

*На правах рукописи*



**СЕМЕНЕНКО Владимир Николаевич**

**КОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ АНТЕННОЙ ТЕХНИКИ И  
СВЧ-УСТРОЙСТВ В СВЕРХШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ**

Специальность 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии  
(технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
доктора технических наук

Москва 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук (ИТПЭ РАН)

**Научный консультант:** **Лагарьков Андрей Николаевич**  
доктор физико-математических наук,  
профессор, академик РАН

**Официальные оппоненты:** **Юханов Юрий Владимирович**  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой антенн и  
радиопередающих устройств  
Южного федерального университета;

**Кириянов Олег Евгеньевич**  
доктор технических наук,  
профессор, начальник 4 управления  
НИИ РЭБ ВУНЦ ВВС «ВВА»;

**Звездина Марина Юрьевна**  
доктор физико-математических наук,  
доцент, ведущий научный сотрудник  
ФГУП «Ростовский-на-Дону научно-  
исследовательский институт радиосвязи»

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской академии наук

Защита диссертации состоится «18» февраля 2025 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета 24.2.327.01 при ФГБОУВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское ш., д. 4.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское ш., д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» и на сайте МАИ по ссылке: [https://mai.ru/events/defence/doctor/?ELEMENT\\_ID=181121](https://mai.ru/events/defence/doctor/?ELEMENT_ID=181121)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета МАИ, к.т.н.



А.А. Горбунова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В настоящее время для СВЧ приложений, в том числе для антенной техники и СВЧ-устройств, применяются в основном диэлектрические и магнитные композитные материалы, используемые, в качестве радиопоглочителей для электромагнитной совместимости и снижения радиолокационной заметности [1, 2], изготовления антенных насадок для проведения испытаний антенно-фидерных устройств [3], устранения помех радиолокаторам аэропортов [4] и улучшения диаграмм направленности антенн [5]. Наиболее эффективными с минимальными массогабаритными параметрами являются магнитные композитные материалы, содержащие, как правило, наполнители из различных ферромагнитных сплавов [6-11]. Самым широко используемым наполнителем для магнитных композитных материалов является порошок карбонильного железа, изобретенный немецкой фирмой BASF в 1925 г. и впервые примененный в Германии в годы второй мировой войны в радиопоглощающем покрытии на перископе подводной лодки [12]. Несмотря на столь длительный срок использования карбонильного железа, сложная частотная дисперсия его магнитной проницаемости в широком диапазоне частот до сих пор не была исследована детально. В большом количестве работ по свойствам композитов на основе карбонильного железа исследуются эффективные материальные параметры и поглощающие свойства композитов, наполненных коммерчески доступными марками карбонильного железа, как правило, немецкой фирмы BASF или американской ISP, при различных концентрациях наполнителя [13], но в достаточно узких диапазонах частот.

Измерения СВЧ свойств композитов проводятся в основном в волноводных или коаксиальных линиях, имеющих ограничения по широкополосности, а также точности измерений [13-15]. Измерения параметров материалов имеют ограниченную полосу частот, невысокую точность измерений, а для свободного пространства требуются образцы материалов, имеющие габаритные размеры, значительно превышающие длину волны [16]. Поэтому актуальной является разработка методик измерения электрофизических параметров материалов в свободном пространстве в сверхшироком диапазоне частот для малогабаритных образцов композитных материалов с использованием современной цифровой обработки сигналов, являющихся базовым инструментом для разработки сверхширокополосных радиопоглощающих материалов и покрытий.

**Степень разработанности темы диссертации.** Как правило, используемые в России и за рубежом промышленные порошки карбонильного железа, имеют квазисферическую форму и обладают значительной агломерированностью частиц [17], что приводит к значительной зависимости СВЧ свойств композитов от партии продукта, условий его хранения и режимов переработки композитов. Существующие способы стабилизации, такие как фосфатирование порошков на заводе, так и химическое осаждение окиси кремния на частицы железа [18] не являются эффективными и обладают низкой повторяемостью результатов. Стабилизация электродинамических параметров композитов, наполненных порошками карбонильного железа, является актуальной задачей для их практического использования.

Несмотря на значительное количество публикаций по увеличению магнитных потерь карбонильного железа методами механического помола в планетарных мельницах или атриторах с получением чешуйчатых частиц железа, которые носят разрозненный характер [17, 19-20], до некоторого времени [21] отсутствовала технология получения магнитных наполнителей пластинчатой формы со стабильными электрофизическими свойствами.

Отсутствие магнитных наполнителей со стабильными электрофизическими свойствами для композитных материалов не позволяет получать предсказуемые электродинамические характеристики композитов при различных концентрациях магнитного наполнителя, и следовательно, использовать их для проектирования радиопоглощающих материалов, в особенности многослойных материалов, с предсказуемыми свойствами. Таким образом, разработка магнитных наполнителей со стабильными электрофизическими свойствами может быть фундаментом для создания композитных материалов с требуемыми радиотехническими характеристиками, с различными законами частотной дисперсии магнитной проницаемости и позволит создавать различные многослойные радиопоглощающие материалы с заданными свойствами.

Другой реализацией микроволновых композитных материалов являются диэлектрические материалы. Существующие на рынке диэлектрические радиопоглощающие материалы обладают, как правило, невысокими эксплуатационными характеристиками при воздействии внешних факторов среды и могут использоваться в основном в закрытых помещениях при комнатных температурах, как правило для облицовки помещений и оборудования безэховых камер [22]. Для использования диэлектрических поглощающих материалов на элементах антенной техники является актуальным повышение их эксплуатационных свойств, а также увеличение их эффективности радиопоглощения.

Ограниченность рабочего диапазона частот традиционных магнитных материалов, обусловленная естественным ферромагнитным резонансом, накладывает значительные ограничения на широкополосность магнитных композитных материалов. Данного недостатка лишены искусственные магнито-диэлектрики, так называемые метаматериалы, у которых частотная зависимость электрических и магнитных поляризуемостей включений определяется только их формой и геометрией. Несмотря на резонансный характер поглощающих свойств метаматериалов и перестраиваемый частотный диапазон, существуют необычные электродинамические характеристики метаматериалов, такие как аномальное распространение электромагнитных волн в средах с отрицательными и нулевыми значениями диэлектрической и магнитной проницаемости, существование обратной волны, которые могут быть полезны для приложений в антенной технике. Низкие массогабаритные характеристики метаматериалов, а также возможность расширения их рабочего диапазона частот в комбинации с традиционными магнитными композитами, делает актуальным детальное исследование свойств метаматериалов с повышенной эффективностью радиопоглощающих СВЧ свойств.

Детальное исследование СВЧ свойств комплекса композитных материалов, как традиционных магнитных, диэлектрических и метаматериалов, а также их

комплексирование, позволяет создавать сверхширокополосные микроволновые композитные материалы с управляемыми поглощающими свойствами, которые могут найти применение в антенной технике и в различных СВЧ устройствах для улучшения их радиотехнических характеристик и решения проблем электромагнитной совместимости.

**Целью диссертационной работы** является создание сверхширокополосных радиопоглощающих материалов и покрытий, их модификация, повышение эффективности радиотехнических характеристик таких материалов и покрытий в сверхшироком СВЧ диапазоне и их внедрение в антенную и СВЧ технику. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Разработка методик измерения электрофизических параметров композитных материалов в свободном пространстве в сверхшироком диапазоне частот, обладающих высокой точностью и воспроизводимостью.

2. Экспериментальное исследование магнитных спектров композитных материалов, наполненных промышленными марками порошков карбонильного железа.

3. Разработка методов стабилизации электрофизических характеристик и увеличения магнитных потерь наполнителей на основе модифицированного карбонильного железа в СВЧ диапазоне.

4. Экспериментальное исследование частотной дисперсии магнитной и диэлектрической проницаемости магнитных композитных материалов, наполненных модифицированными порошками карбонильного железа.

5. Проектирование сверхширокополосных радиопоглощающих покрытий и материалов на основе базы данных электродинамических параметров различных магнитных композитных материалов и определение областей применения разработанных покрытий для антенной техники и СВЧ-устройств.

6. Экспериментальное исследование диэлектрических композитных материалов, в том числе в комбинации с магнитными подслоями.

7. Экспериментальное и теоретическое исследование эффективных материальных параметров искусственных магнито-диэлектриков (метаматериалов), способов их модификации и настройки для применения в качестве радиопоглощающих материалов с целью улучшения радиотехнических характеристик антенн различного назначения.

**Объектом исследований** являются композитные материалы с ферромагнитными, диэлектрическими и резонансными включениями, с заданными электродинамическими свойствами, являющиеся базовыми элементами для проектирования и создания эффективных радиопоглощающих материалов и покрытий в сверхшироком СВЧ диапазоне.

**Предметом исследования** являются методики измерения материальных параметров композитных материалов в свободном пространстве в сверхшироком СВЧ диапазоне; технологии механической обработки порошков карбонильного железа с целью стабилизации их электрофизических свойств и повышения магнитных потерь; материальные параметры композитных материалов, наполненных порошками модифицированного карбонильного железа; схемы построения

многослойных сверхширокополосных радиопоглощающих покрытий на основе магнитных композитных материалов в сверхшироком диапазоне частот; эффективные диэлектрические радиопоглощающие материалы; метаматериалы, как искусственные магнито- диэлектрики с прогнозируемыми электродинамическими свойствами; а также области внедрения разработанных композитных материалов для улучшения радиотехнических характеристик антенных систем и СВЧ-устройств в сверхшироком СВЧ диапазоне.

### **Научная новизна работы**

1. Разработаны и аттестованы методики измерений электрофизических параметров композитных материалов в свободном пространстве в сверхшироком диапазоне частот от 0,2 до 110 ГГц.

2. Впервые экспериментально исследована структура мод эффективной магнитной проницаемости композитных материалов на основе промышленно выпускаемых марок карбонильного железа в широкой полосе частот от 0,2 до 40 ГГц с оценкой особой роли магнитных мод Аарони в магнитных спектрах композитных материалов на высоких частотах.

3. Оптимизированы режимы комплексной механической обработки порошков карбонильного железа, включающие методы сухого и мокрого помолов, позволяющие стабилизировать магнито-диэлектрические свойства модифицированных порошков карбонильного железа и значительно увеличить их магнитные потери в СВЧ диапазоне.

4. Впервые разработан метод мониторинга процесса мокрого помола порошка карбонильного железа, позволивший получать стабильный продукт вне зависимости от степени износа элементов конструкции атритора.

5. Разработаны структуры узкополосных и сверхширокополосных радиопоглощающих покрытий на основе магнитных композитных материалов с низким коэффициентом отражения в сверхшироком диапазоне частот от 0,1 до 110 ГГц.

6. Теоретически и экспериментально показано, что диэлектрическим радиопоглощающим материалам свойственен размерный эффект для коэффициента отражения – зависимость коэффициента отражения образца диэлектрического материала от его размеров.

7. Впервые теоретически и экспериментально доказано фундаментальное ограничение магнитной эффективности искусственных магнито-диэлектриков (метаматериалов) и особая роль нулевых значений диэлектрической и магнитной проницаемости метаматериалов для подавления бокового и заднего излучения апертурных антенн.

Новизна полученных научных результатов подтверждена 6 патентами РФ на изобретения (№№ 2236929, 2414029, 2541871, 2571906, 2626073 и 2814585) и патентом РФ на полезную модель (№ 200478).

**Методы исследования.** В основном, все исследования в работе проведены экспериментальными методами. Ряд задач решен при помощи теоретических или численных методов, методами моментов и интегральных уравнений, с использованием пакета электродинамического моделирования FEKO.

## Теоретическая и практическая ценность работы

1. Разработаны методики измерений и сверхширокополосные стенды для измерения материальных параметров композитов (диэлектрической и магнитной проницаемости), а также коэффициентов отражения и прохождения в сверхшироком диапазоне частот от 0,2 до 110 ГГц в свободном пространстве, аттестованные уполномоченными метрологическими организациями.

2. Разработан комплекс магнитных наполнителей на основе порошков модифицированного карбонильного железа со стабильными электрофизическими и увеличенными магнитными свойствами на СВЧ. Определены функциональные зависимости для частотной дисперсии магнитной и диэлектрической проницаемости композитов, наполненных разработанными магнитными наполнителями с различной концентрацией.

3. На основе модифицированных магнитных наполнителей разработан комплекс стабильных двухкомпонентных компаундов для создания магнитных радиопоглощающих покрытий, как узкополосных однослойных покрытий с широкой полосой перестройки от 0,1 до 46 ГГц, так и сверхширокополосных многослойных радиопоглощающих покрытий с рабочей много октавной полосой частот.

4. Разработанные широкополосные диэлектрические радиопоглощающие материалы на основе стабильных полупроводящих композитных материалов нашли применение на экранах апертурных антенн для снижения уровней бокового и заднего излучения антенн.

5. Расчетным путем доказана и экспериментально подтверждена максимальная эффективность метаматериалов для антенной техники в области частот с околонулевыми значениями диэлектрической и магнитной проницаемости метаматериала. При частотах с отрицательными значениями проницаемостей метаматериала теоретически и экспериментально продемонстрирован эффект обратного излучения электромагнитной волны антенной на основе диэлектрического волновода в виде трубки из метаматериала.

6. Разработанные композитные материалы и покрытия, в том числе на основе метаматериалов, нашли широкое практическое применение на изделиях антенной техники с целью улучшения и корректировки их радиотехнических характеристик, а также для решения проблем электромагнитной совместимости.

Практическая ценность и реализуемость полученных в работе результатов подтверждена 6 патентами на изобретения и патентом на полезную модель, защищающими способы и соответствующую модель.

**Достоверность результатов.** Достоверность полученных в диссертации результатов, как экспериментальных, так и теоретических, подтверждается сопоставлением эксперимента и теории, которые согласуются с высокой точностью. Измеренные частотные зависимости коэффициента отражения многослойных радиопоглощающих покрытий хорошо согласуются с рассчитанными зависимостями из предварительно измеренных магнито-диэлектрических спектров композитных материалов. Достоверность экспериментальных результатов измерений обеспечивается метрологической аттестацией разработанных в работе

методик измерения. Точность разработанных методик измерения подтверждена измерениями эталонных образцов материалов в широком диапазоне частот и находится в пределах погрешности, регламентированной свидетельствами об аттестации методик измерения.

**Личный вклад автора.** Основные научные результаты диссертации получены соискателем лично или при определяющем вкладе со стороны соискателя. Все экспериментальные исследования и численные расчеты планировались и выполнялись при непосредственном участии соискателя, под его руководством, или в сотрудничестве с соавторами. Соискатель принимал непосредственное участие в постановке задач работы, обработке полученных результатов, их анализе и обобщении, формулировке выводов и научных положений. Разработка оптимальных режимов сухого и мокрого помолов порошка карбонильного железа, мониторинга процесса мокрого помола порошка карбонильного железа, электродинамическое моделирование структур сверхширокополосных многослойных материалов и покрытий, а также исследование основных свойств метаматериалов выполнены соискателем лично. В диссертацию включены только те результаты выполненных в соавторстве исследований, в которых личный вклад соискателя являлся определяющим.

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

1. Предложенные, экспериментально апробированные и аттестованные методики измерений электрофизических параметров малогабаритных (с размерами, большими одной длины волны) образцов материалов в свободном пространстве, отличающиеся от существующих аналогов использованием диафрагмированных линзовых рупорных антенн с новыми алгоритмами цифровой обработки сигналов в сверхшироком диапазоне частот (от 0,2 до 40 ГГц с возможностью расширения верхней границы до 110 ГГц), что позволяет обеспечить высокую точность измерений (до десяти процентов) электрофизических параметров материалов с высоким тангенсом диэлектрических и магнитных потерь.

2. Выявленные закономерности технологических методов механической обработки порошка карбонильного железа, включающие в себя комбинации методов сухого помола порошка карбонильного железа в вибромельнице и мокрого помола модифицированного порошка карбонильного железа в аттриторе, отличающиеся от известных ранее аналогов использованием в качестве добавки двуокиси кремния к порошку карбонильного железа при сухом помоле, а также использованием мониторинга процесса мокрого помола, которые приводят к значительной стабилизации электрофизических характеристик магнитных наполнителей и значительному увеличению их магнитных потерь в СВЧ диапазоне, что обеспечивает производство стабильных модифицированных магнитных наполнителей типов КЖ-3А, КЖ-2 и КЖ-6 со значительной вариацией их СВЧ магнитных свойств.

3. Предложенная методология расчета и оптимизации структур эффективных радиопоглощающих покрытий на основе композитных материалов с разработанными стабильными магнитными наполнителями, включающая в себя как

однослойные магнитные покрытия, так и многослойные градиентные магнито-диэлектрические покрытия, основанная на симплекс-процедуре с использованием созданной базы данных магнитных и диэлектрических спектров композитных материалов с разработанными магнитными наполнителями различной концентрации, что обеспечивает создание как эффективных узкополосных радиопоглощающих покрытий (с коэффициентом отражения менее минус 30 дБ) с широкой полосой перестройки рабочей частоты от 0,1 до 46 ГГц, так и сверхширокополосных радиопоглощающих покрытий с рабочим диапазоном частот в несколько октав (от 1 до 40 ГГц) с коэффициентом отражения менее минус 10 дБ.

4. Предложенные принципы построения систем диэлектрических радиопоглощающих материалов, включающие в себя как однослойные, так и многослойные полупроводящие материалы на основе пенополиуретанов, пропитанных полимерными композициями, наполненными высоко проводящей углеродной сажей, со специальной термообработкой, что обеспечивает стабильные радиофизические свойства материалов при воздействии внешних факторов среды, отличающиеся от известных аналогов, как правило, наличием тонких магнитных подслоев для снижения влияния размерных эффектов для коэффициента отражения малогабаритных образцов материалов, применимые для увеличения степени развязки близкорасположенных приемо-передающих рупорных антенн, корректировки диаграмм направленности зеркальных антенн, а также для создания экраняющего кожуха штыревой антенны для проверки работоспособности радиостанции.

5. Выявленные закономерности электродинамических свойств метаматериалов на основе гомогенной смеси лево- и правозакрученных проволочных спиралей, включающие в себя резонансный характер частотных дисперсий диэлектрической и магнитной проницаемости метаматериала в одном диапазоне частот, отличающиеся от аналогов наличием около нулевых значений действительных частей диэлектрической и магнитной проницаемости метаматериала в заданном узком диапазоне частот, что позволяет создавать эффективные узкополосные радиопоглощающие материалы, используемые в качестве насадок рупорных антенн для снижения уровней боковых и задних лепестков их диаграмм направленности.

6. Предложенная схема построения сверхширокополосного радиопоглощающего материала, включающая в себя согласующий слой на основе метаматериала из гомогенной смеси лево- и правозакрученных проволочных спиралей, отличающегося от аналогов наличием в структуре материала двух тонких магнитных подслоев на основе разработанных магнитных наполнителей КЖ-2 и КЖ-3А, что обеспечивает низкий коэффициент отражения (менее минус 10 дБ) радиопоглощающего материала в сверхшироком диапазоне частот от 5 до 33 ГГц за счет оптимальных согласующих свойств метаматериала в области основной и высших магнитных мод.

7. Предложенный способ создания малогабаритных волноводных согласованных нагрузок, включающий в себя использование многослойного интерференционного магнитного покрытия на основе разработанного магнитного

наполнителя КЖ-3А, отличающийся от аналогов методикой настройки данного магнитного покрытия в свободном пространстве с пересчетом коэффициента отражения покрытия для конкретного типа волновода, обеспечивающий изготовление компактных (толщиной около четверти длины волны) волноводных согласованных нагрузок с низкими значениями КСВН (не более 1,07) для диапазона частот 34 – 36 ГГц.

Все основные положения, выносимые на защиту, являются новыми и представляют интерес для широкого круга исследователей, что подтверждается их активным цитированием в отечественной и зарубежной научно-технической литературе.

### **Реализация и внедрение результатов работы**

Разработанные в диссертации радиопоглощающие материалы и покрытия, а также стенды для измерения их радиофизических характеристик использованы в различных организациях как при выполнении опытно-конструкторских работ, так и в серийном производстве: АО «ВНИИ «Градиент», АО НПО «Квант», АО «ЦКБА», АО «ГРПЗ», АО «НИИП имени В.В. Тихомирова», филиал ПАО «Ил»-Авиастар, АО «ВНИИ «Вега», ПАО «Радиофизика», ПАО «ОАК» ОКБ Сухого, ПАО «ТАНТК им. Г.М. Бериева», АО «Композит», ФГУП «КГНЦ», ООО «ИРЗ».

Результаты внедрения результатов работы подтверждаются соответствующими актами внедрения (см. Приложения Д, Е, Ж, З и И).

**Апробация результатов работы.** По теме диссертации изданы 143 печатных работы, включая 51 статью в рецензируемых журналах, 1 монографию, 6 патентов РФ на изобретения и 1 патент РФ на полезную модель.

Материалы диссертации докладывались и обсуждались на многих отечественных и международных научных конференциях, совещаниях и семинарах с 1993 по 2023 гг., среди которых: Школа-семинар «Релаксационные явления в твердых телах», 23-26 февраля, 1993, Воронеж; Int. Conf. and Workshop on Electromagnetics of Complex Media «Bianisotropics' 93», 1993, Gomel, Belarus; Fourth Int. Conf. on Electrical Transport and Optical Properties of Inhomogeneous Media (ETOPIM-4), July 23-30, 1996, Moscow; Int. Conf. and Workshop on Electromagnetics of Complex Media «Bianisotropics' 97», June 5-7, 1997, Glasgow, Great Britain; 7<sup>th</sup> Int. Crimean Conf. «Microwave and Telecommunication Technology», September 15-18, 1997, Crimea; 7<sup>th</sup> Int. Conf. on Complex Media «Bianisotropics' 98», June 3-6, 1998, Technische Univ. Braunschweig, Germany; Progress in Electromagnetics Research Symposium «PIERS' 98», July 13-17, 1998, Nantes, France; Moscow Int. Symp. on Magnetism «MISM-2002», June 20-24, 2002, Moscow; Int. Conf. on Materials for Advance Technologies, ICMAT-2003, December 7–12, 2003, Singapore; 10<sup>th</sup> Int. Conf. on Complex Media and Metamaterials «Bianisotropics' 04», September 22-24, 2004, Ghent, Belgium; 14-я Международ. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», Сентябрь 13-17, 2004, Севастополь; 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Materials for Advance Technologies ICMAT-2005, July 3–8, 2005, Singapore; 15-я Международ. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», Сентябрь 12-16, 2005, Севастополь; X Всероссийская школа-

семинар «Волновые явления в неоднородных средах». Секция Метаматериалы, периодические и дискретные структуры, МГУ, Звенигород, 2006; Progress in Electromagnetic Research Symposium «PIERS' 2008», March 24-28, 2008, Hangzhou, China; Progress in Electromagnetic Research Symposium «PIERS' 2008», July 2–6, 2008, USA; Конф. молодых ученых «Ломоносов-2008», 2008, Москва; Международ. научн. конф. «Излучение и рассеяние электромагнитных волн ИРЭМВ-2009», 27 июня-01 июля 2009, Дивноморск; The 4<sup>th</sup> European Conf. on Antennas and Propagation «EuCAP' 2010», April 12–16, 2010, Barcelona, Spain; The 5<sup>th</sup> Forum on New Materials «СІМТЕС' 2010», Montecatini Terme, Tuscany, Italy, June 13-18, 2010; 20-я Международ. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», Сентябрь 13-17, 2010, Севастополь; V Всероссийская научно-техн. конф. «Радиолокация и радиосвязь», 21-25 ноября 2011 г., Москва, ИРЭ РАН; VIII Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques (ICATT), September 20-23, 2011, Kyiv, Ukraine; Юбилейная научн. конф. посвященная 50-летию ОИВТ РАН, 2011, Москва; V научн. конф. «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации», 18-19 сентября, 2012, Суздаль; XIII Всероссийская школа-семинар «Волновые явления в неоднородных средах» (Волны-2012), секция 2, физический факультет МГУ, 2012, Москва; Международ. научн. конф. «Излучение и рассеяние электромагнитных волн ИРЭМВ-2013», 2013, Дивноморск; II Всероссийская Микроволновая конф., ИРЭ РАН, 2014, Москва; Шестая общероссийская научно-практ. конф. «Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем» (СВЧ-2016), 2016, Омск; XXXII Int. Conf. on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter, March 1-6, 2017, Elbrus, Russia; VI Всероссийская научно-техн. конф. «Электроника и микроэлектроника СВЧ», 29 мая-1 июня, 2017, Санкт-Петербург; XIX координационный научно-техн. семинар по СВЧ-технике, 5-7 сентября, 2017, Нижегородская обл., п. Хахалы, Россия; 27<sup>th</sup> Int. Conf. «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo' 2017), September 10 – 16, 2017, Sevastopol; Пятая всероссийская микроволновая конф., ИРЭ РАН, 2017, Москва; Седьмая всероссийская научно-техн. конф. «Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем» (СВЧ-2018), 2018, Омск; XXIII Международ. конф. «Новое в магнетизме и магнитных материалах», 30 июня – 5 июля, 2018, Москва; XI Всероссийская научно-техн. конф. «Метрология в радиоэлектронике», 19-21 июня, 2018, Менделеево, Московская обл.; VI Всероссийская Микроволновая конф., 26—30 ноября, 2018, ИРЭ РАН, Москва; Conference 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves RSEMW, June 24—28, 2019, Divnomorskoe, Russia; Всероссийская научно-техн. конф. «Антенны и распространение радиоволн 2019» (APP' 2019) 15-17 сентября, 2019, ЛЭТИ, Санкт-Петербург; XXXIV Int. Conf. on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter (“ELBRUS-2019”), March 1-6, 2019, Elbrus, Russia; XXII Международная научно-техн. конф. «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов», 15—17 октября, 2019, Обнинск; The 18<sup>th</sup> Int. Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics, April 9—11, 2019, Moscow; XIII Ежегодная научно-техн. конф. «Радиолокационные системы малой и сверхмалой дальности», 05 февраля,

2020, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва; Восьмая всероссийская научно-техн. конф. «Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем» (СВЧ-2020), 2020, Омск; II Int. Conf. «MIP: Engineering-2020: Modernization, Innovations, Progress: Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering», April 16—18, 2020, Krasnoyarsk, Russia; VII Всероссийская Микроволновая конф., 25-27 ноября, 2020, ИРЭ РАН, г. Москва; XII Всероссийская научно-техн. конф. «Метрология в радиоэлектронике», 21-23 сентября 2021, Менделеево, Московская обл.; Девятая всероссийская научно-техн. Конф. «Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем» (СВЧ-2022), 2022, Омск; The 5<sup>th</sup> Int. Conf. «Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection and Applications (TERA-2023)», 2023, Moscow, Russia; XIII Всероссийская научно-техн. конф. «Метрология в радиоэлектронике», 20-22 июня, 2023, Менделеево, Московская обл., IEEE 8<sup>th</sup> All-Russian Microwave Conf. (RMC-2022), Moscow;

а также на Ежегодных научных конференциях Института теоретической и прикладной электродинамики РАН (ИТПЭ РАН) в 2004–2021 гг., на научных семинарах, проведенных в ИТПЭ РАН, МГТУ им. Н.Э. Баумана, АО «КРЭТ».

Результаты работы были использованы при выполнении ряда научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, в которых автор был ответственным исполнителем или научным руководителем.

**Объем и структура работы.** Диссертационная работа изложена на 397 страницах машинописного текста, иллюстрируется 397 рисунками и 31 таблицей, содержит 288 ссылок на литературные источники. Она состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. В начале каждой главы приведен краткий обзор литературных данных по проблеме, дающий обоснование постановки решаемых задач.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели работы, положения, выносимые на защиту, научная и практическая значимость полученных результатов, описаны структура, объём и содержание диссертационной работы.

**Глава 1** посвящена экспериментальным методам измерений электрофизических материальных параметров композитных материалов на СВЧ, разработанным и использованным при проведении работы. В **параграфе 1.1** приведен обзор современных методов измерений параметров материалов на СВЧ. Отмечено, что наиболее распространены резонаторный метод (метод малых возмущений), метод коаксиального пробника, метод линии передачи (метод Николсона–Росса–Уира) в волноводной или коаксиальной линии, метод измерения в свободном пространстве. Эти стандартные методы измерений позволяют решать большинство задач, связанных с исследованием СВЧ свойств композитных материалов. Однако для проведения экспериментальных исследований в рамках настоящей работы потребовалась доработка и развитие методик измерения в свободном пространстве, обладающих рядом преимуществ по сравнению с

вышеперечисленными методиками измерений, а именно данная методика является принципиально бесконтактной, максимально широкополосной, позволяет измерять композитные материалы с достаточно большими включениями по сравнению с длиной волны (например, метаматериалы), как при комнатной температуре, так и с нагревом и охлаждением образцов материалов.

В параграфе 1.2 рассмотрена разработанная методика измерения электрофизических параметров композитных материалов в свободном пространстве в ближней зоне рупорных антенн МИ 29012159-30002-2002 в диапазоне частот от 1 до 18 ГГц (в период до появления векторных анализаторов цепей). Блок-схема измерительной установки для данной методики измерения представлена на рисунке 1.

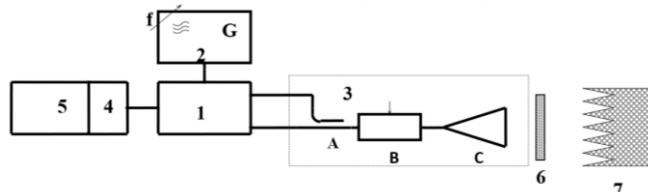


Рисунок 1 – Блок-схема измерительного стенда для измерения параметров материалов в ближней зоне рупорных антенн: 1 – амплифазометр ФК2-33, 2 – СВЧ генератор, 3 – измерительная СВЧ секция в составе: А – направленный ответвитель, В – трансформатор импеданса, С – прямоугольная рупорная антенна, 4 – интерфейс, 5 – персональный компьютер, 6 – измеряемый или эталонный образец, 7 – объемный радиопоглощающий материал

Использование набора модифицированных прямоугольных рупорных антенн с нанесенным магнитным радиопоглощающим покрытием специального профиля требуемой толщины внутри рупоров вблизи краев широкой стенки, специальная объемная радиопоглощающая «засыпка» внутри рупоров, а также процедура компенсации фоновых отражений и набор специальных калибровочных процедур, включая измерение коэффициента отражения эталонного образца кварцевого стекла, позволили обеспечить измерение низких значений коэффициента отражения материалов до минус 40 дБ в диапазоне частот от 1 до 18 ГГц при фиксированных частотах. Разработана специальная процедура учета неплоскостности фазового фронта электромагнитной волны вблизи апертуры рупора введением поправочных коэффициентов по измерению коэффициента отражения эталонного образца и эталонного образца, расположенного на металлической пластине. Из результатов измерений коэффициента отражения образца материала на эталонном образце кварцевого стекла и коэффициента отражения материала на металлической пластине получены формулы для расчета диэлектрической и магнитной проницаемости исследуемого материала. Разработанная методика измерений МИ 29012159-30002-2002 прошла метрологическую аттестацию установленным порядком.

В параграфе 1.3 представлена разработанная методика измерений МИ 29012159-30008-2010 электрофизических параметров материалов и покрытий в свободном пространстве в ближней зоне диафрагмированных линзовых рупорных антенн в сверхшироком диапазоне частот от 1 до 40 ГГц на основе векторного анализатора цепей. В основе данной методики измерений лежит измерение коэффициента отражения  $S_{11}$  или коэффициента прохождения  $S_{12}$  квазиплоской электромагнитной волны образцов материалов. На рисунке 2 представлена

принципиальная схема измерительных стендов, разработанных на основе этой методики измерений.

Измерительные стенды, построенные на основе данной методики, реализованы с использованием четырехпортового векторного анализатора цепей ZVA40 (2). При измерениях используются два набора приемно-передающих широкополосных линзовых рупорных антенн (3-4 и 5-6), работающих в поддиапазонах частот 1-24 и 22-40 ГГц, соответственно. В связи с тем, что геометрические размеры измеряемых образцов (как правило, размерами 200×200 мм) меньше размера апертуры антенн, производится диафрагмирование апертуры антенн с помощью специально разработанных металлических диафрагм с различным круглым окном с нанесенным на них широкополосным радиопоглощающим покрытием и радиопоглощающим материалом (9, 10). При проведении измерений исследуемые образцы помещаются на окно металлической диафрагмы, расположенной в ближней зоне рупорных антенн, что минимизирует вклад от процессов дифракции на краях образца и кромках антенн и позволяет точно позиционировать образец в пространстве для обеспечения точных фазовых измерений коэффициента отражения.

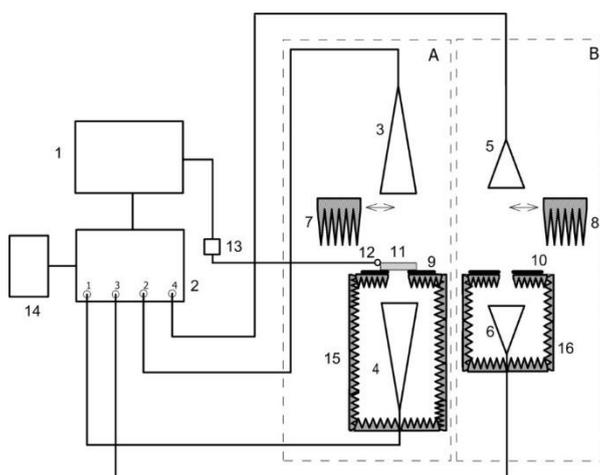


Рисунок 2 – Блок-схема измерительных стендов для измерений параметров материалов и покрытий в свободном пространстве в диапазоне частот от 1 до 40 ГГц: 1 – компьютер; 2 – векторный анализатор цепей R&S ZVA40; 3-6 – рупорная линзовая антенна; 7, 8 – пирамидальный радиопоглощающий блок; 9, 10 – металлическая диафрагма с нанесенными РПП и РПМ; 11 – измеряемый образец; 12 – датчик угла или температуры; 13 – аналогово-цифровой преобразователь; 14 – рубидиевый стандарт частоты; 15, 16 – антенный стол с нанесенными РПП и РПМ

В процессе измерений коэффициента отражения образцов материалов в зоне за диафрагмой устанавливается согласованная нагрузка – объемный радиопоглощающий блок (7, 8) с мягким входом и низким КО в рабочей полосе частот (не выше минус 50 дБ) для исключения дополнительных паразитных отражений от окружающего пространства. Для снижения ошибки измерения S-параметров образцов используется набор специальных калибровок с цифровым вычитанием фона.

Измерения параметров материалов проводят на двух измерительных стендах в двух поддиапазонах частот: стенд А (от 1 до 24 ГГц) и стенд В (от 22

до 40 ГГц). Измерения  $S$ -параметров образцов проводят для 2000 (или более) частотных точек на каждый частотный поддиапазон (измеряется матрица комплексных параметров **MEASURE**, состоящая из значений частоты, модуля и фазы  $S$ -параметров). Перед началом измерений  $S$ -параметров образца для устранения паразитных переотражений в СВЧ тракте (включая отражение волны от диафрагмы) производится процедура калибровки стендов, заключающаяся в измерении матриц двух комплексных сигналов – **BGR** (фон) и **RESPONSE** (стандартный отклик). Комплексные значения матрицы  $S$ -параметров материалов рассчитываются по формуле преобразования измеренных матриц параметров

$$S_{11}, S_{12} = (\mathbf{MEASURE} - \mathbf{BGR}) / (\mathbf{RESPONSE} - \mathbf{BGR}). \quad (1)$$

При расположении образца материала на окне диафрагмы возникают множественные переотражения между образцом, антеннами и окружающим пространством. Для минимизации влияния переотражений СВЧ-сигнал преобразуется во временную область с помощью обратного Фурье-преобразования. Затем производится выделение полезного сигнала с использованием полосового фильтра с применением окна Кайзера-Бесселя:

$$p(t) = \begin{cases} \frac{J_0 \left[ \beta \sqrt{1 - (t/\tau)^2} \right]}{J_0(\beta)}, & |t| \leq \tau, \\ 0, & |t| > \tau \end{cases} \quad (2)$$

где  $J_0(\beta) = \sum_{k=1}^{\infty} [(\beta/2)^k / k!]^2$  – модифицированная функция Бесселя нулевого порядка;  $\tau$  – ширина окна;  $\beta$  – неотрицательное действительное число, определяющее форму окна (в функции фильтра принимается, что  $\beta = 5,8$ ).

Ширину окна временной фильтрации спектра сигнала выбирают таким образом, чтобы не затрагивать области с мешающими переотражениями сигнала. После процедуры прямого Фурье-преобразования получаем частотную зависимость функций отражения  $S_{11}$  или прохождения  $S_{12}$  образца в сглаженном виде. Помимо этого, применяются специальные методы цифровой обработки для подавления осцилляций сигнала на краях частотного диапазона, вызванных эффектом Гиббса. Внешний вид разработанных стендов в свободном пространстве представлен на рисунке 3.



а)



б)

Рисунок 3 – Внешний вид стендов для измерений электрофизических параметров материалов в свободном пространстве в сверхшироком диапазоне частот: а - 1 - 24 ГГц, б – 22 - 40 ГГц

Из измеренных значений параметров образца материала  $S_{11}$  и  $S_{12}$ , а также коэффициента отражения  $S_{11}^{SC}$  на металлической пластине по формулам Френеля рассчитываются диэлектрическая  $\varepsilon$  и магнитная  $\mu$  проницаемости образца материала. На рисунке 4 приведен пример измерения частотной зависимости  $\varepsilon$  и  $\mu$  образца композитного материала, наполненного порошком карбонильного железа марки Р-100Ф2.

В параграфе 1.4 на основе масштабирования методик измерения в свободном пространстве как в сторону низких частот (0,2-2,0 ГГц), так и крайне высоких частот (75-110 ГГц) представлены измерительные стенды на основе диафрагмированных линзовых антенн для измерения параметров композитных материалов в расширенном сверхшироком диапазоне частот от 0,2 до 40 ГГц и в миллиметровом диапазоне частот от 75 до 110 ГГц. Методики измерений параметров материалов в свободном пространстве в диапазонах частот 1-40 ГГц и 0,2-40 ГГц метрологически аттестованы уполномоченными организациями.

В параграфе 1.5 представлен разработанный мобильный измеритель коэффициента отражения покрытий (МИКО), востребованный для контроля коэффициента отражения покрытий на крупногабаритных элементах антенной техники, в том числе в полевых условиях. МИКО построен на основе портативного рефлектометра *PLANAR* с модифицированными с помощью магнитного радиопоглощающего покрытия рупорными антеннами.

Отсутствие радиочастотного фазостабильного кабеля в измерительной схеме расширяет динамический диапазон измерений. Жесткое механическое соединение рефлектометра непосредственно с рупором устраняет проблему фазовой нестабильности кабеля. МИКО имеет ряд преимуществ перед традиционными рефлектометрами: малые размеры и масса, возможность работы вне помещений, простота применения, невысокая стоимость, широкий, не менее 40 дБ, динамический диапазон, возможность проведения измерений в широкой полосе частот и др.

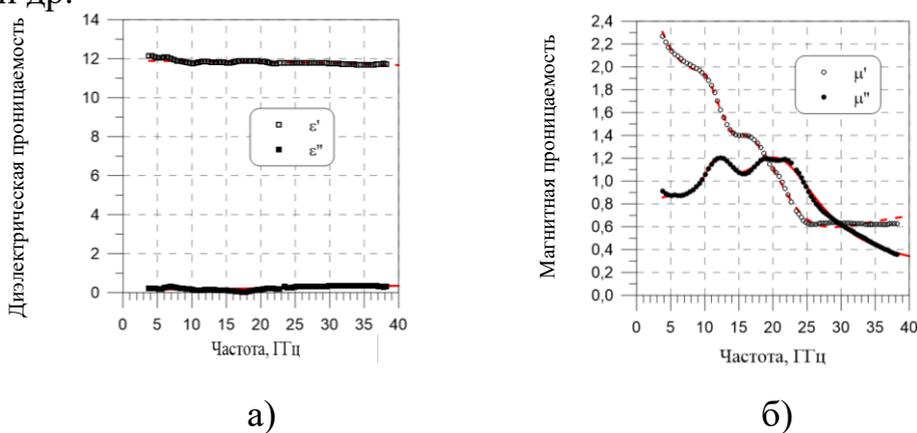


Рисунок 4 – Частотные зависимости диэлектрической (а) и магнитной (б) проницаемости композита, наполненного порошком карбонильного железа Р-100Ф2 с объемной концентрацией 40% (точки – результаты измерений, кривые – аналитические функции аппроксимации)

В **параграфе 1.6** изложены основные положения метода малых возмущений, используемого в работе для измерений поляризуемостей включений разработанных образцов композитных метаматериалов.

**Параграф 1.7** посвящен особенностям коаксиального метода измерения магнитной проницаемости композитных материалов в низкочастотном диапазоне частот от 100 МГц до 3 ГГц методом короткого замыкания и холостого хода, используемого в работе для низкочастотных измерений магнитных свойств разрабатываемых композитных материалов.

В **параграфе 1.8** описана разработанная методика измерения диаграмм обратного рассеяния и эффективной поверхности рассеяния малогабаритных объектов в безэховой камере МИ 29012159-30009-2010, востребованная в работе для оценки эффективности поглощающих свойств разработанных композитных материалов.

**Глава 2** посвящена исследованию микроволновых свойств композитных материалов, наполненных порошками карбонильного железа, способам модификации карбонильного железа для повышения стабильности электрофизических свойств и увеличения магнитных потерь композитов на их основе. Для изготовления основных композитных материалов здесь и далее в работе используется коммерчески доступное кремнийорганическое связующее.

В **параграфе 2.1** представлены основные свойства порошков промышленных марок Р-10, Р-20, Р-50 и Р-100Ф2 карбонильного железа, электронные фотографии порошков карбонильного железа, распределения частиц порошка по размерам, полученные на лазерном дифрактометре, а также частотные зависимости материальных параметров композитов, наполненных порошками различных марок с одинаковой концентрацией. Для мелкодисперсных марок железа Р-50 и, особенно, Р-100Ф2 отмечен сложный вид частотной дисперсии магнитной проницаемости композита на его основе, описывающийся, как правило суммой дебаевской релаксации и пяти лоренцевских магнитных резонансов.

**Параграф 2.2** посвящен исследованию способов стабилизации электрофизических свойств композитных материалов, наполненных порошком крупнодисперсного карбонильного железа Р-10. Показана значительная зависимость диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь композитов на основе железа Р-10 от партии продукта. Промышленно используемые методы стабилизации диэлектрических свойств композитов на основе карбонильного железа – фосфатирование и термоокисление порошков карбонильного железа показали свою низкую эффективность на практике. Разработанный в работе способ сухого помола порошка карбонильного железа Р-10 в шаровых и вибрационных мельницах с добавкой окиси кремния (аэросила) показал свою высокую эффективность для стабилизации электрофизических свойств порошка железа Р-10, вызванной эффективными процессами дезагломерации частиц порошка железа и силонированием их поверхности в процессе длительной механической обработки.

В **параграфе 2.3** представлены экспериментальные результаты по стабилизации электрофизических свойств композитов, наполненных порошком

карбонильного железа Р-20, обладающего меньшими размерами частиц порошка и меньшей степенью агломерированности по сравнению с порошком карбонильного железа Р-10. Показана высокая эффективность стабилизации СВЧ свойств композитов на основе модифицированного карбонильного железа Р-20, получаемого путем длительной механической обработки – сухим помолом порошка Р-20 с добавкой аэросила в шаровой мельнице. Исследована дисперсность порошков модифицированного железа Р-20 в зависимости от времени сухого помола, выявлено значительное снижение диэлектрической проницаемости и рост магнитной проницаемости композита с порошком модифицированного железа Р-20, по сравнению с порошком промышленного карбонильного железа Р-20.

**Параграф 2.4** связан с разработкой основ технологии производства стабильного магнитного наполнителя **КЖ-3А** из исходного сырья – произвольной партии порошка карбонильного железа Р-20. Оптимизированы параметры механической обработки порошка карбонильного железа, наиболее эффективного сухого помола порошка Р-20 в вибрмельнице – вес исходного продукта Р-20, масса шаровой загрузки, оптимальная концентрация аэросила и время длительного сухого помола. Композитный материал, наполненный стабильным магнитным наполнителем КЖ-3А, получаемым после длительного сухого помола в вибрмельнице, имеет минимальное значение диэлектрической проницаемости и потерь при максимальных магнитных потерях в сантиметровом диапазоне длин волн. Типичные частотные зависимости диэлектрической и магнитной проницаемости композита, наполненного магнитным наполнителем КЖ-3А с максимальной концентрацией представлены на рисунке 5.

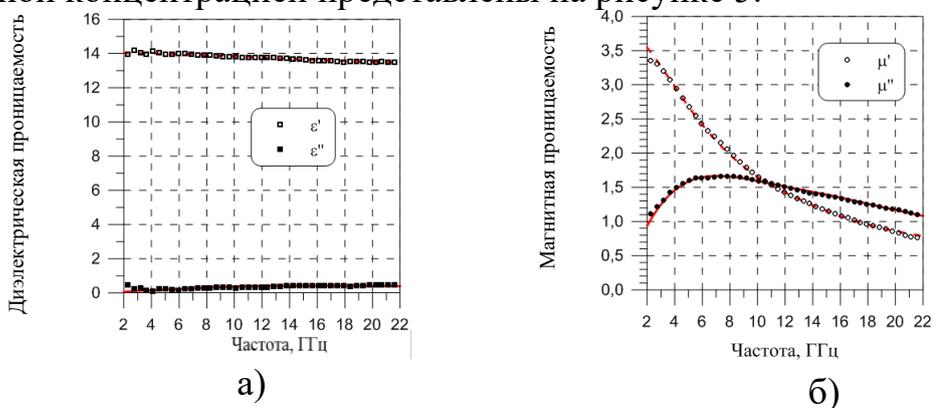


Рисунок 5 – Типичные частотные зависимости диэлектрической и магнитной проницаемости композитного материала на основе кремнийорганического каучука, наполненного магнитным наполнителем КЖ-3А с концентрацией  $C_v=42\%$  (точки – результаты измерений, кривые – аналитические функции аппроксимации)

Стабильные электрофизические свойства магнитного наполнителя КЖ-3А позволили исследовать частотные зависимости материальных параметров композитов (частотную зависимость диэлектрической и магнитной проницаемости) на их основе в зависимости от его концентрации.

На основе полученных в предыдущем параграфе концентрационных зависимостей материальных параметров композитов, наполненных стабильным магнитным наполнителем КЖ-3А, частотных функций аппроксимации их материальных

параметров, в **параграфе 2.5** произведены теоретические расчеты частотных зависимостей коэффициента отражения однослойных магнетодиэлектрических покрытий с различной концентрацией магнитного наполнителя КЖ-3А, являющихся по сути, экранами Далленбаха, с минимумом коэффициента отражения на металлической подложке при выполнении условия

$$d\sqrt{\varepsilon\mu} = \lambda / 4, \quad (3)$$

где  $d$  – толщина покрытия,  $\lambda$  – длина волны. Показано, что на основе композитов, наполненных магнитным наполнителем КЖ-3А с объемной концентрацией от 22 до 42 % (ограничение максимальной концентрации для обеспечения приемлемых физико-механических свойств композитов) можно создать эффективные однослойные радиопоглощающие покрытия, с коэффициентом отражения менее минус 50 дБ, перекрывающие диапазон частот от 8 до 46 ГГц с толщинами покрытий от 0,5 до 1,6 мм. Исследованы параметры однослойных покрытий, оптимальные толщины, частоты глобального минимума коэффициента отражения и относительная широкополосность покрытия по уровню коэффициента отражения покрытия минус 20 дБ, составляющая от 7 до 28 % (при особой частоте около 24 ГГц, соответствующей области аномальной частотной дисперсии магнитной проницаемости композита и появлению двух минимумов коэффициента отражения покрытия РАН-100 при концентрации наполнителя КЖ-3А около 22 %). Для изготовленного однослойного радиопоглощающего покрытия (РПП) РАН-53 с минимумом коэффициента отражения около 9 ГГц (порядка минус 55 дБ) исследована угловая зависимость коэффициента отражения покрытия, температурная зависимость коэффициента отражения покрытия в диапазоне рабочих температур от минус 70 до +180°С, показано, что минимум коэффициента отражения покрытия смещается в пределах 1 ГГц, глубина минимума коэффициента отражения не поднимается выше минус 28 дБ в пределах данного диапазона температур. Полученные высокие радиотехнические характеристики РПП РАН-53 позволили рекомендовать его для применения внутри антенного отсека метеолокатора самолета RRJ-100 для снижения паразитных переотражений волны внутри отсека и улучшения, таким образом, диаграммы направленности антенны.

**Параграф 2.6** посвящен исследованию способа модификации электрофизических свойств карбонильного железа путем мокрого помола порошка карбонильного железа в атриторе в среде этилового спирта. Показано, что при данном способе механической обработки порошка карбонильного железа Р-20 происходит значительная механическая деформация квазисферических частиц порошка карбонильного железа Р-20 размером 2-3 мкм с получением пластинчатых частиц железа размером 5-10 мкм и толщиной порядка 1 мкм. Кардинальное изменение формы частиц железа и связанное с этим изменение полей размагничивания в частицах железа приводит к значительному увеличению магнитных потерь и диэлектрической проницаемости композитов на основе модифицированного железа.

Для производства стабильного порошка модифицированного карбонильного железа путем мокрого помола впервые разработан метод мониторинга процесса мокрого помола, позволяющий автоматически проводить корректировку времени мокрого помола порошка железа, необходимую в связи с естественным износом

силовых элементов конструкции атритора - ворошителей и стальных закаленных шаров. Измерение в процессе мокрого помола эволюции коэффициента передачи между двумя коаксиально-волновыми переходами с пластиковым шлангом между ними, заполненным жидкой пульпой (смесью порошка железа со спиртом), на фиксированной частоте около 4 ГГц, соответствующей максимальному затуханию сигнала между переходами, а также контроль температуры пульпы, позволяет прогнозировать время мокрого помола порошка карбонильного железа по достижению требуемого коэффициента затухания, и получать, таким образом, стабильный продукт в течении длительной эксплуатации оборудования.

**Параграф 2.7** посвящен разработке технологии производства стабильного магнитного наполнителя типа **КЖ-2** с повышенными магнитными потерями в сантиметровом диапазоне частот, получаемого путем оптимальной механической обработки порошка карбонильного железа - комбинации методов сухого и мокрого помолов исходного порошка карбонильного железа в вибромельнице и атриторе. Оптимизированы параметры мокрого помола исходного сырья – магнитного наполнителя КЖ-3А, а также последующего сухого помола полуфабриката железа после мокрого помола с целью стабилизации его электрофизических свойств. Исследованы зависимости материальных параметров композитов, наполненных магнитным наполнителем КЖ-2 в зависимости от его концентрации.

Типичные частотные зависимости диэлектрической и магнитной проницаемости композита, наполненного стабильным магнитным наполнителем КЖ-2 с максимальной концентрацией представлены на рисунке 6.

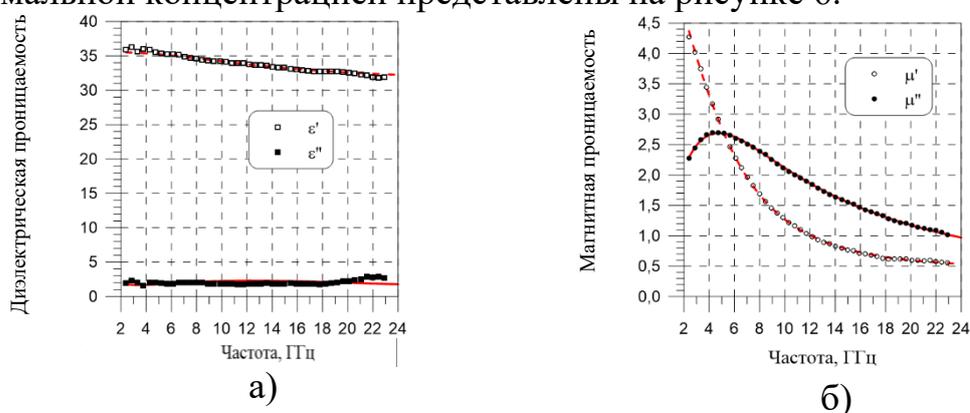


Рисунок 6 – Типичные частотные зависимости диэлектрической и магнитной проницаемости композитного материала на основе кремнийорганического каучука, наполненного магнитным наполнителем КЖ-2 с концентрацией  $C_v=35\%$  (точки – результаты измерений, кривые – аналитические функции аппроксимации)

В **Параграфе 2.8** приведены результаты расчетных исследований по оптимизации однослойных магнитных радиопоглощающих покрытий на основе композитов, наполненных магнитным наполнителем КЖ-2, на основе формул Френеля и базы данных по функциям частотной дисперсии материальных параметров композитов.

Показано, что на основе магнитного наполнителя КЖ-2 можно создать эффективные однослойные магнитные радиопоглощающие покрытия с коэффициентом отражения покрытия менее минус 50 дБ в диапазоне частот от 2 до 12 ГГц

при вариации объемной концентрации магнитного наполнителя КЖ-2 от 14 до 35 % и толщине покрытий от 2,0 до 2,8 мм. При этом относительная широкополосность покрытий по уровню коэффициента отражения покрытия минус 20 дБ составляет от 12 до 15 %.

**Параграф 2.9** посвящен областям применения магнитных радиопоглощающих покрытий на основе магнитного наполнителя КЖ-2 (например, РПП типа РАН-1М, материальные параметры см. на рисунке б) для решения проблем электромагнитной совместимости, снижения просачивания электромагнитной энергии через неплотность экранирующих элементов радиотехнических блоков, коаксиальных разъемов и др.

**Параграф 2.10** описывает результаты разработки технологии получения стабильного магнитного наполнителя типа **КЖ-6**, получаемого путем высокоэнергетичного мокрого помола наполнителя КЖ-3А, имеющего сверхтонкую пластинчатую форму размерами 10-15 мкм и толщиной менее 0,1 мкм. Магнитный наполнитель КЖ-6 имеет самую высокую магнитную проницаемость и магнитные потери в диапазоне частот от 0,1 до 4 ГГц среди всех разработанных магнитных наполнителей на основе порошка карбонильного железа. На рисунке 7 представлены в сравнении частотные зависимости магнитной проницаемости композитов, наполненных различными магнитными наполнителями – карбонильным железом Р-100Ф2 и магнитными наполнителями КЖ-3А, КЖ-2 и КЖ-6 с одинаковой весовой концентрацией (на 100 г каучука - 200 г наполнителя).

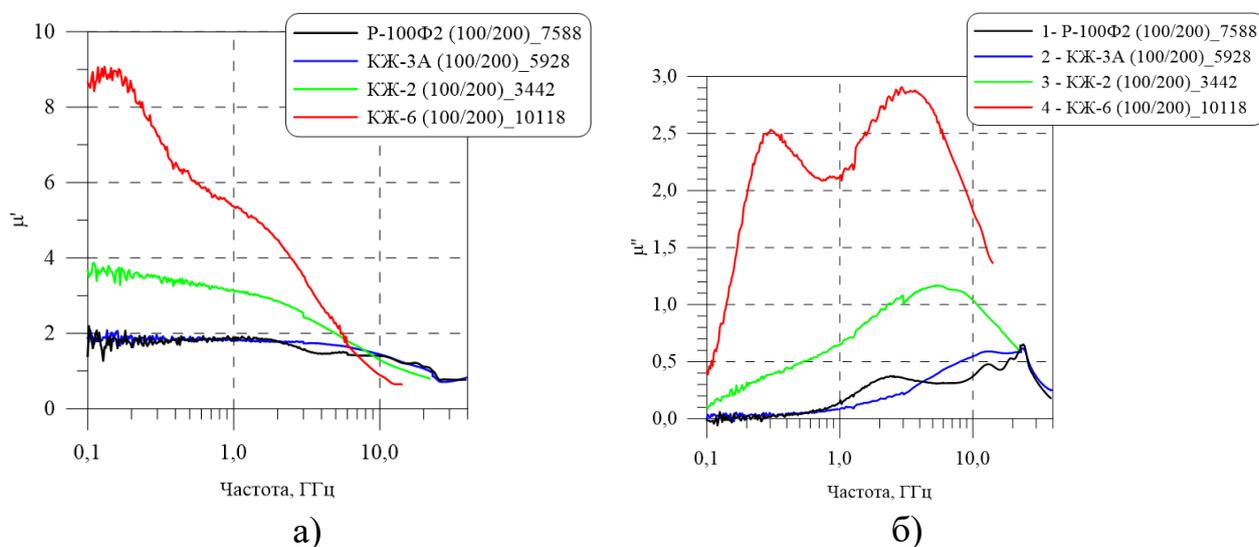


Рисунок 7 – Частотные зависимости действительной (а) и мнимой (б) части магнитной проницаемости композитов на основе кремнийорганического каучука с различными типами магнитных наполнителей при их одинаковой концентрации ( $C_m=100/200$ ,  $C_v=21,5\%$ )

В параграфе 2.11 представлены результаты оптимизации однослойных радиопоглощающих покрытий на основе композитов, наполненных магнитным наполнителем КЖ-6 с различной концентрацией. Показано, что на их основе можно создать эффективные РПП в диапазоне частот от 0,1 до 4,5 ГГц с коэффициентом отражения менее минус 50 дБ при концентрации наполнителя КЖ-6 от 6 до 21 % и толщинах покрытия от 3,5 до 22 мм. При этом относительная

широкополосность РПП по уровню коэффициента отражения покрытия минус 20 дБ составляет от 7 до 12 %.

Таким образом, в главе 2 экспериментально показано, что комбинацией методов механической обработки порошка карбонильного железа – сухого помола с добавкой аэросила в вибрмельнице и мокрого помола в атриторе в среде этилового спирта возможно создание широкой номенклатуры стабильных магнитных наполнителей с повышенными магнитными свойствами в диапазоне частот от 100 МГц до 46 ГГц, востребованных при создании эффективных узкополосных РПП для этого СВЧ диапазона.

**Глава 3** посвящена разработке сверхширокополосных радиопоглощающих покрытий на основе градиентных многослойных магнитных композитных материалов, наполненных разработанными стабильными магнитными наполнителями КЖ-3А, КЖ-2 и КЖ-6.

В **Параграфе 3.1** представлено разработанное широкополосное частотно-селективное РПП РАН-54, представляющее собой пятислойное градиентное покрытие на основе магнитных наполнителей КЖ-3А, КЖ-2 и реологических добавок для диапазона частот от 2 до 18 ГГц толщиной около 4,7 мм, имеющее модуль коэффициента отражения покрытия в полосе частот от 8 до 18 ГГц не более минус 20 дБ, растущий коэффициент отражения при понижении частоты от 8 до 2 ГГц и специально подобранную почти линейную зависимость фазы коэффициента отражения покрытия в этом диапазоне частот. Показана высокая стабильность РПП РАН-54 при различных внешних воздействующих факторах – пониженной (минус 60 °С), повышенной (+120 °С) температурах, после термоциклирования, выдержки в камере влажности. На рисунке 8 (кривая 1) приведена частотная зависимость коэффициента отражения РПП РАН-54 при нормальном падении электромагнитной волны.

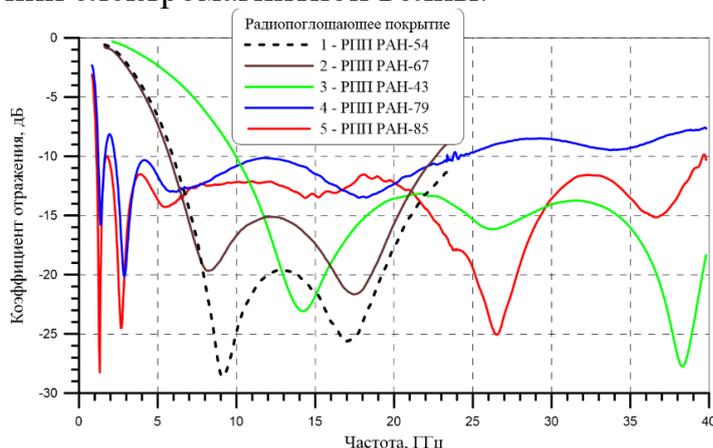


Рисунок 8 - Частотные зависимости модуля коэффициента отражения различных РПП на металлической подложке при нормальном падении электромагнитной волны (кривая 1 – РПП РАН-54, кривая 2 – РПП РАН-67, кривая 3 – РПП РАН-43, кривая 4 – РПП РАН-79, кривая 5 – РПП РАН-85)

РПП РАН-54 специально разработано для применения на поверхности параболического отражателя сверхширокополосной зеркальной многолучевой антенны СШПА218 системы радиомониторинга диапазона частот 2-18 ГГц. Размещение РПП РАН-54 по специальной схеме на периферийной поверхности параболического зеркального отражателя позволило стабилизировать по ширине диаграммы направленности антенны СШПА218 в угломестной плоскости в широком диапазоне частот, снизить массу, упростить конструкцию и, в конечном итоге создать

сверхширокополосную антенную систему СШПА218 в однолитерном исполнении. Технология изготовления СШПА218 с РПП РАН-54 запатентована, РПП РАН-54 применяется в серийном производстве антенной системы СШПА218.

**Параграф 3.2** посвящен разработке широкополосного РПП РАН-67, представляющего собой трехслойное покрытие на основе магнитных наполнителей КЖ-2, КЖ-3А и пигментов с толщиной около 4,2 мм, имеющего коэффициент отражения при нормальном падении волны в диапазоне частот не более минус 17 дБ (кривая 2 на рисунке 8). Стабильность радиотехнических характеристик покрытия при внешних воздействующих факторах, а также хорошие угловые зависимости коэффициента отражения покрытия позволили эффективно применить РПП РАН-67 на законцовках крыла модернизированных летательных аппаратов в зоне размещения широкополосной спиральной антенны системы радиомониторинга, минимизировать интерференцию прямого сигнала, падающего на антенну и отраженного от металлической поверхности антенной платформы, и, таким образом, снизить изрезанность диаграммы направленности спиральной антенны.

В **параграфе 3.3** рассмотрено двухслойное широкополосное РПП РАН-43 на основе магнитного наполнителя КЖ-3А и реологических добавок толщиной 2,4 мм с коэффициентом отражения не более минус 12 дБ в диапазоне частот от 12 до 39 ГГц (кривая 3 на рисунке 8). Оптимальное размещение РПП РАН-43 на элементах конструкции широкополосного антенного блока системы радиомониторинга и элементах конструкции летательного аппарата позволило значительно снизить изрезанность диаграммы направленности (изрезанность  $N = 10 \left| \lg(P / P_{cp}) \right|$ , где  $P$  – амплитуда измеренной диаграммы направленности антенны для угла, на котором определяется изрезанность,  $P_{cp}$  – амплитуда усредненной (аппроксимирующей) диаграммы направленности антенны для угла, на котором определяется изрезанность) спиральной антенны за счет минимизации паразитных переотражений сигнала в зоне размещения антенны. На рисунке 9 представлены диаграммы направленности одной из спиральных антенн на летательном аппарате при частоте 18 ГГц при вертикальной (а) и горизонтальной (б) поляризациях волны в исходном виде и с РПП РАН-43.

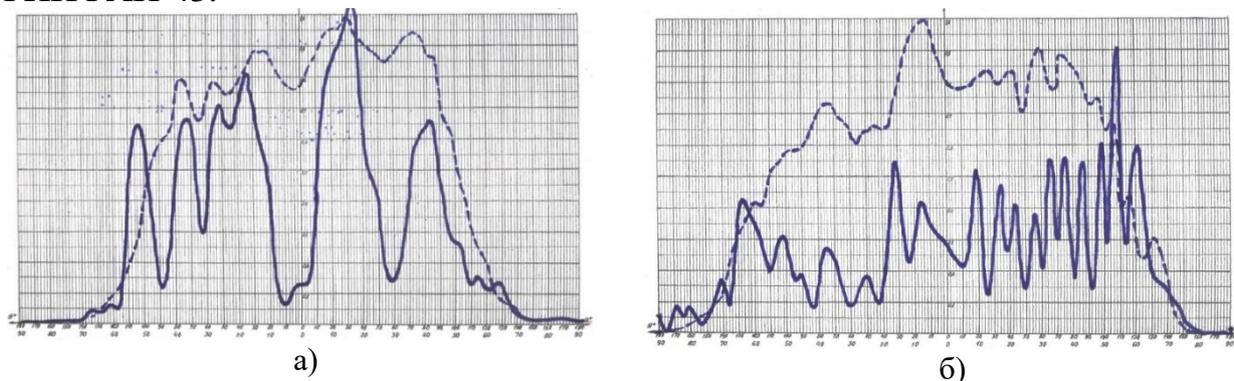


Рисунок 9 – Азимутальные нормированные диаграммы направленности спиральной антенны при частоте 18 ГГц для вертикальной (а) и горизонтальной (б) поляризации (сплошная линия – антенна в исходном виде, пунктирная линия – антенна с РПП РАН-43)

**Параграф 3.4** посвящен разработке сверхширокополосного шестислойного РПП РАН-79 на основе разработанных магнитных наполнителей ВЖ-1 (мокрый

помол в атриторе порошка металлургического железа ВМ), КЖ-2, КЖ-3А и реологических добавок толщиной 11,2 мм с коэффициентом отражения покрытия не более минус 10 дБ в диапазоне частот от 1,2 до 18 ГГц (кривая 4 на рисунке 8). РПП РАН-79 показало свою высокую эффективность для стабилизации диаграмм направленности сверхширокополосных спиральных антенн на металлической платформе. На рисунке 10 приведены частотные зависимости изрезанности диаграммы направленности спиральной антенны в исходном виде и с РПП РАН-79. На РПП РАН-79 оформлен патент на изобретение.

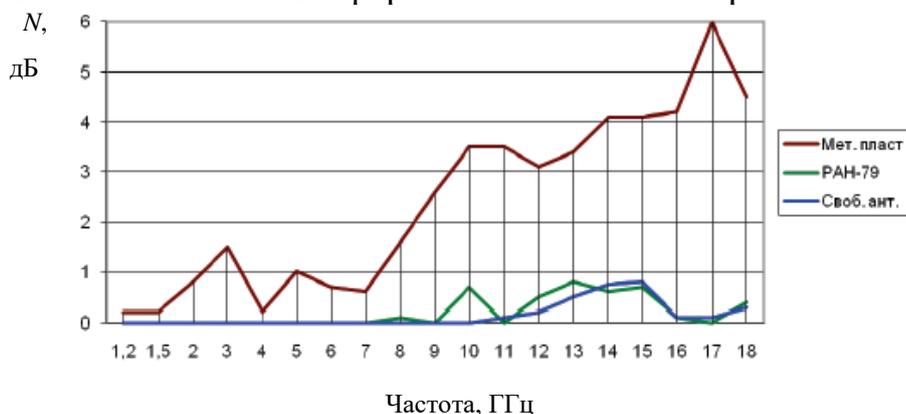


Рисунок 10 – Частотные зависимости изрезанности диаграммы направленности спиральной антенны в свободном пространстве (синяя кривая), на металлической пластине (коричневая) и на металлической пластине с РПП РАН-79 (зеленая) при горизонтальной поляризации волны

В параграфе 3.5 изложена доработка сверхширокополосного РПП РАН-79 до семислойного РПП РАН-85 на основе тех же магнитных наполнителей с верхним согласующим диэлектрическим слоем на основе стеклосфер, общей толщиной 12,1 мм с коэффициентом отражения покрытия не более минус 10 дБ в диапазоне частот от 1,2 до 40 ГГц (кривая 5 на рисунке 8). На РПП РАН-85 оформлен патент на изобретение.

Параграф 3.6 посвящен исследованию эффективности разработанного многослойного широкополосного радиопоглощающего материала (РПМ) РАН-98 пирамидальной формы на основе полиуретанового связующего с магнитными наполнителями КЖ-2 (материал основания пирамид) и КЖ-3А (материал конусов) с мягким входом с коэффициентом отражения покрытия не более минус 10 дБ в диапазоне частот от 2 до 40 ГГц при толщине 12 мм на металлической платформе спиральной антенны. Показано, что применение РПМ РАН-98 на основании антенного стакана приводит к увеличению коэффициента усиления антенны в низкочастотном диапазоне 2 – 7 ГГц на 3-4 дБ и значительно улучшает диаграммы направленности антенны в диапазоне частот 2-18 ГГц, что подтверждено результатами измерений.

В параграфе 3.7 представлены результаты мероприятий по снижению КСВН и улучшению диаграмм направленности поликонической вибраторной антенны, установленной на длинном металлическом держателе в диапазоне частот от 250 до 1000 МГц, за счет нанесения на держатель разработанного двухслойного магнитного РПП, с первым слоем толщиной 4,5 мм на основе крупнодисперсного порошка ферромагнитного наноструктурированного сплава АМАГ-200 и второго слоя толщиной 5,5 мм на основе магнитного наполнителя КЖ-2. Применение магнитного РПП с высокими магнитными потерями в метровом и дециметровом диапазонах длин волн способствует эффективному подавлению тока, наводимого на

металлическом держателе. Исследование эффективности данного двухслойного РПП проведено расчетным путем с использованием пакета FEKO.

**Параграф 3.8** связан с разработкой эффективных волноводных согласованных нагрузок сантиметрового диапазона длин волн на основе разработанного ферроэпоксида РПМ РАН-89 с магнитным наполнителем КЖ-3А, имеющего низкую диэлектрическую проницаемость, низкие диэлектрические потери при значительной магнитной проницаемости (низкое значение входного импеданса). Исследованы КСВН волноводных нагрузок различной формы – в форме клина, пирамиды и экспоненциального клина различной геометрии расчетным путем с использованием пакета электродинамического моделирования FEKO. Показано, что наименьшим КСВН (порядка 1,01-1,02) обладают трудно реализуемые на практике нагрузки в форме экспоненциального клина. Для волновода X-диапазона частот изготовлена нагрузка в форме традиционного клина длиной 150 мм с КСВН не более 1,01 в диапазоне частот 8-12 ГГц, что превышает параметры лучших зарубежных аналогов.

**Параграф 3.9** посвящен разработке компактных малогабаритных волноводных нагрузок 8 мм диапазона длин волн на основе двухслойного магнитного РПП РАН-87 на основе магнитного наполнителя КЖ-3А и наполнителя в виде стеклосфер толщиной около 2,7 мм. Разработаны три модификации РПП РАН-87 (А, Б и В) для волноводов сечениями 7,2×3,4, 6,2×2,0 и 5,4×2,5 мм с различными соотношениями толщин отдельных слоев, настройка которых производится на стенде для измерений коэффициента отражения покрытий в свободном пространстве и обеспечивающие КСВН волноводной нагрузки в диапазоне частот 34-36 ГГц не более 1,065. На компактную волноводную нагрузку оформлен патент на изобретение, РПП РАН-87 используется при серийном производстве компактных волноводных нагрузок.

**Глава 4** посвящена разработке широкополосных диэлектрических радиопоглощающих материалов (РПМ) на основе полупроводящих пенополиуретанов и областям их практических приложений в антенной технике.

**В параграфе 4.1** представлены диэлектрические СВЧ свойства открытопористого пенополиуретана, пропитанного различными проводящими композициями на основе хлорсульфированного полиэтилена, наполненного высокопроводящей наноструктурированной сажей PRINTEX XE-2В. Приведены измеренные частотные зависимости диэлектрической проницаемости различных образцов пенополиуретанов, пропитанных композициями с различной концентрацией сажи, а также полимерных пленок X-1 X-2, полученных из пропиточных составов. Показана положительная роль прогрева диэлектрических полупроводящих образцов на стабильность их диэлектрической проницаемости, а также стабильность свойств образцов проводящих композитов при термостарении.

**Параграф 4.2** описывает свойства разработанных диэлектрических РПМ - листового однослойного РПМ РАН-29М толщиной 10 мм, двухслойного РПМ РАН-28М толщиной 20 мм, двухслойного РПМ РАН-46М толщиной 30 мм и пирамидального РПМ РАН-68М толщиной 130 мм, имеющих эффективные широкополосные радиопоглощающие свойства в сантиметровом и миллиметровом диапазонах

длин волн. Частотные зависимости коэффициента отражения данных РПМ при нормальном падении электромагнитной волны представлены на рисунке 11.

Особо отмечено, что использование разработанных листовых диэлектрических РПМ в антенной технике целесообразно в составе систем покрытий с магнитными подслоями, из-за так называемых размерных эффектов для малогабаритных РПМ, в частности, разработанный РПМ РАН-55 для использования в качестве экранов сверхширокополосной зеркальной антенны радиомониторинга, содержит в своем составе два магнитных подслоя на основе магнитных наполнителей КЖ-3А и КЖ-2 в комбинации с диэлектрическим РПМ РАН-46М.

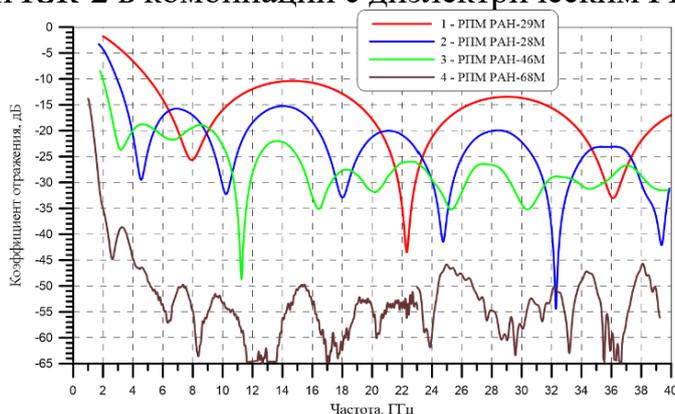


Рисунок 11 – Частотные зависимости модуля коэффициента отражения листовых РПМ РАН-29М (кривая 1), РПМ РАН-28М (кривая 2), РПМ РАН-46М (кривая 3) и пирамидального РПМ РАН-68М (кривая 4) на металлической подложке при нормальном падении электромагнитной волны

**Параграф 4.3** посвящен областям применений разработанных диэлектрических РПМ в антенной технике. Показано, что диэлектрический РПМ РАН-29М в составе системы с магнитным РПП РАН-18М на основе магнитного наполнителя КЖ-2 эффективен для использования на разделительных металлических экранах для снижения «завязки» близкорасположенных широкополосных приемо-передающих антенн, используемых, например, в безэховой камере для измерения диаграмм обратного рассеяния малогабаритных образцов материалов. Продемонстрирована высокая эффективность использования РПМ РАН-28М на металлической бленде и облучателе параболической антенны радиорелейной связи для снижения бокового и заднего излучения антенны в комбинации с радиопоглощающим герметиком (на основе наполнителя КЖ-2) в зазоре между блендой и зеркалом антенны, а также двухслойным штыревым и поляризационными фильтрами (см. рисунок 12).

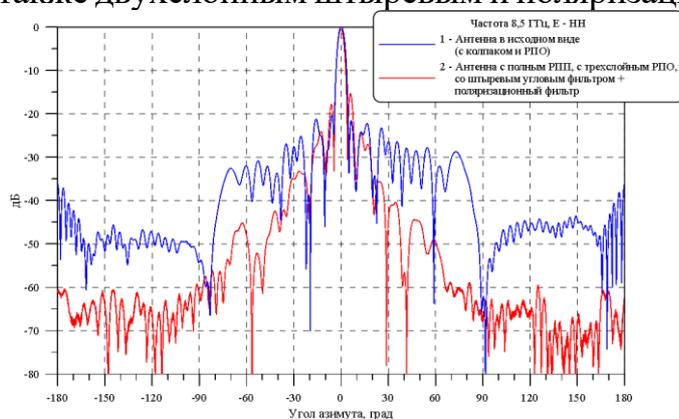


Рисунок 12 – Диаграммы направленности исходной (кривая 1) и модернизированной (кривая 2) (с РПМ РАН-28М, трехслойным радиопрозрачным обтекателем, со штыревым угловым и поляризационным фильтром) параболической антенны при частоте 8,5 ГГц в E - плоскости

В параграфе 4.4 описан обнаруженный в эксперименте и подтвержденный расчетным путем так называемый размерный эффект для «коэффициента отражения» малогабаритных диэлектрических РПМ, а именно, зависимость степени

снижения эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) металлической пластины при нанесении на нее диэлектрического РПМ от габаритов материала, которая наиболее ярко выражена при размерах материала сравнимых с длиной волны. На рисунке 13 представлена степень снижения ЭПР квадратной металлической пластины на счет нанесения диэлектрического РПМ РАН-28 от его габаритов, а также теоретический (настоящий) коэффициент отражения для бесконечного образца.

В работе показано, что применение под диэлектрическим РПМ на металлической подложке магнитного подслоя небольшой толщины с большими магнитными потерями способно заметно ослабить роль размерных эффектов для коэффициента отражения малогабаритных образцов РПМ, что практически очень важно для использования диэлектрических РПМ на различных антенных платформах.

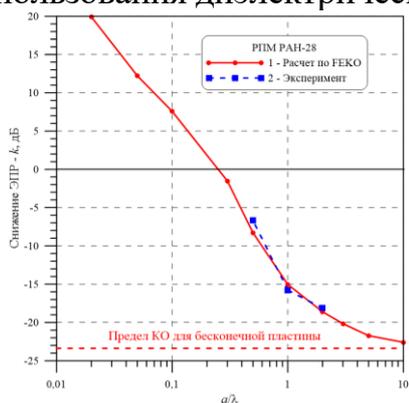


Рисунок 13 – Расчетная (кривая 1) и экспериментальная (кривая 2) зависимости степени снижения  $k$  ЭПР квадратной металлической пластины за счет нанесения на нее РПМ РАН-28 в зависимости от относительного размера пластины при частоте 3 ГГц (красная пунктирная линия – теоретический предел коэффициента отражения для бесконечной пластины с РПМ РАН-28)

В параграфе 4.5 изложено описание практически важного технического решения по использованию диэлектрического РПМ РАН-90 с высокими диэлектрическими потерями в метровом диапазоне длин волн (около 300 МГц) внутри экранирующего металлического кожуха для проверки работоспособности радиостанции со штыревой антенной. Оптимизация диэлектрических параметров материала, толщины и зоны размещения внутри металлического колпака позволила обеспечить низкие значения КСВН антенны в рабочем состоянии с экранирующим колпаком с обеспечением степени экранирования антенны не ниже минус 35 дБ. На данное техническое решение оформлен патент на полезную модель.

Глава 5 посвящена исследованию нового типа композитных материалов – искусственных магнитодиэлектриков, так называемых метаматериалов, содержащих в своем составе резонансные включения различной природы. В параграфе 5.1 содержится краткий литературный обзор по необычным свойствам метаматериалов.

Параграф 5.2 связан с исследованием эффективных микроволновых свойств искусственных магнетиков на основе диэлектрических резонаторов произвольной формы с высокой диэлектрической проницаемостью от 120 (композит с алюминиевой пудрой) до 2700 (сегнетоэлектрик титанат бария). Показано, что магнитная проницаемость композитов, наполненных диэлектрическими резонаторами, имеет многомодовый резонансный характер, зависимость амплитуды резонансов магнитной проницаемости от концентрации диэлектрических резонаторов имеет немонотонный вид с максимумом при концентрациях, зависящих от проницаемости диэлектрических резонаторов. Получено фундаментальное ограничение для магнитной эффективности (отношение амплитуды к добротности резонанса магнитной

проницаемости) искусственного магнетика – сумма магнитных эффективностей всех магнитных резонансов магнетика не может быть больше единицы.

В параграфе 5.3 исследованы микроволновые свойства метаматериалов на основе проволочных би-спиралей (компенсированных спиралей – суперпозиции лево- и правозакрученных спиралей), их эффективные диэлектрическая и магнитная проницаемости, модовая структура для различных типов проволочных би-спиралей.

Параграф 5.4 связан с оптимизацией параметров проволочных би-спиралей при изменении диаметра провода, шага спирали. Показано, что максимальной магнитной поляризуемостью обладают спирали с нулевым шагом и максимальным диаметром провода. Рассмотрены проволочные включения типа «улитка» (комбинация нескольких колец с нулевым шагом спирали) и «рулет» (скрутка из алюминиевой фольги). Магнитная проницаемость анизотропного композита из алюминиевых «рулетов» демонстрирует максимальные резонансные магнитные потери по сравнению с композитами, наполненными проволочными би-спиралями.

Параграф 5.5 посвящен практическим приложениям метаматериалов на основе кольцевых спиральных включений в антенной технике. Показана высокая эффективность метаматериала на основе кольцевых проволочных скруток из никромового провода, размещенного на апертуре и торцах дипольной антенны базовой станции сотовой связи АМРА065-18 для снижения бокового излучения антенны в верхней и нижней полуплоскостях. На рисунке 14 представлены круговые диаграммы направленности антенны сотовой связи в исходном виде и с оптимальным размещением метаматериала. Кроме того, показана возможность реализации экранирующего колпака для проверки работоспособности радиостанции со штыревой антенной в узком диапазоне частот около 300 МГц за счет использования внутри экранирующего колпака резонансных проволочных кольцевых скруток (альтернатива исследованному ранее диэлектрическому РПМ РАН-90).

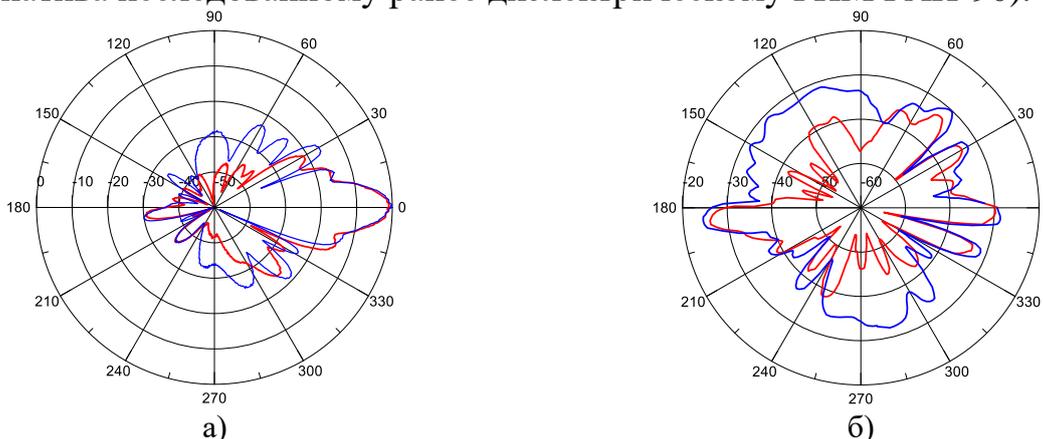


Рисунок 14 – Круговые диаграммы направленности антенны АМРА065-18 в угломестной плоскости при частоте 874 МГц для случая ко-поляризации (а) и кросс-поляризации (б) (синие кривые – исходная антенна, красные кривые – модернизированная антенна)

В Параграфе 5.6 исследованы микроволновые свойства композитов, наполненных гомогенной смесью лево-и правозакрученных проволочных спиралей. Данные композиты обладают рядом уникальных СВЧ свойств – соизмеримые резонансные частотные зависимости диэлектрической и магнитной

проницаемости с одинаковой резонансной частотой, наличие полосы частот с близкими к нулю и отрицательными значениями проницаемостей. На основе многослойной метаструктуры на основе метаматериала LR-5A, диэлектрической развязки и тонкого магнитного слоя в области частот с отрицательной рефракцией создан материал с низкими значениями коэффициента отражения материала при широких диапазонах углов падения электромагнитной волны для обеих поляризаций.

**Параграф 5.7** связан с разработкой эффективного радиопоглощающего материала на основе метаматериала LR-5A с тонким магнитным подслоем на основе магнитного наполнителя КЖ-2, который значительно снижает коэффициент отражения системы покрытий в полосе частот магнитных мод метаматериала и позволяет получить композитный материал с коэффициентом отражения менее минус 10 дБ в диапазоне частот от 5 до 33 ГГц с малым удельным весом.

**Параграф 5.8** посвящен практическим приложениям метаматериалов на основе лево- и правозакрученных спиралей для коррекции диаграмм направленности конического рупора как модернизированного облучателя коллиматора со «столообразной» диаграммой направленности, снижению бокового и заднего излучения рупорных антенн с метаматериалом, размещенным на внешних широких стенках рупора на частотах с околонулевыми значениями проницаемостей.

В **параграфе 5.9** расчетным путем и экспериментально продемонстрирован эффект обратного излучения электромагнитной волны антенной на основе диэлектрического волновода в виде трубки из метаматериала LR-5D при частотах, когда обе проницаемости метаматериала принимают отрицательные значения.

**В заключении** сформулированы **основные результаты диссертационной работы**, вынесенные на защиту:

1. Разработаны требования к построению методик измерений радиофизических параметров материалов в свободном пространстве в сверхшироком диапазоне частот 0,2 ... 110 ГГц для малоразмерных образцов композитных материалов с использованием диафрагмированных линзовых рупорных антенн, а также к измерительным стендам на их основе. Разработанные методики измерений в свободном пространстве явились базовым инструментарием для разработки сверхширокополосных радиопоглощающих покрытий в СВЧ диапазоне. Высокая точность измерений параметров материалов подтверждена свидетельствами об аттестации методик измерения уполномоченными метрологическими организациями.

2. На основе огромного массива экспериментальных данных определены сложные функциональные зависимости, описывающие частотную дисперсию магнитной проницаемости композитов, наполненных порошками карбонильного железа различных типов с различными концентрациями, определяющие, в основном, достоверность моделирования многослойных структур магнитных радиопоглощающих покрытий.

3. В результате проведенных экспериментальных исследований предложен эффективный способ стабилизации электрофизических параметров промышленных порошков карбонильного железа путем совместного помола порошка карбонильного железа с двуокисью кремния в шаровых мельницах и вибромельницах. На основе разработанного квази-сферического магнитного наполнителя КЖ-3А разработана серия эффективных однослойных магнитных РПП с коэффициентом отражения не выше минус 50 дБ для диапазона частот от 8 до 46 ГГц при нормальном падении ЭМВ.

4. Выявлены факторы, влияющие на модификацию свойств порошков карбонильного железа путем их мокрого помола в этиловом спирте в аттриторе, позволяющие существенно увеличить магнитные потери композитных материалов на основе модифицированного карбонильного железа в сантиметровом диапазоне длин волн.

5. Установлена взаимосвязь оптимального времени мокрого помола порошка карбонильного железа в аттриторе с износом силовых элементов конструкции аттритора, на основе которой разработан метод мониторинга процесса мокрого помола порошка карбонильного железа в аттриторе, позволяющий стабилизировать электрофизические параметры получаемого магнитного наполнителя.

6. На основе разработанного стабильного магнитного наполнителя КЖ-2, получаемого комбинацией методов сухого и мокрого помолов порошка карбонильного железа, разработаны однослойные высокоэффективные радиопоглощающие покрытия для диапазона частот от 2 до 8 ГГц при нормальном падении ЭМВ.

7. Определена целесообразность увеличения энергии мокрого помола порошка карбонильного железа для увеличения магнитных потерь композитов на его основе в метровом диапазоне длин волн. На основе разработанного стабильного магнитного наполнителя КЖ-6, получаемого путем высокоэнергичного мокрого помола магнитного наполнителя КЖ-3А в аттриторе, разработана серия однослойных эффективных РПП для диапазона частот от 0,2 до 3 ГГц при нормальном падении ЭМВ.

8. На основе многослойных структур магнитных покрытий с разработанными магнитными наполнителями, построенных по градиентным схемам, спроектирована серия широкополосных и сверхширокополосных магнитных РПП для диапазона частот от 0,2 до 40 ГГц. Разработанные широкополосные и сверхширокополосные покрытия нашли практическое применение на зеркале сверхширокополосной антенны для стабилизации ширины главного лепестка диаграммы направленности антенны в рабочем диапазоне частот, на антенных платформах и элементах конструкции сверхширокополосных систем радиомониторинга для снижения изрезанности диаграмм направленности антенн.

9. В дополнение к разработанным магнитным РПП показана практическая значимость диэлектрических РПМ. Разработана серия диэлектрических РПМ для СВЧ диапазона, нашедшая практическое применение для снижения уровней боковых и задних лепестков диаграмм направленности антенн

радиорелейной связи, в экранирующих кожухах дипольной антенны для диагностики работоспособности радиостанции метрового диапазона, в экранах для увеличения развязки рупорных антенн. Выявлен размерный эффект для коэффициента отражения малоразмерных диэлектрических РПМ, который удастся минимизировать путем использования магнитных подслоев в системах РПМ.

10. Для расширения рабочего диапазона РПП и РПМ предложено использовать искусственные магнитные материалы (метаматериалы) на основе диэлектрических резонаторов и спиральных проволочных включений, не имеющих физических ограничений по рабочей частоте по сравнению с традиционными магнитными РПП и диэлектрическими РПМ. Метаматериалы на основе гомогенной смеси лево- и правозакрученных проволочных спиралей с близкими к нулевым значениям диэлектрической и магнитной проницаемости нашли эффективное применение для снижения уровней боковых и задних лепестков диаграмм направленности рупорных антенн.

11. Установлено, что разработанные метаматериалы на основе смеси лево- и правозакрученных проволочных спиралей с магнитными подслоями демонстрируют широкополосные поглощающие свойства и приемлемые угловые зависимости коэффициента отражения в области частот магнитных мод метаматериала.

12. Доказана высокая эффективность разработанных РПП и РПМ на основе модифицированных магнитных наполнителей для решения проблем электромагнитной совместимости, создания высокоэффективных согласованных волноводных нагрузок, в том числе малогабаритных, увеличения развязки приемо-передающих антенн.

*Таким образом, в работе изложены новые научно-обоснованные технические и технологические решения по созданию сверхширокополосных радиопоглощающих материалов и покрытий в СВЧ диапазоне, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие антенной и СВЧ техники – позволяет значительно улучшить радиотехнические характеристики антенн и СВЧ-устройств различного назначения.*

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

1. A.N. Lagarkov, V.N. Semenenko, V.A. Chistyayev, D.E. Ryabov, S.A. Tretyakov, C.R. Simovski. Resonance Properties of Bi-Helix Media at Microwaves // Electromagnetics. 1997. V.17. No. 3. P.213 – 237.

2. A.N. Lagarkov, **V.N. Semenenko**, V. N. Kisel, V. A. Chistyayev. Development and Simulation of Microwave Artificial Magnetic Composites Utilizing Nonmagnetic Inclusions // J. Magn. Magn. Mater. 2003. V.258-259. P.161-166.

3. Г.В. Белокопытов, А.Н. Лагарьков, **В.Н. Семеновко**, В.А. Чистяев. Модель искусственного магнетика. Двумерная решетка резонансных диполей // Радиотехника и электроника. 2005. Т.50. № 1. С.89-94.

4. Г.В. Белокопытов, А.Н. Лагарьков, **В.Н. Семеновко**, В.А. Чистяев. Модель искусственного магнетика. Двумерные решетки проводящих колец и сегнетоэлектрических резонаторов // Радиотехника и электроника. 2005. Т.50. № 4. С.447-455.

5. Белокопытов Г.В., Лагарьков А.Н., **Семененко В.Н.**, Ступаков А.В., Чистяев В.А. Экспериментальное определение поляризуемости дипольных резонаторов // Электромагнитные волны и электронные системы. 2007. Т.12. № 10. С.44-50.
6. Lagarkov A.N., Kisel V.N., **Semenenko V.N.** Wide-Angle Absorption by the Use of a Metamaterial Plate // Progress in Electromagnetic Research Letters. 2008. V.1. P.35-44.
7. Н.П. Балабуха, А.А. Башарин, **В.Н. Семененко**. Распространение электромагнитных волн в планарных волноводах из метаматериалов и излучение антенн на их основе // Радиотехника и электроника. 2009. Т.54. № 8. С.946-951.
8. Н.П. Балабуха, А.А. Башарин, **В.Н. Семененко**. Излучение из открытого конца полубесконечного круглого двухслойного магнитоэлектрического волновода // Антенны. Вып. 8(147). 2009. С.46-49.
9. Н.П. Балабуха, А.А. Башарин, **В.Н. Семененко**. Эффект обратного излучения электромагнитных волн волноводной структурой из метаматериала // Письма в ЖЭТФ. 2009. Т.89. Вып.9-10. С.593-598.
10. А.А. Basharin, N.P. Balabukha, and **V.N. Semenenko**. The radiation from a planar metamaterial waveguide // Journal of Applied Physics. 2010. V.107. No.11. P.113301-1-5.
11. А.Н. Лагарьков, В.Н. Кисель, А.К. Сарычев, **В.Н. Семененко**. Электрофизика и электродинамика метаматериалов // Теплофизика высоких температур. 2010. Т.48. Вып.6. С.1031-1048.
12. А.А. Basharin, N.P. Balabukha, **V.N. Semenenko** and N.L. Menshikh. Metamaterial Waveguides and Antennas// Wave Propagation. Published by InTech, March 2011, Croatia, 570 p. –ISBN 978-953-307-275-3/ Edited by: Andrey Petrin. Chapter 12. P.241-266.
13. А.Н. Лагарьков, В.Н. Кисель, **В.Н. Семененко**. Радиопоглощающие материалы на основе метаматериалов // Радиотехника и электроника. 2012. Т.57. № 10. С.1119-1127.
14. А.Н. Lagarkov, **V.N. Semenenko**, V.A. Chistyayev and I.T. Iakubov. High-frequency modes in magnetic spectra of carbonyl iron // J. Magn. Magn. Mater. 2012. V.324. P.3402-3405.
15. С.Э. Григас, А.Г. Ржанов, **В.Н. Семененко** и В.А. Чистяев. Поляризационные характеристики аномального пропускания СВЧ-излучения проводящими пленками // Письма в ЖЭТФ. 2012. Т.96. Вып.2. С.103-106.
16. К.М. Басков, Н.И. Бобков, И.И. Краснолобов, **В.Н. Семененко**. Математическое моделирование сверхширокополосной многолучевой зеркальной антенны // Журнал радиоэлектроники. 2013. № 4. С.1-18.
17. В.И. Иванова, С.Г. Кибец, И.И. Краснолобов, А.Н. Лагарьков, А.А. Политико, **В.Н. Семененко**, В.А. Чистяев. Разработка широкополосного радиопоглощающего покрытия с высокими эксплуатационными свойствами // Журнал радиоэлектроники. 2016. № 7. С.1-23.
18. К.М. Басков, А.А. Политико, **В.Н. Семененко**, В.А. Чистяев. Коррекция S-параметров при измерении материальных параметров магнитоэлектрических композитов в свободном пространстве с применением диафрагмы // Журнал радиоэлектроники. 2017. № 5. С.1-27.
19. **В.Н. Семененко**, К.М. Басков, А.А. Политико, Д.И. Акимов, Н.Н. Степанов. Экранирующий колпак с радиопоглощающим метаматериалом внутри // Журнал радиоэлектроники. 2018. № 1. С.1-13.
20. **В.Н. Семененко**, К.М. Басков, И.И. Краснолобов, Т.А. Фурманова, Д.И. Акимов. Радиопрозрачные укрытия со свойствами угловой фильтрации для параболической зеркальной антенны // Журнал радиоэлектроники. 2018. № 5. С.1-22.
21. **В.Н. Семененко**, К.М. Басков, И.И. Краснолобов, Д.И. Акимов, А.А. Политико, В.А. Чистяев, Н.И. Бобков. Применение магнитных радиопоглощающих материалов для коррекции радиотехнических характеристик поликонических вибраторных антенн // Журнал радиоэлектроники. 2018. № 9. С.1-11.

22. **В.Н. Семенов**, В.А. Чистяев, А.А. Политико, К.М. Басков. Стенд для измерений в свободном пространстве радиофизических параметров материалов в сверхширокой полосе сверхвысоких частот // Измерительная техника. 2019. № 2. С.55—59.

23. **В.Н. Семенов**, К.М. Басков, Д.И. Акимов, А.А. Политико, В.А. Чистяев, А.Ю. Зарубина. Широкополосные волноводные согласованные нагрузки на основе ферроэпоксида // Журнал радиоэлектроники. 2019. № 7. С.1-12.

24. К.М. Басков, Д.Е. Данилов, А.А. Политико, С.Е. Просыпкин, А.А. Рогозин, **В.Н. Семенов**. Портативный измеритель коэффициента отражения покрытий СВЧ диапазона // Радиотехника и электроника. 2020. Т.65. № 10. С.939-950.

25. **V.N. Semenenko**, V.A. Chistyayev, A.A. Politico, S.G. Kibets, V.N. Kisel, C.P. Gallagher, C. McKeever, A.P. Hibbins, F.Y. Ogrin, and J.R. Sambles. Complex permittivity and permeability of composite materials based on carbonyl iron powder over an ultrawide frequency band // Physical Review Applied **16**. 014062 (2021) (doi: 10.1103/PhysRevApplied.16.014062).

26. А.Н. Лагарьков, М.В. Глазачева, С.Г. Кибец, Е.А. Преображенский, К.Н. Розанов, **В.Н. Семенов**. Способ получения магнитных порошков материала на основе карбонильного железа // Патент РФ на изобретение № 2236929, заявлен 17.07.2003, опубликован 27.09.2004, Б.И. № 27, классы В22F1/00, Н01F1/20.

27. Зайцева Н.В., Коробейников Г.В., Кохнюк Д.Д., Иванова Л.Н., Славин В.В., Кузнецов П.А., Маренников Н.В., **Семенов В.Н.** Поглотитель электромагнитных волн // Патент РФ на изобретение № 2414029, заявлен 01.02.2010, опубликован 10.03.2011, Б.И. № 7, классы Н01Q 17/00.

28. Бобков Н.И., Габриэльян Д.Д., Пархоменко Н.Г., **Семенов В.Н.** Сверхширокополосная многолучевая зеркальная антенна // Патент РФ на изобретение № 2541871, заявка № 2013131605, приоритет изобретения 09 июля 2013 г., зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 16 января 2015 г., срок действия патента истекает 09 июля 2033 г.

29. Лагарьков А.Н., **Семенов В.Н.**, Кибец С.Г., Иванова В.И., Сиберт С.Д., Иванова Л.Н., Коробейников Г.В., Кохнюк Д.Д. Сверхширокополосное радиопоглощающее покрытие // Патент РФ на изобретение № 2571906, заявка № 2014129366, приоритет изобретения 16 июля 2014 г., зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 27 ноября 2015 г., срок действия патента истекает 16 июля 2034 г.

30. **Семенов В.Н.**, Кибец С.Г., Чистяев В.А., Иванова В.И., Тимкин А.В., Лило Г.Я., Иванова Л.Н., Боровик И.А., Кохнюк Д.Д. Сверхширокополосное радиопоглощающее покрытие // Патент РФ на изобретение № 2626073, заявка № 2016138947, приоритет изобретения 03 октября 2016 г., зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 21 июля 2017 г., срок действия патента истекает 03 октября 2036 г.

31. Колосов С.В., Трубицын О.Б., Басков К.М., Политико А.А., **Семенов В.Н.**, Чистяев В.А. Экранирующий кожух для устройства проверки работоспособности радиостанции с штыревой антенной // Патент РФ на полезную модель № 200478, заявка № 2019140688, приоритет полезной модели 09 декабря 2019 г., зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 27 октября 2020 г., срок действия исключительного права на полезную модель истекает 09 декабря 2029 г.

32. Басков К.М., Гузовский А.Б., Гузовский Б.А., Назаркин Д.И., **Семенов В.Н.**, Чистяев В.А. Малогабаритная волноводная нагрузка // Патент РФ на изобретение № 2814585, заявлен 03.11.2023, опубликован 01.03.2024, Б.И. № 7.

Все указанные выше основные статьи по теме работы напечатаны в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и в изданиях, входящих в международные базы данных Web of Science и Scopus.

## СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] Sohn J., Han S.H., Yamaguchi M., Lim S.H. Tunable electromagnetic noise suppressor integrated with a magnetic thin film // *Appl. Phys. Lett.* 2006. V.89. Art. no. 103501.
- [2] Алимин Б.Ф., Торгованов В.А. Методы расчета поглотителей электромагнитных волн // *Зарубежная радиоэлектроника.* 1976. № 3. С.29-57.
- [3] А.С. Мальцев. Исследование свойств радиопоглощающих материалов в конструкциях антенных насадок // *Инфокоммуникационные технологии.* 2022. Т.18. № 3. С.332-341.
- [4] Tennant A., Chambers B. Radar signature control of wind turbine generator // *Proc. 2005 IEEE APS Int. Symp. Washington, USA.* 2005. V.4a. P.489.
- [5] Abdelaziz A.A. Improving the Performance of an Antenna Array by Using Radar Absorbing Cover // *PIER Lett.* 2008. V.1. P.129.
- [6] J.B. Birks. Microwave Magnetic Dispersion in Carbonyl Iron Powder // *Phys. Rev.* 1948. P.843-844.
- [7] Omid Khani, Morteza Zargar Shoushtaru, Karl Ackland, Plamen Stamenov. The structural, magnetic and microwave properties of spherical and flake shaped carbonyl iron particles as thin multilayer microwave absorber // *J. Magn. Magn. Mater.* 2017. V.428. P.28-35.
- [8] Y.L. Cheng, J.M. Dai, D.J. Wu, Y.P. Sun. Electromagnetic and microwave absorption properties of carbonyl iron/La<sub>0.6</sub>Sr<sub>0.4</sub>MnO<sub>3</sub> composites // *J. Magn. Magn. Mater.* 2017. V.428. P.28-35.
- [9] Inyoung Kim, Seok Bae, Jongryoul Kim. Composition effect on high frequency properties of carbonyl iron composites // *Material Letters.* 2008. V.62. P.3043-3046.
- [10] Wang Meng, Duan Yuping, Liu Shunhua, Li Xiaogang, Ji Zhijiang. Absorption properties of carbonyl iron/carbon black double-layer microwave absorber // *J. Magn. Magn. Mater.* 2009. V.321. P.3442-3446.
- [11] Алексеев А.Г., Корнев А.Е. Магнитные эластомеры. М.: Химия. 1987. 240 с.
- [12] McFarlane G.G. Radar camouflage research and development by the Germans / *Tech. Report: T.1905. M/99. TRB.* 1945.
- [13] Yong Wang and Mohammed N. Afsar. Measurement of complex permittivity and permeability of carbonyl iron powders at microwave frequencies // *Microwave and Optical Technology Letters.* 2004. V.42. No. 6. P.458-459.
- [14] R.B. Yang, W.F. Liang, C.H. Wu and C.C. Chen. Synthesis and microwave absorbing characteristics of functionally graded carbonyl iron/polyurethane composites // *AIP Advances.* 2016. V.6. P.055910.
- [15] А.С. Антонов, Л.В. Панина, А.К. Сарычев. Высокочастотная магнитная проницаемость композитных материалов, содержащих карбонильное железо // *ЖТФ.* 1989. Вып. 6. С.88-94.
- [16] D. K. Ghodgaonkar, V.V. Varadan, V.K. Varadan. Free-space measurement of complex permittivity and complex permeability of magnetic materials at microwave frequencies // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 1990. V.39. No. 2. P.387—394.
- [17] Baoshan Zhang *et al.* Microwave-Absorbing Properties of De-Aggregated Flake-Shaped Carbonyl-Iron Particle Composites at 2-18 GHz // *IEEE Transactions on Magnetics.* 2006. V.42. No.7. P.1778-1781.
- [18] K. Sugimura *et al.* Formation of high electrical-resistivity thin surface layer on carbonyl-iron powder (CIP) and thermal stability of nanocrystalline structure and vortex magnetic structure of CIP // *AIP ADVANCES.* 2016. V.6. P.055932.
- [19] Fusheng Wen *et al.* Microwave-absorbing properties of shape-optimized carbonyl iron particles with maximum microwave permeability // *Physica B.* 2009. V.404. P.3567-3570.
- [20] Sung-Soo Kim *et al.* Magnetic, dielectric, and microwave absorbing properties in iron particles dispersed in rubber matrix in gigahertz frequencies // *Journal of Applied Physics.* 2005. V.97. No.10F905.
- [21] А.Н. Лагарьков, М.В. Глазачева, С.Г. Кибец, Е.А. Преображенский, К.Н. Розанов, В.Н. Семененко. Способ получения магнитных порошков материала на основе карбонильного железа // Патент РФ № 2236929, заявлен 17.07.2003, опубликован 27.09.2004, Б.И. № 27, классы B22F1/00, H01F1/20.
- [22] Михайлин Ю.А. Специальные полимерные композиционные материалы. СПб.: Научные основы и технологии. 2014. С.171–450.