

Проректор по научной работе  
НГТУ,  
Заслуженный деятель науки РФ,  
д.т.н., профессор Вострецов А.Г.



09 2016 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования  
«Новосибирский государственный технический университет».

Диссертация «Методы увеличения полосы рабочих частот и уровня входной мощности в многокаскадных СВЧ аттенюаторах» выполнена на кафедре Общей физики.

В период подготовки соискатель Богомолов Павел Геннадьевич обучался в очной аспирантуре Новосибирского государственного технического университета.

В 2011 г. окончил НГТУ по направлению 210200 – «Проектирование и технология электронных средств».

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана 06.07.2016 г. отделом аспирантуры Новосибирского государственного технического университета.

Научный руководитель - доктор технических наук, доцент Рубанович Михаил Григорьевич, кафедра Общей физики Новосибирский государственный технический университет, доцент.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

### **Оценка выполненной соискателем работы**

Диссертация Богомолова Павла Геннадьевича является научно-квалифицированной работой, в которой содержится решение важных и актуальных задач: разработка методов проектирования мощных многокаскадных СВЧ аттенюаторов выполненных по микрополосковой технологии.

## Актуальность темы

Для радиопередающих устройств СВЧ диапазона, применяемых в цифровых телекоммуникациях, системах связи и радиолокации необходимы широкополосные аттенюаторы высокого уровня мощности. Быстрое развитие радиотехники и непрерывное продвижение в верхнюю часть СВЧ диапазона, использование новейших достижений в области создания современных материалов и технологий приводят к повышению следующих требований, предъявляемых к радиоаппаратуре: ширина полосы рабочих частот, уровень преобразуемой мощности, качество согласования и массогабаритные параметры. Сегодня особую роль приобретает автоматизированное (компьютерное) проектирование СВЧ устройств, позволяющее, в том числе и с помощью методов оптимизации, решить многие задачи, стоящие перед разработчиком. Перечисленные выше требования стимулируют создание новых методов построения и проектирования широкого класса СВЧ устройств различного назначения, в том числе с диссипативными потерями. Важным аспектом является также совершенствование существующих структурных, схемотехнических и конструктивно-технологических решений для широкополосных СВЧ аттенюаторов. Отметим, что для комплексного решения перечисленных выше вопросов необходимо использовать численные электродинамические методы анализа и параметрического синтеза данного вида СВЧ устройств.

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 полосковых и микрополосковых резисторов в пленочном исполнении, которые будем называть планарными пленочными резисторами. В настоящее время для диапазона частот от 0 до 5 ГГц, в котором работает большинство современных радиопередающих СВЧ систем, необходимы аттенюаторы и оконечные согласованные нагрузки, способные рассеивать в рабочем режиме мощность до нескольких киловатт. Отметим, что на высоких уровнях рассеиваемой СВЧ мощности планарные плёночные резисторы имеют ряд существенных преимуществ в конструктивном и технологическом плане по сравнению с другими типами диссипативных элементов. Планарные плёночные резисторы позволяют реализовать согласованные нагрузки и аттенюаторы, предназначенные для работы в сверхширокой полосе частот. Такие аттенюаторы выполняются как на основе одного, так и на основе нескольких резистивных элементов

включенных в виде параллельно-последовательных и каскадных структур. 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, но обеспечение работы в широкой полосе рабочих частот всё ещё в полной мере не реализовано. Лучшие параметры по полосе рабочих частот для пленочных оконечных нагрузок и аттенуаторов высокого уровня мощности, на наш взгляд, обеспечивают многокаскадные структуры, выполненные на согласованных по входу выходу звеньях. Однако для таких многокаскадных структур не решены вопросы обеспечения равномерного распределения рассеиваемой мощности по каскадам и резистивным элементам, входящим в соответствующих каскадов. Имеются нерешенные вопросы, связанные обоснованием выбора согласующих цепей по входу и выходу, а также каскадами.

Существующие методы проектирования нагрузок и математические модели планарных пленочных резисторов использует одномерное упрощённое описание микрополосковой линии передачи, вследствие чего результаты теоретического анализа значительно отличаются от результатов, полученных экспериментально. Особенно сильно это проявляется в дециметровом и сантиметровом диапазоне (1-2 ГГц) в котором на точность анализа частотных свойств влияет ширина резистивного слоя плёночного резистора. Чем больше площадь пленочного резистора, тем сильнее проявляется несоответствие теоретических и экспериментальных результатов. Следует отметить, что конкретные методы получения равномерных амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) вносимого затухания в многоэлементных и многокаскадных мощных СВЧ аттенуаторах в технической литературе не описаны в достаточном объеме. Исходя из вышесказанного, следует, что существует необходимость в модификации известных и создание новых методов построения аттенуаторов, выполненных на основе планарных пленочных резисторов большой мощности, методов расчёта трансформирующих и согласующих звеньев с диссипативными потерями. 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. В современной СВЧ технике широкое применение нашли полосковые и микрополосковые линии передачи, отличающиеся высокой технологичностью. Однако на первоначальном этапе их использования были значительные ограничения на уровень входной мощности из-за высоких диссипативных потерь в таких линиях передачи и из-за повышенного электромагнитного излучения. Одной из основных причин этих недостатков является низкое значение относительной диэлектрической проницаемости используемого материала подложки (около 2,5). В процессе дальнейшего развития микрополосковой технологии эти недостатки были устранены благодаря кратному увеличению диэлектрической проницаемости подложек и повышению качества производства.

На частотные свойства планарных плёночных резисторов существенное влияние оказывают их паразитные индуктивные и емкостные параметры. В известных одномерных методах расчёта частотные параметры и характеристики определяют с низкой точностью (не учитывается распределение тока в поперечном сечении резистивной пленки). 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 плёночных резисторов, электрические параметры которых сосредоточены на элементарном 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. Такой подход позволяет на основе рассмотрения сущности физических процессов и составления эквивалентных схем получить параметры СВЧ устройств и систем с диссипативными потерями, близкие к предельно достижимым значениям.

Таким образом, разработка новых методов построения широкополосных мощных СВЧ аттенюаторов, выполненных на основе каскадно включенных согласованных звеньев, содержащих планарные пленочные резисторы, является **актуальной задачей** и имеет важное значение для повышения эффективности проектирования и улучшения характеристик СВЧ аттенюаторов.

### **Личное участие автора в получении результатов**

Все представленные в диссертации результаты исследований получены лично автором, либо при его непосредственном участии. В работах, опубликованных в соавторстве, автором получены существенные теоретические и практические результаты. Сформулированы и рассмотрены научные положения, выносимые на защиту:

1. Увеличение входной СВЧ мощности и расширение полосы рабочих частот в многокаскадных аттенюаторах 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 рабочие частот обеспечивает каскадное включение нескольких звеньев, выполненных на одной диэлектрической подложке с равномерным распределением рассеиваемой мощности на пленарных 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 аттенюаторов 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.

## **Степень достоверности результатов работы**

Достоверность полученных результатов и научных положений диссертационной работы подтверждается корректной постановкой задачи, строгостью применяемого математического аппарата, результатами численного моделирования, положительными результатами апробации и внедрения.

## **Научная новизна диссертации**

1. Разработан метод увеличения уровня входной мощности и метод расширения полосы рабочих частот в пленочных 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. Предложены новые схемотехнические решения для многокаскадных СВЧ аттенюаторов большой мощности и разработаны экспериментальные образцы, обеспечивающие работу в полосе частот 0-2 ГГц.

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

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

## **Практическая значимость**

1. 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 пленочных резисторах.

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

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.

### **Ценность научных работ соискателя**

Ценность научных работ соискателя заключается в разработке методов расширения полосы рабочих частот и входной мощности многокаскадных СВЧ аттенюаторах на планарных плёночных резисторах; разработке и экспериментальном исследовании СВЧ аттенюаторах. Соискателем показано, что построение аттенюаторов в виде чебышёвского фильтра нижних частот с диссипативными потерями в последовательных и параллельных резистивных вставках, а также использование многокаскадных согласованных структур позволяет разрабатывать широкополосные аттенюаторы-нагрузки, согласованные до 3 ГГц.

Основные результаты исследований докладывались на следующих конференциях: Научно – технической конференции молодых специалистов – Новосибирск: АО НПО «НИИИП-НЗиК» - 2013. Международная научно – техническая конференция – Новосибирск: НГТУ, The 15 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices/ EDM 2014. Международный научный конгресс «ГЕО – Сибири – 2014». Новосибирск: СГГА, 2014. II Всероссийская научно – техническая конференция «Системы связи и радионавигации» – Красноярск, 2015. Тринадцатая международная научно-техническая конференция "Актуальные проблемы электронного приборостроения". Новосибирск: АО НПО «НИИИП-НЗиК» - 2016. III Всероссийская научно – техническая конференция «Системы связи и радионавигации» – Красноярск: Сибирский Федеральный Университет, 2016.

Работа выполнена при финансовой поддержке министерства образования и науки РФ в рамках базовой части государственного задания за 2013 г. №7.1667.2011 по теме: Разработка теоретических основ построения сверхширокополосных фильтров и высокочастотных резонаторов для радиофизического оборудования, радиопередающей аппаратуры связи и цифрового телевидения и в рамках базовой части государственного задания за 2016 г., код проекта, по теме: Теория построения и практическая реализация широкополосных микрополосковых устройств, предназначенных для использования в измерительном оборудовании цифровых систем телевидения, связи и телекоммуникации, включая вычислительные системы.

Диссертация Богомолова П.Г. является законченной научной работой, выполненной на актуальную тему. Диссертация обобщает самостоятельные исследования автора.

**Полнота изложенных материалов в печатных работах, опубликованных автором**

По результатам исследований опубликовано 21 научная работа из них: 4 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК.

***Статьи в журналах из перечня ВАК***

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

2. Использование метода конечных элементов для расчёта парциального распределения ёмкости микрополосковой линии / П. Г. Богомолов, Д. В. Вагин, М. Г. Рубанович, В. А. Хрусталеv, 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.Хрусталеv// Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетеchnическая. - 2015. – № 5 (5). – С. 81–88.

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

***Статьи и тезисы в материалах конференций***

5. 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.

6. Razinkin V. P. 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.).

7. 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

8. Интегральный критерий оценки селективных свойств / В. П. Разинкин, В. А. Хрусталеv, 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.

9. Широкополосный пленочный СВЧ аттенюатор / П. Г. Богомолов, М. Г. Рубанович, В. А. Хрусталеv, 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.

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

11. 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 copies. – ISBN 978-5-7782-2457-5. - (EDM).

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

13. Богомолов П. Г. Исследование распределения заряда в поперечном сечении микрополосковой линии / П. Г. Богомолов, М. Г. Рубанович, В. А. Хрусталеv // 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.

14. 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.

15. 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.

16. 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.

17. 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 copes. – ISBN 978-5-7782-2457-5.

18. 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.

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

20. 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 copes. – ISBN 978-5-7782-2457-5.

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

## Специальность, которой соответствует диссертация

Представленная Богомоловым Павлом Геннадьевичем диссертационная работа соответствует специальности 05.12.07 — «Антенны, СВЧ устройства и их технологии». Содержание диссертации в соответствии с пунктом 2 паспорта на специальность, в котором указано «Исследование характеристик антенн и СВЧ устройств для их оптимизации и модернизации, что позволяет осваивать новые частотные диапазоны, обеспечивать электромагнитную совместимость, создавать высокоэффективную технологию и т.д.»

Диссертация Богомолова П.Г. «Методы увеличения полосы рабочих частот и уровня входной мощности в многокаскадных СВЧ аттенюаторах» рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.12.07 – «Антенны, СВЧ устройства и их технологии».

Заключение принято на расширенном заседании кафедры Общей физики с участием сотрудников кафедры радиоприёмных и радиопередающих устройств, кафедры конструирования и технология радиозлектронных средств, кафедры электронных приборов, кафедры теоретических основ радиотехники, кафедры электроники и электротехники и кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники.

Присутствовало на заседании 25 человек, в том числе докторов наук – 9 человек, кандидатов наук – 7 человек. Результаты голосования «за» - 25 человек, «против» - 0 человек, «воздержались» - 0 человек, протокол №1/1 от «26» сентября 2016 г.

Зав. Кафедрой Общей физики  
к.т.н., доцент

С.А. Стрельцов

Учёный секретарь

Н.В. Чичерина

**ПОДПИСЬ  
ЗАВЕРЯЮ**

Ведущий документовед



*Стрельцов С.А.*  
*Чичерина Н.В.*

*Чичерина Н.В.*