

*На правах рукописи*

*Сав*

**Савенков Глеб Георгиевич**

**МНОГОКАНАЛЬНЫЕ ШИРОКОПОЛОСНЫЕ  
СВЧ НАГРУЗКИ И АТТЕНЮАТОРЫ НА ПЛЕНОЧНЫХ  
МИКРОПОЛОСКОВЫХ РЕЗИСТОРАХ**

Специальность 05.12.07 Антенны, СВЧ устройства и их  
технологии

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск 2018

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

Научный руководитель: Разинкин Владимир Павлович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», профессор кафедры Теоретических основ радиотехники

Официальные оппоненты: Стукач Олег Владимирович, доктор технических наук, профессор ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», профессор инженерной школы информационных технологий и робототехники

Аубакиров Константин Якубович, кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий», доцент кафедры специальных устройств и технологий

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет»

Защита диссертации состоится «18» декабря 2018г. в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д212.268.01, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР) по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУРа и на сайте <https://postgraduate.tusur.ru/urls/2kzdfra5>

Автореферат разослан «\_\_\_» ноября 2018г.

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



А.Е. Мандель

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В настоящее время имеется большая потребность в создании и разработке новых методов построения и практической реализации сверхширокополосных нагрузок и аттенюаторов высокого уровня мощности, входящих в состав измерительного оборудования для оценки параметров выходного сигнала мощных радиопередающих устройств, используемых в современных цифровых системах связи и телевидения. Особенно актуально создание согласованных нагрузок и аттенюаторов дециметрового и сантиметрового диапазона. Это обусловлено все более интенсивным использованием в этом диапазоне радиопередающей аппаратуры с многопозиционными цифровыми видами модуляции, параметры которой должны систематически проверяться, что определяет помехоустойчивость цифровых систем.

Современные сверхширокополосные СВЧ нагрузки и аттенюаторы нового поколения для мощных радиопередающих устройств в основном выполняются по двум вариантам. В первом варианте за основу взята дендритная структура соединения планарных пленочных резисторов, величины которых выбраны из условия получения требуемого номинального значения входного сопротивления. При этом допустимая мощность входного СВЧ сигнала оказывается пропорциональной количеству используемых резисторов. Однако частотный диапазон такой нагрузки ограничивается полосой пропускания распределителей мощности, входящих в состав дендритной схемы.

Во втором варианте построения широкополосных СВЧ нагрузок используется принцип каскадного соединения согласованных четырехполюсников, выполненных на основе микрополосковых резисторов. Для получения равномерного распределения рассеиваемой СВЧ мощности на каждом четырехполюснике с диссипативными потерями их коэффициенты затухания увеличиваются к концу нагрузки. Данный подход обеспечивает более широкую полосу рабочих частот, но имеет сложную конструктивную реализацию в дециметровом и сантиметровом диапазоне. Исходя из сказанного выше, можно сделать вывод о том, что актуальны исследования, направленные на создание СВЧ нагрузок высокого уровня мощности, предназначенных для работы в верхней части дециметрового и в сантиметровом диапазоне.

Большой вклад в развитие теории и практики построения широкополосных СВЧ устройств с диссипативными потерями внесли известные зарубежные ученые, такие как: J. Peeters, J.H. Thompson, V.D. Stankovic, а также российские ученые: В.П. Мещанов, В.И. Вольман, М.В. Давидович, Н.Ф. Попова, А.А. Яшин, В.Д. Садков, Е.П. Васильев, Д.А. Кабанов, Н.Д. Малютин, А.Н. Сычѳв, В.П. Кисмерешкин, Б.А. Беляев, А.А. Лексиков, М.А. Евдокимов, С.Н. Григорьев, Ю.Н. Антонов, М.Г. Рубанович. Результаты исследований этих и других авторов положены в основу, развиты и обобщены в данной диссертационной работе. Анализ современного состояния уровня СВЧ техники по данному направлению показал, что для создания широкополосного измерительного оборудования дециметрового и сантиметрового диапазона, предназначенного для работы на

уровне мощности сотни Ватт и более, необходимы новые подходы. Перспективным направлением существенного расширения полосы рабочих частот и увеличения допустимого уровня мощности входного СВЧ сигнала, на наш взгляд, является использование многоканального построения поглощающих устройств и частотно-независимой трансформации характеристического сопротивления. Для этого необходимы новые схемотехнические и конструктивные решения для основных блоков многоканальной структуры, прежде всего поглощающих элементов сосредоточенного и распределенного типа, а также широкополосных диплексеров сантиметрового диапазона.

**Объект исследования.** Широкополосные многоканальные СВЧ нагрузки и аттенюаторы большой мощности, выполненные на плёночных резисторах сосредоточенного типа и микрополосковых линиях с большими потерями.

**Предмет исследования.** Схемотехнические решения и конструкции мощных СВЧ нагрузок и аттенюаторов, обеспечивающие широкополосные свойства, близкие к теоретическому пределу.

**Цель работы и задачи исследования.** Основной целью работы является разработка методов построения и конструктивная реализация мощных сверхширокополосных СВЧ нагрузок и аттенюаторов дециметрового и сантиметрового диапазона, выполненных на основе многоканальных частотно-разделительных устройств с нагрузочными элементами в виде планарных плёночных резисторов и микрополосковых линий с большими диссипативными потерями.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи.

1. Обзор известных методов построения и анализ технических параметров широкополосных плёночных СВЧ нагрузок и аттенюаторов высокого уровня мощности. Обоснование применения многоканальных частотно-разделительных структур и неотражающих фильтров для расширения полосы рабочих частот и увеличения мощности входного СВЧ сигнала.

2. Исследование влияния формы планарного плёночного резистора на предельно достижимую полосу частот согласования и разработка методов построения многоэлементных нагрузок и аттенюаторов на основе принципа декомпозиции мощного планарного резистора и использования как внешних, так и внутренних согласующих цепей и элементов.

3. Разработка и исследование частотных свойств распределённых нагрузок сантиметрового диапазона в виде микрополосковой линии с большими потерями.

4. Разработка многоканальных широкополосных СВЧ нагрузок и аттенюаторов дециметрового диапазона на основе частотно-разделительных устройств, выполненных в сосредоточенном элементном базисе.

5. Разработка широкополосных СВЧ нагрузок и аттенюаторов сантиметрового диапазона на основе частотно-разделительных устройств, выполненных в распределённом элементном базисе.

6. Исследование частотных свойств многоканальных СВЧ нагрузок и аттенюаторов различного типа.

7. Экспериментальное исследование основных блоков многоканальных нагрузок дециметрового и сантиметрового диапазона.

**Методы исследования.** Перечисленные выше задачи решались с помощью теории функций комплексного переменного, аппарата матричного исчисления, теории рядов, интегрального и дифференциального исчисления, численных методов схемотехнического и электродинамического моделирования, симплексного и градиентного методов оптимизации. Так же в данной работе использована теория линейных сосредоточенных и распределенных электрических цепей, теория фильтров и теория согласования комплексных импедансов.

### **Научная новизна результатов работы**

1. На основе декомпозиционного подхода предложена многоэлементная структура для микрополосковых нагрузок и аттенуаторов высокого уровня мощности, обеспечивающая расширение полосы рабочих частот пропорционально числу декомпозиционных элементов при использовании внешней согласующей цепи и внутренних индуктивных элементов согласования. Новизна многоэлементного построения защищена патентом РФ на изобретение № 2667348.

2. Разработана мощная микрополосковая нагрузка на основе многоступенчатых линий передачи с равномерным распределением рассеиваемой мощности по всей длине, обусловленным скачкообразным возрастанием погонного сопротивления. Предложенная распределенная нагрузка защищена патентом РФ на полезную модель № 181510.

3. Исследованы частотные свойства и выявлены характерные особенности широкополосных пленочных нагрузок и аттенуаторов, выполненных в виде неотражающих фильтров с пленочными балластными резисторами и многоэлементными нагрузками, имеющими полосу рабочих частот, ограниченную паразитной емкостью планарных пленочных резисторов.

4. Развита принцип построения многоканальных сверхширокополосных нагрузок и аттенуаторов, выполненных на основе частотно-разделительных устройств и использования многоэлементных диссипативных устройств сосредоточенного типа и многоступенчатых распределенных линий передачи с большими потерями.

**Достоверность полученных результатов.** Достоверность научных результатов подтверждается корректными математическими выводами и компьютерным моделированием в демонстрационной версии программы MWO. Результаты проведенных экспериментов с использованием сертифицированных измерительных приборов P2M-04 фирмы «Микран» и ZVL13 фирмы Rohde&Schwarz продемонстрировали достаточно хорошее соответствие с теоретическими расчетами. Полученные результаты не противоречат данным других авторов.

**Практическая ценность результатов работы.** Разработанные конструкции многоканальных сверхширокополосных нагрузок и экспериментальное исследование их основных узлов имеют важное практическое значение для современных радиоэлектронных СВЧ систем. Полученные теоретические и экспериментальные результаты использованы при выполнении Госзадания Минобрнауки РФ 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 ФГОБУ ВО «Новосибирский государственный технический университет» при проведении занятий по курсам «Синтез линейных электрических цепей» и «Телевизионные системы и устройства» для магистрантов направления подготовки 11.03.01 (Радиотехника) и 11.03.02 (инфокоммуникационные технологии и системы связи), что подтверждается соответствующим актом внедрения. Также получен акт о внедрении на предприятии ООО «НПП Триада-ТВ», г. Новосибирск.

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

1. Российской научно-технической конференции «Современные проблемы телекоммуникаций», Новосибирск, 2016, 2018 гг.
2. Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и специалистов, Санкт-Петербург, 2017 г.
3. Международной научно-практической конференции «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации» (Сагиновские чтения № 10), Республика Казахстан, Караганда, 2018 г.
4. 18 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2017, Республика Алтай, Эрлагол.
5. 19 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2018, Республика Алтай, Эрлагол.
6. Электронные средства и системы управления. 13 Международная научно-практическая конференция, посвященная 55-летию ТУСУРа, Томск, 2017.
7. Современные проблемы радиоэлектроники. Всероссийская конференция студентов и молодых ученых. Красноярск 2017, 2018 гг.

**Личный вклад автора.** Изложенные в диссертации результаты исследований получены лично автором при организационном участии научного руководителя, имеются 3 научные публикации без соавторов. На основании обсуждения с соавторами физических принципов и конструктивных реализаций автор лично получил основные расчетные соотношения для разработанных многоканальных нагрузок и оформил две заявки на патент на изобретение и на патент на полезную модель.

**Публикации.** Основные положения диссертационного исследования, а также научные и практические результаты отражены в **15** работах, опубликованных по теме диссертации, 3 из которых входят в перечень журналов

и изданий, рекомендованных ВАК. 10 публикаций – материалы докладов Российских и международных научно-технических конференций. Два доклада индексированы в Web of Science. Получен 1 патент на изобретение и 1 патент на полезную модель.

#### **Основные положения работы, выносимые на защиту.**

1. Реализация многоэлементных пленочных СВЧ нагрузок с помощью декомпозиции на одинаковые фрагменты обеспечивает существенное расширение полосы рабочих частот при использовании внешних согласующих цепей и внутренних индуктивных элементов согласования. Высокая эффективность и хорошая физическая реализуемость данного метода обеспечивается при числе декомпозиционных блоков не более 5.

2. Распределенные нагрузки на основе многоступенчатых линий с возрастающим погонным сопротивлением ступеней работают на частотах выше 3 ГГц, где обеспечивают максимальный уровень входной мощности за счет равномерного распределения рассеиваемой мощности в каждой ступени.

3. Согласованные нагрузки дециметрового диапазона на основе неотражающих фильтров обеспечивают приемлемое качество согласования в полосе рабочих частот 0-2 ГГц при использовании в качестве балластных элементов планарных пленочных резисторов с паразитной емкостью до 1 пФ и рассеиваемой мощностью до 100 Вт.

4. Применение диплексера на взаимно дополняющих баттервортовских фильтрах с частотно-независимой трансформацией характеристического сопротивления в высокочастотном канале, полученной с помощью преобразований Куроды, позволяет в двухканальных нагрузках расширить полосу рабочих частот в три раза по отношению к одноканальному варианту.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы. Диссертация содержит 140 страниц машинописного текста, 85 рисунков. В библиографию включено 78 наименований.

#### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, дана общая характеристика работы. Сформулированы цель и решаемые задачи.

**В первой главе** приведён обзор литературы и сравнительный анализ известных дендритного и многокаскадного методов построения широкополосных СВЧ нагрузок аттенюаторов высокого уровня мощности. Исследованы широкополосные свойства планарных пленочных резисторов различной формы.

На рисунке 1 показаны типовые варианты топологии исследованных пленочных нагрузок.

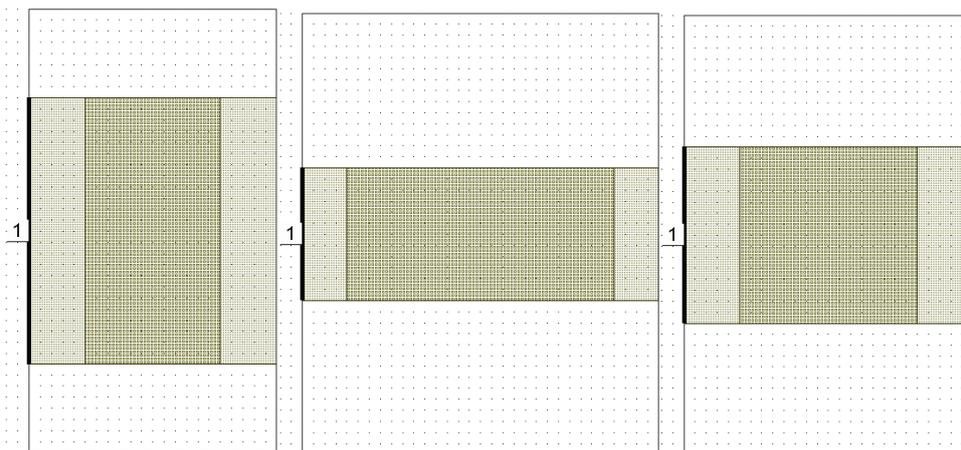


Рисунок 1 – Топологии пленочных нагрузок различной формы

В результате исследования установлено, что более широкой полосой рабочих частот обладает пленочная нагрузка квадратной формы, в которой краевая емкость меньше, чем в других вариантах геометрии. Для планарного пленочного резистора мощностью 150 Вт ( $12 \times 6 \text{ мм}^2$ ) краевая емкость обычно составляет (20-30)% от общей паразитной емкости  $C$ . Поэтому уменьшение краевой емкости за счет выбора оптимальной геометрической формы резистора при неизменной площади резистивной пленки приводит к соответствующему расширению полосы рабочих частот.

Далее, в первой главе представлена декомпозиционная двумерная модель пленочного резистора в форме сектора круга, показанная на рисунке 2. Модель учитывает неравномерное распределение СВЧ тока в поперечном сечении резистивной пленки.

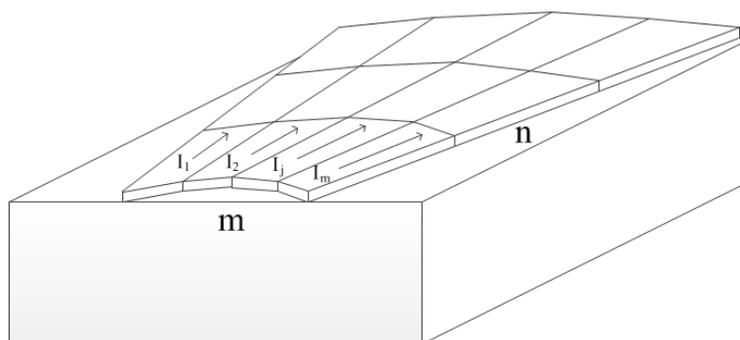


Рисунок 2 - Двумерная декомпозиционная модель пленочного резистора в форме сектора круга

Эквивалентная схема для примыкающих друг к другу блоков, которые образуют одну поперечную полосу резистивной плёнки, имеет вид, показанный на рисунке 3.

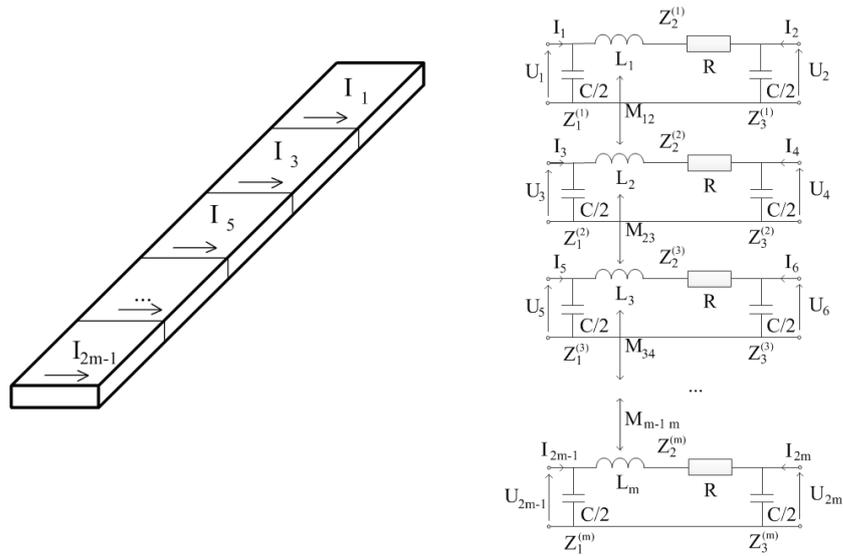


Рисунок 3 - Эквивалентная схема поперечной полосы резистивной плёнки

Для описания индуктивного взаимодействия декомпозиционных блоков резистивной плёнки, входящих в одну поперечную полосу, применяется квадратная  $\mathbf{Z}$  матрица размерности  $2m$ . Для  $m=1$   $\mathbf{Z}$  матрица, соответствующая П-образному четырехполюснику, имеет вид:

$$\mathbf{Z} = \frac{1}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \begin{bmatrix} Z_1 \cdot (Z_2 + Z_3) & Z_1 \cdot Z_3 \\ Z_1 \cdot Z_3 & Z_3 \cdot (Z_1 + Z_2) \end{bmatrix}. \quad (1)$$

При декомпозиционном разбиении в поперечном сечении на две токовые полосы, то есть для  $m=2$  составляется  $\mathbf{Z}$  матрица, соответствующая восьмиполоснику размерности 4. При ее составлении учитывается взаимный импеданс между декомпозиционными блоками, определяемый через их первичные параметры  $Z_{ij} = Z_{ji} = j\omega M_{ij}$ ; где  $M_{ij} = M_{ji}$  - взаимная индуктивность между  $i$  и  $j$  блоками поперечной полосы;  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  - частота высокочастотного сигнала.

Матрицы восьмиполосников могут быть представлены как матрицы-клетки, содержащие в себе 4 матрицы четырехполюсников.

Аналогично составляется  $\mathbf{Z}$  матрица для любого произвольного количества токовых полос  $m$ .

Для пленочного резистора в форме сектора круга элементы  $\mathbf{Z}$  матрицы определяются следующим образом:

$$Z_{ii} = R + j\omega L_i, \quad j = \sqrt{-1}, \quad i = 1, 2 \dots m, \quad (2)$$

$$L_i = \int_{r_k}^{r_{k+1}} L'(r) dr, \quad M_{ij} = \int_{r_k}^{r_{k+1}} M'_{ij}(r) dr, \quad (3)$$

где  $L'$  - погонная индуктивность декомпозиционных блоков в  $k$ -ой поперечной полосе ( $k = 1, 2, 3 \dots n$ );  $r$  - текущий радиус сектора круга,  $k = 1, 2, 3 \dots n$ ;  $M'_{ij}(r)$  - взаимная погонная индуктивность декомпозиционных блоков в  $k$ -ой поперечной полосе.

Разработанная эквивалентная схема планарного пленочного резистора наглядно описывает физические процессы и позволяет обоснованно сформировать первоначальную структуру для последующего численного электродинамического моделирования и оптимизации. На рисунке 4 приведены частотные зависимости КСВН для двух топологий нагрузок.

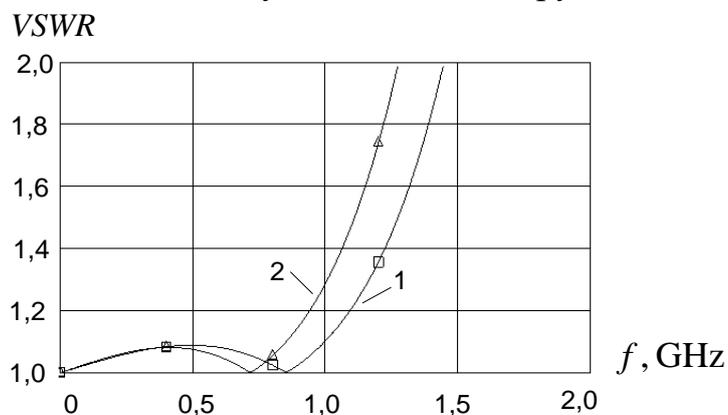


Рисунок 4 - Частотные зависимости КСВ для резисторов в форме сектора круга (1) и прямоугольной формы (2)

**Вторая глава** посвящена разработке многоэлементных микрополосковых СВЧ нагрузок и аттенуаторов высокого уровня мощности, выполненных на основе декомпозиционного разбиения. Разработанные и исследованные в диссертации структуры многоэлементных нагрузок обеспечивают существенное расширение диапазона частот. Это достигнуто за счет использования внешних согласующих цепей в виде чебышевского фильтра нижних частот (ФНЧ) и индуктивных элементов внутреннего согласования. На рисунке 5 (штриховкой показана медная металлизация) представлена топологическая структура многоэлементной нагрузки, состоящей из последовательно включенных одинаковых планарных пленочных резисторов квадратной формы, расположенных на диэлектрической подложке из бериллиевой керамики.

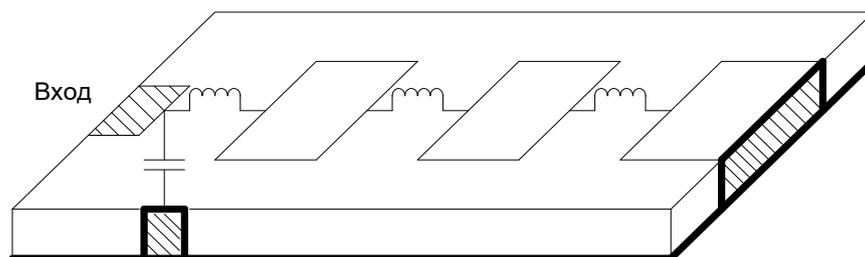


Рисунок 5 – Топологическая структура многоэлементной нагрузки

Как видно из рисунка 5, предлагаемая многоэлементная нагрузка содержит  $N$  планарных пленочных резисторов одинаковых размеров, сопротивление которых равно  $R_f = R/N$ , где  $R$  – входное сопротивление микрополосковой нагрузки. Каждый декомпозиционный элемент обладает паразитной емкостью  $C$ , разбитой на две равные составляющие для двух половин резистора. Между пленочными

резисторами включаются внутренние согласующие индуктивные элементы, составляющие совместно с паразитными емкостями пленочных резисторов  $C/2$  фильтры нижних частот (ФНЧ) третьего порядка. На рисунке 6 представлена эквивалентная схема многоэлементной нагрузки в сосредоточенном элементном базисе.

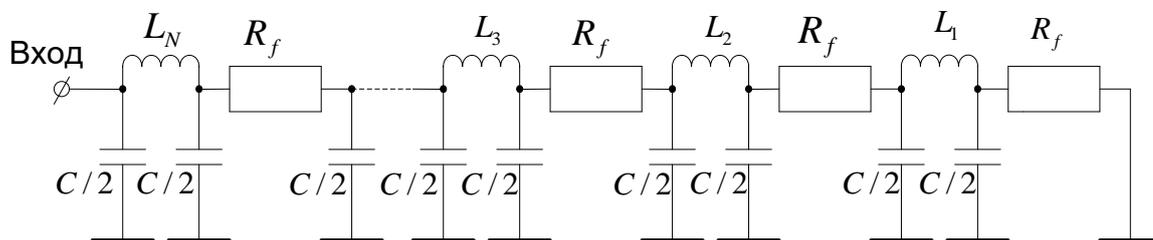


Рисунок 6 - Эквивалентная схема многоэлементной нагрузки

Значения индуктивностей для симметричных чебышевских фильтров нижних частот третьего порядка, используемых во внешних и внутренних согласующих цепях многоэлементной нагрузки (рисунок 6), определяются соотношением

$$L_n = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \cdot \frac{R^2 C}{2N^2} \cdot n^2, \quad (4)$$

где  $\alpha_1$  – первый элемент нормированного чебышевского ФНЧ третьего порядка;  $\alpha_2$  – второй элемент чебышевского ФНЧ;  $n = 1, 2 \dots N$  - соответствующий номер декомпозиционного элемента.

Из анализа эквивалентной схемы рисунок 6 видно, что характеристическое сопротивление каждого ФНЧ различно и увеличивается от конца нагрузки к началу от  $R/N$  до  $R$ . Поэтому при одинаковых паразитных емкостях декомпозиционных элементов значения индуктивностей  $L_n$  зависят от порядкового номера  $n$ . Таким образом, при декомпозиции мощного резистора его общая паразитная емкость уменьшается в  $N$  раз и во столько же раз увеличивается полоса рабочих частот.

Многоэлементная нагрузка включает в свой состав согласующие индуктивности и конденсатор, которые в СВЧ диапазоне реализуют в виде коротких отрезков микрополосковых линий передачи с высоким и низким волновым сопротивлением. Для двухэлементной нагрузки мощностью 100 Вт в соответствии с эквивалентной схемой (рисунок 6) была разработана топология на микрополосковых линиях. На рисунке 7 показана 3D-электромагнитная модель исследуемой нагрузки. На подложке из окиси бериллия толщиной 4 мм расположены два микрополосковых пленочных резистора (волновое сопротивление 40 Ом) и микрополосковые отрезки линий из меди с волновым сопротивлением  $\rho = 60$  Ом, представляющие собой индуктивные элементы.

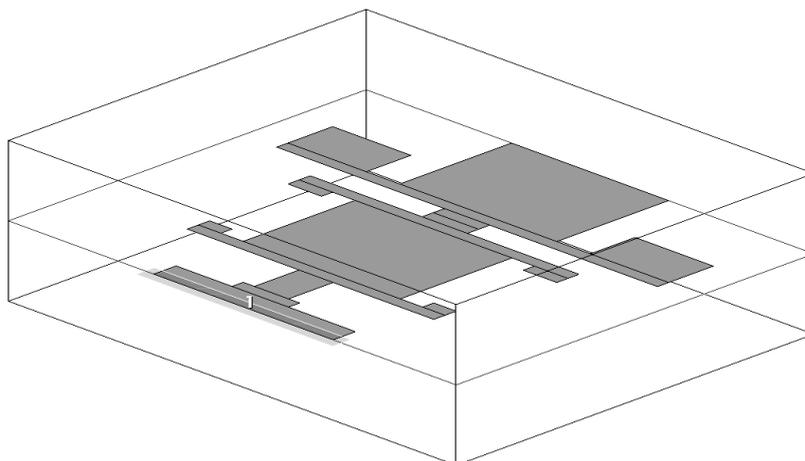


Рисунок 7. 3D- модель двухэлементной микрополосковой нагрузки

График частотной зависимости КСВН по входу для двухэлементной микрополосковой нагрузки, полученный методом электродинамического моделирования, представлен на рисунке 8.

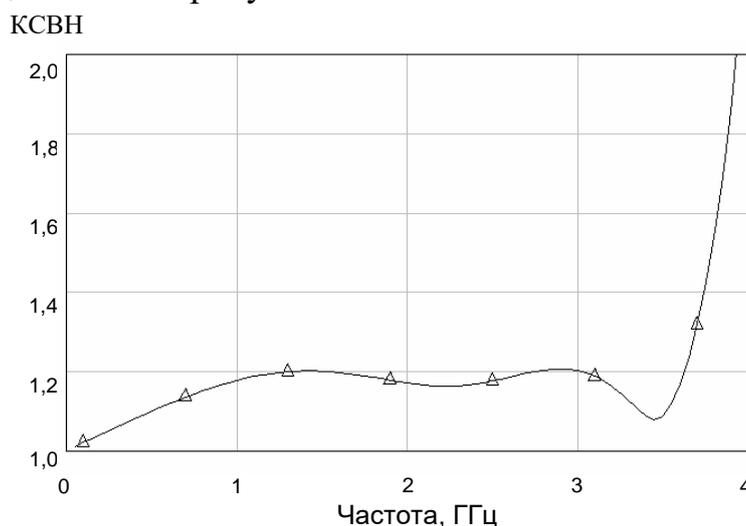


Рисунок 8 – КСВН по входу двухэлементной микрополосковой нагрузки

Таким образом, разработанная конструкция и топология многоэлементной микрополосковой нагрузки большой мощности обеспечивают расширение полосы рабочих частот до значения, близкого к теоретическому пределу.

В предложенных в данном разделе многоэлементных нагрузках был дополнительно введен согласованный выход для подключения измерительной аппаратуры, как показано на рисунке 9.

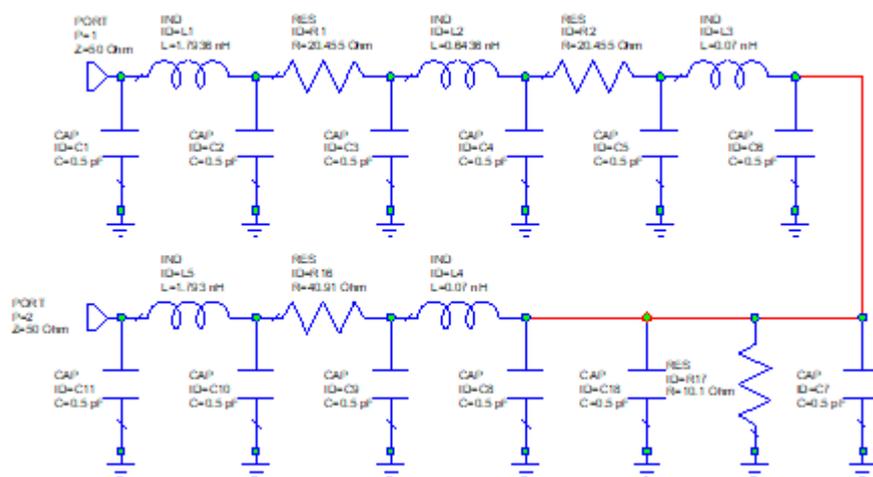


Рисунок 9 - Многоэлементная нагрузка-аттенуатор с контрольным выходом

Частотная зависимость коэффициента передачи (АЧХ) нагрузки-аттенуатора (рисунок 9) представлена на рисунке 10.

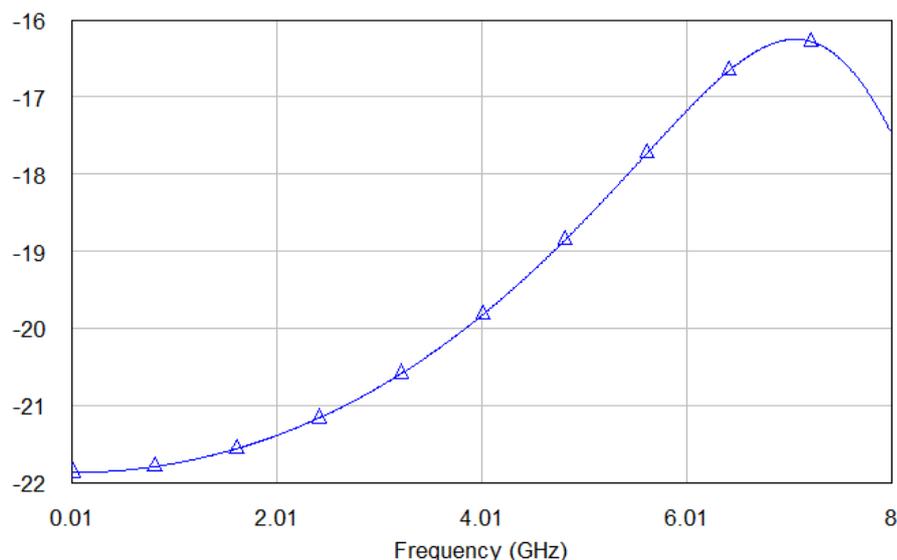


Рисунок 10 - АЧХ нагрузки-аттенуатора с контрольным выходом

**В третьей главе** предложен и исследован принцип построения мощных широкополосных СВЧ-нагрузок в виде последовательного включения микрополосковых линий передачи с возрастающим поверхностным сопротивлением. В результате исследования было установлено, что нагрузки в виде линий передачи с диссипативными потерями имеют высокое качество согласования в сантиметровом диапазоне частот, но плохо согласованы на низких частотах.

Принцип работы нагрузки на основе линий с потерями основан на значительном затухании в тонком резистивном слое падающей и отражённой волны. Входное сопротивление нагруженной линии с потерями определяется следующим выражением:

$$Z_{in} = Z \frac{R \cdot ch(\gamma l) + Z \cdot sh(\gamma l)}{R \cdot sh(\gamma l) + Z \cdot ch(\gamma l)}, \quad (5)$$

где  $R$  - сопротивление нагрузки для линии с потерями;  $\gamma$  - постоянная распространения микрополосковой линии с потерями;  $l$  - длина микрополоскового проводника;  $Z$  - волновое сопротивление микрополосковой линии с потерями.

При большом погонном сопротивлении и малых потерях в диэлектрике в области низких частот ( $\omega \rightarrow 0$ ) волновое сопротивление микрополосковой линии с потерями  $Z$  равно:

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} Z = Z_{\max} = \sqrt{\frac{R'}{G'}} = \sqrt{\frac{R'}{2\pi f_n \cdot \varepsilon_r \varepsilon_0 tg \delta}}, \quad (6)$$

где  $\varepsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$  Ф/м - диэлектрическая проницаемость вакуума;  $R'$  - погонное (на единицу длины) сопротивление микрополоскового проводника;  $G'$  - погонная проводимость диэлектрика микрополосковой линии  $\varepsilon_r$  - относительная диэлектрическая проницаемость;  $tg \delta$  - тангенс угла диэлектрических потерь;  $f_n$  - частота, на которой измеряется  $tg \delta$  ( $10^{10}$  Гц).

На высоких частотах ( $\omega \rightarrow \infty$ ) волновое сопротивление равно:

$$Z(\omega \rightarrow \infty) = Z_{\min} = \sqrt{\frac{L'}{C'}} = R, \quad \lim_{\omega \rightarrow \infty} Z_{in} = R, \quad (7)$$

где  $L'$  - погонная индуктивность микрополосковой линии;  $C'$  - погонная емкость микрополосковой линии.

Результаты расчета КСВН по входу для короткозамкнутой ( $R=0$ ) линии с потерями, разомкнутой линии ( $R \rightarrow \infty$ ) и согласованной линии ( $R = 50$ ) Ом, показаны на рисунке 11.

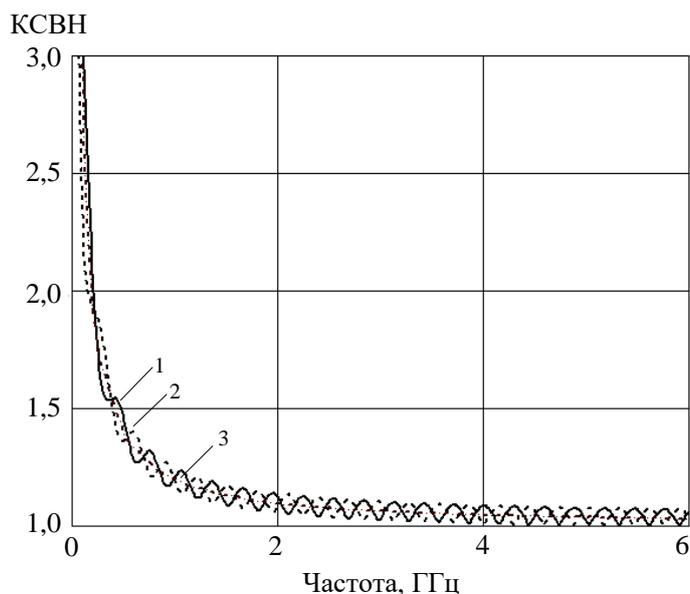


Рисунок 11 – КСВН по входу микрополосковой линии с потерями:

1 –  $R = 0$  Ом; 2 –  $R \rightarrow \infty$ ; 3 –  $R = 50$  Ом

Результаты расчетов показали, что у нагрузок данного типа с увеличением погонного сопротивления  $R'$  увеличивается нижняя граница полосы рабочих

частот. Для предлагаемых микрополосковых нагрузок рекомендуемое поверхностное сопротивление находится в пределах  $R_s = 2 \div 10$  Ом/квadrat.

Далее была исследована двухступенчатая нагрузка с увеличивающимся поверхностным сопротивлением резистивных материалов ступеней, 3D-модель которой показана на рисунке 12. В данной нагрузке поверхностное сопротивление первого отрезка линии передачи было выбрано в 2 раза меньше, чем во втором отрезке. Разработанная топология позволяет равномерно распределить поглощаемую СВЧ-мощность между ступенями и увеличить допустимую входную мощность.

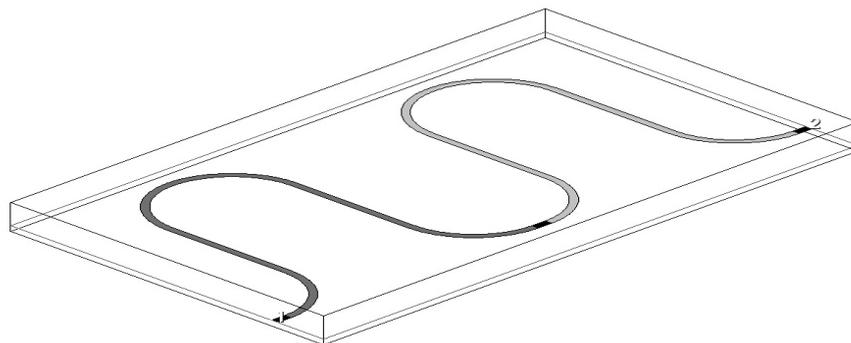


Рисунок 12 – Двухступенчатая микрополосковая нагрузка

График КСВН по входу двухступенчатой микрополосковой нагрузки представлен на рисунке 13.

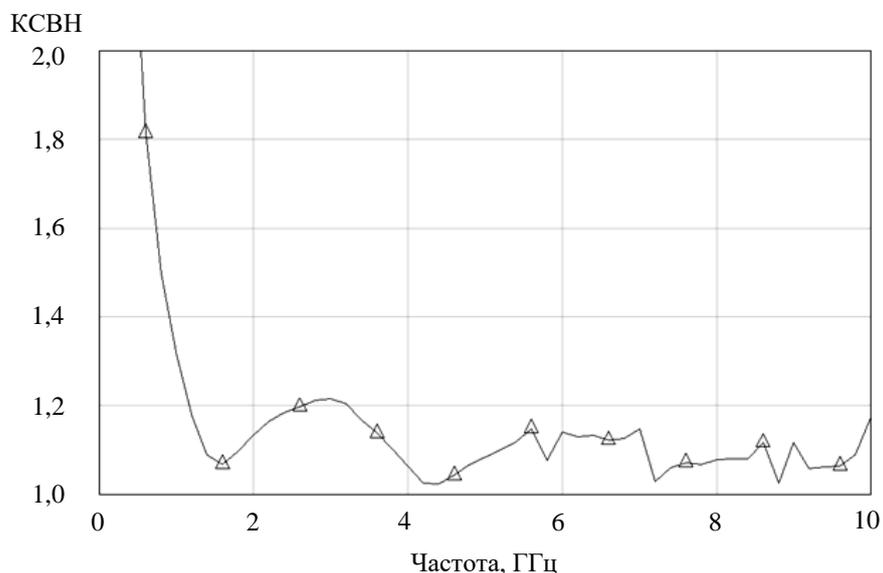


Рисунок 13 – КСВН по входу для двухступенчатой нагрузки

Соотношение для коэффициента передачи каждой ступени имеет вид

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

где  $K_{(n)}$  – коэффициент передачи по мощности  $n$ -ой ступени распределенной нагрузки;  $N$  – общее количество ступеней в нагрузке;  $K_p$  – результирующий коэффициент передачи по мощности многоступенчатой линии с потерями.

Далее были определены выражения для погонного сопротивления (9) и поверхностного сопротивления (10) резистивной пленки:

$$R'(n) = \frac{Z}{l(n)} \cdot \ln \left( \frac{n \cdot K_p + (N - n)}{(n - 1) \cdot K_p + (N - n + 1)} \right), \quad (9)$$

$$R_s(n) = \frac{R \cdot w}{l(n)} \ln \frac{n \cdot K_p + (N - n)}{(n - 1) \cdot K_p + (N - n + 1)}. \quad (10)$$

**В четвёртой главе** обоснован и развит многоканальный метод построения широкополосных СВЧ нагрузок высокого уровня мощности для диапазона частот 0-10 ГГц. В основе многоканального метода построения широкополосных СВЧ нагрузок лежит использование частотно-разделительных устройств, которые представляют собой неотражающие по входу структуры. При работе на большом уровне мощности наиболее предпочтительными в конструктивном отношении оказываются диплексеры на взаимно дополняющих баттервортовских фильтрах нижних (ФНЧ) и фильтрах верхних (ФВЧ) частот. Схемотехническая реализация фильтрового диплексера с частотой стыковки  $f_0 = 5$  ГГц на отрезках линий передачи показана на рисунке 14.

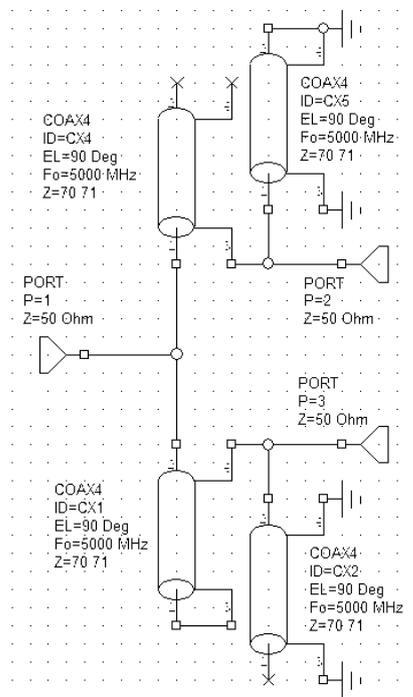


Рисунок 14 - Диплексер на взаимно дополняющих ФНЧ и ФВЧ

В описываемом фильтровом диплексере для входной нормированной проводимости выполняется условие

$$\bar{Y}_{IN}(\omega) = \bar{Y}_{LPF}(\omega) + \bar{Y}_{HPF}(\omega) = 1 = const. \quad (11)$$

Схема диплексера (рисунок 14) составлена на основе применения преобразования Ричардса к низкочастотному нормированному прототипу, выполненному на сосредоточенных катушках индуктивности и конденсаторах

$$S = j\Omega = jtg \frac{\pi\omega}{2\omega_0} = jtg \theta, \quad (12)$$

где  $\omega_0$  - частота стыковки фильтров диплексера;  $\theta$  - электрическая длина отрезков линий.

В соответствии с преобразованием (12) нормированное сопротивление  $\bar{Z}_L$  короткозамкнутого отрезка линии равно соответствующей нормированной индуктивности низкочастотного прототипа  $\bar{Z}_L = \bar{L}$ . Нормированное сопротивление  $\bar{Z}_C$  разомкнутого отрезка линии связано с нормированной емкостью низкочастотного прототипа соотношением  $\bar{Z}_C = 1/\bar{C}$ .

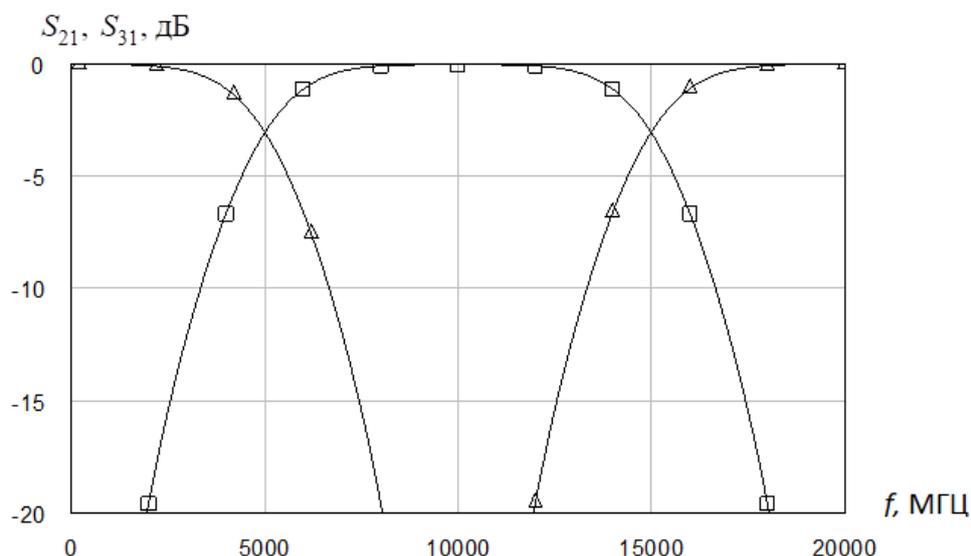


Рисунок 15 - АЧХ диплексера на взаимно дополняющих фильтрах

На рисунке 15 приведены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) низкочастотного и высокочастотного каналов диплексера, которые периодически повторяются, что обусловлено свойствами преобразования Ричардса.

На основе эквивалентных преобразований Куроды было проведено усовершенствование схемы диплексера. В модифицированном диплексере за счет исключения частотно-независимого трансформатора сопротивление нагрузки в высокочастотном канале уменьшено в 3 раза. Во столько же раз увеличилась полоса частот согласующей-компенсирующей цепи высокочастотного канала диплексера.

На рис. 16 представлена схема модифицированного диплексера. Нормированное волновое сопротивление  $\bar{Z}_E$  четвертьволновых инверторов определяется следующим соотношением

$$\bar{Z}_E = 1/(1 + \bar{C}) = 1/(1 + 0,7071) = 0,586.$$

Нормированное волновое сопротивление  $\bar{Z}_H$  короткозамкнутого отрезка линии в высокочастотном канале равно

$$\bar{Z}_H = \frac{\bar{L}}{1 + 1/\bar{L}} = 1,4142/1 + 0,7071 = 0,8284.$$

Нормированное сопротивление  $\bar{Z}_L$  короткозамкнутого отрезка линии в низкочастотном канале равно

$$\bar{Z}_L = \frac{\bar{C}}{1 + \bar{C}} = 0,7071/(1 + 0,7071) = 0,4142.$$

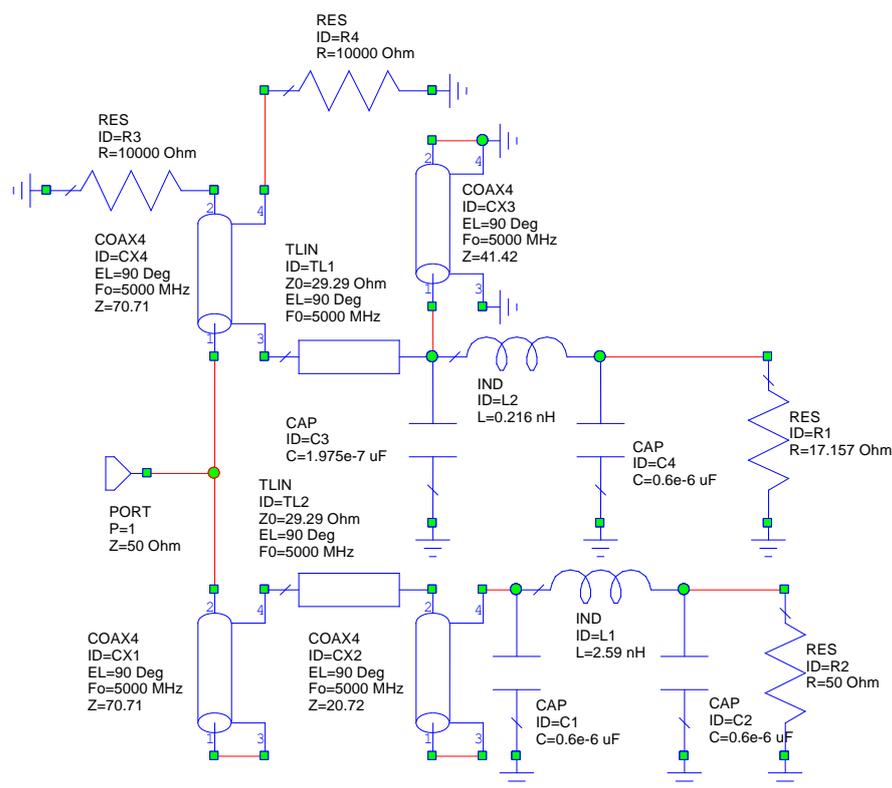


Рисунок 16 – Электрическая схема модифицированного диплексера

Следует отметить, что денормированные значения волновых сопротивлений короткозамкнутых и разомкнутых шлейфов имеют удобную физическую реализуемость в виде симметричных двухпроводных ленточных линий, которые устанавливаются перпендикулярно несимметричным микрополосковым линиям инверторов.

Для модифицированного диплексера была рассчитана частотная зависимость КСВН по входу, приведенная на рисунке 17. На рисунке 17 для сравнения приведена также характеристика одноканальной нагрузки.

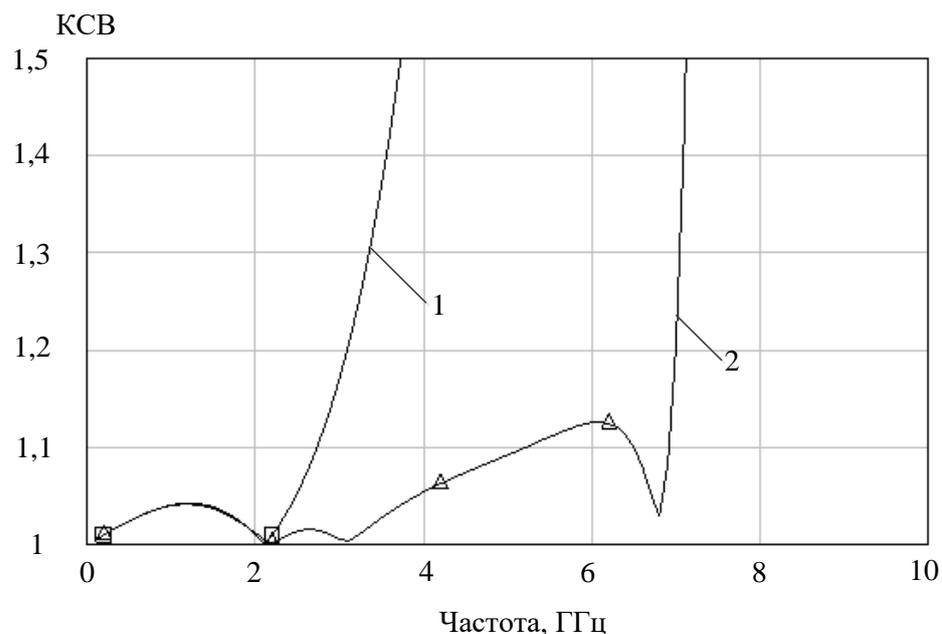


Рисунок 17 - КСВ по входу одноканальной и двухканальной нагрузки: 1 – одноканальная нагрузка; 2 – двухканальная нагрузка

В качестве нагрузки низкочастотного канала использовался заземленный с одной стороны планарный пленочный резистор 50 Ом с паразитной входной емкостью 0,6 пФ. В качестве нагрузки высокочастотного канала использовался планарный пленочный резистор 17,16 Ом такой же площади и с такой же паразитной емкостью 0,6 пФ.

С учетом трансформации сопротивления нагрузки высокочастотного канала предельно достижимая полоса рабочих частот  $\Delta f_{\max}$  рассматриваемой двухканальной нагрузки определяется соотношением

$$\Delta f_{\max} \leq \frac{(1+1/\bar{L})^2}{2RC_{IN} \ln|1/\Gamma|}, \quad (13)$$

где  $C_{IN}$  - входная емкость планарного пленочного резистора;  $\Gamma$  - допустимое значение коэффициента отражения по входу двухканальной нагрузки.

В четвертой главе было также предложено использовать в качестве широкополосной нагрузки неотражающий фильтр нижних частот, показанный на рисунке 18. В качестве нагрузки и балластных резисторов График для КСВН по входу представлен на рисунке 19.

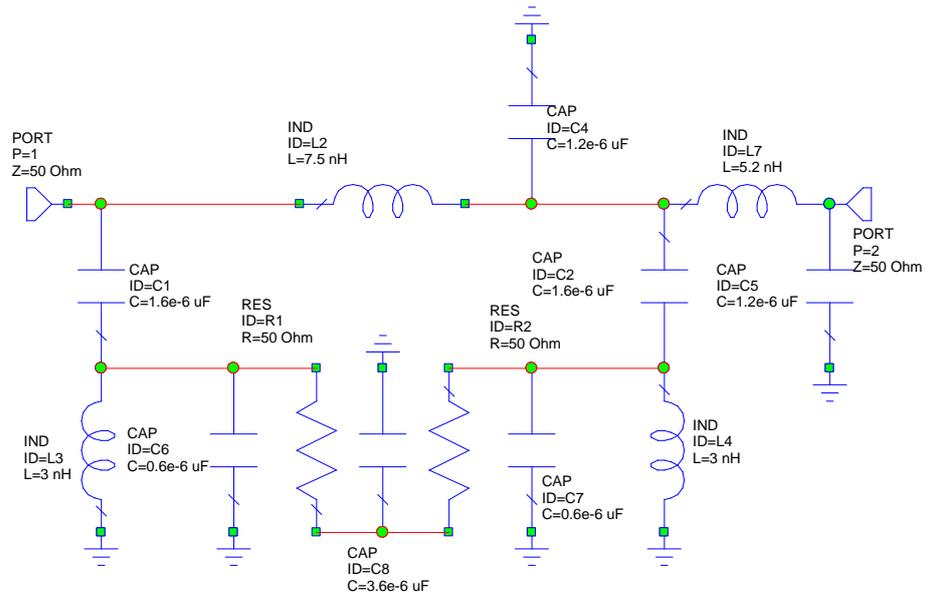


Рисунок 18 – Широкополосная нагрузка - неотражающий ФНЧ

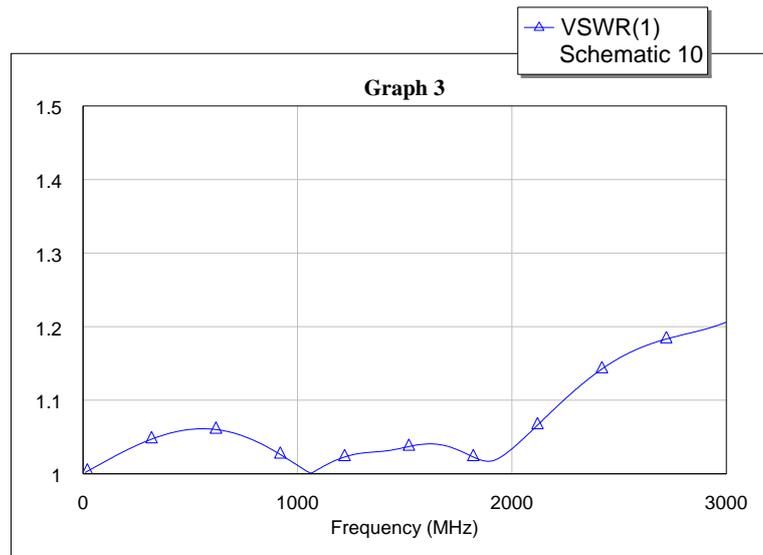


Рисунок 19 – КСВН по входу для нагрузки в виде неотражающего ФНЧ

**В пятой главе** приведены результаты экспериментального исследования основных узлов многоканальных нагрузок, выполненных как в сосредоточенном, так и в распределенном элементном базисе. На рисунке 20 приведена фотография распределенных нагрузок сантиметрового диапазона.

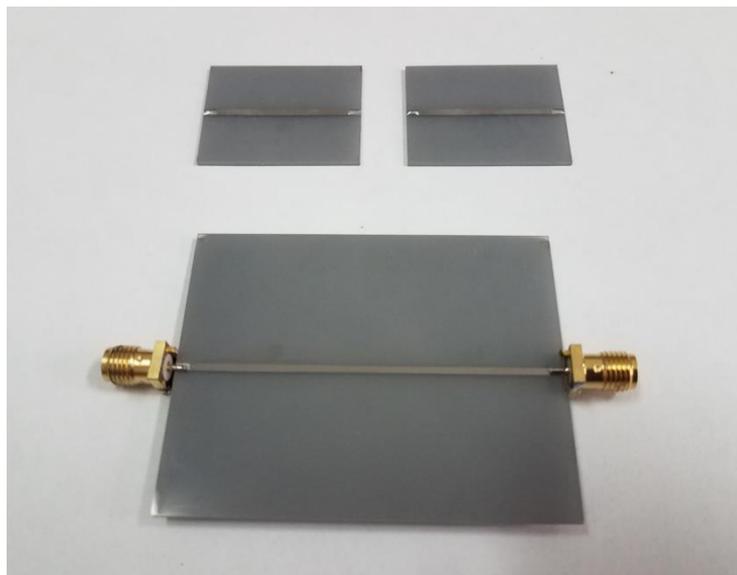


Рисунок 20 – Распределенные нагрузки сантиметрового диапазона

Проведены исследования частотных свойств пленочного резистора на уровень мощности 120 Вт, нагрузки в виде неотражающего ФНЧ, распределенных нагрузок длиной 25 мм и 55 мм и диплексера 1 порядка на отрезках линий передачи.

Результаты экспериментов достаточно хорошо соответствуют результатам расчетов.

### **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

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

1. На основе обзора литературы сделан вывод о целесообразности и перспективности построения многоканальных сверхширокополосных СВЧ нагрузок высокого уровня мощности на микрополосковых пленочных резисторах сосредоточенного и распределенного типа.

2. Сделана потенциальная оценка широкополосных свойств для многоэлементных пленочных нагрузок, используемых в низкочастотных каналах исследуемого класса нагрузок. Показано, что за счет использования внутренних согласующих индуктивных элементов структура многоэлементной нагрузки приближается к полураспределенной, что позволяет в несколько раз увеличить полосу рабочих частот по сравнению с одноэлементными нагрузками.

3. Исследованные и разработанные распределенные нагрузки на основе линий передачи с большими диссипативными потерями в микрополосковом проводнике, расположенном на диэлектрической подложке без потерь, позволяют реализовать полосу рабочих частот при многоканальном построении до 10 ГГц и более при уровне входной мощности до 100 Ватт.

4. Предложенные варианты построения диплексеров в распределенном элементном базисе за счет периодического повторения АЧХ позволяют на их основе реализовать сверхширокополосные нагрузки, объединяющие в себе

большое число каналов, разделенных по частоте и согласованных с более узкополосными нагрузками.

5. Рассмотренные в работе методы построения и схемотехническая реализация многоканальных СВЧ нагрузок и аттенюаторов в полном объеме применимы для построения нагрузок малой и средней мощности для диапазона частот до 10 ГГц.

6. Предложенные в работе схемотехнические и конструктивные решения для многоканальных нагрузок обеспечивают высокое качество согласования на частотах от 0 до 10 ГГц. Полученные результаты обладают новизной, имеют практическую ценность для применения в системах цифрового телевидения, связи, радиоканалах телекоммуникационных систем и радиолокации. По своим техническим характеристикам предложенные устройства не уступают современным зарубежным аналогам.

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

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

1. Савенков Г.Г. Синтез согласующих цепей для пленочных СВЧ-нагрузок и аттенюаторов / В.П. Разинкин, Г.Г. Савенков, М.Г. Рубанович, В.В. Югай // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Радиолокационная техника, 2017. – № 4. – С. 77–80.

2. Савенков Г.Г. Многоступенчатая микрополосковая СВЧ-нагрузка / Г.Г. Савенков, В.П. Разинкин, А.Д. Мехтиев // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 4. С. 53-57.

3. Савенков Г.Г. Широкополосные СВЧ нагрузки на ступенчато-неоднородных линиях с потерями / Г.Г. Савенков, В.П. Разинкин, В.А. Хрусталеv // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 4. С.68-72.

### **Патенты**

4. Микрополосковая нагрузка. Патент на изобретение / Г.Г. Савенков, В.П. Разинкин. Заявитель и правообладатель ФГОБУ ВО «НГТУ», №2667348. Опубликовано 18.09.2018, Бюллетень № 26.

5. Микрополосковая нагрузка. Патент на полезную модель / Г.Г. Савенков, В.П. Разинкин. Заявитель и правообладатель ФГОБУ ВО «НГТУ», №181510. Опубликовано 17.07.2018. Бюллетень № 20.

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

6. Савенков Г.Г. Широкополосный СВЧ диплексер / Г.Г. Савенков, В.П. Разинкин // Материалы Российской научно-технической конференции «Современные проблемы телекоммуникаций». Новосибирск. Изд-во Сиб ГУТИ.– 2018. – С. 669-673.

7. Савенков Г.Г. Сверхширокополосная микрополосковая нагрузка / Савенков Г.Г. // Сборник научных трудов конференции «Современные проблемы радиоэлектроники». – Сибирский Федеральный университет, Красноярск, 2018. – С. 297-299.

8. Савенков Г. Г. Berillium oxide ceramics wideband UHF attenuator / Савенков Г. Г., Югай В. В. // Сборник трудов международной научно-

практической конференции «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации» (Сагиновские чтения № 10). – Карагандинский государственный технический университет, Республика Казахстан, Караганда, 2018. – С. 287-289.

9. Богомолов П.Г. Широкополосные многокаскадные СВЧ аттенюаторы / П.Г. Богомолов, Г.Г. Савенков, А.А. Столяренко, В.П. Разинкин // материалы Всерос. науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов «Старт в будущее – 2017» ( Санкт-Петербург, 19 апреля 2017 г.) – Санкт-Петербург, КБСМ, 2017. – С. 408–412.

10. Савенков Г.Г. Оконечные нагрузки для мощных радиопередающих устройств / Г.Г. Савенков, В.П. Разинкин // Материалы Российской научно-технической конференции «Современные проблемы телекоммуникаций». Новосибирск, 21–22 апреля 2016 г. – Новосибирск. Изд-во СибГУТИ.– 2016. – С. 794-797.

11. Савенков Г.Г. Оптимизация формы пленочных СВЧ-нагрузок / Савенков Г.Г. // Сборник научных трудов Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и студентов «Современные проблемы радиоэлектроники» (Красноярск, 4–5 мая 2017 г.) – Красноярск. Изд-во СФУ. – 2017. – С. 459–462.

12. Савенков Г.Г. Широкополосная микрополосковая СВЧ нагрузка / Савенков Г.Г. // Сборник научных трудов конференции «Наука. Технологии. Инновации» (Новосибирск, 4–8 дек. 2017 г.) – Новосибирск. Изд-во НГТУ. – 2017. – Ч. 6. – С. 24-29.

13. Савенков Г.Г. Широкополосная пленочная нагрузка в СВЧ диапазоне / Г.Г. Савенков, В.П. Разинкин // 13 Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления». – Томск. – 2017.– Часть 1.– С. 148-150.

14. Film microwave loads of a circle sector shape / Gleb G. Savenkov, Vladimir P. Razinkin, Mikhail G. Rubanovich // The 18 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices «EDM 2017»./ Респ. Алтай, Эрлагол, 29 июня – 3 июля 2017 г. – Новосибирск, НГТУ.–2017. – С. 199-201. (Web of science)

15. Savenkov G.G. Multi-element film microwave load / Gleb G. Savenkov, // The 19 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices «EDM 2018». Респ. Алтай, Эрлагол, 29 июня – 3 июля 2018 г.) – Новосибирск, НГТУ. – 2018. – С. 216-219. (Web of science)