

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАТИКИ И  
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

УДК 621.396.6:537.862

**СИЦКО**  
**Николай Юрьевич**

**ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТОНКОПРОВОЛОЧНЫХ  
МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУР  
И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ИХ ОСНОВЕ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.03 – Радиофизика

Минск 2012

Работа выполнена в Белорусском государственном университете.

Научный руководитель **Демидчик Валерий Иосифович**, кандидат технических наук, доцент, зам. декана факультета радиопизики и компьютерных технологий Белорусского государственного университета

**Аксенчик Анатолий Владимирович**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры вычислительных методов и программирования учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

**Карпович Виктор Аркадьевич**, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией радиопизических исследований НИУ «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета

Оппонирующая организация Учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь»

Защита состоится «4» октября 2012 г. в 14<sup>00</sup> на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.05 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел. 293-89-89, e-mail: [dissovet@bsuir.by](mailto:dissovet@bsuir.by).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

## КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проволочные антенны являются одним из важных классов антенн и широко применяются в различных областях науки и техники (радиовещание, сотовая связь, беспроводная широкополосная передача данных, радиолокация, радионавигация) во всём освоенном диапазоне радиоволн. К ним относятся вибраторные антенны разных типов и конструкций, рамочные антенны, директорные антенны, спиральные антенны, логопериодические антенны и другие типы. Исследование композиционных сред, наполненных тонкими проводящими волокнами, которые по сути являются проволочными «микроантеннами», представляется одним из перспективных направлений по созданию искусственных покрытий и материалов с заданными электродинамическими характеристиками. Разработка такого рода покрытий и материалов находит широкое применение в различных областях радиотехники, особенно в СВЧ-диапазоне: создание радиопоглотителей, фильтров, частотно-селективных поверхностей и др. Значительный интерес представляют математические модели тонкого проводника с различными структурными изменениями и модификациями, открывающими новые объекты и перспективы исследований. Одним из перспективных направлений исследований является изучение электродинамических свойств тонкого проводника в диэлектрической оболочке.

Диссертация посвящена разработке математической модели по решению задачи возбуждения тонкого проводника произвольной геометрии в диэлектрической оболочке в режиме излучения и рассеяния и проведению исследований по влиянию диэлектрической оболочки на электродинамические характеристики антенн, тонких проводящих волокон и композиционных покрытий и материалов, наполненных такими волокнами.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Связь работы с крупными научными программами и темами

Тема диссертационной работы утверждена советом факультета радиофизики и электроники Белорусского государственного университета, протокол № 3 от 30.10.2004 г.

Основные результаты исследований, включённые в диссертационную работу, представлены в отчётах следующих НИР: «Разработка методов визуализации внутренней структуры радиопрозрачных материалов и объектов сложной формы в микроволновом диапазоне и исследование микроволновых свойств композиционных структур, способных к самоорганизации» (2003 – 2005, № гос. рег. 2005887); «Разработка специализированной экспертной системы решения задач ЭМС РЭС различного назначения с возможностями визуализации электромагнитной обстановки и ведением баз данных с техническими характери-

### **Цель и задачи исследования**

Целью диссертационной работы является повышение эффективности проектирования тонкопроволочных металлодиэлектрических антенн и композиционных радиоматериалов, наполненных тонкими проводящими волокнами в диэлектрической оболочке. Для достижения поставленной цели потребовалось решение следующих основных задач:

- разработка математической модели по решению задачи возбуждения тонкопроволочных проводящих объектов произвольной геометрии с диэлектрическим покрытием в режиме излучения и рассеяния;
- разработка математической модели по расчёту эффективных макроскопических электродинамических параметров (диэлектрическая и магнитная проницаемости, коэффициент киральности) композиционных сред, состоящих из тонких проводящих волокон в диэлектрической оболочке;
- установление влияния диэлектрического покрытия на основные электродинамические характеристики тонкопроволочных антенн (излучателей);
- установление влияния диэлектрической оболочки на основные электродинамические характеристики рассеяния тонких проводящих волокон;
- оптимизация радиопоглощающих свойств композиционных покрытий и материалов, наполненных тонкими проводящими волокнами в диэлектрической оболочке.

В качестве объекта исследования выбраны тонкопроволочные антенны с диэлектрическим покрытием, тонкие проводящие волокна в диэлектрической оболочке и композиционные покрытия и материалы, состоящие из таких волокон.

Предметом исследования являются электродинамические характеристики излучения и рассеяния тонкопроволочных антенн, проводящих волокон, макроскопические электродинамические характеристики композиционных сред, покрытий и материалов, наполненных проводящими волокнами.

### **Положения диссертации, выносимые на защиту**

1. Интегральное уравнение (ИУ) типа Поклингтона с модифицированным ядром, которое позволяет решать задачу возбуждения тонкого проводника с диэлектрическим покрытием произвольной криволинейной геометрии в режиме излучения и рассеяния. Ядро интегрального уравнения не содержит производных от функции Грина, является универсальным по отношению к геометрии проводника и удобным для разработки вычислительных программ.
2. Методика оценки электродинамических материальных параметров композиционных сред, состоящих из тонких волокон в диэлектрической обо-

лочке, которая базируется на решении задачи возбуждения одиночного волокна падающей гармонической электромагнитной волной методом ИУ, расчёте коэффициентов поляризуемости и гомогенизации материальных параметров среды. Методика является универсальной по отношению к геометрии волокон.

3. Установленные закономерности влияния диэлектрического покрытия на основные электродинамические характеристики тонкопроволочных антенн: амплитудно-фазовое распределение тока, диаграмма направленности (ДН), коэффициент направленного действия (КНД), поляризационные характеристики. Для цилиндрических спиральных антенн (ЦСА) в режиме осевого излучения показано, что диэлектрическое покрытие приводит к смещению рабочего диапазона частот в низкочастотную область на 10...15 %.

4. Установленные закономерности влияния диэлектрической оболочки на характеристики рассеяния тонких проводящих волокон различной конфигурации. Для волокон, представляющих комбинации диполя и витка, выявлены закономерности смещения частотной зависимости эффективной площади рассеяния (ЭПР) в низкочастотную область на 15...20 %.

5. Полученные результаты по улучшению радиопоглощающих свойств композиционных покрытий и пирамидальных поглотителей электромагнитных волн с внедрёнными тонкими проводящими волокнами. Применение тонких волокон позволяет снизить коэффициент отражения на 5...6 дБ для пирамидальных поглотителей.

#### **Личный вклад соискателя**

Основные результаты, изложенные в диссертационной работе, получены автором самостоятельно: ИУ с модифицированным ядром; методика оценки электродинамических материальных параметров композиционных сред; характеристики металлодиэлектрических антенн, рассеивателей, композиционных сред и материалов. Программные средства, используемые при моделировании, разработаны лично соискателем.

Руководителем, кандидатом технических наук, доцентом В.И. Демидчиком выбрана область и основные направления исследований, осуществлялось общее руководство. Совместно с ним проводилось обсуждение способов и методов решения поставленных задач, оценка полученных результатов.

#### **Апробация результатов диссертации**

Результаты, включённые в диссертационную работу, докладывались: на 9-й Международной конференции «ММЕТ – математические методы в теории электромагнетизма» (Киев, Украина, 2002 г.); на 4-й, 5-й, 6-й международной конференции «ICATT – международная конференция по теории и технике антенн» Севастополь, Киев и Севастополь, Украина, 2003, 2005, 2007 гг.); на 15-й, 17-й международных конференциях «CriMiCo – международная конфе-

рениция по СВЧ-технике и телекоммуникационным технологиям» (Севастополь, Украина, 2005, 2007 г.); на международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы современной радиоэлектроники: научные исследования, подготовка кадров» (Минск, 2006 г.); на международной научно-практической конференции «Современная радиоэлектроника: научные исследования и подготовка кадров» (Минск, 2007 г.); а также на научных конференциях в Белгосуниверситете.

### **Опубликованность результатов диссертации**

Результаты диссертации опубликованы в 15 научных работах, среди которых 4 статьи в научных журналах, 11 в сборниках материалов научно-технических конференций. Общий объем опубликованных материалов составляет 2.92 авторских листа.

### **Структура и объём диссертации**

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырёх глав, заключения, библиографического списка и четырёх приложений.

В первой главе приводится разработка математической модели возбуждения тонкого проводника произвольной конфигурации в диэлектрической оболочке в режиме рассеяния и излучения, выполнена проверка сходимости и устойчивости решения задачи возбуждения в рамках предложенной математической модели. Во второй главе рассмотрен эффект замедления электромагнитной волны на проводнике в диэлектрической оболочке, приводятся результаты моделирования электродинамических характеристик антенной системы «сетчатый экран-вибратор» с диэлектрическим покрытием, металлодиэлектрических цилиндрических спиральных антенн. Третья глава посвящена моделированию характеристик рассеяния одиночных проводящих волокон в диэлектрической оболочке различной геометрии и моделированию эффективных материальных параметров композиционных сред, наполненных такими волокнами. В четвертой главе приводятся результаты моделирования композиционных радиопоглощающих покрытий и материалов, состоящих из тонких проводников в диэлектрической оболочке.

Общий объём диссертации составляет 136 страниц, из них 98 страниц основного текста, 67 рисунков на 23 страницах, 5 таблиц на 2 страницах, библиографический список из 103 наименований на 9 страницах и 4 приложения на 4 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Во введении дан обзор используемых в настоящее время методов моделирования электродинамических характеристик проволочных антенн и композиционных материалов на базе тонких проводников, определено основное направление исследований, обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** содержит вывод интегрального уравнения (ИУ) для тонкого проводника с диэлектрическим покрытием. ИУ выводится из уравнений Максвелла с учётом осевого приближения распределения тока вдоль электрически тонкого проводника и квазистатического приближения распределения заряда в диэлектрической оболочке:

$$\int_L I(s') K(s, s') ds' = i\omega\epsilon_0 E_r^i, \quad (1)$$

$$K(s, s') = \frac{G_a}{r_a^2} \left[ AB \left( k^2 - \frac{3ik}{r_a} - \frac{3}{r_a^2} \right) + C \left( \beta_a - k^2 r_a^2 \right) \right] - \\ - \alpha AB \left( \frac{G_a}{r_a^2} k^2 - \frac{G_b}{r_b^2} k^2 - \frac{3ikG_a}{r_a^3} + \frac{3ikG_b}{r_b^3} - \frac{3G_a}{r_a^4} + \frac{3G_b}{r_b^4} \right) - \\ - \alpha C \left( \beta_a \frac{G_a}{r_a^2} - \beta_b \frac{G_b}{r_b^2} \right), \quad (2)$$

$$A = \sum_{j=1}^3 d_j \frac{\partial x_j}{\partial s}, \quad B = \sum_{i=1}^3 d_i \frac{\partial x'_i}{\partial s'}, \quad C = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial x_i}{\partial s} \frac{\partial x'_i}{\partial s'}, \quad r_a = \sqrt{\sum_{j=1}^3 (x_j - x'_j)^2 + a^2},$$

$$r_b = \sqrt{\sum_{j=1}^3 (x_j - x'_j)^2 + b^2}, \quad \alpha = \frac{\epsilon - 1}{\epsilon}, \quad d_i = x_i - x'_i, \quad \beta_{a,b} = 1 + ikr_{a,b}, \quad b = a + d_\epsilon,$$

где  $K$  – ядро ИУ;  $I$  – ток;  $L$  – общая длина проводников;  $s, s'$  – криволинейные координаты точек наблюдения и источника тока;  $\omega$  – циклическая частота;  $\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума;  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость покрытия;  $E_r^i$  – тангенциальная составляющая напряженности электрического поля источника;  $k=2\pi/\lambda$  – волновое число свободного пространства;  $\lambda$  – длина волны;  $r_{a,b}$  – расстояние между точкой истока и наблюдения, соответственно;  $x_b, x'_j$  – декартовы координаты точек наблюдения и источника;  $G_a, G_b$  – функция Грина для точек наблюдения на поверхности проводника и покрытия;  $a$  – радиус проводника;  $d_\epsilon$  – толщина диэлектрического покрытия.

Полученное ИУ(1) с ядром (2) является универсальным по отношению к геометрии проводника и может использоваться при решении задачи возбужде-

ния тонкого проводника в режиме излучения или рассеяния. Правая часть ИУ определяется условием возбуждения. Граничные условия включены в ИУ. Ограничение модели обусловлено физическими приближениями, которые использовались при выводе ИУ:  $a/\lambda=0.003...0.01$ ,  $\epsilon=1 \dots 10$ ,  $d_e/a < 3 \dots 4$ .

Для численного решения ИУ использовался метод моментов, позволяющий перейти от рассмотрения ИУ к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$ZI = V, \quad (3)$$

$$z_{mn} = \int_L \int_L \psi_m(s) K(s, s') \varphi_n(s') ds' ds, \quad (4)$$

$$V_m = \int_L \psi_m(s) \cdot E_{\tau}^s(s) ds, \quad (5)$$

где  $\varphi_n(s')$ ,  $\psi_m(s)$  – базисные и весовые функции.

Найденное по уравнениям (1) – (5) амплитудно-фазовое распределение тока вдоль проводника позволяет рассчитать важные антенные характеристики: коэффициент направленности (КНД), диаграммы направленности (ДН) по мощности, поляризационные характеристики, ширину главного лепестка по уровню половинной мощности.

Проведено исследование на сходимость и устойчивость решения ИУ методом моментов, когда в качестве базисных функций используются кусочно-постоянные функции, а в качестве весовых – дельта-функции. Покажем, что в качестве параметра саморегуляризации решения ИУ может использоваться длина отрезка разбиения исходной геометрии проводника на сегменты. В этом случае сходимость и устойчивость решения ИУ достигается соответствующим выбором длины отрезка сегментирования  $\Delta s$ , как показано в таблице 1, и выполнении условия  $\Delta s/a > 2 \dots 3$ .

Таблица 1 – Рекомендации по выбору длины сегмента разбиения

Параметры диэлектрической оболочки	Длина сегмента	
	Прямолинейный проводник	Криволинейный проводник
$1 < \epsilon < 2, d_e / \lambda \leq 0.025$ ,	$\Delta s / \lambda = 0.01 \dots 0.03$	$\Delta s / \lambda = 0.01 \dots 0.03$
$2 < \epsilon < 5, d_e / \lambda \leq 0.025$ ,	$\Delta s / \lambda = 0.025 \dots 0.05$	$\Delta s / \lambda = 0.025 \dots 0.033$
$\epsilon > 5, d_e / \lambda \geq 0.025$ ,	$\Delta s / \lambda = 0.05 \dots 0.1$	$\Delta s / \lambda = 0.033 \dots 0.05$

Адекватность разработанной математической модели по решению задачи возбуждения проверена на тестовых расчетах, проведенных в программах HFSS (метод конечных элементов) и CST (гибридные методы). Разработанная математическая модель реализована в виде вычислительной программы «РМК32W», которая решает задачу возбуждения тонкого проводника в режиме излучения или рассеяния, и рассчитывает наиболее важные электродинамиче-



ские характеристики антенн, рассеивателей и композиционных сред, состоящих из тонких проводников в диэлектрической оболочке.

**Вторая глава** посвящена моделированию и анализу электродинамических характеристик тонкопроволочных антенн с диэлектрическим покрытием. Рассмотрен эффект замедления электромагнитной волны (ЭМВ) на прямолинейных и спиральных проводниках под влиянием диэлектрической оболочки. На примере антенной системы «сетчатый экран-вибратор» рассмотрено влияние диэлектрического покрытия на отражательные свойства конечноразмерного рефлектора. Для металлодиэлектрических цилиндрических спиральных антенн (ЦСА) проведено исследование, в результате которого установлено влияние диэлектрического покрытия на основные антенные характеристики: амплитудно-фазовое распределение тока, характеристики направленности, ДН, КНД, поляризационные характеристики.

Проведено исследование замедления ЭМВ на тонкопроволочных структурах в диэлектрической оболочке в зависимости от параметров оболочки. Оценка замедления проводилась по количеству стоячих волн, укладывающихся вдоль проводника. Эффект замедления рассмотрен на прямолинейном и спиральном проводниках. Согласно полученным результатам коэффициент замедления для прямолинейных проводников достигает  $v/c=0.75\dots 0.80$ , для спиралей  $-v/c=0.80\dots 0.85$  (где  $v$  – фазовая скорость волны,  $c$  – скорость света) при параметрах диэлектрического покрытия  $\epsilon=1\dots 9$ ,  $d_e/\lambda=0.0\dots 0.006$ . Установлено, что изменение фазовой скорости волны от толщины оболочки носит линейный характер, а от диэлектрической проницаемости – нелинейный. Результаты исследований показали, что в резонансной области степень замедления ЭМВ зависит от погонной длины проводника. Фактически замедление ЭМВ можно рассматривать как укорочение рабочей длины волны. На рисунке 1 приведен пример типовой зависимости замедления (где  $a_s$  – радиус витка спирали,  $a - d_e/\lambda=3\cdot 10^{-3}$ ,  $b - \epsilon=5$ ).

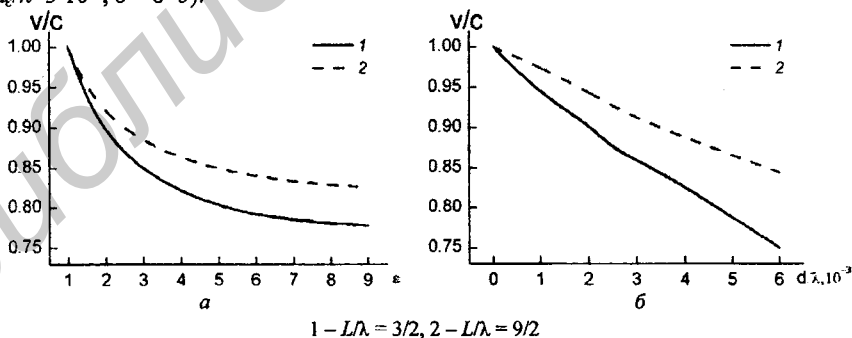


Рисунок 1 – Замедление волны для прямолинейных проводников в диэлектрической оболочке

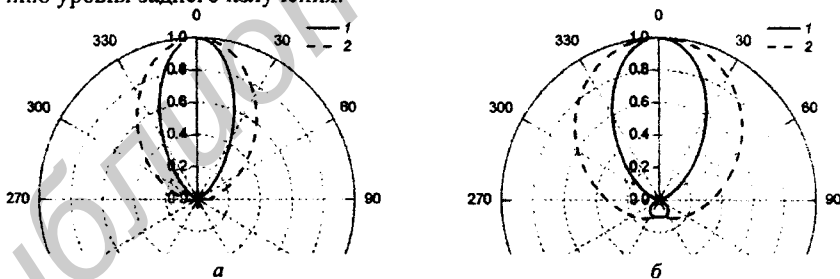
Для коэффициента замедления ЭМВ в зависимости от диэлектрической проницаемости получено инженерное приближение, в котором коэффициенты  $k_1, k_2, k_3$  определяются эмпирическим путём исходя из толщины оболочки, радиуса, длины и конфигурации проводника:

$$v/c \approx 1 - \ln\left(k_1 + k_2\sqrt{(\epsilon - k_3)/\epsilon}\right), \quad (6)$$

где  $k_1 = 1.00 \dots 1.05, k_2 = 0.1 \dots 0.2, k_3 = 0.95 \dots 1.00$ .

Исследования отражательных свойств антенной системы «сетчатый экран-вибратор» проведены при размерах экрана  $a_r/\lambda = 0.6 \dots 2.4$ , ячейки экрана  $b_r/\lambda = 0.08 \dots 0.3$  в зависимости от параметров диэлектрического покрытия  $\epsilon = 1 \dots 9, d_e/\lambda = 0.005 \dots 0.035$ . В качестве источника возбуждения ЭМВ использовался полуволновый вибратор, лежащий в плоскости, параллельной плоскости экрана на высоте  $h/\lambda = 0.25 \dots 1.0$ .

Установлено, что диэлектрическое покрытие приводит к существенному увеличению амплитуды тока на проводниках экрана, как параллельных, так и ортогональных вибратору. Данный эффект обусловлен появлением поляризационных токов в диэлектрической оболочке, которые возбуждаются излучением вибратора в ближней зоне. Как следствие, возрастает уровень излучения ЭМВ в задней полуплоскости. Установлено, что в зависимости от размеров экрана ширина главного лепестка ДН по уровню половинной мощности в  $E$ -плоскости составляет  $2\theta_{0.5} = 50^\circ \dots 80^\circ$ , в  $H$ -плоскости  $-2\theta_{0.5} = 80^\circ \dots 130^\circ$ , как показано на рисунке 2. Вследствие появления поляризационных токов выявлена закономерность по сужению ширины главного лепестка на  $5^\circ \dots 10^\circ$  и увеличению уровня заднего излучения.



$a - a_r/\lambda = 1.2, b_r/\lambda = 0.12; б - a_r/\lambda = 0.81, b_r/\lambda = 0.27;$

1 –  $E$ -плоскость; 2 –  $H$ -плоскость

**Рисунок 2 – Диаграмма направленности**

Отражательные свойства сетчатого экрана оценивались по максимальному (отношение уровней максимума заднего лепестка к главному лепестку по мощности) и среднему (отношение мощности излучения заднего лепестка к мощности основного лепестка) уровням заднего излучения. Установлено, что средний уровень заднего лепестка увеличивается пропорционально как толщине покры-

тия, так и диэлектрической проницаемости, как показано на рисунке 3. Для максимального уровня заднего лепестка такой монотонной картины не наблюдается, ввиду того, что задний лепесток расщепляется на два.

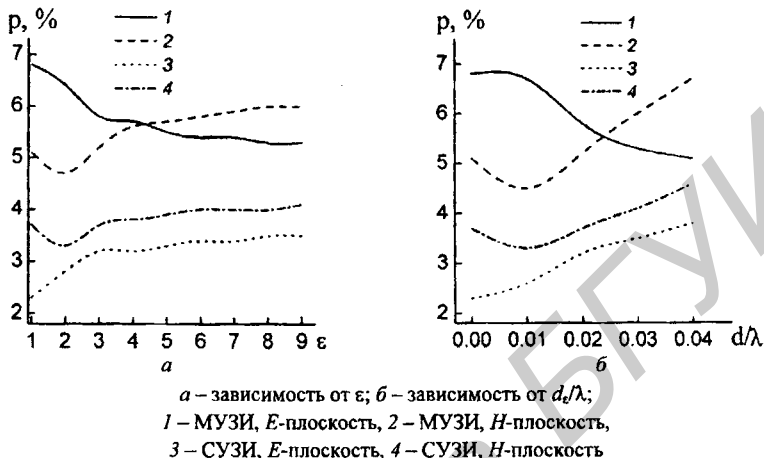


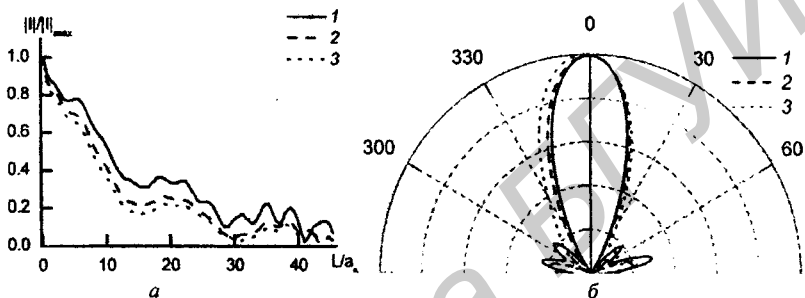
Рисунок 3 – Нормированный уровень излучения заднего лепестка

По результатам исследования определён размер ячейки  $b/\lambda < 0.08$ , при котором влиянием диэлектрического покрытия на отражательные свойства экрана можно пренебречь. При размерах ячейки экрана  $b/\lambda > 0.08$  уровень заднего излучения увеличивается на 2 ... 4 %.

В рамках вычислительного эксперимента изучено влияние параметров диэлектрического покрытия для ЦСА на амплитудно-фазовое распределение тока, ДН, КНД, поляризационные характеристики в частотной области, соответствующей осевому режиму излучения ЦСА. При моделировании ЦСА менялись количество витков  $N_c=4...8$ , угол намотки  $\alpha=5...30^\circ$ , радиус спирали  $ka_s=0.5...1.4$ , диэлектрическая проницаемость покрытия  $\epsilon=1...10$  и толщина покрытия  $d_c/\lambda=0.0...0.035$ .

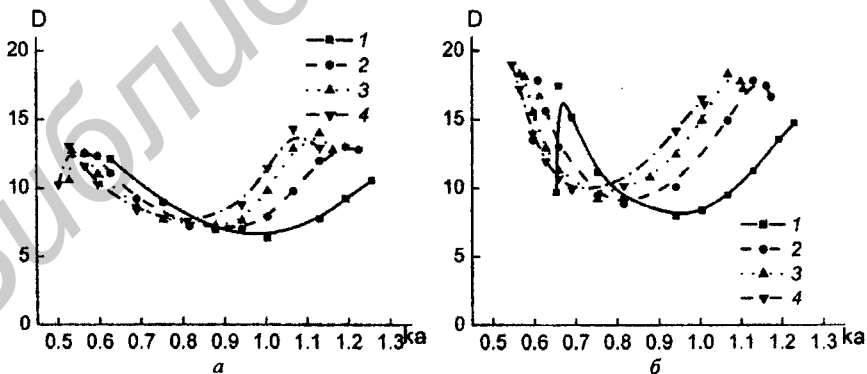
По результатам исследований установлено, что диэлектрическое покрытие главным образом влияет на амплитудно-фазовое распределение тока на низкочастотной (НЧ) и высокочастотной (ВЧ) границах существования осевого режима излучения и в меньшей мере на центральных частотах. В НЧ области при  $ka_s=0.55...0.65$  замедление ЭМВ приводит к переходу от режима стоячей волны к режиму бегущей волны, который обеспечивает осевое излучение. На центральных частотах осевого режима излучения диэлектрическое покрытие практически не влияет на распределение тока и сохраняется режим бегущей волны, рисунок 4, а. В ВЧ области при  $ka_s=1.2...1.4$  возрастает уровень отраженных волн от конца ЦСА, как следствие, формируются стоячие волны малой амплитуды, обеспечивающие появление боковых лепестков ДН.

Анализ результатов расчётов ДН показывает, что в НЧ области формируется трёхлепестковая ДН с уровнем боковых лепестков, сравнимым с уровнем осевого лепестка. Диэлектрическое покрытие приводит к увеличению уровня осевого лепестка и снижению уровней боковых лепестков. На центральных частотах формируется осевая ДН, диэлектрического покрытия существенным образом не влияет на распределение поля в дальней зоне излучения, рисунок 5. В ВЧ области формируется многолепестковая ДН, отклонение максимального излучения от оси спирали достигает  $30^\circ$ . В целом, ширина главного лепестка по уровню половинной мощности изменяется в пределах  $45 \dots 70^\circ$ .



$a$  – распределение тока;  $b$  – ДН;  $1 - \epsilon = 1, 2 - \epsilon = 2, 3 - \epsilon = 5$ ;  
 Рисунок 4 – Режим осевого излучения ЦСА ( $ka_s = 0.7$ )

На рисунке 5 приведена характерная зависимость КНД от частотного параметра  $ka_s$  при различной диэлектрической проницаемости. Установлено, что диэлектрическое покрытие ЦСА приводит к увеличению КНД в 1.5...2 раза в частотной области  $ka_s > 0.9$ . Дополнительный анализ, проведенный в отсутствие экрана, показал, что в частотной области  $ka_s = 0.60 \dots 0.70$  осевой режим излучения формируется только обратной волной, обеспечивающей высокий КНД.



$a - N_c = 4; b - N_c = 7; 1 - \epsilon = 1, 2 - \epsilon = 2, 3 - \epsilon = 4, 4 - \epsilon = 8$

Рисунок 5 – КНД ЦСА

Установлено, что в пределах главного лепестка диэлектрическое покрытие незначительно влияет на коэффициент поляризации (эллиптичности) ЦСА; в существенной мере влияют количество витков, угол намотки.

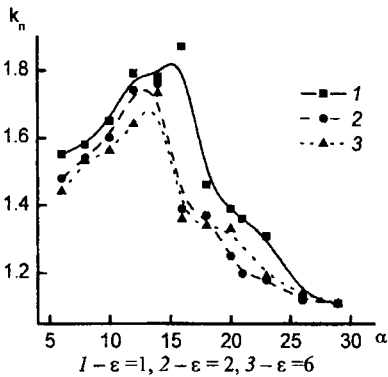


Рисунок 6 – Коэффициент перекрытия по частоте

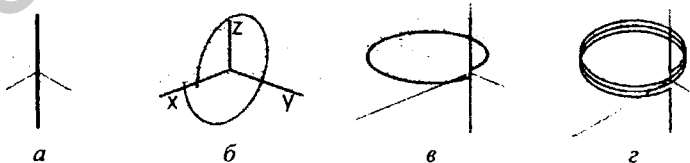
По результатам комплексного анализа ДН, КНД, поляризационных характеристик определены границы частотной области существования осевого режима излучения ЦСА с диэлектрическим покрытием в зависимости от угла намотки.

Проведённые исследования позволили сделать ряд выводов и рекомендаций по проектированию ЦСА с диэлектрическим покрытием: 1) рабочий диапазон частот осевого режима излучения в среднем смещается на 10...15 % в НЧ область, при этом коэффициент перекрытия по частоте снижается на 5...10 %, рисунок 6; 2) оптимальные углы намотки спирали составляют  $\alpha=10...16^\circ$ ; 3) На НЧ границе осевого

режима излучения наблюдается формирование осевого излучения с высоким КНД  $D = 15...20$  на обратной волне; 4) отклонение главного лепестка от осевого излучения на ВЧ достигает  $30^\circ$ .

Полученные результаты относятся к широкому кругу задач и могут использоваться при проектировании тонкопроволочных металлдиэлектрических антенн различных конструкций, при решении задач электромагнитной совместимости между радиоэлектронным оборудованием в реальных условиях эксплуатации.

Третья глава посвящена исследованию характеристик рассеяния тонких проводящих волокон различной конфигурации в диэлектрической оболочке и эффективных параметров композиционных сред на их основе. Рассмотрены различные конфигурации волокон, что представлено на рисунке 7. Подобного рода волокна чаще всего используются при синтезе искусственных материалов, электромагнитные свойства которых можно оценивать заранее по характеристикам рассеивания одиночного волокна.



а – диполь; б – виток; в – диполь-виток-диполь; г – диполь-спираль-диполь

Рисунок 7 – Тонкие волокна

В работе рассмотрено возбуждение волокон падающей линейно поляризованной плоской гармонической ЭМВ с взаимно ортогональных сторон. Параметры волокон изменялись в пределах: погонная длина  $L=35\dots60$  мм, для спиралей также изменялся угол намотки  $\alpha=0\dots30^\circ$  и количество витков  $N_c=1\dots3$ . По результатам моделирования получены частотные зависимости основной и кросс-поляризационной компонент эффективной площади рассеяния (ЭПР) при различной диэлектрической проницаемости  $\epsilon=1\dots9$  и толщине оболочки  $d_\epsilon=0.1\dots0.2$  мм в резонансной частотной области. На рисунке 8 представлены наиболее характерные результаты.

Анализ результатов исследований позволил сделать следующие выводы: 1) диэлектрическая оболочка приводит к смещению частоты резонанса ЭПР в НЧ область для прямолинейных волокон до 15 % и для витка до 25 %; 2) зависимость частоты резонанса ЭПР от толщины покрытия нелинейная (близка к обратно пропорциональной зависимости), от диэлектрической проницаемости – квазилинейная; 3) прямолинейные волокна следует использовать для создания искусственных материалов с широкополосными свойствами  $\Delta f/f_{\text{рез}}=10\dots15\%$  (где  $f_{\text{рез}}$  – частота резонанса ЭПР,  $\Delta f$  – частотная расстройка), спиральные волокна – для материалов с узкополосными свойствами  $\Delta f/f_{\text{рез}}=0.1\dots2\%$ ; 4) волокна в виде диполь-виток-диполь целесообразно использовать для создания поляризационных фильтров.

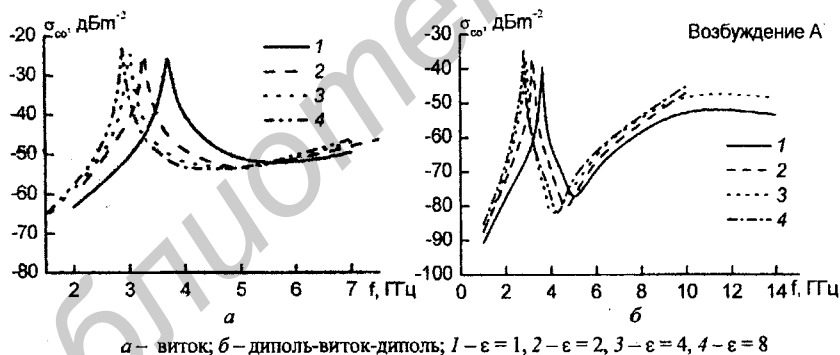


Рисунок 8 – ЭПР проводящих волокон в диэлектрической оболочке

Разработана методика по оценке эффективных макроскопических материальных параметров для композиционных сред, состоящих из тонких волокон в диэлектрической оболочке. Методика заключается в решении задачи возбуждения тонкопроволочного рассеивателя в диэлектрической оболочке, падающей линейно поляризованной волной со взаимноортогональных направлений. Затем по наведенным токам на рассеивателе рассчитываются дипольные моменты. С помощью выведенных выражений по дипольным моментам вычисляются коэффициенты поляризуемости (КП). Далее по известным КП, на базе модели

теории эффективных сред (например, квазистатистическая модель Максвелла-Гарнетта), рассчитываются эффективные электродинамические параметры композиционных сред, включающих в себя проводящие тонкие волокна в диэлектрической оболочке. Отличительной особенностью предложенной методики является универсальность по отношению к геометрии тонкого волокна, возможность учитывать диэлектрическую оболочку и независимость от выбора модели усреднения эффективных параметров среды. Методику можно представить в следующем виде:

$$\vec{E}_{inc} \rightarrow I \rightarrow \vec{p}, \vec{m} \rightarrow \hat{\alpha}_{ee}, \hat{\alpha}_{em}, \hat{\alpha}_{me}, \hat{\alpha}_{mm} \rightarrow \hat{\epsilon}_{eff}, \hat{\mu}_{eff}, \hat{\gamma}_{eff}, \quad (7)$$

где  $\vec{p}, \vec{m}$  – дипольный электрический и магнитный моменты;  $\hat{\alpha}_{ee}, \hat{\alpha}_{em}, \hat{\alpha}_{me}, \hat{\alpha}_{mm}$  – коэффициенты поляризуемости;  $\hat{\epsilon}_{eff}, \hat{\mu}_{eff}, \hat{\gamma}_{eff}$  – эффективная диэлектрическая, эффективная магнитная проницаемости, коэффициент киральности.

Выражения для расчёта КП были получены в следующем виде:

$$\begin{aligned} \alpha_{i1}^{ee} &= 0.25 \left( p_i^Y + p_i^Z + p_i^X + p_i^Z \right), \\ \alpha_{i2}^{ee} &= 0.25 \left( p_i^X + p_i^X + p_i^Z + p_i^Z \right), \\ \alpha_{i3}^{ee} &= 0.25 \left( p_i^X + p_i^X + p_i^Y + p_i^Y \right), \\ \alpha_{i1}^{em} &= 0.25 \cdot Z_w \left( -p_i^Y + p_i^Y + p_i^Z - p_i^Z \right), \\ \alpha_{i2}^{em} &= 0.25 \cdot Z_w \left( +p_i^X - p_i^X - p_i^Z + p_i^Z \right), \\ \alpha_{i3}^{em} &= 0.25 \cdot Z_w \left( -p_i^X + p_i^X + p_i^Y - p_i^Y \right), \end{aligned} \quad (8)$$

где  $X, Y, Z$  – указывают на направление распространения плоской электромагнитной волны, а индексы 1, 2 – указывают на поляризацию ЭМВ;  $Z_w$  – волновое сопротивление среды, нижние индексы;  $i, j = 1 \dots 3$  соответствуют декартовым координатам.

Аналогичным образом получены КП  $\alpha_{i,j}^{ne}, \alpha_{i,j}^{mm}$ , которые формально можно записать, проведя в выражении (8) замену  $p \rightarrow m$  и индексов  $ee \rightarrow me, em \rightarrow mm$ .

С помощью разработанной методики проведены исследования эффективной диэлектрической и магнитной проницаемостей, коэффициента киральности композиционных сред, состоящих из тонких волокон в диэлектрической оболочке. Рассмотрены среды как в виде решётки из тонких волокон, так и со статистически однородно распределёнными тонкими прямолинейными и спиральными волокнами. Исследование эффективных параметров композиционных сред проведено в частотной области, ограниченной пределами применимости метода интегральных уравнений и теорией эффективных сред ( $p/\lambda, q/\lambda < 0.1 \dots 0.2$ , где  $p$  – расстояние между волокнами,  $q$  – линейный размер волокна).

По результатам моделирования статистически однородно распределённых волокон установлено, что применение диэлектрической оболочки с параметра-

ми  $\epsilon=1..9$ ,  $d_{\epsilon}=0.0..0.2$  мм позволяет повысить эффективную диэлектрическую проницаемость среды в нерезонансной области с  $\epsilon'=1.08..1.15$  до  $\epsilon'=1.1..1.25$  по сравнению с аналогичными средами, заполненными волокнами без оболочки (где  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  – действительная и мнимая часть диэлектрической проницаемости). Наличие диэлектрических потерь  $\epsilon'' \neq 0$  в недиссипативной среде обусловлено диффузным рассеянием ЭМВ внутри среды. Магнитные и киральные свойства среды практически отсутствуют.

Выполнено исследование композиционных сред со статистически однородным распределением маловитковых спиралей. По результатам моделирования установлено, что для спиралей в диэлектрической оболочке с углом намотки менее  $10^\circ$  смещение резонансной частоты эффективных параметров в НЧ область может составить 30 %.

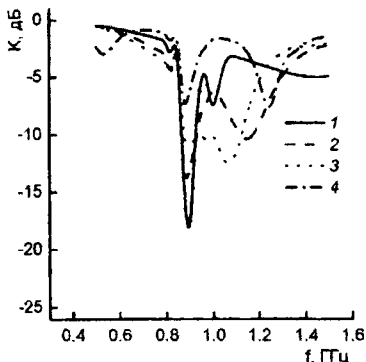
Установлено, что среда из спиральных включений в области резонанса проявляет как диэлектрические свойства, так и магнитные и киральные. Частотная область дисперсии эффективных параметров составляет  $\Delta f/f_{рез}=0.1..2$  %, что коррелирует с результатами исследований рассеяния на одиночных волокнах. Проявление киральных свойств среды позволяет разрабатывать, как перспективные узкополосные радиопоглощающие материалы, так и частотоселективные материалы, поляризационные фильтры.

Фактически можно выделить следующие перспективные направления практического использования диэлектрической оболочки для тонких проводящих волокон: изменение эффективных параметров, снижение концентрации включений, изоляция проводящих волокон от полупроводящих сред, получение двухдиапазонных искусственных сред.

**Четвертая глава** посвящена изучению взаимодействия падающей плоской гармонической ЭМВ с различными конструкциями композиционных радиопоглощающих покрытий (РПП) и материалов (РПМ), содержащих тонкие проводящие волокна. Исследования радиопоглощающих свойств проведены по коэффициентам отражения (КО) и прохождения ЭМВ методом последовательного приближения сопротивления, численно-аналитическим методом для покрытий с киральными свойствами и методом конечных элементов. Материальные макроскопические свойства РПП и РПМ рассмотрены в рамках теории эффективных сред как усредненные параметры диэлектрической и магнитной проницаемости и киральности.

Проведено исследование радиопоглощающих свойств в зависимости от толщины однослойного композиционного РПП, заполненного спиралью с левой и правой намоткой. Использование спиралей с противоположным направлением намотки нивелирует киральные свойства таких РПП. Согласно полученным результатам ширина рабочей полосы частот изменяется в пределах  $\Delta f=25..75$  МГц в диапазоне 900 МГц для толщины РПП  $d=3..7$  см. Анализ результатов позволил установить линейную зависимость ширины рабочей полосы РПП от толщины РПП.

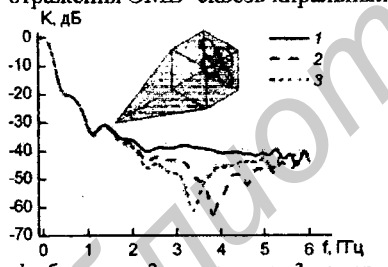




1 –  $\epsilon=12$ , 2 –  $\epsilon=25$ , 3 –  $\epsilon=30$ , 4 –  $\epsilon=81$

**Рисунок 10 – КО от РПП  
«композит-диэлектрик»**

Проведено исследование композиционных РПП, наполненных тонкими спиралями с односторонней намоткой. Выявлено, что киральные свойства РПП при толщине покрытия менее  $\lambda/4$  и концентрации волокон в диэлектрической оболочке менее  $n < 10^5 \text{ м}^{-3}$  (где  $n$  – концентрация) не влияют на отражательные свойства РПП. Установлено, что применение диэлектрической оболочки для волокон позволяет сместить рабочие частотные характеристики до 200 МГц в НЧ область. Величина кросс-поляризационных коэффициентов прохождения и отражения ЭМВ сквозь киральный слой достигает 0.01.



1 – без колец, 2 – с кольцами, 3 – с кольцами в диэлектрической оболочке

**Рисунок 11 – КО от решётки из пирамид на пьедестале**

С целью расширения ширины рабочего диапазона частот композиционного РПП рассмотрены различные модификации конструкции РПП. На примере использования дважды периодической решётки композитных пластин в диэлектрической матрице удалось добиться трёхкратного расширения рабочей полосы частот. Расширение достигнуто за счёт появления второго резонанса. Изменяя геометрические размеры пластин и диэлектрическую проницаемость вмещающей матрицы, можно добиться слияния двух резонансов в один, как показано на рисунке 10.

Проведено исследование композиционных РПП, наполненных тонкими спиралями с односторонней намоткой.

Проведено исследование радиопоглощающих свойств пирамидального РПП, представляющего дважды периодическую решётку с внедрёнными разомкнутыми кольцами. Выявлено, что за счёт определённого расположения проводящих колец в диэлектрической оболочке можно добиться снижения коэффициента отражения на 5...6 дБ, как показано на рисунке 11. Данный эффект достигается за счёт диффузного рассеяния ЭМВ внутри поглотителя.

В приложениях приведены описание подпрограмм по расчету геометрии исследуемых объектов, акт внедрения полученных результатов в учебный процесс; акт внедрения в научно-исследовательский процесс, связанный с решением проблем электромагнитной совместимости между радиозлектронными средствами различного назначения в Республике Беларусь; свидетельство об интеллектуальной собственности на программу «РМК32W».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Получено интегральное уравнение типа Поклингтона с модифицированным ядром, описывающее взаимодействия ЭМВ с тонким проводником произвольной криволинейной геометрии, покрытым диэлектриком. Отличительной чертой полученного уравнения является универсальность по отношению к геометрии проводника и отсутствие производных от функции Грина в ядре ИУ. Данный факт позволяет решать задачу возбуждения проводников с произвольной плавно меняющейся криволинейной геометрией; нивелируются вычислительные погрешности, связанные с численным дифференцированием функции Грина. На базе предложенного ИУ разработана алгоритмическая модель и программный комплекс по решению задачи возбуждения тонкого проводника сторонним источником электромагнитного поля. [2–А, 7–А, 8–А, 9–А, 12–А, 13–А]

2. На базе разработанной математической модели проведено численное исследование основных электродинамических характеристик тонкопроволочных антенн с диэлектрическим покрытием. Показано, что диэлектрическое покрытие с проницаемостью  $\epsilon < 10$  и толщиной, сопоставимой с радиусом проводника, приводит к существенным изменениям характеристик излучения и рассеяния. На примере сетчатого экрана показано, что диэлектрическое покрытие приводит к перераспределению электромагнитного поля, что влечёт за собой ухудшение отражательных свойств при размерах ячеек  $b/\lambda \geq 0.08$ . На примере цилиндрических спиральных антенн, расположенных над бесконечным экраном, изучено влияние диэлектрического покрытия на амплитудно-фазовое распределение тока, характеристики направленности, поляризационные характеристики в осевом режиме излучения. Показано, что изменение характеристик ЦСА в целом связано со смещением рабочего диапазона в НЧ область на 10...15 % и незначительным уменьшением коэффициента перекрытия по частоте [1–А, 2–А, 4–А, 5–А, 6–А, 10–А].

3. Исследованы характеристики рассеяния тонких проволочных рассеивателей в диэлектрической оболочке. На примере геометрий диполя, витка, диполь-виток-диполь, диполь-спираль-диполь, наиболее часто используемых при синтезе композиционных материалов, изучено влияние диэлектрической оболочки на характеристики рассеяния в резонансной частотной области. Установлено, что использование диэлектрической оболочки приводит к смещению частоты резонанса ЭПР в НЧ область до 15 % для прямолинейных волокон и до 20 % – для волокон в виде витков и спиралей. Показано, что смещение резонансной частоты ЭПР в зависимости от толщины покрытия имеет линейную зависимость, от диэлектрической проницаемости – нелинейную (близкую к обратно пропорциональной). Разработана методика по расчёту эффективных параметров композиционных сред, состоящих из тонких проводящих волокон в

диэлектрической оболочке. Отличительной особенностью методики является универсальность по отношению к геометрии волокна, применимость к средам, наполненным тонкими проводящими волокнами в диэлектрической оболочке и применимость как для сред со статистически однородным распределением волокон, так и для сред с упорядоченным распределением волокон. С помощью разработанной методики проведена оценка эффективных материальных параметров композиционных сред, состоящих из тонких проводящих волокон в диэлектрической оболочке. Подтверждено, что сдвиг частоты резонанса ЭПР одиночного волокна коррелирует со сдвигом частоты резонанса эффективных материальных параметров композиционных сред. Установлено, что применение диэлектрической оболочки с параметрами  $\varepsilon=1...9$ ,  $d_e=0.0...0.2$  мм для тонких волокон позволяет повысить эффективную диэлектрическую проницаемость среды в нерезонансной области  $\varepsilon_{eff}=1.1...1.25$  по сравнению с аналогичными средами, заполненными волокнами без оболочки [3–А, 12–А, 13–А].

4. Проведены исследования радиопоглощающих свойств однослойных композиционных покрытий, наполненных проводящими волокнами как с диэлектрической оболочки, так и без неё. Получено трёхкратное расширение рабочего диапазона от 50 до 150 МГц по уровню -10 дБ за счёт создания периодической структуры «композит-диэлектрик» при сохранении толщины покрытия. Проведено исследование композиционных покрытий, обладающих киральными свойствами. Установлено, что применение диэлектрической оболочки с  $\varepsilon = 2...9$  позволяет сдвигать частоту резонанса коэффициента отражения в НЧ область до 200 МГц. Также показано, что при прохождении волны сквозь киральный слой появляется кросс-поляризация, составляющая 0.01 от величины падающего поля. Установлено, что влияние диэлектрической оболочки сказывается при концентрации волокон  $n > 10^5$  м<sup>-3</sup>. Проведены исследования по улучшению радиопоглощающих свойств для РПМ пирамидального типа путём внедрения в РПМ тонких проводящих волокон в диэлектрической оболочке. Установлено, что за счёт тонких проводящих волокон в диэлектрической оболочке возможно снизить коэффициент отражения на 5...6 дБ [3–А, 11–А, 14–А, 15–А].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Разработанная математическая модель, реализованная в виде вычислительной программы «РМК32W», может использоваться: 1) для моделирования характеристик излучения и рассеяния проволочных антенн произвольной геометрии с диэлектрическим покрытием (изоляция); 2) для уточнения заводских характеристик при эксплуатации антенн в реальных условиях, когда требуется учитывать влияние осадков, опор и ближайших объектов; 3) для решения задач электромагнитной совместимости между близко расположенными радиоэлектронными средствами; 4) для решения задач электромагнитной совместимости между радиоэлектронными средствами, работающими в общей или смежных

полосах частот; 5) для моделирования и прогнозирования эффективных электродинамических параметров сложных композиционных сред, наполненных тонкими проводящими волокнами в диэлектрической оболочке; 6) как составная часть программных пакетов по электродинамическому моделированию.

Следующие направления исследований представляются перспективными: 1) исследование антенн различных конструкций и назначений с диэлектрическим покрытием (логопериодические, антенные решетки и др.); 2) исследование и обобщение интегрального уравнения для проводника с магнитной изоляцией, с нелинейными импедансными элементами; 3) использование новых методов по получению эффективных электродинамических параметров композиционных сред, состоящих из тонких волокон; 4) оптимизация свойств радиопоглощающих материалов за счет применения металлодиэлектрических волокон.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статьи в рецензируемых научных журналах**

1–А. Демидчик, В.И. Электродинамический анализ спирально-диэлектрических излучателей/ В.И. Демидчик, Н.Ю. Сицко // Вестник БГУ. – 2005. – Сер. 1, № 1. – С. 56 – 59.

2–А. Демидчик, В. И. Электродинамическое моделирование металлодиэлектрических структур в рамках тонкопроволочного приближения / В. И. Демидчик, Н.Ю. Сицко // Вестник Военной академии Республики Беларусь. – 2006. – № 2. – С. 62 – 67.

3–А. Демидчик, В. И. Влияние диэлектрической оболочки на характеристики рассеяния проводящих волокон произвольной геометрии/ В. И. Демидчик, П.Д. Кухарчик, Н.Ю. Сицко // Доклады НАН Беларуси. – 2007. – Т. 51, № 3. – С. 37 – 41.

4–А. Сицко, Н.Ю. Антенные характеристики проволочных цилиндрических спиральных излучателей с диэлектрическим покрытием/ Н.Ю. Сицко // Доклады БГУИР. – 2008. – № 2. – С. 65 – 71.

### **Статьи в сборниках и материалах конференций**

5–А. Sitsko, M. Reflective properties of grid structure with dielectric coating/ M. Sitsko, V. Demidchik // International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. Proceedings. – Kiev, Ukraine, 2002. – Vol. 2. – P. 420 – 422.

6–А. Сицко, Н.Ю. Отражательные свойства сетчатых структур с диэлектрическим покрытием/ Н.Ю. Сицко // Материалы VII Республиканской научной конференции студентов и аспирантов Беларуси (НИРС-2002) /Витебский технологический университет.

7-А. Сицко, Н.Ю. Алгоритмизация решения интегрального уравнения для тонкопроволочных структур, покрытых диэлектриком/ Н.Ю. Сицко // *Материалы 59-й научной конференции студентов и аспирантов БГУ / Белгосуниверситет.* – 2002. – С. 32 – 36.

8-А. Сицко, Н.Ю. Разработка алгоритма и программ расчёта характеристик излучения и рассеяния тонкопроволочных структур/ Н.Ю. Сицко // *Научные труды молодых учёных, студентов и аспирантов.* – Минск, БГУ, 2002. – С. 205 – 208.

9-А. Demidchik, V.I. Investigation of integral equation for dielectric-coated thinwire conductors/ V.I. Demidchik, N.U. Sitsko // *4th International Conference on Antenna Theory and Techniques. Sevastopol, Ukraine, September 9–12, 2003. Proceedings.* – Sevastopol, 2003. – Vol. 2. – P. 723 – 725.

10-А. Demidchik, V.I. Range properties of cylindrical helical antennas made of a conductor with dielectric coating/ V.I. Demidchik, N.U. Sitsko // *5th International Conference on Antenna Theory and Techniques. Kiev, Ukraine, 24–27 May 2005. Proceedings.* – Kiev, 2005. – Vol. 2. – P. 295 – 297.

11-А. Demidchik, V.I. Electromagnetic wave absorbers simulation/ V.I. Demidchik, N.U. Sitsko // *15th International Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology».* Sevastopol, Ukraine, September 12–16 2005. *Proceedings.* – Sevastopol, 2005. – Vol. 2. – P. 653 – 654.

12-А. Демидчик, В.И. Рассеяние электромагнитной волны на волокнистой микрочастице в диэлектрической оболочке/ В. И. Демидчик, Н.Ю. Сицко // *Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы современной радиоэлектроники: научные исследования, подготовка кадров».* Минск, 20–21 апреля 2006. *Материалы конф.* – Минск, 2006. – Ч. 1. – С. 112 – 115.

13-А. Демидчик, В. И. Методика расчёта коэффициентов поляризуемости для одиночных проволочных рассеивателей произвольной геометрии/ В. И. Демидчик, Н.Ю. Сицко // *Международная научно-практическая конференция «Современная радиоэлектроника: научные исследования и подготовка кадров».* Минск, 10–11 апреля 2007. *Материалы конф.* – Минск, 2007. – Ч. 1. – С. 124 – 127.

14-А. Demidchik, V.I. The simulation effective parameters of composite media with embedded metal-dielectric thin fibers/ V.I. Demidchik, N.Yu. Sitsko // *6th International Conference on Antenna Theory and Techniques. Sevastopol, Ukraine, 17–21 September 2007. Proceedings.* – Sevastopol, 2007. – P. 202 – 204.

15-А. Сицко, Н.Ю. Широкополосное композиционное радиопоглощающее покрытие/ Н.Ю. Сицко, В.И. Демидчик // *10-я Военно-научная конференция.* Минск, 9–10 апреля 2009. *Тезисы.* – Минск, 2009. – С. 327.

## РЭЗЮМЭ

Сіцко Мікалай Юр'евіч

### Электрадынамічны аналіз танкадротавых металадыяэлектрычных структур і кампазіцыйных матэрыялаў на іх падставе

**Ключавыя словы:** тонкі праваднік у дыэлектрычнай абалочцы, інтэгральнае ўраўненне, характарыстыкі выпраменьвання і рассеявання, цыліндравыя спіральныя антэны, кампазіцыйнае асяроддзе.

**Аб'ект даследавання:** танкадротавыя антэны з дыэлектрычным пакрыццём, валакністыя рассеявацелі ў дыэлектрычнай абалочцы і кампазіцыйныя пакрыцці і матэрыялы з такіх валокан.

**Прадмет даследавання:** электрадынамічныя характарыстыкі выпраменьвання і рассеявання танкадротавых антэн, правадніковых валокан, маскарскапічных электрадынамічных характарыстыкі кампазіцыйных асяроддзяў, пакрыццй і матэрыялаў, якія напоўнены правадніковымі валокнамі.

**Мэта даследавання:** павышэнне эфектыўнасці прасектвання танкадротавых металадыэлектрычных антэн і кампазіцыйных радыёматэрыялаў, напоўненых тонкімі валокнамі ў дыэлектрычнай абалочцы.

**Метады даследавання:** метады інтэгральных ураўненняў, метады прыбліжэння асявога размеркавання току, метады квазістатычнага прыбліжэння электрычнага зараду, метады момантаў, метады гамагенізацыі, метады канечных элементаў, метады паслядоўнага прыбліжэння ўваходнага імпэдансу.

**Атрыманыя вынікі даследавання:** атрымана інтэгральнае ўраўненне тыпу Паклінгтона з мадыфікаваным ядром, без вытворных ад функцыі Грына, што дазваляе вырашаць задачу ўзбуджэння тонкага правадніку адвольнай геаметрыі ў дыэлектрычнай абалочцы ў рэжыме выпраменьвання і рассеявання; устаноўлена пагаршэнне адлюстравання ўласцівай сеткавага экрану канчатковых памераў з-за дыэлектрычнага пакрыцця; атрыманы залежнасці антэных характарыстык цыліндравых спіральных антэн ад параметраў дыэлектрычнай абалочцы ў рэжыме асявога выпраменьвання; даследаван эфект здвігу рэзанансных характарыстык рассеявання тонкіх валокан у нізка частотны дыяпазон з-за дыэлектрычнай абалочцы; распрацавана метадыка па ацэнцы эфектыўных матэрыяльных параметраў кампазіцыйных асяроддзяў, якія запоўнены тонкімі валокнамі ў дыэлектрычнай абалочцы; аптымізаваны розныя канструкцыі кампазіцыйных радыёпаглынальных пакрыццяў да матэрыялаў, якія змяшчаюць тонкія валокны ў дыэлектрычнай абалочцы.

**Вобласць выкарыстання:** распрацаваная матэматычная мадэль і вынікі, якія атрыманы ў працы, могуць выкарыстоўвацца ў навукова-даследчых арганізацыях, займаюцца пытаннямі распрацавання і канструіравання металадыэлектрычных антэн, кампазіцыйных пакрыццяў і матэрыялаў, а таксама пры вырашэнні задач электрамагнітнай сумяшчальнасці.

## РЕЗЮМЕ

Сицко Николай Юрьевич

### Электродинамический анализ тонкопроволочных металлодиэлектрических структур и композиционных материалов на их основе

**Ключевые слова:** тонкий проводник в диэлектрической оболочке, интегральное уравнение, характеристики излучения и рассеяния, цилиндрические спиральные антенны, композиционные среды.

**Объект исследования:** тонкопроволочные антенны с диэлектрическим покрытием, тонкие проводящие волокна в диэлектрической оболочке и композиционные покрытия и материалы, состоящие из таких волокон.

**Предмет исследования:** электродинамические характеристики излучения и рассеяния тонкопроволочных антенн, проводящих волокон, макроскопические электродинамические характеристики композиционных сред, покрытий и материалов, наполненных проводящими волокнами.

**Цель работы:** повышение эффективности проектирования тонкопроволочных металлодиэлектрических антенн и композиционных радиоматериалов, наполненных тонкими проводящими волокнами в диэлектрической оболочке.

**Методы исследования:** метод интегральных уравнений, метод приближения осевого распределения тока, метод квазистатического приближения электрического заряда, метод моментов, метод гомогенизации, метод конечных элементов, метод последовательного приближения входного импеданса.

**Полученные результаты:** получено интегральное уравнение типа Полингтона с модифицированным ядром, не содержащее производных от функции Грина и позволяющее решать задачу возбуждения тонкого проводника произвольной геометрии с диэлектрическим покрытием в режиме излучения и рассеяния; установлено ухудшение отражательных свойств сетчатого экрана конечных размеров из-за диэлектрического покрытия; получены зависимости характеристик излучения цилиндрических спиральных антенн от параметров диэлектрического покрытия в режиме осевого излучения; исследован эффект смещения резонансных характеристик рассеяния тонких волокон в низкочастотную область из-за диэлектрической оболочки; разработана методика по оценке эффективных материальных параметров композиционных сред, наполненных тонкими волокнами в диэлектрической оболочке; оптимизированы различные конструкции композиционных радиопоглощающих покрытий и материалов, содержащих тонкие волокна с диэлектрической оболочкой.

**Область применения:** разработанная математическая модель и результаты, полученные в работе, могут использоваться в научно-исследовательских организациях, занимающихся вопросами разработки и конструирования металлодиэлектрических антенн, композиционных покрытий и материалов, а также при решении задач электромагнитной совместимости.

## SUMMARY

Sitsko Mikalai Yur'evich

### Electrodynamic's Analyses of Thin Wire Metaldielectric Structures and Composite Materials Based on Wires

**Keywords:** thin conductor with dielectric coating, integral equation, radiation and scattering characteristics, cylindrical helices antennas, composite medium.

**The objects of research** are thin wires antennas with dielectric coatings, thin wire fibers with dielectric isolation, composite coatings and materials.

**The subjects of research** are electrodynamic's characteristics of radiation and scattering for thin wire antennas, fibres, macroscopic electrodynamic's characteristics of composite medium, coatings and materials included thin wires.

**The purpose of work** is development mathematical, algorithmic and calculation models for solving exciting problem of thin wire conductors with dielectric coating by electromagnetic wave in radiation and scattering mode, find out influence of dielectric coating on characteristics of antennas, scatterers and composite medium.

**The applied techniques** are method of integral equation, axial approximation of current distribution, quasistatic charge distribution, moment methods, homogenization, finite element method.

**The results of investigation are:** an Pockingtons kind integral equation with a modified kernel without any derivation of the Green's function, enabling to solve the exciting problem a thin metaldielectric wire of arbitrary geometry in radiation and scattering mode; find out the reflective properties of a grid screen with dielectric covering; antenna characteristics of metaldielectric cylindrical helix antennas due to dielectric isolation influence into axial radiation mode; find out resonance shifting of scattering characteristics of thin fibres into low-frequency domain due to dielectric coating; developed technique for estimation of effective materials parameters of composite media; optimized different construction of composite radio absorbing coatings and materials which is included thin fibres into dielectric isolation.

**Field of application:** the developed mathematical models and the results obtained during the work can be used in research and development institute, working on the development and designing of metaldielectric antennas, composite materials and dealing with the electromagnetic compatibility problems



**Сицко Николай Юрьевич**

**ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ  
ТОНКОПРОВОЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
СТРУКТУР И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ  
НА ИХ ОСНОВЕ**

Специальность 01.04.03 – Радиофизика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

---

Подписано в печать 05.07.2012.  
Гарнитура «Таймс».  
Уч.-изд. л. 1,4.

Формат 60x84 1/16.  
Отпечатано на ризографе.  
Тираж 50 экз.

Бумага офсетная.  
Усл. печ. л. 1,63.  
Заказ 365.

---

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.  
220013, Минск, П. Бровки, 6