность. Более высокие параметры по полосе рабочих частот для пленочных

оконечных нагрузок и аттенюаторов высокого уровня мощности, на наш взгляд, обеспечивают многокаскадные структуры, выполненные на согласованных по входу и выходу звеньях. Однако для таких структур не решены вопросы обеспечения равномерного распределения рассеиваемой СВЧ мощности по каскадам и резистивным элементам. Имеются нерешенные вопросы, связанные с обоснованием выбора согласующих цепей по входу и выходу, а также между каскадами.

Существующие методы проектирования нагрузок и математические модели планарных пленочных резисторов используют одномерное упрощённое описание микрополосковой линии передачи, вследствие чего результаты теоретического анализа значительно отличаются от экспериментальных результатов. Следует отметить, что конкретные методы получения равномерных амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) вносимого затухания в многоэлементных и многокаскадных мощных СВЧ аттенюаторах в технической литературе не описаны в достаточном объеме. Исходя из этого, следует, что существует необходимость в модификации известных и создание новых методов построения СВЧ аттенюаторов на планарных пленочных резисторах, методов расчёта согласующих звеньев. Многие отечественные ученые, такие как В.П. Мещанов, М.В. Давидович, Н.Ф. Попова, А.А. Яшин, В.Д. Садков, Е.П. Васильев, Д.А. Кабанов, Н.Д. Малютин, А.Н. Сычёв, В.П. Кисмерешкин, Б.А. Беляев, А.А. Лексиков, М.А. Евдокимов, С.Н. Григорьев, Ю.Н. Антонов, а также зарубежные ученые J. Peeters, J.H. Thompson, V.D. Stankovic внесли значительный вклад в разработку и создание методов построения широкополосных СВЧ цепей и устройств с диссипативными потерями.

На частотные свойства планарных пленочных резисторов существенное влияние оказывают их паразитные параметры. В известных одномерных методах расчёта частотные параметры и характеристики определяются с низкой точностью. Более высокую точность обеспечивает применение компьютерных программ и САПР с численным электродинамическим моделированием, например, Microwave Office или CST Studio Suite. С помощью этих программ можно провести адекватное моделирование частотных свойств поглощающих устройств, аттенюаторов и плёночных резисторов с большой площадью поверхности (способных рассеять значительную СВЧ мощность). Однако данные программы позволяют анализировать и оптимизировать уже сформированные первоначальные структуры аттенюаторов и топологии планарных плёночных резисторов, электрические параметры которых в сосредоточенном элементном базисе описываются ёмкостями, индуктивностями и резисторами. Далее формируется общая структура аттенюатора, которая и является первоначальным приближением для последующего параметрического синтеза на основе методов численного электродинамического моделирования в компьютерных САПР.

Таким образом, разработка новых методов построения широкополосных мощных СВЧ аттенюаторов, выполненных на основе каскадно включенных

согласованных звеньев, содержащих планарные пленочные резисторы, является актуальной задачей.

### **Цель работы**

Основной целью работы является разработка и практическая реализация методов расширения полосы рабочих частот и увеличения уровня входной мощности в многокаскадных СВЧ аттенюаторах, выполненных на основе планарных пленочных резисторов.

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

1. Анализ существующих и обоснование новых многокаскадных структур при построении СВЧ аттенюатора для расширения полосы рабочих частот и увеличения уровня входной мощности. Обзор конструктивных, схемотехнических и технологических аспектов построения широкополосных СВЧ аттенюаторов высокого уровня мощности.

2. Разработка и обоснование первоначального облика для численного электродинамического моделирования многокаскадных аттенюаторов, выполненных на планарных пленочных СВЧ резисторах большой мощности.

3. Разработка схемотехнических и конструктивных решений для многокаскадных мощных широкополосных СВЧ аттенюаторов и оконечных нагрузок, выполненных на одинаковых (раздельных) диэлектрических подложках.

4. Численное электродинамическое моделирование частотных свойств СВЧ аттенюаторов и оконечных нагрузок, выполненных на планарных пленочных резисторах. Экспериментальное исследование многокаскадных СВЧ аттенюаторов.

### **Объект исследования**

Широкополосные многокаскадные СВЧ аттенюаторы большой мощности, выполненные на планарных пленочных резисторах.

### **Предмет исследования**

Методики расчёта и проектирования мощных многокаскадных СВЧ аттенюаторов, обеспечивающие полосу рабочих частот, близкую к предельно достижимому значению.

### **Методы исследования**

Перечисленные выше задачи решались с помощью теории функций комплексного переменного, аппарата матричного исчисления, теории дифференциальных уравнений в частных производных, теории рядов, асимптотических методов определения значений функций и интегралов, численных методов электродинамического моделирования и оптимизации. Так же

в данной работе используется теория линейных электрических цепей и теория фильтров. Создание и разработка опытных образцов мощных сверхширокополосных многокаскадных СВЧ аттенюаторов в микрополосковом исполнении, содержащих плёночные резисторы большой мощности, подтверждает достоверность полученных результатов.

### **Научная новизна**

1. Разработан метод увеличения уровня входной мощности и метод расширения полосы рабочих частот в плёночных СВЧ аттенюаторах на основе многокаскадных структур с равномерным распределением рассеиваемой мощности по всем каскадам, в которых согласующие цепи выполнены в виде чебышёвского фильтра нижних частот.

2. Предложено новое структурное построение многокаскадного аттенюатора в микрополосковом исполнении на одной диэлектрической подложке, обеспечивающее существенное расширение полосы рабочих частот за счет равномерного распределения рассеиваемой мощности на планарных плёночных резисторах.

3. Проведено теоретическое и экспериментальное исследование частотных свойств ряда разработанных многокаскадных СВЧ аттенюаторов и согласованных нагрузок высокого уровня мощности на планарных плёночных резисторах с использованием внутренних многокаскадных структур на каждой диэлектрической подложке.

4. Предложены новые схемотехнические решения для многокаскадных СВЧ аттенюаторов большой мощности и разработаны экспериментальные образцы, обеспечивающие работу в полосе частот 0-2 ГГц.

### **Практическая значимость работы**

1. Проведена теоретическая оценка широкополосных свойств многокаскадных СВЧ аттенюаторов и оконечных нагрузок, выполненных на основе планарных плёночных резисторов.

2. Установлена связь между основными параметрами СВЧ аттенюатора: входная мощность, полоса рабочих частот и количество согласованных каскадов с одинаковой рассеиваемой мощностью.

3. Разработаны новые оригинальные схемотехнические и конструктивные решения для многокаскадных СВЧ аттенюаторов, выполненных на одной и нескольких диэлектрических подложках.

4. Практически реализован и экспериментально исследован ряд СВЧ аттенюаторов высокого уровня мощности, выполненных по предложенным многокаскадным структурам.

## **Научные положения, выносимые на защиту**

1. Увеличение входной СВЧ мощности и расширение полосы рабочих частот в многокаскадных аттенуаторах обеспечивает применение согласованных звеньев с равномерным распределением рассеиваемой мощности, выполненных на разных диэлектрических подложках с использованием межкаскадных согласующих цепей в виде чебышёвского фильтра нижних частот.

2. При фиксированной мощности входного СВЧ сигнала расширение полосы рабочих частот обеспечивает каскадное включение нескольких звеньев, выполненных на одной диэлектрической подложке с равномерным распределением рассеиваемой мощности на планарных пленочных резисторах.

3. Получение полосы рабочих частот близкой к предельно достижимому значению достигается с помощью двойной каскадной структуры, выполненной в виде последовательно включенных согласованных звеньев, расположенных на разных диэлектрических подложках, каждая из которых содержит несколько каскадов.

4. Конструкции сверхширокополосных СВЧ аттенуаторов высокого уровня мощности, выполненные по многокаскадной структуре с равномерным распределением рассеиваемой мощности для систем связи и цифрового телевидения в полосе рабочих частот 0-2 ГГц.

## **Реализация и внедрение результатов исследований**

Работа выполнена в рамках проведения госбюджетных НИР на кафедре «Общей физики» Новосибирского государственного технического университета. Результаты практического характера, полученные в диссертационной работе, внедрены в ООО «Научно производственное предприятие Триада – ТВ» (Новосибирск), ЗАО «СТВ» (Новосибирск), ООО Инженерно-технический центр «Контур» (Новосибирск), ООО «Альфа Инструментс». Также результаты исследований используются в учебном процессе НГТУ и в научно-исследовательской работе студентов и магистров, обучающихся по направления подготовки 11.04.01 - Радиотехника и 11.04.02 – Инфокоммуникационные технологии и системы связи

## **Апробация работы**

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях и симпозиумах: Научно – техническая конференция молодых специалистов АО «НИИИП-НЗиК» (Новосибирск) 2013, 15<sup>th</sup> International conference of young specialists on Micro/nanotechnologies and electron devices, EDM (Республика Алтай, Эрлагол) 2014, II Всероссийская научно-техническая конференция «Системы связи и радионавигации» (Красноярск) 2015, Международная научно-техническая

конференция «Современные проблемы телекоммуникаций» (Новосибирск, СибГУТИ) 2016, III Всероссийская научно-техническая конференция «Системы связи и радионавигации» (Красноярск) 2016.

**Личный вклад автора.** Изложенные в диссертации результаты исследований получены лично автором. По теме диссертации опубликовано три научные работы без соавторов. На основании обсуждения с соавторами конструктивных и схемотехнических решений автор лично получил основные расчетные соотношения. Во втором и третьем разделах в формировании ряда идей участвовали соавторы соответствующих публикаций.

### **Публикации**

По материалам диссертации опубликовано 23 научные работы: 4 статьи соответствуют перечню периодических изданий, рекомендуемых ВАК; 10 статей и докладов опубликованы в сборниках и материалах международных и Российских конференций.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка использованной литературы. Объем работы составляет 148 страниц машинописного текста, включая 84 рисунка, 2 таблицы и список литературы из 104 наименований.

### **Краткое содержание работы**

**Во введении** показана актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследований, приведены защищаемые положения, представлена научная новизна и практическая значимость результатов, приведены сведения об апробации работы, публикациях и структуре диссертации.

**В первой главе** проведен аналитический обзор литературы, современного состояния и тенденций дальнейшего развития в области создания широкополосных СВЧ аттенюаторов и нагрузок высокого уровня мощности. Рассмотрены существующие в настоящее время методы построения многокаскадных СВЧ аттенюаторов различного типа. Описаны преимущества использования в качестве диссипативных элементов плёночных резистивных элементов, нанесенных на диэлектрическую подложку из бериллиевой керамики (BeO). Следует отметить, что бериллиевая керамика является хорошим СВЧ диэлектриком и обладает теплопроводностью, сопоставимой с теплопроводностью металлов. Такие резисторы называют планарными плёночными резисторами. В многоэлементных и многокаскадных аттенюаторах и нагрузках на планарных плёночных резисторах допустимая входная СВЧ мощность составляет несколько кВт. Однако в известной литературе отсутствует оценка теоретического ограничения по полосе рабочих частот для мощных СВЧ устройств с диссипативными потерями. На основе аналитического обзора



литературы в первой главе показано, что ведущей тенденцией в области создания мощных СВЧ аттенуаторов является обеспечение одновременного расширения полосы рабочих частот и увеличения уровня входной допустимой СВЧ мощности. При этом важными аспектами являются также получение малой частотной неравномерности вносимого затухания и качественного согласования, особенно для мощных СВЧ аттенуаторов, а также уменьшение массогабаритных показателей. Сделан вывод о том, что для обеспечения всех перечисленных выше технических характеристик одной из наиболее перспективных технологий является микрополосковая технология и использование планарных пленочных резисторов. В конце первой главы представлен обзор современных САПР для анализа и синтеза СВЧ устройств.

**Вторая глава** посвящена анализу одномерных и двумерных эквивалентных схем планарных пленочных резисторов в микрополосковом исполнении и методам построения широкополосных СВЧ аттенуаторов. Сформулированы основные пути совершенствования пленочных аттенуаторов и нагрузок. В метровом и дециметровом диапазоне длин волн для составления первоначального облика пленочных СВЧ аттенуаторов на практике чаще всего пользуются упрощенными методами анализа в виде одномерных моделей МПЛ с диссипативными потерями. На рисунке 1 представлена схема элементарной ячейки одномерной линии передачи с диссипативными потерями.

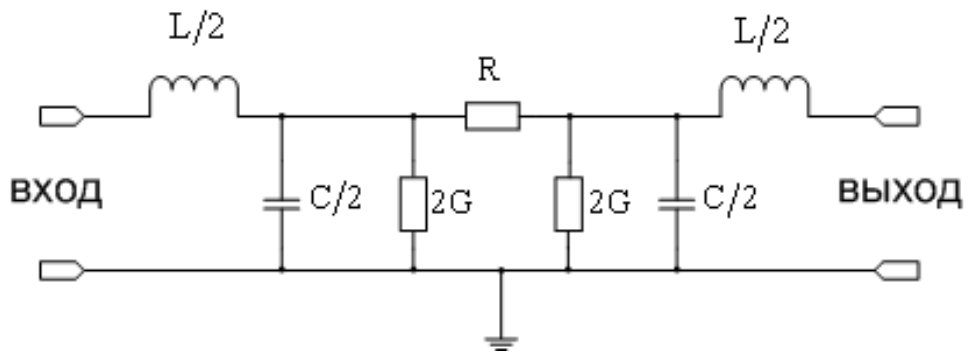


Рисунок 1 – Одномерная эквивалентная схема элементарной ячейки линии передачи

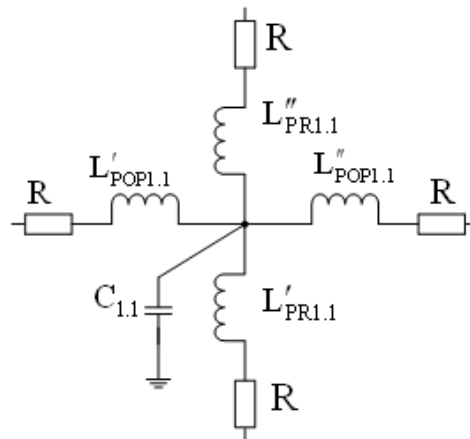


Рисунок 2 – Схема двумерной элементарной ячейки планарного плёночного резистора

Анализ эквивалентной схемы (см. рисунок 1) показывает, что она применима только для маломощных пленочных резисторов с небольшими габаритными размерами, в которых распределение СВЧ тока по поперечному сечению можно считать постоянным. Для описания мощных планарных резисторов с большими геометрическими размерами применяют двумерную модель. В соответствии с декомпозиционным подходом мощный резистор представляется в виде соответствующего включения большого числа элементарных двумерных ячеек. Эквивалентная схема двумерной элементарной ячейки показана на рисунке 2.

Двумерное описание планарного резистора позволяет найти парциальные распределения паразитной индуктивности и ёмкости по поперечному сечению резистивной пленки, которые обуславливают неравномерное распределение тока в поперечном сечении. В работе отмечается, что для описания планарного резистора мощностью 200 Вт достаточно использовать в поперечном сечении 5-10 элементарных двумерных ячеек.

Поскольку элементарные ячейки эквивалентных схем планарных пленочных резисторов содержат реактивные элементы, то для широкополосных аттенуаторов необходимы внешние согласующие цепи.

Для оценки предельно достижимой полосы рабочих частот согласующих цепей для аттенуатора воспользуемся интегральным соотношением Боде-Фано, определяющим теоретическое ограничение полосы согласования комплексных импедансов:

$$\int_0^{\infty} \ln \left| \frac{1}{S_{11}(j\omega)} \right| d\omega \leq \frac{\pi}{RC}, \quad (1)$$

где:  $S_{11}(j\omega)$  - комплексный коэффициент отражения на входе согласующей цепи;  $R$  – сопротивление нагрузки;  $C$  – входная емкость, подключенная параллельно нагрузке (емкость пленочного резистора)

Далее соотношение Бode-Фано (1) преобразуем к виду, в котором ёмкость (первый элемент согласующей цепи) нормируется, аналогично, как и в чебышёвском низкочастотном фильтре прототипе:

$$\alpha_F = C \cdot R \cdot \omega_s = \frac{\pi}{\int_0^{\infty} \ln \left| \frac{1}{S_{11}(\omega)} \right| d\omega}, \quad (2)$$

где:  $\omega_s$  - граничная частота.

С другой стороны, известно, что для полиномиального чебышевского фильтра первый элемент нормированного низкочастотного прототипа определяется соотношением:

$$\alpha_C = \frac{2 \sin\left(\frac{\pi}{2n}\right)}{\operatorname{sh} \left[ \frac{\ln \left( \operatorname{cth} \frac{h_d}{17,37} \right)}{2n} \right]}, \quad (3)$$

где  $h_d$  [дБ] - уровень пульсации АЧХ в полосе пропускания;  $n$  - порядок фильтра.

С помощью численного интегрирования по соотношению (2) и расчета по соотношению (3) были определены зависимости  $\alpha_F$  и  $\alpha_C$  от порядка цепи  $n$ , которые приведены на рисунке 3.

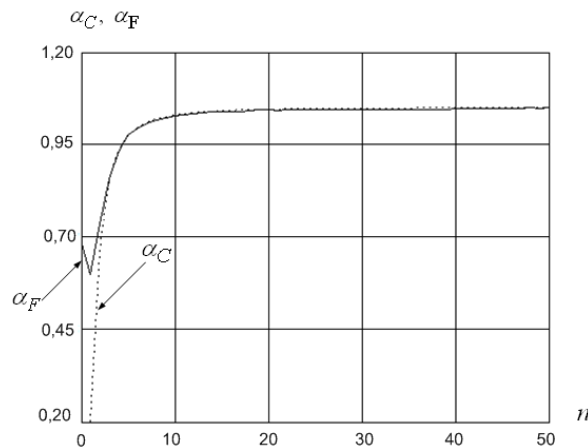


Рисунок 3 – Значения нормированных элементов  $\alpha_F$  и  $\alpha_C$  в зависимости от порядка цепи  $n$

Из анализа графиков, представленных на рисунке 3 следует, что идеальной согласующей цепью при  $n > 3$  является полиномиальный чебышевский фильтр бесконечно большого порядка. Поэтому данный вид частотно-избирательной цепи выбранного порядка в дальнейшем будет использован при разработке схемотехнических решений и согласующих цепей для многокаскадных аттенюаторов.

При практической реализации согласующих цепей обычно используют фильтры 3-5 порядка. Эффективность таких согласующих цепей определяется коэффициентом  $\eta(n)$ , значение которого зависит от порядка цепи

$$\eta(n) = \frac{\alpha_1(n)}{\alpha_1(n \rightarrow \infty)}. \quad (4)$$

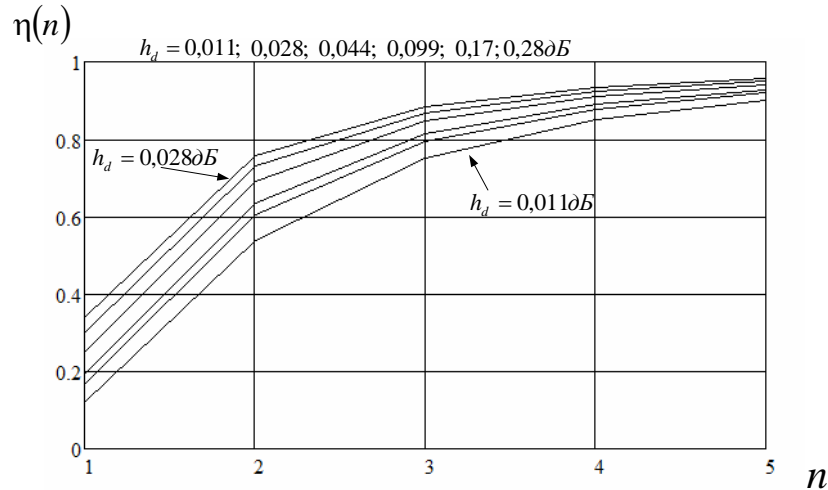


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента эффективности  $\eta(n)$  от порядка согласующей цепи  $n$

Используя соотношение (3) и определение (4) в работе получено аналитическое выражение для коэффициента  $\eta(n)$ , описывающего эффективность согласующей цепи в зависимости от ее порядка

$$\eta(n) = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2n}\right) \cdot \ln\left(\operatorname{cth}\left(\frac{h_d}{17,37}\right)\right)}{\pi \cdot \operatorname{sh}\left(\ln\left(\operatorname{cth}\left(\frac{h_d}{17,37}\right)\right)\right)}. \quad (5)$$

В соответствии с полученным выражением (5) были рассчитаны графики значений коэффициента  $\eta(n)$  для типовых величин  $h_d$ , которые приведены на рисунке 4.

На основе соотношения (5) и учета влияния диссипативных потерь ограничение Боде-Фано (1) для полосы рабочих частот  $\Delta\omega$  было преобразовано к виду:

$$\Delta\omega = \frac{\pi}{\ln\left(\frac{1}{|S_{11}|_{\max}}\right) RC \cdot K_p} \cdot \eta(n), \quad (6)$$

где  $|S_{11}|_{\max}$  - модуль максимального значения коэффициента отражения на выходе согласующей цепи в полосе ее пропускания  $K_p$  - коэффициент передачи по

мощности четырехполюсника с диссипативными потерями, включенного между комплексным импедансом и согласующей цепью.

Таким образом, полученное выражение (6) является уточненным ограничением Боден-Фано, в котором учтено влияние порядка согласующей цепи  $n$  и эффект развязки за счет влияния диссипативных потерь.

Далее во второй главе были рассмотрены многоэлементные и многокаскадные пленочные аттенюаторы. Описана конструктивная реализация одного из вариантов построения мощного пленочного аттенюатора на уровень входной мощности 100 Вт с вносимым затуханием 4 дБ, выполненного на диэлектрической подложке из бериллиевой керамики (BeO) толщиной 4 мм. В этом аттенюаторе резистивные пленки образуют симметричную согласованную Т-образную структуру. Для обеспечения максимального уровня входной допустимой СВЧ мощности первый резистор Т-структуры имеет максимальную площадь и представляет собой микрополосковую линию передачи с низким волновым сопротивлением. Средний резистор в описываемой Т-структуре для обеспечения симметрии топологии выполнен в виде двух параллельно включенных короткозамкнутых микрополосковых шлейфов с диссипативными потерями.

Для получения вносимых ослаблений менее 1 дБ при технологических ограничениях на поверхностное сопротивление  $\rho_s \leq (2 \div 4) \text{ Ом/кв. см}$  необходимо увеличивать ширину и уменьшать длину резистивной вставки. Поэтому были рассмотрены альтернативные структуры и топологии многоступенчатых аттенюаторов на основе фильтра гармоник с вынесенными диссипативными потерями в виде согласованной Т-образной структуры.

Исследования показали, что хорошими широкополосными свойствами обладает также симметричная структура (см. рисунок 5) с пленочными резисторами в виде высокоомных короткозамкнутых шлейфов с диссипативными потерями.

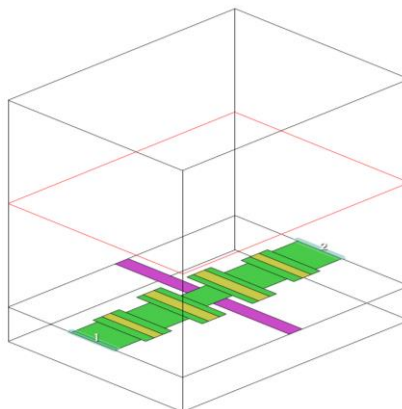


Рисунок 5 – 3D модель аттенюатора с двумя симметрично расположенными короткозамкнутыми шлейфами с диссипативными потерями

В завершении второй главы проведена оценка полосы рабочих частот конечных нагрузок, выполненных на основе микрополосковой линии передачи с диссипативными потерями и длиной меньше  $\lambda/4$ . Было получено следующее соотношение

$$\Delta f \cdot P = \text{const} \cdot \eta(n), \quad (7)$$

где  $\lambda$  - длина волны;  $P$  - максимально допустимый уровень мощности входного СВЧ сигнала;  $\Delta f$  - полоса рабочих частот.

Отметим, что конкретное значение  $\text{const}$  в соотношении (7) определяется физическими параметрами конструкции и количеством каскадов в многокаскадной структуре и её значение увеличивается с увеличением количества каскадов. По аналогии с термином в теории усилителей «площадь усиления», соотношение (7) описывает «площадь аттенюации».

В третьей главе были исследованы конструкции многокаскадных СВЧ аттенюаторов, у которых согласованные каскады с различным уровнем вносимого затухания выполнены на одной или нескольких диэлектрических подложках. В данном разделе также представлены результаты моделирования ряда мощных многокаскадных аттенюаторов.

Структурная схема многокаскадного построения СВЧ аттенюаторов высокого уровня мощности показана на рисунке 6.

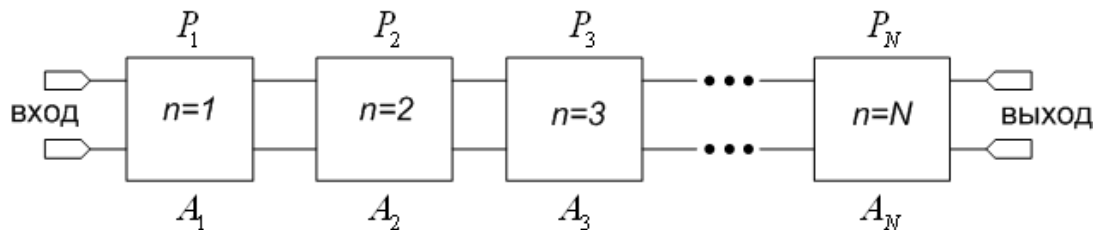


Рисунок 6 – Структурная схема многокаскадного СВЧ аттенюатора

В предлагаемой структуре входная СВЧ мощность равномерно распределяется по всем каскадам, которые последовательно соединены между собой отрезками микрополосковых линий передачи. Коэффициент передачи по мощности каждого каскада данного СВЧ аттенюатора рассчитывается следующим образом:

$$K_{(n)} = \frac{n \cdot K_p + (N - n)}{(n - 1) \cdot K_p + (N - n + 1)}, \quad (8)$$

где  $K_{(n)}$  – коэффициент передачи по мощности соответствующего каскада;  $n=1 \dots N$  – текущий номер каскада;  $K_p$  - результирующий коэффициент передачи по мощности многокаскадного СВЧ аттенюатора.

При реализации отдельных каскадов в схеме (см. рисунок 6) применены симметричные П- или Т- согласованные структуры.

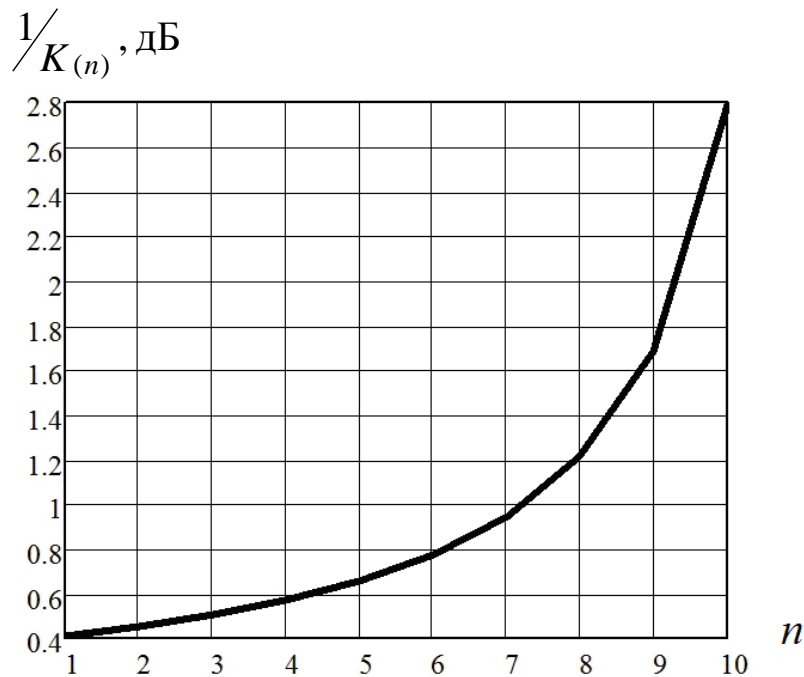


Рисунок 7 – Распределение коэффициента затухания по мощности каскадно включенных П - образных согласованных структур

На рисунке 7 представлен график зависимости коэффициента затухания по мощности на каждом каскаде, построенный по соотношению (8). График (см. рисунок 7) построен при условии, что используется десять симметричных П-образных структур ( $N=10$ ), а результирующий коэффициент передачи по мощности равен  $K_p = 0,1$  (вносимое затухание 10 дБ)

В таблице 1 приведены значения коэффициентов передачи по мощности отдельных каскадов, рассчитанные по соотношению (8) с результирующим коэффициентом передачи  $K_p = 0,1$ .

Таблица 1.

Величины коэффициентов передачи  $K_{(n)}$  для значения  $K_p = 0,1$  (-10 дБ)

$N$	$K(1)$	$K(2)$	$K(3)$	$\prod_{n=1}^N K_{(n)}$
1	0,1			0,1
2	0,5508	0,1818		0,1
3	0,7000	0,5714	0,2500	0,1

В компьютерной САПР было проведено моделирование частотных свойств многокаскадных аттенюаторов на уровень входной мощности 100 Вт, выполненных на основе П-образной структуры. Частотные зависимости

коэффициента стоячей волны (КСВ) представлены на рисунке 8. АЧХ данного аттенюатора представлены на рисунке 9.

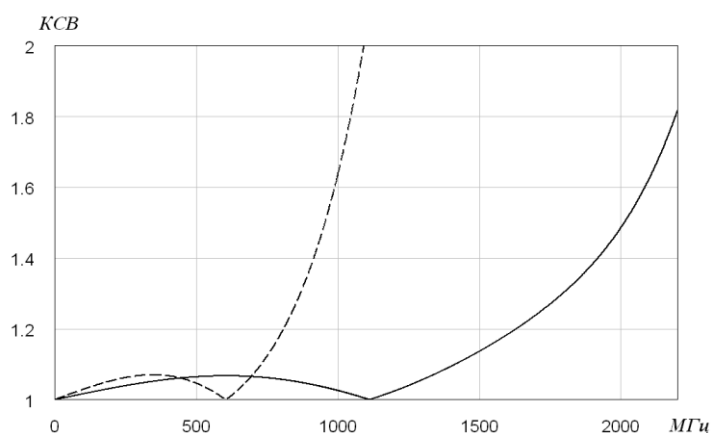


Рисунок 8 – КСВ аттенюатора с одной (пунктирная кривая) и двумя симметричными П-образными структурами (сплошная кривая)

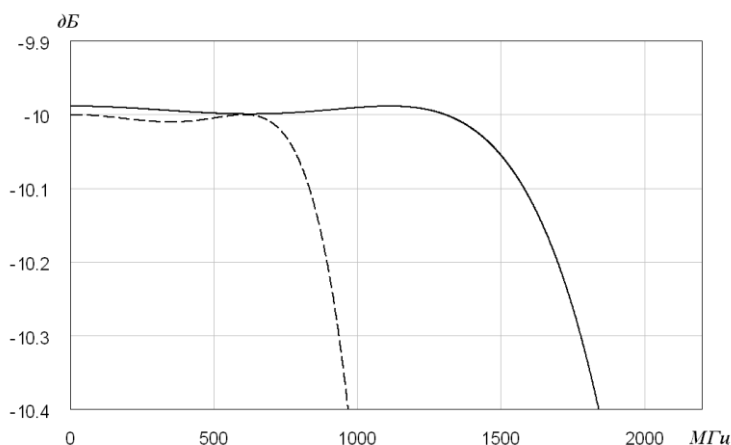


Рисунок 9 – АЧХ аттенюатора с одной (пунктирная кривая) и двумя симметричными П-образными структурами (сплошная кривая)

Как видно из рисунка 8 и рисунка 9 увеличение количества каскадов при фиксированной мощности на входе приводит к увеличению полосы рабочих частот.

На рисунке 10 представлена 3D электромагнитная модель двухкаскадного СВЧ аттенюатора, выполненного на одной общей диэлектрической подложке из бериллиевой керамики (BeO) толщиной 4 мм.



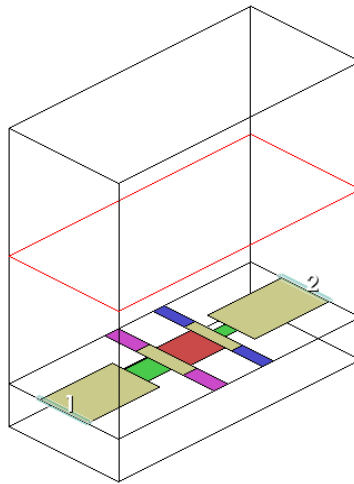


Рисунок 10 – 3D электромагнитная модель двухкаскадного СВЧ аттенюатора

На рисунке 11 представлена частотная зависимость КСВ для двухкаскадного СВЧ аттенюатора, описанного выше. Из рассмотрения графиков (см. рисунки 8, 9 и 11) видно, что при одинаковой входной мощности в двухкаскадном аттенюаторе при равномерном распределении рассеиваемой мощности по каскадам полоса рабочих частот увеличивается.

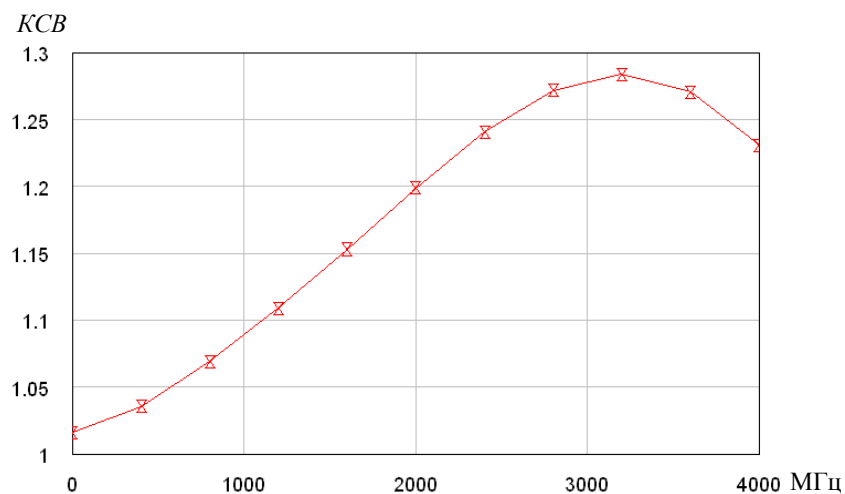


Рисунок 11 – Частотная зависимость КСВ двухкаскадного аттенюатора

Таким образом, предложенное многокаскадное построение аттенюатора и методика расчета коэффициентов передачи по мощности каждого из каскадов в соответствии с соотношением (8) позволяет существенно расширить полосу рабочих частот при сохранении допустимого уровня входной СВЧ мощности или увеличить входную мощность при фиксированной полосе рабочих частот.

**В четвертой главе представлены конструкции и функциональные схемы разработанных аттенюаторов на планарных пленочных резисторах.** Планарный пленочный резистор на основе диэлектрической подложки из бериллиевой керамики, установленный на радиатор с воздушным охлаждением, способен

рассеивать мощность до 200 Вт. Использование большого количества каскадов в виде симметричных согласованных Т-образных и П-образных структур позволяет рассредоточить выделение тепловой мощности attenuатора на большую площадь. Это можно использовать либо для увеличения полосы рабочих частот или уровня входной мощности. В разработанных мощных многокаскадных широкополосных СВЧ attenuаторах на планарных пленочных резисторах предусмотрено несколько выходов для одновременного контроля нескольких параметров выходного сигнала передатчика.

По предложенному методу был спроектирован и изготовлен однокаскадный и двухкаскадный attenuатор на симметричных Т-образных согласованных структурах (см. рисунок 12 и 13), расположенных на общей диэлектрической подложке. Оба attenuатора с коэффициентом затухания 10 дБ рассчитаны на уровень входной допустимой мощности 10 Вт.

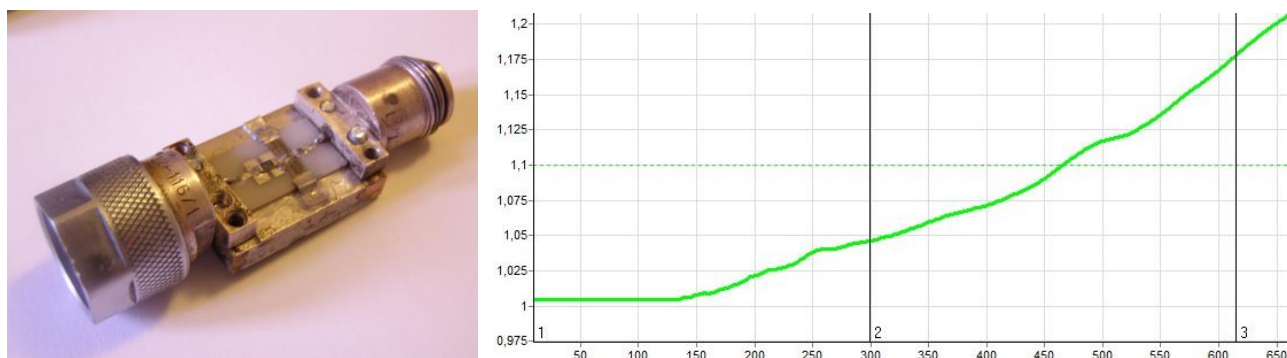


Рисунок 12 – Однокаскадный СВЧ attenuатор на основе симметричной Т-образной структуре и частотная зависимость КСВ

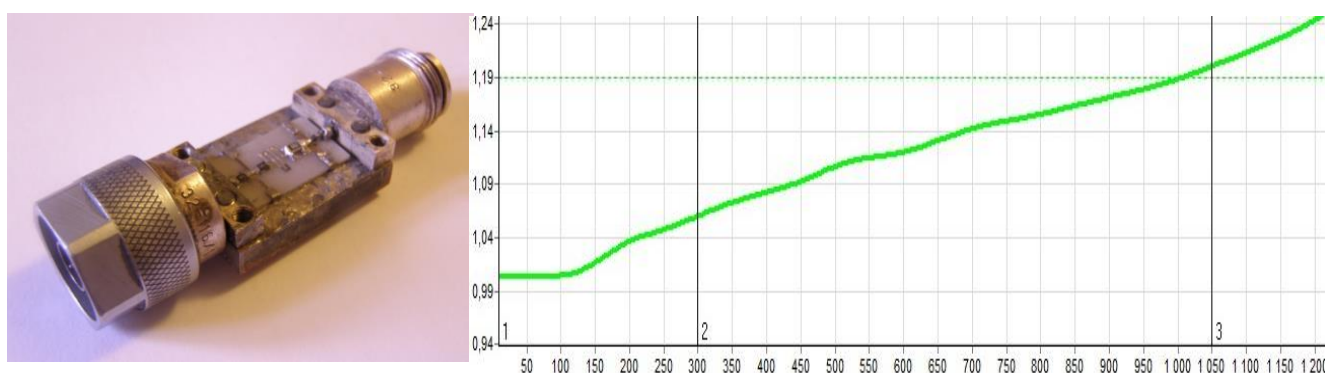


Рисунок 13 – Двухкаскадный СВЧ attenuатор на основе симметричной Т-образной структуре и частотная зависимость КСВ

При экспериментальном исследовании с помощью измерителя модуля коэффициента передачи и отражения Р2М-04 фирмы «Микран» (РФ) получены

графики частотных зависимостей КСВ для описанных выше конструкций СВЧ аттенюаторов (см. рисунки 12 и 13).

Приведенные графики на рисунках 12 и 13 для КСВ показывают, что действительно, увеличение количества каскадов приводит к существенному расширению полосы рабочих частот. Экспериментальные графики описывают частотные свойства, обусловленные внутренним согласованием Т-структур за счет выбора оптимальных волновых сопротивлений планарных пленочных резисторов. При использовании внешних согласующих цепей полоса рабочих частот приближается к теоретическому пределу, оценка которого проведена во второй главе.

### **Заключение**

Основные теоретические и практические результаты, изложенные в данной работе, состоят в следующем.

На основе аналитического обзора литературы сделан вывод о перспективности построения многокаскадных СВЧ аттенюаторов высокого уровня мощности и согласованных нагрузок на планарных пленочных резисторах, выполненных по микрополосковой технологии с использованием диэлектрической подложки из окиси бериллия и установленных на внешний радиатор с принудительным воздушным охлаждением.

Получена теоретическая оценка предельно достижимой полосы рабочих частот для СВЧ аттенюаторов высокого уровня мощности, выполненных на основе многокаскадного включения согласованных симметричных структур (звеньев), содержащих планарные пленочные резисторы.

Для увеличения полосы рабочих частот или уровня входной мощности СВЧ аттенюатора предложено каскадное включение симметричных согласованных структур, выполненных на отдельных диэлектрических подложках.

Разработан метод расширения полосы рабочих частот при фиксированной мощности входного СВЧ сигнала с помощью каскадного включения нескольких симметричных структур аттенюатора, выполненных на планарных пленочных резисторах, которые расположены на одной диэлектрической подложке.

Созданы и исследованы экспериментальные образцы мощных СВЧ аттенюаторов и нагрузок на основе планарных пленочных резисторов. Полученные параметры для сверхширокополосных СВЧ аттенюаторов и нагрузок удовлетворяют требованиям стандарта РФ на передающую телевизионную и радиовещательную аппаратуру.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Статьи, соответствующие перечню периодических изданий, рекомендуемых ВАК:**

1. Богомолов П. Г. Широкополосные пленочные аттенюаторы = Wideband of film attenuators / М. Г. Рубанович, П. Г. Богомолов, К. Я. Аубакиров // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетеχνическая. - 2015. – № 5 (5). – С. 154–163.

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

3. Богомолов П. Г. Мощные пленочные СВЧ-аттенюаторы = Powerful film microwave attenuators/ М. Г. Рубанович, П. Г. Богомолов, К. Я. Аубакиров, В.А.Хрусталёв // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетеχνическая. - 2015. – № 5 (5). – С. 81–88.

4. Богомолов П.Г. Методы расширения полосы рабочих частот плёночных СВЧ-аттенюаторов / П.Г. Богомолов // Успехи современной радиоэлектроники. – 2015. - № 10 – С. 145-148.

### Статьи и тезисы в журналах и материалах конференций:

5. Богомолов П. Г. Широкополосные пленочные аттенюаторы = Wideband of film attenuators / М. Г. Рубанович, П. Г. Богомолов, К. Я. Аубакиров // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетеχνическая. - 2015. – № 5 (5). – С. 154–163.

6. Bogomolov P. G. The broadband Microwave attenuator/ P. G. Bogomolov// The 16 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM 2015) : proc., Altai, Erlagol, 29 June – 3 July 2015. – Novosibirsk : IEEEE, 2014. – P. 110-112. – 125 copes. – ISBN 978-5-7782-2457-5.

7. Bogomolov P. G. Two-circuit elliptic filter / P. G. Bogomolov, V. P. Razinkin, V. A. Khrustalev // Современные техника и технологии : сб. докл. 20 междунар. науч.-практ конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 14–18 апр. 2014 г. В 3 т. – Томск : Изд-во ТПУ, 2014. – Т. 1. – С. 159–160. – 100 эк.

8. Bogomolov P. G. A elliptic filters for digital modulation techniques telecommunication systems / V. P. Razinkin, V. A. Khrustalev, P. G. Bogomolov // Research Bulletin SWorld.Modern scientific research and their practical application. - 2014. - Vol. J11410. - Art. J11410 - 041 (7 p.).

9. Bogomolov P. 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

10. Богомолов П.Г. Интегральный критерий оценки селективных свойств / В. П. Разинкин, В. А. Хрусталева, П. Г. Богомолов, А. Г. Вихорев // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014* : сб. матер. 10 междунар. науч. конгр. и выставка. СибОптика-2014 : междунар. науч. конф., Новосибирск, 8–18 апр. 2014 г. : сб. материалов : в 2 т. – Новосибирск : СГГА, 2014. – Т. 2. – С. 246–252.

11. Богомолов П.Г. Широкополосный пленочный СВЧ аттенюатор / П. Г. Богомолов, М. Г. Рубанович, В. А. Хрусталева, В. П. Разинкин // *Электроника и микроэлектроника СВЧ* : сб. тр. 3 Всерос. конф., Санкт-Петербург 2–5 июня 2014 г. – СПб : Изд-во СПбГЭТУ, 2014. – С. 93–97. – 175 экз.

12. Богомолов П.Г. Эллиптические фильтры для телекоммуникационных систем с цифровыми методами модуляции / В. П. Разинкин, В. А. Хрусталева, П. Г. Богомолов // *Сборник научных трудов Sworld*. - 2014. – Т. 9, вып. 1. – С. 25–29. – Тема вып. Современные направления теоретических и прикладных исследований - 2014.

13. Bogomolov P. G. Decomposition method of calculating the present longitudinal inductance in a transverse band of film resistor / P. G. Bogomolov, M. G. Rubanovich, V. A. Khrustalev // *The 15 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM 2014)* : proc., Altai, Erlagol, 30 June – 4 July 2014. – Novosibirsk : IEEE, 2014. – P. 142-146. – 125 copes. – ISBN 978-5-7782-2457-5. - (EDM).

14. Богомолов П.Г. Декомпозиционный метод моделирования электромагнитных процессов в планарных плёночных резисторах / М. Г. Рубанович, В. А. Хрусталева, П. Г. Богомолов // *Сборник научных трудов Sworld*. - 2014. – Т. 9, вып. 1. – С. 30–34. – Тема вып. Современные направления теоретических и прикладных исследований - 2014.

15. Богомолов П. Г. Исследование распределения заряда в поперечном сечении микрополосковой линии / П. Г. Богомолов, М. Г. Рубанович, В. А. Хрусталева // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014* : сб. матер. 10 междунар. науч. конгр. и выставка. СибОптика-2014 : междунар. науч. конф., Новосибирск, 8–18 апр. 2014 г. : сб. материалов : в 2 т. – Новосибирск : СГГА, 2014. – Т. 2. – С. 194–199.

16. Богомолов П. Г. Метод расчета распределения ёмкости в поперечном сечении МПЛ / П. Г. Богомолов, М. Г. Рубанович // *Наука, образование, бизнес : материалы Всерос. науч.-практ. конф. ученых, преподавателей, аспирантов, студентов, специалистов промышленности и связи, посвящ. Дню радио*. – Омск : Изд-во КАН, 2013. - С. 143–147.

17. Богомолов П. Г. Моделирование электромагнитного поля в планарных пленочных резисторах / П. Г. Богомолов, М. Г. Рубанович // Современные проблемы телекоммуникаций : материалы Рос. науч.-техн. конф. [Новосибирск, 24–25 апр. 2014 г.]. – Новосибирск : СибГУТИ, 2014. – С. 230–232.

18. Богомолов П.Г. Широкополосный пленочный СВЧ аттенюатор / П. Г. Богомолов, М. Г. Рубанович, В. А. Хрусталева, В. П. Разинкин // Электроника и микроэлектроника СВЧ : сб. тр. 3 Всерос. конф., Санкт-Петербург 2–5 июня 2014 г. – СПб : Изд-во СПбГЭТУ, 2014. – С. 93–97. – 175 экз.

19. Bogomolov P. G. Microwave elliptic filter with resonance coupling / P. G. Bogomolov, V. P. Razinkin, V. A. Khrustalev // The 15 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM 2014) : proc., Altai, Erlagol, 30 June – 4 July 2014. – Novosibirsk : IEEE, 2014. – P. 147-149. – 125 copies. – ISBN 978-5-7782-2457-5.

20. Богомолов П.Г. Методы расширения полосы рабочих частот плёночных СВЧ аттенюаторов / П. Г. Богомолов // Системы связи и радионавигации : сб. тезисов / г. Красноярск : АО «НПП «Радиосвязь», 2015. - 355 с.

21. Богомолов П.Г. СВЧ аттенюаторы на резистивных плёнках / П. Г. Богомолов // Материалы научно-технической конференции молодых специалистов / г. Новосибирск АО «НИИИП-НЗиК», 2013.

22. Bogomolov P. G. The broadband Microwave attenuator/ P. G. Bogomolov// The 16 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM 2015) : proc., Altai, Erlagol, 29 June – 3 July 2015. – Novosibirsk : IEEE, 2014. – P. 110-112. – 125 copies. – ISBN 978-5-7782-2457-5.

23. Богомолов П.Г. Многокаскадные СВЧ аттенюаторы на планарных плёночных резисторах / П.Г. Богомолов, В.П. Разинкин, В. А. Хрусталёв, К. Я. Аубакиров // Системы связи и радионавигации : сб. тезисов / г. Красноярск : АО «НПП «Радиосвязь», 2016. - 472 с.