

На правах рукописи



Арутюнян Артуш Арсенович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ПОГЛОЩАЮЩИХ ФИЛЬТРОВ СВЧ НА ОСНОВЕ СЕКЦИЙ
СВЯЗАННЫХ ПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЙ С НЕОДНОРОДНЫМ
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ЗАПОЛНЕНИЕМ**

2.2.14 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск - 2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР).

Научный руководитель: **Малютин Николай Дмитриевич**
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры ТУСУР

Официальные оппоненты: **Горбачев Анатолий Петрович**
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры радиоприемных и радиопередающих устройств ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет».

Журавлев Виктор Алексеевич
кандидат физико-математических наук, доцент,
доцент кафедры радиоэлектроники ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Московский институт электроники и математики им. А.Н. Тихонова НИУ ВШЭ).

Защита состоится 24 ноября 2026 года в 9 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.415.01, созданного на базе 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/lgdm3htc>

Автореферат разослан «___» сентября 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.415.01
доктор технических наук, доцент



Суровцев Р.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Быстрое развитие средств связи, радиолокации, управления постоянно усложняет электромагнитную обстановку. Поэтому становится все более актуальным создание новых и совершенствование известных технологий обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС), помехоустойчивости и живучести электронной аппаратуры. Решение перечисленных задач при воздействии радиочастотных широкополосных сигналов традиционно осуществляется с помощью частотно-селективных цепей (ЧСЦ). Одной из основных, но не единственной, функцией ЧСЦ, является формирование заданной частотной зависимости коэффициента передачи, определяемого через коэффициент S_{21} матрицы рассеяния S . Устройства, реализующие эту функцию, представляют собой фильтры разных типов, строящиеся на основе сосредоточенных и распределенных цепей. В полосах частот пропускания такие устройства имеют максимально возможный коэффициент передачи S_{21} и малые возвратные потери, определяемые коэффициентом отражения S_{11} . На частотах полос загираания наоборот – как можно более полное отражение и минимальный коэффициент передачи. Этот тип фильтров называют отражающими фильтрами (ОФ). Применение ОФ в радиотехнических системах позволяет достичь высокие показатели ЭМС, если возникающие отражения на частотах загираания не сказываются на работе аппаратуры. Однако в ряде случаев наличие отражений в трактах передачи сигналов приводит к снижению ЭМС. Так в работе Цинсянь Ли показано, что применение ОФ в понижающих преобразователях приводит к отражению большого количества внеполосных сигналов на входе и выходе системы. Отраженные сигналы генерируют дополнительные продукты интермодуляции, т.к. преобразователи содержат нелинейные цепи. Это порождает внутриволосные и внеполосные помехи. Внутриволосные помехи более разрушительны, чем внеполосные помехи, поскольку они могут перекрываться с сигналом промежуточной частоты и ухудшать качество сигнала.

В исследованиях Моргана были представлены неотражающие фильтры (НФ), позволяющие осуществлять селекцию сигналов в заданной полосе частот пропускания и уменьшать помехи путем поглощения внеполосных гармоник. Одновременно с разработкой неотражающих фильтров актуальны исследования по применению НФ, например, для подавления влияния близко расположенных антенн.

Степень разработанности темы. В последнее время значительно вырос интерес к неотражающим фильтрам, которые в научно-технической литературе называют также поглощающими, что отражено во многих научных публикациях и патентах. Следует отметить отечественных авторов публикаций по теме поглощающих фильтров (ПФ): Адрианов М.К., Веснин С.Г., Владимиров Д.Е., Гойчук В.М., Ладур А.А., Лоцилов А.Г., Малютин Г.А., Малютин Н. Д., Осипенков В.М., Разинкин В.П., Семенов Э.В., Тиличенко В.М., Тиличенко М.П., Чепко Т.А., Чинь То Тхань и др. Их вклад в развитие технологии поглощающих фильтров разноплановый, так же как и зарубежных авторов: Morgan M. A., Boyd T. A., Cai J., Chaudhary G., Chen J.X., Deng Z., Fan M., Gómez-

García R., Huang Y.C., Jeong S.W., Jeong Y., Jiang Q.Y., Jin X.H., Kong M., Lee G., Lee J., Li Y., Lin Y.S., Liu X., Liu C., Luo X., Malki M., Wu X., Yang L., Zhang R., Zhang S. и др.

Возрастающий интерес к теме создания и применения поглощающих частотно-селективных устройств с центральной частотой полосы пропускания до 6 ГГц и их применение в современной радиоаппаратуре делает разработку и исследование поглощающих фильтров актуальным направлением развития компонентной базы СВЧ.

Цель работы – повысить центральную частоту полосы пропускания поглощающих полосно-пропускающих фильтров (ПППФ) СВЧ до 6 ГГц на основе применения двух- и трехпроводных связанных полосковых линий с буферными резонансными нагрузками (БРН) со специальной частотной характеристикой входного импеданса путем поиска новых технических решений, моделирования и экспериментальных исследований схем и конструкций.

Для достижения поставленной цели поставлены следующие задачи:

1. Провести аналитический литературный обзор по теме поглощающих фильтров СВЧ, выполненных на основе сосредоточенных, распределено-сосредоточенных и распределённых цепей.

2. Провести классификацию, моделирование и экспериментальные исследования секций связанных полосковых линий с неоднородным диэлектрическим заполнением, образующих буферные резонансные нагрузки (БРН) со специальной частотной характеристикой входного импеданса для построения поглощающих фильтров.

3. Выполнить квазистатическое и электродинамическое моделирование, экспериментальное исследование поглощающих полосно-пропускающих фильтров СВЧ на основе двухпроводных и трехпроводных связанных линий с сосредоточенными и распределёнными БРН.

4. Проектирование конструкций поглощающих фильтров СВЧ на основе связанных полосковых линий с буферными резонансными нагрузками в виде секций связанных линий с неоднородным диэлектрическим заполнением.

Научная новизна

1. Установлено, что буферные резонансные нагрузки, выполненные в виде отрезков несимметричных полосковых линий, нагруженных на согласованное сопротивление, на поверхности полосок которых размещены отрезки брусчатых полосковых линий, образующих с отрезками несимметричных полосковых линий секции связанных полосковых линий с неоднородным диэлектрическим заполнением, обладают разреженным спектром резонансных частот секций с зависимостью входного импеданса, близкого к значениям согласованных нагрузок в полосе частот пропускания БРН как четырехполюсника, а в полосе запираания стремящегося к минимальному (порядка $10^{-1} - 10^{-2}$) или максимальному значению (порядка $10^3 - 10^4$ Ом) в зависимости от схемы соединения полоски брусчатой полосковой линии с токонесущей полоской несимметричной полосковой линии.

2. Показана идентичность частотных характеристик волновых параметров в ограниченном частотном диапазоне отрезка полосковой квази-планарной

трехпроводной связанной линии с характеристиками связанных двухпроводных линий, если центральный проводник трехпроводной связанной линии не нагружен, находится под плавающим потенциалом и связан электромагнитно с двумя другими токонесущими полосками.

3. Разработаны электродинамические модели буферных резонансных нагрузок и трехпроводных связанных линий, позволяющие проводить анализ частотных характеристик новых конструкций поглощающих фильтров на основе двухпроводных и трехпроводных связанных линий, осуществлять проектирование поглощающих фильтров по заданным параметрам конструкций и материалов.

Теоретическая значимость

1. Путем моделирования волновых свойств секций связанных линий показана возможность реализации буферных резонансных нагрузок со специальной частотной характеристикой входного импеданса, необходимой для создания поглощающих полосно-пропускающих полосковых фильтров.

2. Предложена классификация секций связанных полосковых линий с неоднородным в поперечном сечении диэлектрическим заполнением по признаку схемы и топологии межсоединений и достигаемым особенностям частотной зависимости коэффициентов матрицы рассеяния S .

3. Доказана возможность получения ограниченной идентичности модальных и волновых параметров секций на основе двухпроводных и трехпроводных связанных полосковых линий при использовании сильной связи между планарно расположенными токонесущими полосками и дополнительной полоской с плавающим потенциалом, перекрывающей планарные полоски.

Практическая значимость. Предложены и разработаны макеты полосковых поглощающих полосно-пропускающих фильтров, выполненных как с использованием трехпроводных структур, так и с использованием двухпроводных структур. Разработана математическая модель, позволяющая рассчитывать частотные характеристики поглощающих фильтров СВЧ при известных погонных параметрах полосковых линий.

Предложена новая конструкция буферных резонансных нагрузок поглощающих фильтров, которая является замещением RLC-цепей и позволяющая увеличить центральную частоту полосы пропускания при сохранении поглощающих свойств.

Разработанные поглощающие полосно-пропускающие фильтры используются в интеграции с антеннами, образуя новый класс устройств – антенн-фильтров, в которых достигается подавление отраженных волн при передаче и приеме сигналов.

Получены результаты экспериментальных исследований частотных характеристик полосковых поглощающих фильтров, которые составляют базу данных реальных параметров ПФ.

Методы исследования. При выполнении работы проводилось математическое моделирование, электродинамический расчет и экспериментальные измерения. Разработана модель в MathCad, выполнены электродинамический анализ в программе COMSOL Multiphysics и экспериментальные измерения с

применением векторных анализаторов цепей производства АО «НПФ «Микран» и ООО «Планар» с подтвержденными метрологическими характеристиками.

Положения, выносимые на защиту

1. Формирование частотной характеристики поглощающих полосно-пропускающих фильтров на основе отрезков связанных полосковых линий с неоднородным в поперечном сечении диэлектрическим заполнением достигнуто включением в диагональные плечи буферных резонансных нагрузок нового типа, частотная зависимость коэффициента передачи которых инверсна частотной зависимости коэффициента передачи поглощающих полосно-пропускающих фильтров, что достигается обеспечением специальной частотной зависимости входного импеданса буферных резонансных нагрузок, близких к значению 50 Ом на частотах записи поглощающих полосно-пропускающих фильтров и стремящегося к минимальному, (порядка $10^{-1} - 10^{-2}$ Ом) или максимальному значению (порядка $10^3 - 10^4$ Ом) в полосе частот пропускания поглощающих полосно-пропускающих фильтров. При этом коэффициент отражения фильтров в полосе записи уменьшается до минус 10 – 20 дБ по отношению к фильтрам отражающего типа.

2. Новая конструкция поглощающего полоскового полосно-пропускающего фильтра на основе отрезков трехпроводных связанных полосковых линий в виде планарно расположенных связанных токонесущих полосок, перекрытых третьей полоской под плавающим потенциалом и с длиной, равной длине связанных токонесущих полосок, позволяет обеспечить 3 дБ электромагнитную связь между токонесущими полосками и сблизить фазовые скорости синфазных и противофазных волн в токонесущих полосках, необходимые для получения ПППФ на центральную частоту до 2,5 ГГц в квази-планарном исполнении с потерями в полосе пропускания менее 2,5 дБ.

3. Расширен диапазон центральной частоты полосы пропускания до 6 ГГц поглощающих полосно-пропускающих фильтров по новому способу поглощения отраженных волн, что достигается включением в диагональные порты каналов, образуемых двухпроводными и трехпроводными отрезками связанных полосковых линий, буферных резонансных нагрузок на основе связанных полосковых и брусчатых полосковых линий, получены поглощающие фильтры с потерями коэффициента передачи на центральной частоте менее 2,5 дБ и внеполосными коэффициентами отражения и передачи не хуже минус 10 дБ в диапазоне до 9 ГГц.

Достоверность результатов. Проведенные расчеты по построенным математическим моделям предложенных поглощающих фильтров, результаты электродинамического моделирования в COMSOL Multiphysics разработанных устройств подтверждаются качественно и количественно экспериментальными измерениями и сравнением характеристик с аналогами поглощающих фильтров на сосредоточенных элементах.

Апробация результатов. Результаты диссертации прошли экспертную оценку в составе отчетов по выполнению госзадания по проектам FEWM-2020-0039 от 01.03.2020, FEWM-2023-0014 от 16.01.2023 Министерства науки и высшего образования РФ. Разработанные конструкции и модели использованы при

проведении исследований в НИР по хозяйственному договору 14/22 с АО «НПФ «Микран» от 01.06.2022. Результаты докладывались на конференциях: Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления», Томск, 2022 г.; IEEE Int. conf. of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM), Эрлагол (Алтай), 2022, 2023, 2026 г.; IEEE International Scientific and Technical Conference Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE), Домина (Новосибирск), 2023 г.; Международной «Крымской конференции СВЧ-техника и телекоммуникационных технологий» (КрыМиКо), Севастополь, 2024 г.; Международной «Крымской конференции Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии», Севастополь, 2024 г.

Публикации. По результатам исследований опубликованы 24 работы (2 без соавторов): 5 статей в журналах из перечня ВАК, 7 докладов в трудах конференций, индексируемых в WoS и Scopus, получено 5 патентов на изобретения, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 4 доклада в трудах международных конференций, 2 монографии.

Структура и объем диссертации. Содержание диссертации изложено на 163 страницах текста, включает 93 рисунка и 4 таблицы. Список литературы содержит 128 наименований. Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения, списка литературы и приложений.

Личный вклад автора

Результаты, представленные в защищаемых научных положениях, получены лично автором или непосредственно с его участием. Личный вклад состоит в выполнении всех этапов исследования: разработка математической модели, электродинамическое моделирование, макетирование, проведение экспериментальных измерений с обработкой и анализом полученных данных. Постановка задач для проведения экспериментальных исследований, анализа и обобщения полученных данных выполнены совместно с научным руководителем, д.т.н., профессором Малютиным Н.Д.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведены общие сведения по теме исследования и обоснована ее актуальность.

В первом разделе представлен обзор поглощающих фильтров СВЧ на сосредоточенных и распределенно-сосредоточенных элементах. Показана история развития ПФ. Рассмотрены различные ПФ, выполненные как на RLC-элементах, так и на полосковых линиях передачи или на базе связанных линий. А также приведены сведения о режекторных фильтрах СВЧ с особенностями входного импеданса. Показаны режекторные фильтры, выполненные с применением материалов с высокой диэлектрической проницаемостью. Сформулированы задачи исследований.

Во втором разделе рассмотрены вопросы моделирования поглощающих фильтров на основе секций связанных полосковых линий (СПЛ) с неоднородным диэлектрическим заполнением.

В подразделе 2.1 рассмотрена обобщенная структурная схема поглощающих фильтров, показанная на рисунке 1. Особенность этой схемы состоит в применении трех блоков на связанных полосковых линиях в отличие от ранее

разработанных поглощающих фильтров, включающих отрезок СПЛ и буферные резонансные нагрузки в виде RLC-цепи на сосредоточенных элементах.

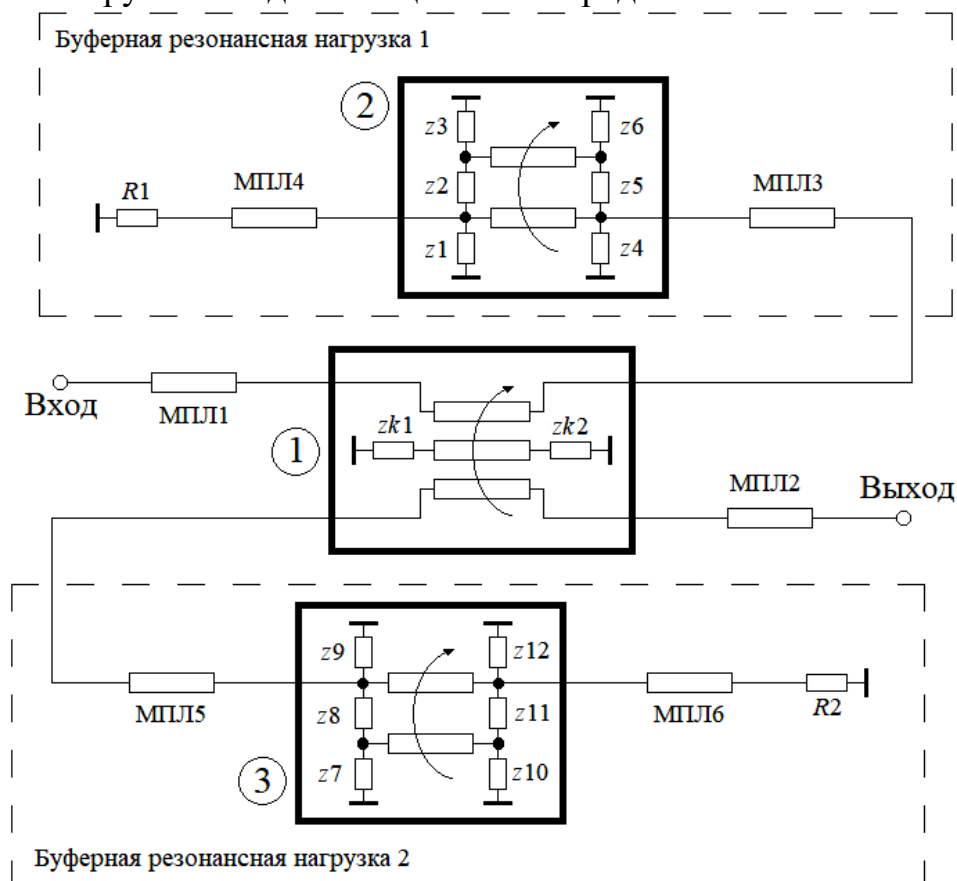


Рисунок 1 – Обобщенная структурная схема поглощающих фильтров: блок 1 – отрезок связанных трехпроводных или двухпроводных связанных полосковых линий; блоки 2 и 3 – буферные резонансные нагрузки, включающие связанные полосковые линии. Составляющие элементы: МПЛ1,..., МПЛ6 – отрезки микрополосковых линий, соединяющие блоки 1, 2, 3; R_1, R_2 – сопротивления нагрузок блоков 2 и 3; $z_1, z_2, \dots, z_{10}$ – сопротивления элементов, образующих варианты схем секций связанных полосковых линий; z_{k1}, z_{k2} – сопротивления краевых неоднородностей трёхпроводных связанных линий

В подразделе 2.2 на основе представленной обобщенной схемы разработана конструкция поглощающего полосно-пропускающего фильтра на основе трех блоков двухпроводных связанных линий (рисунок 2). Конструкция содержит: основную подложку 1 с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_{r1} ; отрезок связанных полосковых линий на вертикально расположенной подложке 2 из диэлектрика с ϵ_{r2} , установленную в зазоре между горизонтально расположенными полосками СПЛ; входные/выходные подводящие линии 3 и 4; подложки 5 с проницаемостью ϵ_{r3} ; отрезки брусчатых полосковых линий 6, выполненные на керамике с проницаемостью ϵ_{r4} ; отрезки микрополосковых линий (МПЛ) 7 и 8; согласованные нагрузки в виде резисторов 9, соединенных с заземляющими площадками 10.

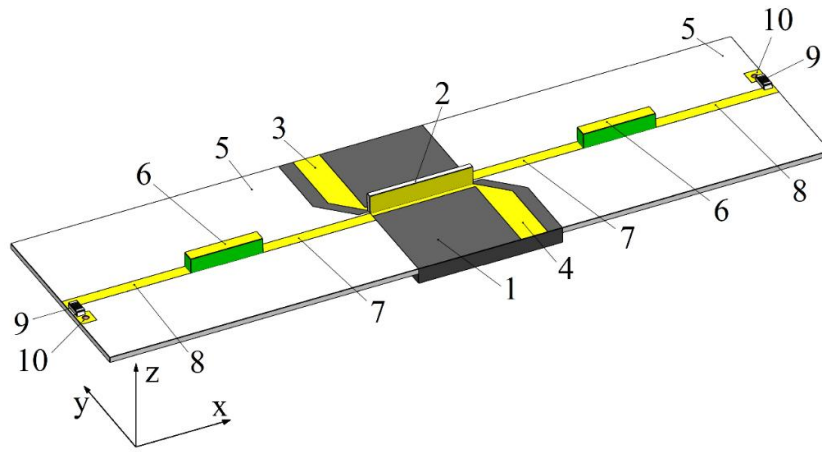


Рисунок 2 – Конструкция поглощающего полосно-пропускающего фильтра на трех отрезках двухпроводных связанных линий: 1 – основная подложка с диэлектрической проницаемостью ϵ_{r1} ; 2 – СПЛ на вертикально расположенной подложке из диэлектрика с ϵ_{r2} ; 3 и 4 – входные/выходные подводящие линии; 5 – подложка с диэлектрической проницаемостью ϵ_{r3} ; 6 – брусчатые полосковые линии на подложке с диэлектрической проницаемостью ϵ_{r4} ; 7 и 8 – отрезки МПЛ; 9 – согласованные нагрузки; 10 – заземляющие площадки

Структурная схема поглощающего полосно-пропускающего фильтра, включающего три отрезка двухпроводных связанных линий, позволяет перейти к моделированию ПППФ с применением матричного анализа. СПЛ представляются восьмиполусниками, матрицы передачи которых известны. Отрезки МПЛ по существу являются четырехполусниками, но для удобства анализа схемы размерность их матриц передачи увеличивается введением перемычек до восьмиполусника. В результате приходим к упрощенной схеме, показанной на рисунке 3. В этой схеме блок А – восьмиполусник с матрицей передачи **a**, диагональные порты которого нагружены на импеданс $z1_{БРН}$ и $z2_{БРН}$ блоков B_1 , B_2 . Эти блоки на схеме рисунка 1 обозначены как БРН1 и БРН2. Архитектура упрощенной схемы, как это видно из рисунка 3, представляет восьмиполусник с результирующей матрицей передачи **a**.

Последующий переход к матрице рассеяния **S** позволил исследовать полный набор коэффициентов передачи между портами и коэффициентов отражения от всех портов. Знание полной матрицы рассеяния **S** позволило исследовать закономерности распространения волн в схеме. Было выяснено, что сохранение частотно-селективных свойств ПППФ при поглощении внеполосных частот определяются частотной зависимостью модулей импеданса $z1_{БРН}$, $z2_{БРН}$.

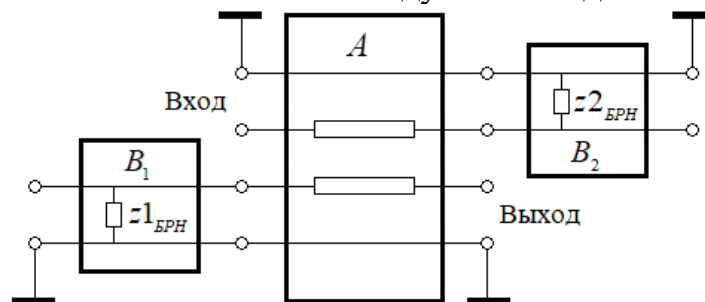


Рисунок 3 – Упрощенная схема поглощающего фильтра, состоящая из блока А и блоков B_1 , B_2 , составляющих буферные резонансные нагрузки

В подразделе 2.3 проведено математическое моделирование вариантов выполнения БРН на основе секций связанных полосковых линий. Рассмотрена эквивалентная схема БРН, показанная на рисунке 4, являющаяся детализацией структурной схемы БРН поглощающего полосно-пропускающего фильтра.

Модель БРН представлена в виде каскадного соединения восьмиполюсников (рисунок 4), описываемых матрицами передачи, что позволило исследовать волновые свойства вариантов включения секций связанных полосковых линий при передаче энергии из порта 1 в порты 2, 3, 4, а также коэффициенты отражения от всех портов.

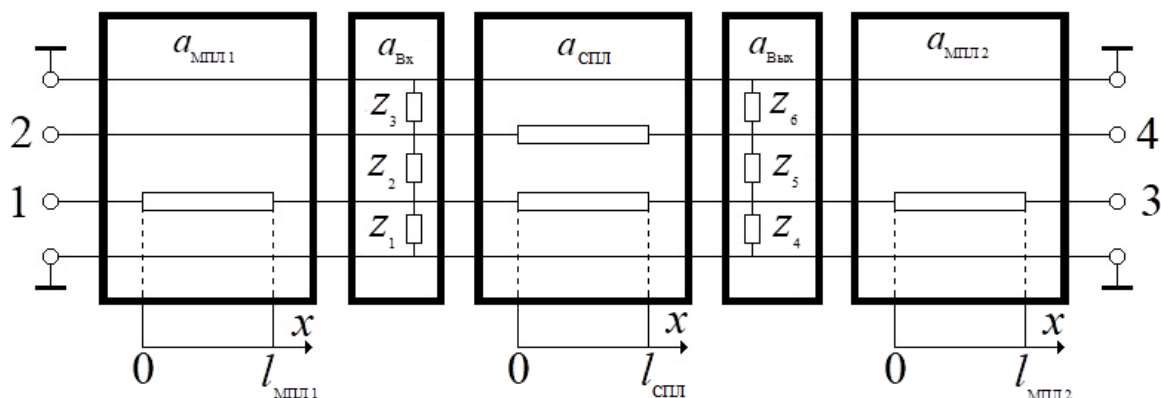


Рисунок 4 – Детализированная эквивалентная схема БРН в виде каскадного соединения восьмиполюсников

В схеме рисунка 4 обозначены следующие матрицы: $a_{МПЛ 1}$ и $a_{МПЛ 2}$ – матрицы передачи отрезков микрополосковых линий (поз. 7 и 8 на рисунке 2), в общем случае имеющие: разные длины $l_{МПЛ 1}$ и $l_{МПЛ 2}$; $a_{Вх}$ и $a_{Вых}$ – матрицы передачи с элементами $Z_1, \dots, Z_6$, соединяющими полоски отрезка связанных полосковых линий друг с другом и с заземляемым основанием. СПЛ образованы брусчатой полосковой линией с длиной $l_{СПЛ}$ (поз. 6 на рисунке 2) и отрезком микрополосковой линии той же длины; $a_{СПЛ}$ – матрица передачи связанных полосковых линий (поз. 2 на рисунке 2).

Для отрезков МПЛ 1 и МПЛ 2 записаны матрицы передачи в виде восьмиполюсников (1)

$$a_{МПЛ 1} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & a_{12} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ a_{21} & 0 & a_{22} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad a_{МПЛ 2} = \begin{bmatrix} a_{21} & 0 & a_{22} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ a_{21} & 0 & a_{22} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где: $a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$ – элементы матрицы передачи МПЛ 1; a_{21}, a_{22} – элементы матрицы передачи МПЛ 2.

Матрицы передачи $a_{Вх}$ и $a_{Вых}$ как восьмиполюсника заданы через сопротивления $Z_1, \dots, Z_6$ и имеют вид

$$a_{\text{Вх}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ z_1^{-1} + z_2^{-1} & -z_2^{-1} & 1 & 0 \\ -z_2^{-1} & z_2^{-1} + z_3^{-1} & 0 & 1 \end{bmatrix}, a_{\text{Вых}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ z_4^{-1} + z_5^{-1} & -z_5^{-1} & 1 & 0 \\ -z_5^{-1} & z_5^{-1} + z_6^{-1} & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где: z_1 и z_4 – это шунтирующие сопротивления проводника СПЛ, расположенного между МПЛ 1 и МПЛ 2; z_2 и z_5 – сопротивления между линиями СПЛ; z_3 и z_6 – это шунтирующие сопротивления-проводника с плавающим потенциалом.

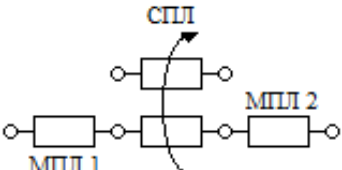
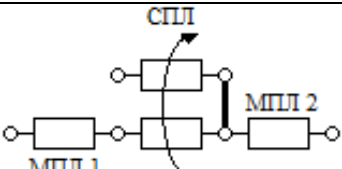
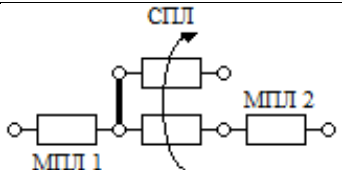
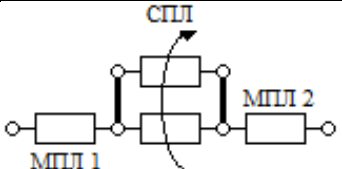
Каскадное соединение матриц передачи БРН по схеме, показанной на рисунке 4, имеет вид

$$a_{\text{БРН}} = a_{\text{МПЛ 1}} \cdot a_{\text{Вх}} \cdot a_{\text{СПЛ}} \cdot a_{\text{Вых}} \cdot a_{\text{МПЛ 2}}, \quad (3)$$

где $a_{\text{МПЛ 1}}$ и $a_{\text{МПЛ 2}}$ – это матрицы передачи отрезков МПЛ 1 и МПЛ 2 (2.1), $a_{\text{Вх}}$ и $a_{\text{Вых}}$ – матрицы межсоединений (2.2 и 2.3), $a_{\text{СПЛ}}$ – матрица передачи СПЛ.

Рассмотрены четыре типа секций буферных резонансных нагрузок, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Типы секций буферной резонансной нагрузки

Тип секции	Наименование	Схема секции связанных полосковых линий	Значения сопротивлений элементов матриц межсоединений полосок связанных полосковых линий, Ом
1	С плавающим потенциалом		$a_{\text{Вх}} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10^6 \\ 10^6 \\ 10^6 \end{bmatrix}, a_{\text{Вых}} = \begin{bmatrix} z_4 \\ z_5 \\ z_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10^6 \\ 10^6 \\ 10^6 \end{bmatrix}$
2	U-образный резонатор правый		$a_{\text{Вх}} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10^6 \\ 10^6 \\ 10^6 \end{bmatrix}, a_{\text{Вых}} = \begin{bmatrix} z_4 \\ z_5 \\ z_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10^6 \\ 0,1 \\ 10^6 \end{bmatrix}$
3	U-образный резонатор левый		$a_{\text{Вх}} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10^6 \\ 0,1 \\ 10^6 \end{bmatrix}, a_{\text{Вых}} = \begin{bmatrix} z_4 \\ z_5 \\ z_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10^6 \\ 10^6 \\ 10^6 \end{bmatrix}$
4	Кольцевая		$a_{\text{Вх}} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10^6 \\ 0,1 \\ 10^6 \end{bmatrix}, a_{\text{Вых}} = \begin{bmatrix} z_4 \\ z_5 \\ z_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10^6 \\ 0,1 \\ 10^6 \end{bmatrix}$

Для расчета входного сопротивления необходимо от ненормированной матрицы $a_{\text{БРН}}$ по формулам в работе Фельдштейна перейти к матрице коэффициентов рассеяния $S_{\text{БРН}}$. Переход к двухполусной схеме был выполнен через расчет полной матрицы рассеяния S схемы БРН как восьмиполусника по определенному коэффициенту отражения S_{11} из известного соотношения (4)

$$Z_{БРН} = \frac{(1 - S_{БРН_11}) \cdot Z1_{БРН}}{1 + S_{БРН_11}}. \quad (4)$$

где $S_{БРН_11}$ – коэффициент отражения матрицы рассеяния, $Z1_{БРН}$ – сопротивление нагрузки (50 Ом).

На рисунке 5 представлены рассчитанные характеристики модулей импедансов БРН секции с плавающим потенциалом (тип 1) и секции БРН с U-образным резонатором (тип 3).

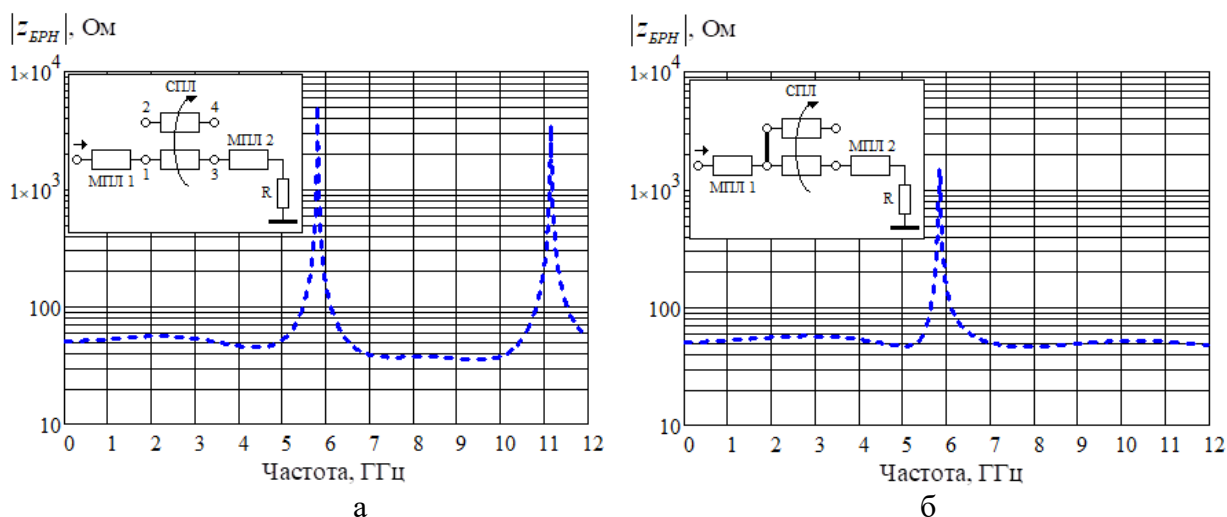


Рисунок 5 – Рассчитанные характеристики модулей импедансов секции БРН с плавающим потенциалом (а) и секции БРН с U-образным резонатором (б)

В подразделе 2.4 представлены результаты расчета ПППФ по схеме, показанной на рисунке 3, где в блоках B_1 и B_2 взяты полученные $z_{БРН}$. Для расчета характеристик поглощающего фильтра заданы матрицы передачи для блоков B_1 и B_2 (рисунок 3), которые имеют следующий вид

$$a_{B1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ (z1_{БРН})^{-1} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad a_{B2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & (z2_{БРН})^{-1} & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $z1_{БРН}$ и $z2_{БРН}$ – это входные сопротивления БРН, рассчитанные по формуле 4.

Матрица передачи ПППФ $a_{ПППФ}$ как восьмиполусника определяется как произведение матрицы передачи a_{B1} блока B_1 , матрицы передачи a связанных линий и матрицы a_{B2} блока B_2 (6)

$$a_{ПППФ} = a_{B1} \cdot a \cdot a_{B2}. \quad (6)$$

Для расчета частотных характеристик поглощающих фильтров выполнен переход к нормированной матрице коэффициентов рассеяния $S_{ПППФ}$. На рисунке 6 представлены рассчитанные частотные характеристики ПППФ с секцией БРН с плавающим потенциалом (тип 1) и с секцией БРН с U-образным резонатором (тип 3).

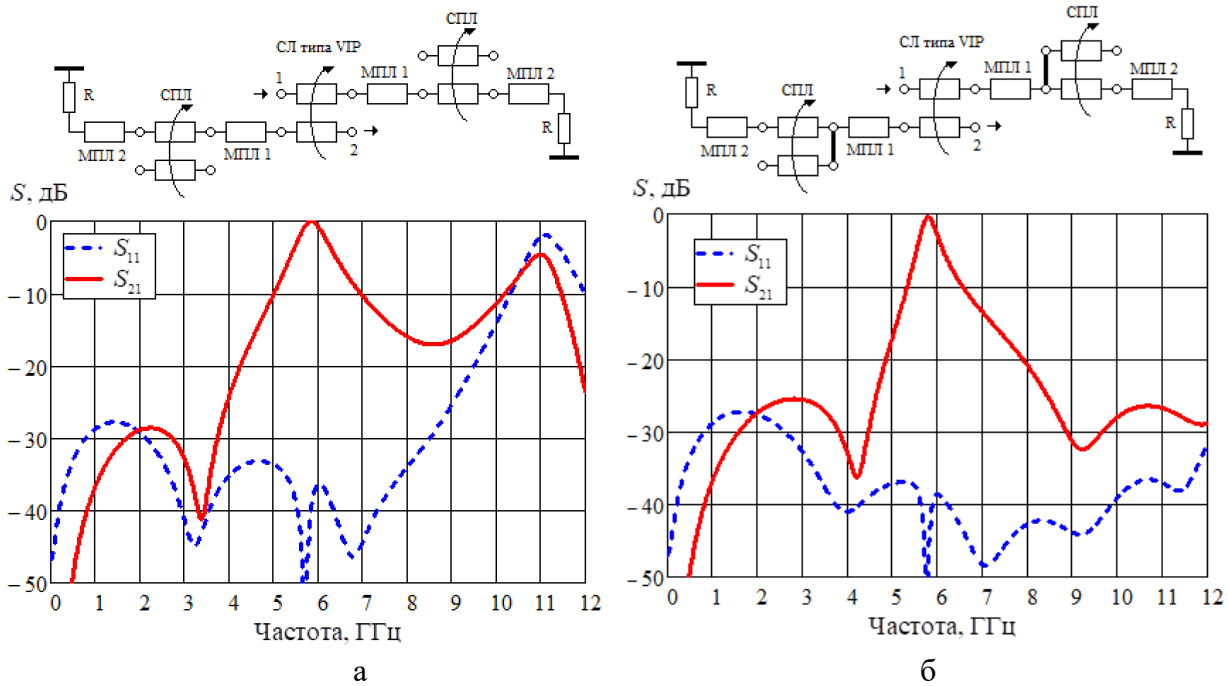


Рисунок 6 – Частотные зависимости коэффициента отражения и коэффициента передачи секции БРН типа 1 (а) и секции БРН типа 3 (б)

Показано, что связанные линии 2 (см. рисунок 2) при выбранных исходных параметрах, характеризуются примерно одинаковыми коэффициентами связи полосок по емкости $k_C = 0,703$ и индуктивности $k_L = 0,712$. Это означает, что фазовые скорости синфазных и противофазных волн, возбуждаемых в линиях, почти совпадают. Возникающий синхронизм синфазных и противофазных волн в связанных линиях определяет их частотные свойства как 3 дБ направленного ответвителя. Поэтому происходит равное распределение мощности электромагнитной волны, поступающей на вход, между выходом первой линии и входом второй линии.

На резонансной частоте $f_0 = 5,8$ ГГц секций типа 1, 3 $|z_{\text{БРН}}| \rightarrow 1000$ Ом, что приводит к почти полному отражению мощности входного сигнала от этих резонаторов. Отраженные волны складываются на выходном порту ПППФ. На частотах выше резонансной частоты $f_0 > 5,8$ ГГц входной импеданс $|z_{\text{БРН}}|$ изменяется в диапазоне частот $f = 6 \dots 9,0$ ГГц от 30 Ом до 60 Ом. В результате этого формируются частотные характеристики полосно-пропускающих фильтров с центральной частотой до 5,8 ГГц, в которой коэффициент отражения $S_{11} \leq -20$ дБ, а коэффициент ослабления $S_{21} \leq 2$ дБ на центральной частоте $f_0 = 5,8$ ГГц (рисунок 6).

Таким образом во втором разделе показано, что предложенные конструкции БРН и их расчет позволили увеличить центральную частоту полосы пропускания ПППФ с 0,2–2,5 ГГц до 5,8 ГГц. При этом коэффициент отражения на внеполосных частотах не хуже минус 20 дБ до 9 ГГц. Установлено, что применение U-образной секции позволяет разнести резонансные частоты БРН, что расширяет частотный диапазон поглощающих свойств с 9 до 12 ГГц.

В третьем разделе «Моделирование, экспериментальное исследование и проектирование поглощающих полосно-пропускающих фильтров СВЧ»

рассмотрены вопросы электродинамического моделирования и экспериментальных измерений поглощающих фильтров с RLC нагрузками и полосковыми резонаторами с неоднородным диэлектрическим заполнением. Рассмотрены вопросы проектирования ПППФ на разных полосковых структурах.

В подразделе 3.1 приведена обобщенная структурная схема поглощающих фильтров, создаваемых на основе квази-планарных СПЛ, нагруженных на RLC-цепи. Такая конструкция более технологична по сравнению с конструкцией СПЛ с вертикально расположенными подложками. Обобщенная схема предложенной конструкции поглощающего фильтра представлена на рисунке 7. Эта схема положена в основу создания новых конструкций и решения задач их моделирования. Схема состоит из блока 1, основным элементом которых являются трехпроводные связанные полосковые линии с неоднородным диэлектрическим заполнением, и блоков БРН 1, БРН 2, которые выполнены как последовательные LC-контуры, шунтированные сопротивлением R.

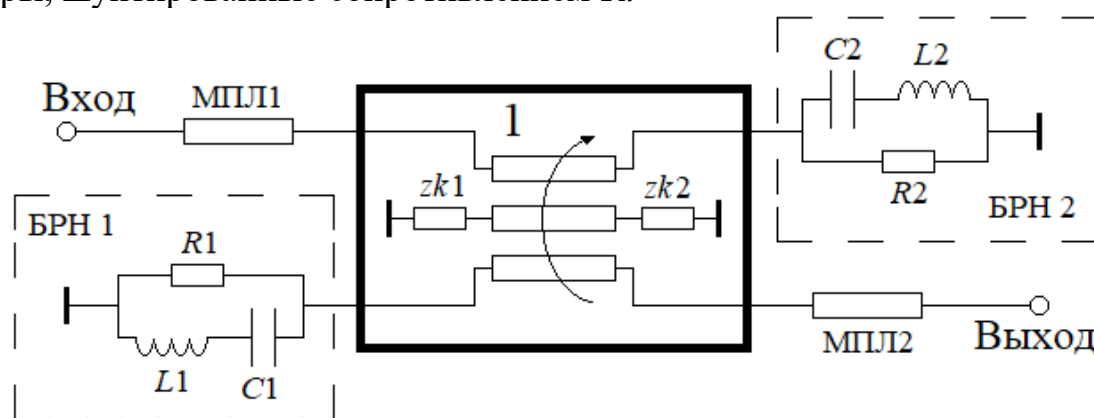


Рисунок 7 – Обобщенная структурная схема поглощающих фильтров на основе трехпроводных связанных линий и сосредоточенных RLC-элементов: блок 1 – отрезок связанных трехпроводных линий; блоки БРН 1 и БРН 2 – буферные резонансные нагрузки, включающие RLC-цепи (последовательные или параллельные). Составляющие элементы: МПЛ1,..., МПЛ2 – отрезки подводящих линий; R1, R2 – сопротивления нагрузок блоков БРН 1 и БРН 2; L1, C1 и L2, C2 – емкости и индуктивности БРН 1 и БРН 2; zk1, zk2 – сопротивления краевых неоднородностей трёхпроводных связанных линий

В блоке 1 обеспечено образование двух связанных каналов распространения квази-Т-волн. Одни диагональные плечи СПЛ нагружены на БРН 1 и БРН 2, другие служат входом и выходом устройства и подключены к подводящим линиями МПЛ 1 и МПЛ 2. Решена задача уменьшения габаритов конструкция фильтра со схемой рисунка 7 выполнением топологии трехпроводной полосковой линии в виде меандра. Конструкция ПППФ на основе меандровой трехпроводной линии (рисунок 8) включает: 1, 2 – планарно расположенные токонесущие связанные полоски; 3 – подложку с ϵ_{r1} ; 4 – третью полоску с лицевой связью между полосками 1 и 2 и конформно повторяющую их форму; 5 – подложку (диэлектрическую полоску) с ϵ_{r2} , выполненную в виде полоски в форме меандра; 6 – заземляемое основание; 7 – RLC-цепь, образующую буферные резонансные нагрузки.

Выполнено моделирование показанной конструкции в среде COMSOL Multiphysics. Рассчитывались конструкции фильтров для трех вариантов материалов диэлектрической полочки 5: FR-4, RO3003 и RO4350B. Сравнение частотной зависимости коэффициента передачи ПППФ для разных материалов показывает совпадение характерных особенностей частотной зависимости вносимых потерь на частотах запираания и их идентичность в полосе пропускания. Если ограничиваться значением $|S_{41}|$ на частотах запираания -10 дБ, лучший показатель в полосе частот до 6 ГГц дает применение RO3003 либо RO4350B. Коэффициент отражения $|S_{11}|$ макета ПППФ с применением RO4350B меньше минус 10 дБ в той же полосе частот. На рисунке 9 показана фотография экспериментально исследованного макета ПППФ.

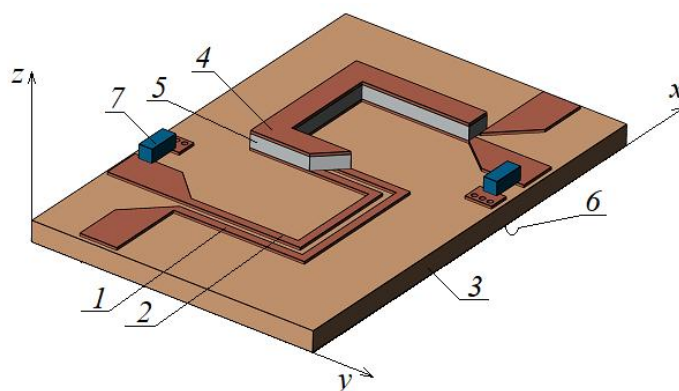


Рисунок 8 – 3D-модель трехпроводной меандровой связанной линии в конструкции поглощающего фильтра

Рассмотрены зависимости влияния параметров поперечного сечения конструкции ПППФ на частотные характеристики поглощающего полосно-пропускающего фильтра. Экспериментальное исследование и моделирование в системе

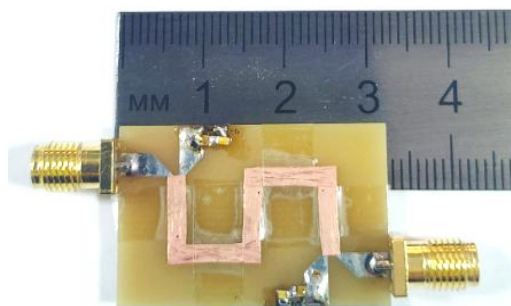


Рисунок 9 – Фотография ПППФ

COMSOL Multiphysics трехпроводной полосковой структуры подтвердили реализуемость увеличения электромагнитной связи между токонесущими полосками и работоспособность поглощающего полосно-пропускающего фильтра. Показано, что при толщине диэлектрической полочки 5 (рисунок 8) 0,1 мм, изменении зазора между планарно расположенными полосками 1 и 2 в пределах $s = 0,4...0,5$ мм с применением использованных диэлектриков в диа-

пазоне частот до 4 ГГц коэффициент отражения не превышает -10 дБ и обеспечивается функция полосно-пропускающего фильтра. Результаты сравнения частотных характеристик измерений и моделирования коэффициентов отражения $|S_{11}|$ и коэффициентов передачи $|S_{41}|$ макета показаны на рисунке 10.

При исследовании резонаторов на основе секций, образованных связанными полосковыми линиями и брусчатыми полосковыми линиями, был поставлен вопрос о решении задачи разрежения спектра резонансных частот БРН.

В подразделе 3.2 приведены результаты экспериментальных исследований и моделирования частотных характеристик резонатора в виде двух полосковых вибраторов, разделенных большим зазором и перекрытых объемным кристаллом ниобата лития, на верхней поверхности которого установлен металлический электрод с плавающим потенциалом (рисунок 11).

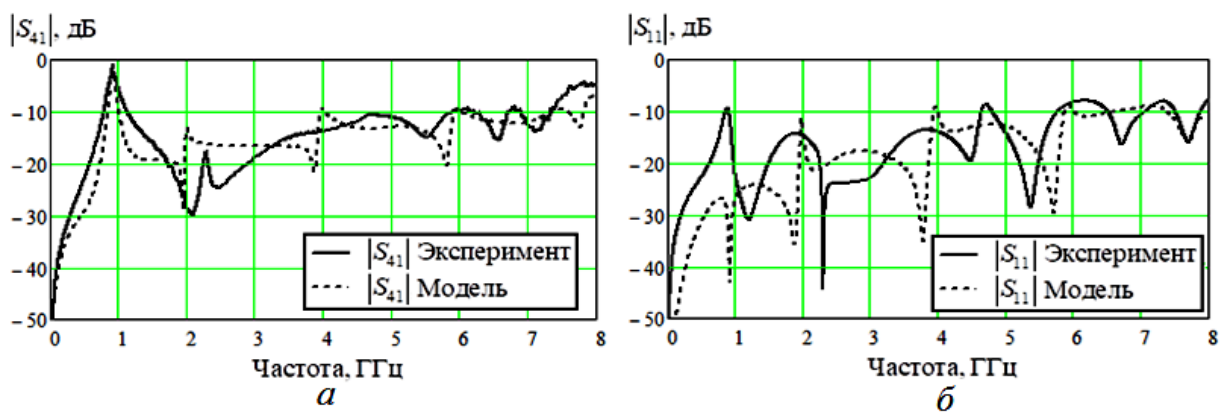


Рисунок 10 – Сравнение частотных характеристик измеренных и рассчитанных коэффициентов передачи $|S_{41}|$ (а) и отражения $|S_{11}|$ (б) ПППФ

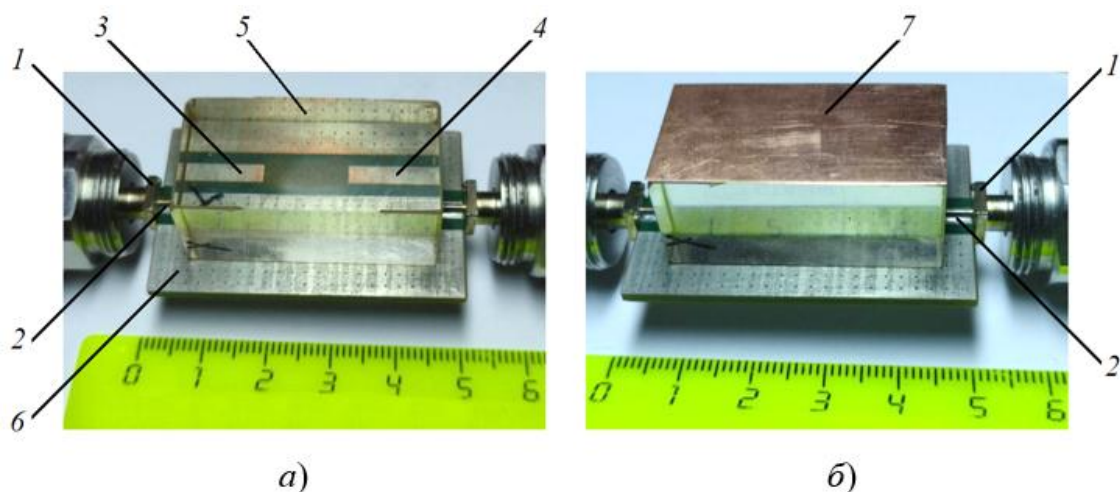


Рисунок 11 – Полосковый резонатор с объемным кристаллом ниобата лития:
 1 – коаксиально-полосковые переходы; 2 – отрезки полосковых линий; 3 – вибратор-возбудитель; 4 – вибратор-приемник; 5 – кристалл ниобата лития; 6 – боковые экраны, соединенные металлизированными отверстиями с заземляющим основанием;
 7 – металлический электрод с плавающим потенциалом

При проведении экспериментов измерялись частотные зависимости коэффициентов матрицы рассеяния в диапазоне частот до 3 ГГц. Электродинамический анализ проводился в среде численного моделирования COMSOL Multiphysics. Проведено сравнение экспериментальных и численных результатов, показавших хорошее качественное совпадение коэффициентов передачи и коэффициентов отражения.

Результаты электродинамического моделирования резонатора с индексом расположения кристалла $\bar{X}\bar{Z}$ показаны на рисунке 12. Моделирование на слое модели расположения вибраторов проведено на дорезонансной частоте 1,5731 ГГц (рисунок 12, а), на частоте первого резонанса 2,1623 ГГц (рисунок 12, б), на частоте между первым и вторым резонансом 2,4188 ГГц (рисунок 12, в) и на второй резонансной частоте 2,5832 ГГц (рисунок 12, г). Показанные картины напряженности электрического поля иллюстрируют возникновение резонанса с картиной поля, отличающейся от картины поля четвертьволнового резонанса (рисунок 12, а, б), характерной для полоскового четвертьволнового вибратора в однородной среде.

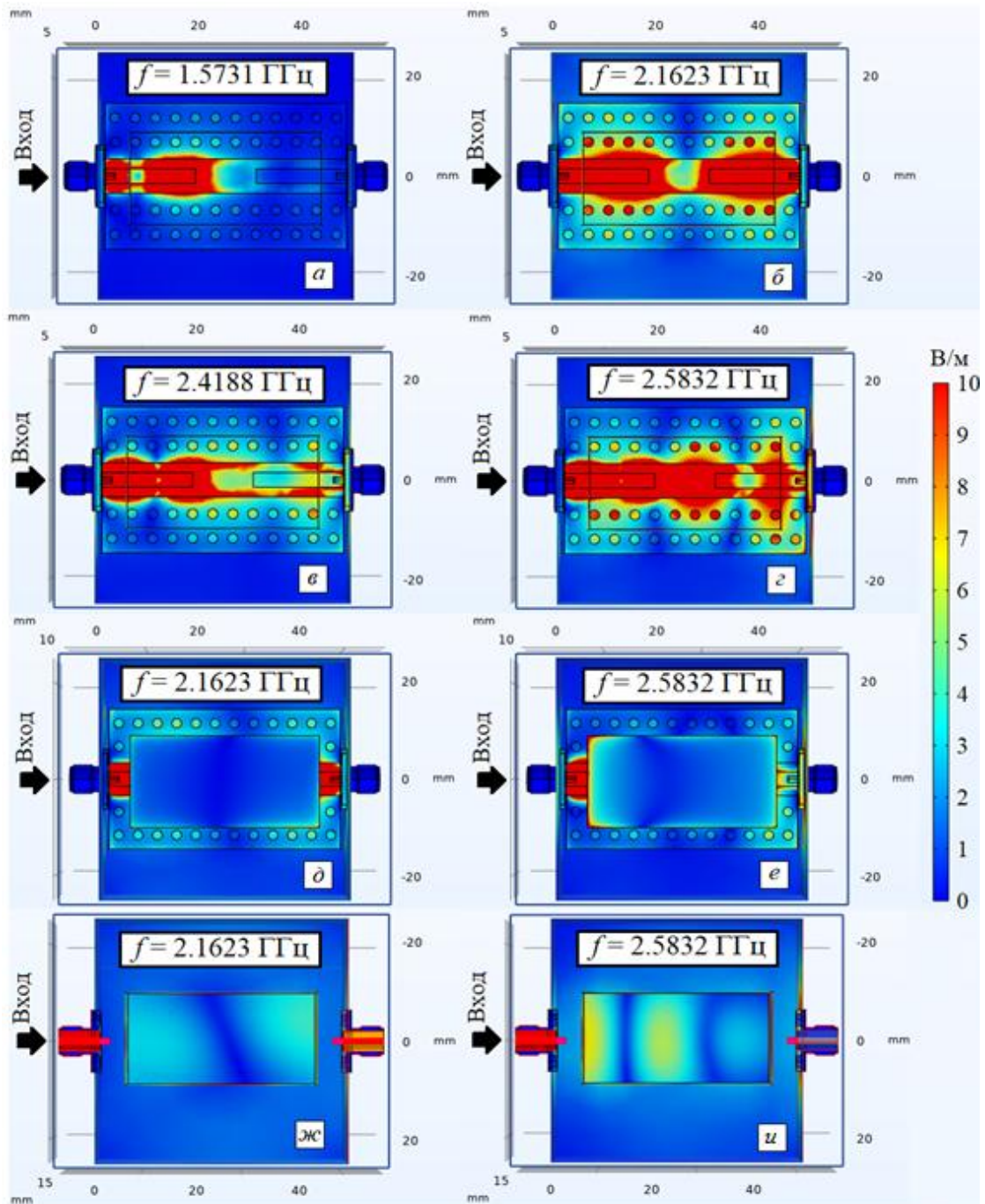


Рисунок 12 – Результаты моделирования нормированной напряженности электрического поля резонатора с индексом $\bar{X}\bar{Z}$ в слое модели расположения вибраторов (а-г), в слое модели, соответствующем внешней поверхности электрода (д-и) и в слое внутренней поверхности электрода с плавающим потенциалом

Это связано с сильным влиянием объемного кристалла на отбор энергии вибратора-возбудителя колебаний и передачу энергии в вибратор-приемник через кристалл. На основе полученных результатов исследования полосковых резонаторов СВЧ с объемным кристаллом созданы буферные резонансные нагрузки, на основе секций полосковых связанных линий в виде микрополосковой линии, связанной с брусчатой полосовой линией, представленные в разделе 2.

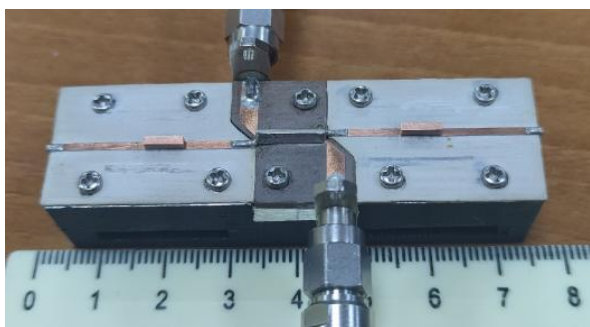


Рисунок 13 – Фотография макета ПППФ с резонаторами тип 1 с длиной 6,7 мм

В подразделе 3.3 проведено электродинамическое моделирование и экспериментальное исследование поглощающих фильтров на частоту 5,8 ГГц с резонаторами типа 1 и типа 3. Макет ПППФ с БРН типа 1 состоит из отрезков связанных линий с 3 дБ связью. Базовые материалы выбраны в соответствии с проведенными расчетами в разделе 2. На рисунке 13 показана фотография разработанного ПППФ с резонаторов 6,7 мм. В результате проведения моделирования были получены частотные характеристики коэффициентов передачи S_{21} и отражения S_{11} , показанные на рисунке 14.

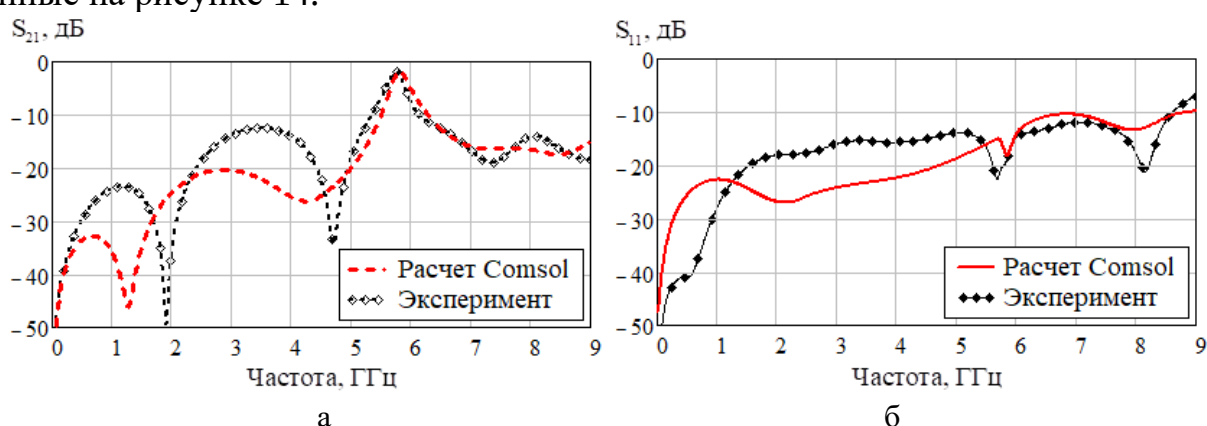


Рисунок 14 – Сравнение частотных характеристик коэффициентов передачи S_{21} (а) и отражения S_{11} (б), полученных при экспериментальном измерении и моделировании в COMSOL. Резонатор тип 1 длиной 6,7 мм

В подразделе 3.4 представлены результаты исследования применения поглощающих фильтров СВЧ в приемопередающих трактах СВЧ. Измерения проводились с помощью векторного анализатора цепей. Тракт включал 2 широкополосных антенны А1 и А2, формирователь квази-хаотических сигналов (ФКС) и ПППФ на частоту 5,8 ГГц. Показано, что при воздействии на радиотракт такого сигнала применение ПППФ дает возможность реализовать частотную селекцию с заданной центральной частотой и уменьшить отражение от входа цепочки ПППФ-А1-среда распространения-А2-ФКХС в среднем на 10 дБ.

В Заключение отмечено, что в представленной диссертационной работе разработаны и исследованы новые конструкции поглощающих полосно-пропускающих фильтров СВЧ на основе секций связанных полосковых линий с неоднородным диэлектрическим заполнением в диапазоне частот до 6-12 ГГц.

Решены следующие задачи.

1. Проведена классификация, моделирование и экспериментальные исследования секций связанных полосковых связанных линий с неоднородным диэлектрическим заполнением, образующих буферные резонансные нагрузки со специальной частотной характеристикой входного импеданса для построения поглощающих фильтров.

2. На базе исследованных схем и конструкций секций разработаны поглощающие полосно-пропускающие фильтры СВЧ на основе двух- и трехпроводных связанных линий, обеспечивающих работу на центральной частоте полосы пропускания с ослаблением 2,5 дБ и возвратными потерями 10 дБ в широком диапазоне частот, как в полосе пропускания, так и полосе подавления.

Основные научные и практические результаты исследований можно сформулировать следующим образом:

1. Буферные резонансные нагрузки на основе секций связанных полосковых линий с неоднородным диэлектриком обладают разреженным спектром резонансных частот. Их входной импеданс близок к согласованию в полосе пропускания, а в полосе запираания стремится к минимуму (10^{-1} – 10^{-2} Ом) или максимуму (10^3 – 10^4 Ом) в зависимости от схемы соединения полосок.

2. Частотные характеристики волновых параметров отрезка квазипланарной трехпроводной связанной линии идентичны характеристикам двухпроводных линий в ограниченном диапазоне, если центральный проводник не нагружен, находится под плавающим потенциалом и электромагнитно связан с двумя токонесущими полосками.

3. Разработаны электродинамические модели БРН и трехпроводных связанных линий. Они позволяют анализировать частотные характеристики поглощающих фильтров нового типа и проектировать их по заданным параметрам материалов и конструкций.

4. Предложены, разработаны и испытаны макеты полосковых поглощающих полосно-пропускающих фильтров, выполненных как с использованием трехпроводных структур, так и с использованием двухпроводных структур. Технические решения защищены патентами на изобретения.

5. Разработанные поглощающие полосно-пропускающие фильтры используются в интеграции с антеннами, образуя новый класс устройств – антенн-фильтров, в которых достигается подавление отраженных волн при передаче и приеме сигналов от их источника.

6. Получены результаты экспериментальных исследований частотных характеристик полосковых поглощающих фильтров и их элементов, которые составляют базу данных о реальных параметрах фильтров такого класса.

Таким образом, представленная диссертация содержит результат решения научной задачи, имеющей важное значение для развития техники СВЧ, в частности, разработки полосковых поглощающих полосно-пропускающих фильтров. В диссертации изложены новые научно обоснованные технические решения и разработки, имеющие существенное значение для развития компонентной базы СВЧ.

Рекомендации. Предложенная обобщенная эквивалентная схема поглощающих полосковых фильтров может служить основой для разработки новых секций буферных резонансных нагрузок, которые являются ключевыми элементами для получения частотно-избирательных свойств и подавления отраженных волн. Полученные результаты моделирования ПППФ на основе обобщенной схемы и полученные экспериментальные данные необходимо привести в практику

инженерных применений с целью разработки новых ПППФ и их применений для обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры связи и радиолокации.

Перспективы дальнейшего развития в области исследований поглощающих фильтров состоят в создании перестраиваемых поглощающих фильтров, антенн-фильтров и неотражающих элементов метасред. Интеграция фильтров поглощающего типа с полосковыми антеннами представляется наиболее логичной, так как не потребует изменения технологического процесса. Переход к интегральной технологии изготовления ПППФ позволит значительно уменьшить габариты поглощающих фильтров и расширить область их применений.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Публикации в журналах из перечня ВАК

1. Частотные характеристики полосковых модулей формирования квазихаотических сигналов на основе объемных нелинейно-оптических кристаллов / **А. А. Арутюнян**, Н. Д. Малютин, Г. А. Малютин [и др.] // Ural Radio Engineering Journal. – 2023. – Т. 7, № 3. – С. 227-249. – DOI 10.15826/urej.2023.7.3.001.

2. **Арутюнян, А. А.** Полосковый резонатор СВЧ с объемным кристаллом: экспериментальные характеристики и определение эффективной диэлектрической проницаемости / **А. А. Арутюнян**, Н. Д. Малютин // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – № 7. – DOI 10.30898/1684-1719.2024.7.8.

3. **Арутюнян А. А.** Моделирование и экспериментальное исследование фильтра неотражающего типа на основе полосковой трехпроводной связанной линии / **А. А. Арутюнян** // Доклады ТУСУР. – 2025. – Т. 28, № 2. – С. 55–61. DOI: 10.21293/1818-0442-2025-28-2-55-61.

4. Характеристики антенн, нагруженных на отражающие и неотражающие частотно-селективные цепи / Н. Д. Малютин, М. О. Коноваленко, Г. А. Малютин, **А. А. Арутюнян**, Е. И. Тренкаль, Т. А. Чепко // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – № 11. – DOI 10.30898/1684-1719.2025.11.31.

5. **Арутюнян, А. А.** Моделирование и экспериментальное исследование неотражающего полоскового фильтра на основе трехпроводной меандровой связанной линии / **А. А. Арутюнян**, Н. Д. Малютин // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – № 1. – DOI 10.30898/1684-1719.2026.1.6.

Патенты на изобретение

6. Патент № 2803456 С1 Российская Федерация, МПК G01S 7/38, H04K 3/00. Модуль формирования квазихаотического сигнала сверхвысоких частот: № 2022124041: заявл. 12.09.2022: опубл. 13.09.2023 / А. В. Дворкович, Н. Д. Малютин, А. Г. Лощилов, **А. А. Арутюнян**, Л. Я. Серебренников, Г. А. Малютин; заявитель ФГБОУ ВО "ТУСУР".

7. Патент № 2837988 С1 Российская Федерация, МПК H01P 1/36. Способ подавления отражённых волн на внеполосных частотах СВЧ тракта: заявл. 05.11.2024: опубл. 07.04.2025 / Н. Д. Малютин, Л. Я. Серебренников, Г. А. Малютин, **А. А. Арутюнян**, Т. А. Чепко; заявитель ФГАОУ ВО "ТУСУР".

8. Патент № 2 848 681 С1 Российская Федерация, МПК H01P 1/203. Неотражающий полосковый фильтр, совмещающий разнесенные по частоте полосы

пропускания и полосу заграждения: заявл. 22.04.2025: опубл. 21.10.2025 / **А.А. Арутюнян**, Г.А. Малютин, Н.Д. Малютин, Т.А. Чепко; заявитель ФГАОУ ВО "ТУСУР".

9. Патент № 2 848 917 С1 Российская Федерация, МПК H01P 1/203, H01P 5/18. Неотражающий полосно-пропускающий фильтр на связанных квази-планарных полосковых линиях: заявл. 13.05.2025: опубл. 21.10.2025 / **А.А. Арутюнян**, Г.А. Малютин, Н.Д. Малютин, Т.А. Чепко; заявитель ФГАОУ ВО "ТУСУР".

10. Патент № 2 862 899 С1 Российская Федерация, МПК H01P 1/203. Неотражающий полосно-пропускающий фильтр: заявл. 10.02.2026: опубл. 26.05.2026 / **А. А. Арутюнян**, Н. Д. Малютин, Ю. В. Янковская; заявитель ФГАОУ ВО "ТУСУР".

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023681254 Российская Федерация. Программа анализа влияния экрана на частотные характеристики модуля формирования квази-хаотического сигнала на основе копланарной линии и нелинейно-оптического кристалла в СВЧ диапазоне: № 2023680643: заявл. 10.10.2023: опубл. 11.10.2023 / А. В. Артамонов, **А. А. Арутюнян**; заявитель ФГБОУ ВО "ТУСУР".

Доклады в трудах конференций, индексируемых в Scopus и Web of Science

12. **A. A. Arutyunyan** and G. A. Malyutin, "Experimental Research of the Scattering Parameters of the Module Based on a Coplanar Strip Line Segment With a Lithium Niobate Crystal and its Possible Use," 2022 IEEE 23rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), Altai, Russian Federation, 2022, pp. 168-171, doi: 10.1109/EDM55285.2022.9855037.

13. **A. A. Arutyunyan**, G. A. Malyutin and N. D. Malyutin, "The Effect of Quasi-Chaotic Oscillations Formation in Devices Based on Strip Structures Containing Bulk LiNbO₃ Crystals," 2022 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Tomsk, Russian Federation, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/SIBCON56144.2022.10003019.

14. **A. A. Arutyunyan**, N. D. Malyutin, S. N. Podzyvalov and N. N. Yudin, "Investigation of Stripline Modules at the Formation of Quasi-Chaotic Signals in the Transmitting-Receiving Path," 2023 IEEE 24th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), Novosibirsk, Russian Federation, 2023, pp. 120-124, doi: 10.1109/EDM58354.2023.10225158.

15. **A. A. Arutyunyan**, G. A. Malyutin, N. D. Malyutin, D. E. Minenko, A. A. Artamonov and A. A. Tomashevich, "Quasi-Chaotic Microwave Oscillations: Formation, Application to Test Vector Network Analyzers," 2023 IEEE XVI International Scientific and Technical Conference Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE), Novosibirsk, Russian Federation, 2023, pp. 750-754, doi: 10.1109/APEIE59731.2023.10347681.

16. G. A. Malyutin, T. T. Thanh, T. A. Chepko and **A. A. Arutyunyan**, "Modeling and Experimental Study of Non-Reflective Microwave Filters," 2024 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED), Sochi, Russian Federation, 2024, pp. 1-4, doi: 10.1109/SED63331.2024.10741057.

17. **A. A. Arutyunyan**, G. A. Malyutin and T. A. Chepko, "Coupled Striplines with Enhanced Electromagnetic Coupling Based on Three-Wire Striplines and Their Applications," 2025 IEEE Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT), Yekaterinburg, Russian Federation, 2025, pp. 159-162, doi: 10.1109/USBREIT65494.2025.11054109.

18. **A. A. Arutyunyan** and N. D. Malyutin, "New Absorbing Band-Pass Filter," 2026 IEEE 27th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), Novosibirsk, Russian Federation, 2026, pp. 1-5, doi: 10.1109/EDM69524.2026.11632215.

Доклады в трудах международных конференций

19. **Арутюнян, А. А.** Полосковый фильтр верхних частот, формирующий квазихаотический сигнал в полосе прозрачности / **А. А. Арутюнян** // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. – 2022. – № 1-1. – С. 121-124.

20. Малютин, Н. Д. Модули формирования квазихаотического сигнала в сверхширокой полосе частот СВЧ диапазона на основе кристаллов ниобата лития / Н. Д. Малютин, Г. А. Малютин, **А. А. Арутюнян** // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества: тезисы докладов II Российской научной конференции, Омск, 05–07 октября 2022 года. – Омск: Омский научно-исследовательский институт приборостроения, 2022. – С. 218-220.

21. **Арутюнян, А. А.** Способ определения эффективной диэлектрической проницаемости объемных кристаллов / **А. А. Арутюнян**, Н. Д. Малютин // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – 2024. – № 6. – С. 50-52.

22. Подавление переотражений и внеполосных колебаний в межкаскадных соединениях с помощью неотражающих частотно-селективных цепей СВЧ / А. Г. Лощилов, Н. Д. Малютин, Г. А. Малютин, **А. А. Арутюнян**, Т. А. Чепко [и др.] // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии: сборник трудов XXI Международной научно-практической конференции, Сочи, 01–10 октября 2024 года. – Москва: Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. проф. Жуковского, 2024. – С. 271-277.

Монографии

23. Распределенно-сосредоточенные цепи и полосковые СВЧ-устройства на их основе: моногр. / А. Г. Лощилов, **А. А. Арутюнян** [и др.]; под ред. проф. Н. Д. Малютина. – Томск: ТУСУР, 2023. – 151 с.

24. Невзаимное обратное рассеяние электромагнитных волн: Обзор методов исследования, экспериментальная техника обнаружения, обработка результатов измерений / Лощилов А. Г., Малютин Н. Д., Семенов Э. В., Сычев А. Н., Суторихин В. А., Тренкаль Е. И., Поздняков В. С., Чинь Т. Т., **Арутюнян А. А.**, Ахраров Н. М., Малютин Г. А. — 2021. 157 с.