



**МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
(МИНОБОРОНЫ РОССИИ)**

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ КАЗЕННОЕ
ВОЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОЕННЫЙ УЧЕБНО-НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
ВОЕННО-ВОЗДУШНЫХ СИЛ
«ВОЕННО-ВОЗДУШНАЯ АКАДЕМИЯ
имени профессора Н.Е. Жуковского
и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

394064, г. Воронеж,
ул. Старых Большевиков, д. 54а

«23» декабря 2024 г. № 25/4/711

На № 010/1994-2 от 23.10.2024

Председателю диссертационного совета
24.2.327.01

на базе федерального государственного
бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Московский авиационный институт
(национальный исследовательский
университет)»

доктору технических наук
профессору Ю.В. КУЗНЕЦОВУ
Волоколамское ш., д.4, г. Москва, 125993

Уважаемый Юрий Владимирович!

Высылаю отзыв официального оппонента доктора технических наук профессора Кирьянова Олега Евгеньевича на диссертацию Семененко Владимира Николаевича «Композитные материалы для антенной техники и СВЧ-устройств в сверхшироком диапазоне частот», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по научной специальности 2.2.14. «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии (технические науки)»

Приложение: 1. Отзыв, в 2-х экз., на 10 л. каждый, только адресату.

С уважением

Начальник Научно-исследовательского испытательного института
(радиоэлектронной борьбы) Военного учебно-научного центра
Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия
имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»
(г. Воронеж)

В.Балыбин

ОТДЕЛ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ
И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ
ДОКУМЕНТОВ МАИ

«27» 12 2024 г.

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Семененко Владимира Николаевича

на тему: «Композитные материалы для антенной техники и СВЧ-устройств в сверхшироком диапазоне частот», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по научной специальности 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии (технические науки)

Актуальность темы диссертации

Для улучшения характеристик антенн, обеспечения электромагнитной совместимости, уменьшения эффективной площади рассеяния объектов и решения многих других задач требуются высокоэффективные композитные материалы, работающие в сверхшироком диапазоне частот, имеющие стабильные характеристики и высокие эксплуатационные свойства. Одними из наиболее распространенных и эффективных являются магнитные композитные материалы, содержащие наполнители в виде порошков карбонильного железа. К перспективным композитам относятся искусственные магнито-диэлектрики – метаматериалы, которые обладают уникальными электродинамическими свойствами, имеют низкие массогабаритные характеристики, а в комбинации с традиционными магнитными композитами обеспечивают расширение их рабочего диапазона частот. Указанные материалы имеют малую толщину и достаточно легко могут быть встроены в конструкцию антенн и других СВЧ-устройств.

К антенной технике и СВЧ-устройствам предъявляются жесткие требования к их радиотехническим характеристикам и соответственно к характеристикам применяемых в них композитных материалов. Характеристики композитных материалов и особенно многослойных материалов во многом зависят от стабильности электрофизических свойств входящих в их состав магнитных наполнителей.

Таким образом, диссертация Семененко В.Н., направленная на

ОТДЕЛ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ
И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ
ДОКУМЕНТОВ МАИ

разработку новых научно-обоснованных технических и технологических решений по созданию сверхширокополосных радиопоглощающих материалов и покрытий в СВЧ диапазоне с требуемыми стабильными характеристиками, несомненно, является актуальной и имеет явную практическую направленность. Внедрение таких решений позволит значительно улучшить радиотехнические характеристики антенн и СВЧ-устройств различного назначения.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

В ходе проведенных исследований автором получены следующие основные научные результаты.

1. Методики измерений электрофизических параметров малогабаритных образцов материалов в свободном пространстве, использующие диафрагмированные линзовые рупорные антенны и цифровую обработку сигналов в сверхшироком диапазоне частот от 0,2 до 40 ГГц.

2. Технологические решения по механической обработке порошка карбонильного железа, включающие в себя комбинации методов сухого помола порошка карбонильного железа в вибромельнице и мокрого помола модифицированного порошка карбонильного железа в атриторе, позволившие стабилизировать электрофизические характеристики магнитных наполнителей и значительно увеличить магнитные потери в СВЧ диапазоне и обеспечившие производство стабильных модифицированных магнитных наполнителей типов КЖ-3А, КЖ-2 и КЖ-6 со значительной вариацией их СВЧ магнитных свойств.

3. Методология расчета и оптимизации структур эффективных радиопоглощающих покрытий на основе композитных материалов с разработанными стабильными магнитными наполнителями, включающих в себя как однослойные магнитные покрытия, так и многослойные градиентные магнитодиэлектрические 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 широкой полосой перестройки рабочей частоты, так и сверхширокополосных радиопоглощающих покрытий.

4. Технические решения по построению 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. Материалы могут применяться для увеличения степени развязки близкорасположенных приемо-передающих рупорных антенн, корректировки диаграмм направленности зеркальных антенн, а также для создания экранирующего кожуха штыревой антенны для проверки работоспособности радиостанции.

5. 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 проницаемостей 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. Техническое решение по построению сверхширокополосного радиопоглощающего материала, включающего в себя согласующий слой на основе метаматериала из гомогенной смеси лево- и правозакрученных проволочных спиралей, отличающегося от аналогов наличием в структуре мате-

риала двух тонких магнитных подслоев на основе разработанных магнитных наполнителей КЖ-2 и КЖ-3А, что обеспечивает низкий коэффициент отражения радиопоглощающего материала в сверхшироком диапазоне частот за счет оптимальных согласующих свойств метаматериала в области основной и высших магнитных мод.

7. 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.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций диссертации обеспечивается корректным выбором используемого математического аппарата при обработке результатов измерений и определении параметров композитных материалов, наглядной физической трактовкой полученных результатов, экспериментально установленной стабильностью характеристик созданных композитных материалов с использованием современной аппаратуры, а также реализацией результатов в образцах техники, подтвердившей их эффективность.

Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций

Новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных по результатам выполненных исследований, связана с разработкой технических и технологических решений по созданию сверхширокополосных радиопоглощающих материалов и покрытий в СВЧ диапазоне, а также методик измерений их характеристик.

1. Разработаны методики измерений электрофизических параметров композитных материалов в свободном пространстве в сверхшироком диапа-

зоне частот от 0,2 до 110 ГГц. В методиках математически компенсируется влияние основные факторов, характерных процессу измерений. Методики измерений позволяют с высокой точностью определять частотные зависимости комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей материалов, знание которых необходимо для создания композитов с требуемыми характеристиками отражения. Методики аттестованы и имеют соответствующие свидетельства, что подтверждает их достоверность.

2. Разработаны технологические решения по комплексной механической обработке порошков карбонильного железа, включающие методы сухого и мокрого помолов, позволяющие стабилизировать магнито-диэлектрические свойства модифицированных порошков карбонильного железа и значительно увеличить их магнитные потери.

3. Разработана методология расчета и оптимизации структур эффективных радиопоглощающих покрытий на основе композитных материалов с созданными стабильными магнитными наполнителями. Методология включает экспериментальное получение дисперсионных зависимостей параметров различных материалов, математический подбор слоев из исследованных материалов, создание образцов композитных материалов с требуемыми характеристиками и экспериментальный контроль достигнутых результатов. С использованием методологии 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.

4. 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 сверхвысоких частотах.

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

6. Теоретически и экспериментально доказано фундаментальное ограничение магнитной эффективности 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 Российской Федерации на изобретения и одним патентом Российской Федерации на полезную модель.

Достоверность полученных в работе результатов подтверждена высокой степенью совпадения результатов теоретических расчетов с экспериментальными данными, полученными с использованием аттестованных методик измерений.

Основные результаты диссертации апробированы на международных и всероссийских научно-технических конференциях и достаточно полно опубликованы, в том числе в 32 изданиях из перечня, рекомендованного ВАК. Основные результаты работы реализованы при выполнении большого количества научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации. В нем изложены основные идеи и выводы по работе, показаны определяющий вклад автора в проведенные исследования, степень новизны и практическая значимость результатов. В целом тематика диссертации соответствует специальности 2. 2. 14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии (технические науки).

Замечания и недостатки диссертации

1. В диссертации не представлены в сравнении радиотехнические характеристики разработанных магнитных радиопоглощающих покрытий с имеющимися в России и за рубежом магнитными покрытиями. Это касается, в том числе, и согласованных волноводных нагрузок на основе ферроэпоксида.

2. Оптимизация толщин слоев пятислойного покрытия проводилась путем минимизации функционала (3.2) методом градиентного спуска. Однако при использовании указанного функционала в ходе численного решения возможны ситуации, когда характеристики покрытия целенаправленно будут ухудшаться, так как покрытие с большим значением модуля коэффициента отражения по сравнению с покрытием с меньшим значением модуля коэффициента отражения может быть более предпочтительным исходя из величины функционала.

3. В параграфе 4.4 при исследовании размерных эффектов для коэффициента отражения диэлектрических радиопоглощающих материалов не приведена физическая интерпретация полученных результатов. Наблюдаемые значения ослабления отраженной волны от образцов с малыми поперечными размерами связаны со значительным вкладом краевых волн в отраженное электромагнитное поле. При увеличении размеров образцов относительный вклад краевых волн в рассеянное поле уменьшается, и измеренное ослабление отраженной волны приближается к классическим значениям коэффициента отражения для бесконечных образцов. Приведенные в работе экспериментальные данные это и подтверждают.

4. На рисунке 5.79 приведена схема измерительной установки и результаты измерений угловых зависимостей амплитуд отраженных волн от двугранного уголкового отражателя с различными вариантами нанесенных радиопоглощающих покрытий. Результаты приведены для углов падения волны на покрытия от 0 до 90 градусов. Как следует из рисунка в соответствии с приведенной схемой измерений в приемную антенну должна попасть зеркально отраженная от покрытия волна, для этого требуется для каждого угла падения волны обеспечить определенное расстояние между облучающей и приемной антеннами и достаточный размер двугранного уголкового отражателя. Поэтому сектор углов падения волны на рисунке 5.79б следовало бы привести в соответствие с условиями проведения эксперимента, включающими размеры антенн и двугранного уголкового отражателя.

5. В работе не приведены пояснения сильных изрезанностей измеренных с помощью двугранного уголкового отражателя угловых зависимостей модуля коэффициента отражения радиопоглощающих покрытий, представленных на рисунках 3.34б, 3.35б, 3.36б, 3.38б, 3.39б и 3.40б.

6. В работе установлено, что однослойные магнитные радиопоглощающие покрытия на основе магнитного наполнителя КЖ-3А на металлической подложке вблизи частоты, соответствующей глобальному минимуму модуля коэффициента отражения, имеют слабое отличие угловых зависимостей коэффициента отражения покрытия при параллельной и перпендикулярной поляризациях излучения. Этот результат действительно является нетривиальным, но в диссертации он не объясняется.

7. В диссертации имеются отдельные погрешности оформления:

на стр. 41 в формулу (1.15) напряженности электрического поля в раскрыве рупора входит размер узкой стенки рупора, а должен входить размер широкой стенки рупора;

в выводах по главе 1 в пункте 5 указано, что «реализована возможность проводить корректные измерения коэффициентов прохождения и коэффициентов отражения образцов материалов вблизи окна диафрагмы антенного стола для углов падения ЭМВ до 75 град.», хотя в материалах главы 1 и в свидетельстве об аттестации методики измерений (Приложение Б диссертации) рассматривается измерение угловых зависимостей только коэффициента прохождения материалов;

при описании схемы эксперимента в нижнем абзаце на стр. 178 диссертации вместо выражения «при вертикальной (перпендикулярной) поляризации» необходимо использовать выражение «при горизонтальной (параллельной) поляризации»;

на рисунках 3.34б, 3.35б, 3.36б, 3.38б, 3.39б, 3.40б приведены угловые зависимости модуля коэффициента отражения, а оси ординат подписаны как эффективная площадь рассеяния;

на рисунках 3.5, 3.9, 3.10 и др. в названиях рисунков и в подписях осей ординат более точно было бы использовать выражение «модуль коэффициента отражения»;

на стр. 151 используется выражение «сантиметровый диапазон частот», более точным является выражение «сантиметровый диапазон длин волн».

Вместе с тем, отмеченные недостатки не снижают общего положительного впечатления от работы и не ставят под сомнение полученные результаты.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней

Диссертация Семененко В. Н. на тему «Композитные материалы для антенной техники и СВЧ-устройств в сверхшироком диапазоне частот» является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны новые научно-обоснованные технические и технологические решения по созданию сверхширокополосных радиопоглощающих материалов и покрытий в СВЧ диапазоне. Тематика диссертации соответствует специальности 2.2. 14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии (технические науки). Автореферат диссертации соответствует п. 25 «Положения о присуждении ученых степеней» и достаточно полно отражает содержание и основные положения диссертационной работы. Основные научные результаты, выводы и рекомендации работы достаточно полно отражены в публикациях, в том числе и по перечню изданий ВАК. Диссертация является завершенной научной работой, обладающей внутренним единством, содержит новые научные положения и результаты, имеющие важное значение для развития антенной и СВЧ техники и свидетельствующие о крупном вкладе автора в науку.

Диссертация Семененко В. Н. на тему «Композитные материалы для антенной техники и СВЧ-устройств в сверхшироком диапазоне частот» удовлетворяет требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней»,

утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (ред. от 16.10.2024 г.), предъявляемого к докторской диссертации, а ее автор Семененко Владимир Николаевич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии (технические науки).

Официальный оппонент:

Начальник 4 научно-исследовательского управления
Научно-исследовательского испытательного института
радиоэлектронной борьбы Военного учебно-научного центра
Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия
имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
доктор технических наук,
профессор

Кирьянов Олег Евгеньевич

«20» декабря 2024 г.

394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А,
8-473-244-76-38, vaiu@mil.ru, академия-ввс.рф

Подпись Кирьянова Олега Евгеньевича заверяю.

Старший помощник начальника строевого отдела ВУНЦ ВВС «ВВА»

Антонов Илья Вячеславович

«20» декабря 2024 г.



С отзывом ознакомлен : 27.12.2024г.