

Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики»

На правах рукописи



Т а б а к о в Д м и т р и й П е т р о в и ч

**ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ
СИНГУЛЯРНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ
К ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОМУ АНАЛИЗУ
КОЛЬЦЕВЫХ И СПИРАЛЬНЫХ СТРУКТУР**

Специальность – 01.04.03 – Радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

САМАРА – 2009

Работа выполнена на кафедре основ конструирования и технологий радиотехнических систем государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики» (ПГУТИ)

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,
профессор *Вячеслав Александрович Незанов*

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
профессор *Леонид Иванович Пономарев*
заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук,
профессор *Сергей Борисович Раевский*

Ведущая организация:

ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс», г. Самара

Защита состоится «__» _____ 2009 г. в ___ часов на заседании диссертационного совета Д219.003.01 в Поволжском государственном университете телекоммуникаций и информатики по адресу: 443010, г. Самара, ул. Льва Толстого, 23.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ПГУТИ.

Автореферат разослан «__» _____ 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д219.003.01,
доктор физико-математических наук



О.В. Осипов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. При решении вопросов электромагнитной совместимости особый интерес представляет структура поля в ближней зоне антенны, однако при анализе ближних полей могут возникнуть трудности, связанные с измерениями – любой датчик искажает картину поля, так как сам становится источником излучения и начинает взаимодействовать с излучающей структурой. Расчет и синтез антенн, а также ряд других задач можно решить с помощью математического моделирования (ММ) на ЭВМ.

В настоящее время многие электродинамические задачи решаются в некорректной постановке [Л1]. Наиболее характерным примером является использование тонкопроволочного приближения при построении физической модели тонкого электрического вибратора, приводящего к уравнениям Поклингтона и Халлена. Некорректно построенная физическая модель порождает целый ряд проблем:

- необходимость математической регуляризации решения [Л1];
- возможное отсутствие устойчивости решения;
- возникновение явления относительной сходимости [Л1], которое может привести к заведомо неверным физическим результатам;
- отсутствие предельного перехода от электромагнитного поля (ЭМП) на антенне (поверхностного тока) к ЭМП в окружающем ее пространстве.

Последнее обстоятельство необходимо принципиально учитывать при анализе ближнего поля – разрыв между током на антенне и ЭМП также может привести к неверным результатам.

До середины 90-х годов на практике при анализе антенных решеток и вообще проволочных антенн, в основном, применялись методы, основанные на тонкопроволочном приближении [Л2,3]. В [Л4] был предложен новый класс базисных функций для решения таких уравнений, называемых собственными функциями интегродифференциального оператора. Однако использование этих функций сильно усложняет алгоритм численного решения.

В [Л5] был развит новый метод, основанный на применении математического аппарата теории сингулярных интегральных уравнений (СИУ) [Л6]. Решение СИУ, как известно, является математически корректной по Адамару задачей, и при таком подходе некорректностей, приводящих к разрывам ЭМП и неустойчивым вычислительным алгоритмам, в задачах практически не возникает.

Поскольку причины (физическая модель, некорректные математические выкладки, отсутствие предельного перехода), приводящие к

некорректным задачам электродинамики, прежде всего связаны с физическими особенностями задачи, процедура регуляризации таких задач с применением СИУ по терминологии В.А. Неганова представляет собой метод физической регуляризации (МФР) [Л1]. В отличие от него метод регуляризации Тихонова А.Н. интегральных уравнений Фредгольма первого рода [Л7] назван методом математической регуляризации.

Из последних работ следует отметить [Л8]. В ней описан вывод СИУ тонкого криволинейного вибратора и приведен алгоритм его решения. Рассмотрены вопросы определения входного сопротивления и возбуждения такой антенны. Однако в качестве примера приведен численный расчет только прямолинейного полуволнового вибратора.

Анализ вопроса позволяет сделать вывод, что наиболее распространенные методы электродинамического анализа рассматриваемых антенн имеют ряд недостатков.

Основной недостаток – разделение внутренней и внешней электродинамической задачи. Зачастую внешняя задача решается лишь в предположениях о распределении тока, основанных на физике происходящих в антенне процессов, внутренняя задача просто игнорируется. Расчет характеристик вибраторных и кольцевых антенн проводится в предположении синусоидального распределения тока, для спиральных антенн ток принимают в виде бегущей волны, экспоненциально затухающей при распространении к свободному концу спирали.

Данный подход является несамосогласованным, т.к. отсутствует непрерывный переход от поля в ближней зоне к полю (току) на поверхности излучения антенны, и не позволяет решить ряд важных вопросов электромагнитной экологии и электромагнитной совместимости радиотехнических систем.

Использование тонкопроволочного приближения сводит задачу анализа антенн к интегральным уравнениям Фредгольма первого рода. Решение таких интегральных уравнений представляет собой некорректно поставленную задачу [Л1].

Что касается спиральных антенн (СА), то часто при анализе спираль заменяют решеткой, состоящей из кольцевых элементов [Л9], анизотропно-проводящей моделью, а также переносят результаты, полученные для регулярной спиральной линии бесконечной длины на СА конечной длины и нерегулярные СА с помощью принципа локальной эквивалентности [Л10]. Результаты такого подхода носят скорее качественный, а не количественный характер. Значительная часть характеристик СА определяется экспериментальным путем.

Таким образом, построение корректных электродинамических моделей излучающих структур представляется весьма актуальной задачей.

Цель работы - электродинамический анализ излучающих структур: решение внутренних и внешних задач для криволинейного вибратора, плоской кольцевой антенны, цилиндрической и плоской спиральных антенн с помощью сингулярных интегральных уравнений.

Основные задачи работы:

- внутренний и внешний электродинамический анализ криволинейного вибратора, конформно расположенного на воображаемой цилиндрической поверхности;
- решение внутренней задачи анализа плоской кольцевой (рамочной) антенны с учетом поперечного распределения продольной составляющей вектора поверхностной плотности тока;
- определение входного сопротивления плоской кольцевой (рамочной) антенны для различных электрических длин кольца и различной ширины токопроводящей полоски;
- решение внутренней и внешней задач анализа цилиндрической спиральной антенны с постоянным шагом намотки;
- решение внутренней задачи анализа плоской однозаходной спиральной антенны с постоянным шагом намотки.

Методы исследований. Основу работы составляют методы математического моделирования, математический аппарат электродинамики, математический аппарат теории СИУ, численные методы решения интегральных уравнений. Численные результаты получены с использованием вычислительных алгоритмов, реализованных на ПЭВМ.

Научная новизна работы состоит в применении самосогласованных моделей для электродинамического анализа излучающих структур и разработке строгой теории спиральных антенн. В рамках диссертации решены следующие задачи:

- получено СИУ криволинейного полоскового вибратора, конформно расположенного на воображаемой цилиндрической поверхности, записанное относительно поверхностной плотности тока и его первой производной;
- разработан алгоритм, представляющий собой решение внутренней задачи (определение распределения поверхностной плотности

- тока по антенне) для плоской кольцевой (рамочной) антенны с помощью СИУ, и внешней задачи (расчет ЭМП) излучения антенны с использованием результатов решения внутренней задачи;
- из СИУ выведено простое аналитическое выражение для определения входного сопротивления плоской кольцевой антенны;
- показано, что при электрической длине кольца, кратной длине волны, возникает поперечный резонанс поверхностной плотности тока;
- разработан алгоритм, представляющий собой решение внутренней задачи для цилиндрической спиральной антенны с помощью гиперсингулярного интегрального уравнения, и внешней задачи излучения антенны с использованием результатов решения внутренней задачи;
- разработан алгоритм, представляющий собой решение внутренней задачи для плоской однозаходной спиральной антенны с помощью гиперсингулярного интегрального уравнения;
- установлены режимы распределения тока по плоской и цилиндрической спиральной антенне при различных соотношениях геометрических параметров.

Обоснованность и достоверность. Результаты исследований получены на основе строгих электродинамических и математических моделей. Используемые при этом приближенные методы решения сингулярных интегральных уравнений корректны с формальной математической точки зрения. Контроль результатов осуществлялся: сравнением для некоторых излучающих структур полученных результатов с расчетными данными, приведенными в работах других авторов, полученными с помощью других методов; исследованием внутренней сходимости численных алгоритмов.

Практическая ценность работы. В работе рассмотрены внутренние и внешние задачи электродинамического анализа для четырех физических моделей антенн: криволинейного полоскового вибратора, плоской кольцевой антенны, цилиндрической спиральной антенны с линейным шагом намотки и плоской однозаходной спиральной антенны с линейным шагом намотки. Результаты, полученные в диссертации, имеют большое теоретическое, методическое и практическое значение, связанное с вопросами расчета и практического применения рассмотренных типов антенн.

Методы расчета, разработанные в диссертации, можно обобщить на случай многих антенн того же типа, в частности, конических антенн,

нерегулярных спиральных антенн, спиральных антенн, расположенных на различных телах вращения, а также на случай более сложных антенных систем, например фазированных антенных решеток и т.д. Разработанные математически обоснованные электродинамические модели структур могут быть также использованы в задачах синтеза сложных антенных конструкций. Предложенные алгоритмы расчета антенн могут быть использованы при разработке систем автоматизированного проектирования различных антенно-фидерных устройств.

С помощью моделей спиральных антенн можно построить строгую самосогласованную теорию киральных структур, опираясь на уравнения Максвелла, а не на феноменологические уравнения [Л11], оперирующие параметром киральности.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Самосогласованные алгоритмы решения внутренней и внешней задач для криволинейного полоскового вибратора, плоской кольцевой антенны, однозаходной цилиндрической спиральной антенны с линейным шагом намотки; самосогласованный алгоритм решения внутренней задачи для однозаходной плоской спиральной антенны.

2. Самосогласованные математические модели криволинейного полоскового вибратора, плоской кольцевой антенны, однозаходной цилиндрической спиральной антенны с линейным шагом намотки и однозаходной плоской спиральной антенны, разработанные на основе математического аппарата теории СИУ.

3. Поперечный резонанс поверхностной плотности тока плоской кольцевой антенны при электрической длине кольца, кратной длине излучаемой волны

4. Аналитическое выражение для определения входного сопротивления плоской кольцевой антенны.

5. Численные результаты анализа излучающих структур: комплексные и амплитудные распределения тока по структурам, результаты расчета входного сопротивления плоской кольцевой антенны в зависимости от ее геометрических размеров, диаграммы направленности.

Личный вклад автора. В совместных работах научному руководителю принадлежит постановка задач и определение направлений ведения исследований. Подробное проведение рассуждений, доказательств и расчетов принадлежит диссертанту.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались на следующих конференциях:

- IV Международная научно-техническая конференция «Физика и технические приложения волновых процессов». – Нижний Новгород, сентябрь 2005;

- XXXII Самарская областная студенческая научная конференция. – Часть I: общественные, естественные и технические науки. – Самара 2006;
- V Международная научно-техническая конференция «Физика и технические приложения волновых процессов». – Самара, сентябрь 2006;
- VI Международная научно-техническая конференция «Физика и технические приложения волновых процессов». – Казань, сентябрь 2007;
- VII Международная научно-техническая конференция «Физика и технические приложения волновых процессов». – Самара, сентябрь 2008;
- Международная конференция по математической физике и ее приложениям, сентябрь 2008;
- VI Международная научно-техническая конференция «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций, Казань, ноябрь 2008.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 19 работ, в том числе 10 статей в журналах, включенных в перечень ВАК. Материалы диссертации также вошли в [Л12].

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 98 наименований, приложения, и содержит 79 страниц текста, в том числе 34 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** определена цель диссертационной работы, показана ее актуальность и практическая значимость, определена новизна и обоснована достоверность полученных результатов, представлены основные положения, выносимые на защиту, кратко изложено содержание диссертации.

В **первой главе** диссертации для узкого криволинейного полоскового вибратора (КПВ) решена внутренняя и внешняя электродинамическая задача. Под криволинейным полосковым вибратором (КПВ) понимается металлическая полоска шириной $2l$ и угловой длиной 2ξ , расположенная на цилиндрической поверхности $\rho = a$ (рис.1). Под действием вектора стороннего электрического поля \vec{E}^{cm} , приложенного к зазору угловой шириной $2\varphi_3$, на поверхности антенны возникает вектор поверхностной плотности тока $\vec{\eta}(\varphi, z)$.

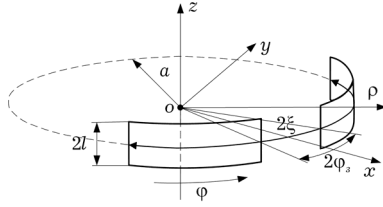


Рис.1. Криволинейный вибратор

Проводник предполагается идеально проводящим, бесконечно тонким и достаточно узким ($2l \ll a$, $2l \ll \lambda$, где λ – длина волны в свободном пространстве), поэтому векторы \vec{E}^{cm} и $\vec{\eta}(\varphi, z)$ имеют только продольные составляющие E_φ^{cm} и $\eta_\varphi(\varphi, z)$, причем составляющая $\eta_\varphi(\varphi, z)$ непрерывна в области зазора ($2a\varphi_s \ll \lambda$). На концах полоски ($\varphi = \pm \xi$) $\eta_\varphi(\varphi, z)$ обращается в нуль, а на краях ($z = \pm l$) – в бесконечность:

$$\eta_\varphi(\varphi, z) = \eta_\varphi(\varphi)(1 - (z/l)^2)^{-1/2}. \quad (1)$$

Выражение (1) можно считать квазистатическим приближением распределения поверхностной плотности тока по ширине полоски [Л14].

В такой постановке относительно неизвестной функции $\eta_\varphi(\varphi)$ и ее производной $\eta'_\varphi(\varphi)$ было получено СИУ с логарифмической особенностью и особенностью типа Коши ($t \in [-1; 1]$):

$$\begin{aligned} \sigma E_\varphi^{cm}(t) = & \int_{-1}^1 \eta_\varphi(t') D_1(t, t') dt' - \int_{-1}^1 \frac{\partial \eta_\varphi(t')}{\partial t'} D_2(t, t') dt' - \\ & - \mathcal{G}^2 \xi^2 \int_{-1}^1 \eta_\varphi(t') \ln|t - t'| dt' + \int_{-1}^1 \frac{\partial \eta_\varphi(t')}{\partial t'} \frac{1}{t - t'} dt'. \end{aligned} \quad (2)$$

В выражении (2) введены нормированные переменные $t = \varphi / \xi$, $t' = \varphi' / \xi$; σ – константа; $D_1(t, t')$, $D_2(t, t')$ – регулярные ядра, $\mathcal{G} = ka$, $k = 2\pi a / \lambda$. При выводе (2) было использовано классическое представление функции Грина в свободном пространстве [Л13]:

$$G(p, q) = \frac{1}{4\pi} \frac{e^{-ikR}}{R}, \quad (3)$$

где R - расстояние между точкой источника $q = q(\rho', \varphi', z')$ и точкой наблюдения $p = p(\rho, \varphi, z)$.

Решение СИУ (2) осуществлялось методом ортогонализирующей подстановки [Л14]. Нормированную амплитудную диаграмму направленности в дальней зоне КПВ от определенной из (2) поверхностной плотности тока можно рассчитать по простой формуле [Л13]:

$$F_{\varphi} = |E_{\varphi}(\varphi)| / |E_{\varphi_{\max}}(\varphi_0)|,$$

где $|E_{\varphi_{\max}}(\varphi_0)|$ максимальное значение составляющей E_{φ} , которое имеет место при $\varphi = \varphi_0$. Проведенные расчеты говорят о том, что функция Грина (3) является удобным и универсальным представлением, позволяющим строить сингулярные и гиперсингулярные интегральные уравнения для различных излучающих структур в различных системах координат. Интегральные уравнения, полученные Поклингтоном и Халленом [Л14] с помощью (3), являются некорректными только вследствие некорректности физической модели вибратора.

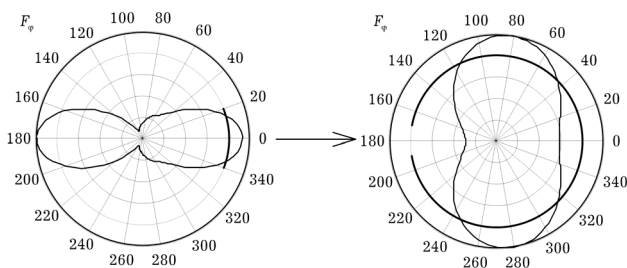


Рис.2. Сдвиг максимума излучения при изменении угловой длины ξ криволинейного вибратора ($2\xi a / \lambda = 0.5$); геометрия КПВ показана на рисунке

Полученные результаты хорошо согласуются с результатами в [Л14], где было использовано другое представление функции Грина. Можно сделать следующие выводы:

- распределение поверхностной плотности тока на криволинейном вибраторе мало зависит от кривизны излучателя. Это означает, что ток, рассчитанный на линейном вибраторе, можно использовать для корректного расчета ЭМП в ближней зоне криволинейных антенн вибраторного типа;

- криволинейный вибратор не имеет нулей в амплитудной диаграмме направленности в азимутальной плоскости. То же можно сказать и об амплитудной диаграмме направленности трубчатого вибратора в меридиональной плоскости;
- при увеличении угловой длины криволинейного вибратора ξ (при неизменной электрической длине $2\xi a / \lambda$) происходит существенное изменение картины амплитудной диаграммы направленности. В частности, происходит сдвиг максимума излучения на 90 градусов (рис.2).

Во **второй главе** диссертации рассмотрена плоская кольцевая антенна (ПКА). ПКА - излучатель электромагнитного поля в виде лежащего в плоскости $z = 0$ бесконечно - тонкого идеально проводящего диска радиуса $a+l$ с зазором $\varphi \in [-\Delta, \Delta]$, в котором действует стороннее электрическое поле \vec{E}_τ^{cm} (рис.3). Под действием \vec{E}_τ^{cm} на антенне возникает поверхностная плотность тока $\vec{\eta}$, непрерывная в области зазора.

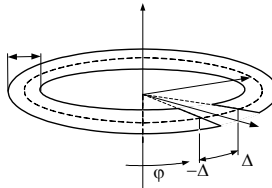


Рис. 3. Геометрия плоской кольцевой антенны

На поверхности антенны выполняется граничное условие:

$$\vec{E}_\tau + \vec{E}_\tau^{cm} = 0,$$

здесь \vec{E}_τ - вектор тангенциального электрического поля, возбуждаемый поверхностной плотностью тока $\vec{\eta}$. Ширина полоски $2l$ намного меньше длины волны λ , поэтому можно считать, что вектор поверхностной плотности тока $\vec{\eta}$ имеет только одну составляющую:

$$\vec{\eta}(\rho, \varphi) = \vec{\varphi}_0 \eta_\varphi(\rho, \varphi),$$

где $\vec{\varphi}_0$ - единичный орт цилиндрической системы координат. Такая постановка задачи является самосогласованной [Л1]. Представляя $\vec{E}_\tau^{cm} = \vec{\varphi}_0 E_\varphi^{cm}$ и $\eta_\varphi(\rho, \varphi)$ комплексными рядами Фурье:

$$E_\varphi^{cm}(\rho, \varphi) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} e_{m\varphi}^{cm}(\rho) e^{-im\varphi}, \quad \eta_\varphi(\rho, \varphi) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \eta_{m\varphi}(\rho) e^{-im\varphi},$$

получаем набор СИУ следующего вида ($t \in [-1; 1]$, $m = 0, 1 \dots \pm \infty$):

$$\sigma e_{m\varphi}^{cm}(t) = \int_{-1}^1 \eta_{m\varphi}(t') R_m(t, t') dt' - \lambda_m \int_{-1}^1 \eta_{m\varphi}(t') \ln|t - t'| dt'. \quad (4)$$

В (4): σ, λ_m - константы; $t = (\rho - a)/l$, $t' = (\rho' - a)/l$ - безразмерные переменные; $R_m(t, t')$ - регулярные ядра СИУ. Решение набора СИУ (4) осуществляется методом ортогонализирующей подстановки [Л14].

Численное решение (4) показало, что при резонансе максимум поверхностной плотности тока протекает по радиусу, удовлетворяющему условию $2\pi\rho_{рез} / \lambda = m$, $m = 0, 1 \dots \infty$ (рис.4).

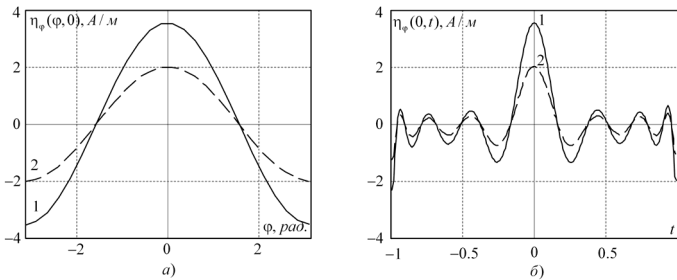


Рис. 4. Первый резонанс тока, $2\pi a / \lambda = 1$: а) – азимутальное распределение, б) – распределение по ширине полоски; 1 – действительная часть η_φ , 2 – мнимая часть η_φ .

Возможно, что при $2\pi a / \lambda = m$ концентрация тока на ребрах полоски равна нулю, и он «фокусируется» на радиусе a .

Из набора СИУ (4) получено выражение для расчета входного сопротивления $Z_{вх}$ антенны. Расчет показал, что чем больше отношение ширины полоски к радиусу кольца, тем сложнее зависимость $Z_{вх}$ от частоты.

Третья глава диссертации посвящена цилиндрической спиральной антенне с линейным шагом намотки (ЦСА). Цилиндрическая спиральная антенна (ЦСА) представляет собой идеально проводящий бесконечно тонкий проводник шириной $2h$, свернутый в спираль радиуса a (рис.5). Угловая ширина спирали 2ξ . Считается, что спираль расположена симметрично относительно начала координат.

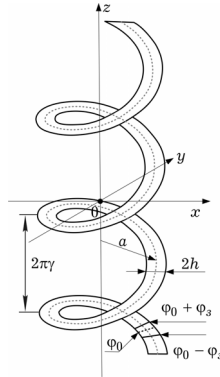


Рис.5. Цилиндрическая спиральная антенна

Параметр γ будем называть коэффициентом намотки. Он является постоянным и не зависит от координат ρ и z , что соответствует винтовой спирали с линейным шагом. Таким образом, мы имеем список геометрических параметров $\chi = \{a, \xi, \gamma, h\}$, обладающий четырьмя степенями свободы. Отсюда вытекает универсальность модели - с ее помощью можно производить электродинамический анализ множества структур: линейных полосок, криволинейных полосок, конформно расположенных на цилиндрической поверхности, замкнутых колец, разомкнутых колец и цилиндрических спиралей с линейным шагом. Распределение продольной составляющей вектора поверхностной плотности электрического тока по ширине полоски при $2h \ll \lambda$ можно считать квазистатическим: $\eta_l(\rho, \varphi) = \eta_l(\varphi)(h^2 - (\rho - a)^2)^{-1/2}$. Относительно $\eta_l(\varphi)$ было получено СИУ вида ($t \in [-1; 1]$):

$$\begin{aligned}
 -\sigma E_l^{cm}(t) &= \int_{-1}^1 \eta_l(t') R(t, t') dt' + \\
 &+ (1 - \mathcal{G}^2) \int_{-1}^1 \eta_l(t') \ln |t - t'| dt' + \frac{2}{p^2} \int_{-1}^1 \frac{\eta_l(t')}{(t - t')^2} dt'.
 \end{aligned} \tag{5}$$

В (5) σ , \mathcal{G} , p - константы, $t = \varphi / \xi$, $t' = \varphi' / \xi$ - нормированные переменные, $R(t, t')$ - регулярное ядро, $E_l^{cm}(t)$ - поле, создаваемое источником сторонней ЭДС в зазоре антенны ($t \in [(\varphi_0 - \varphi_s) / \xi, (\varphi_0 + \varphi_s) / \xi]$). Результаты расчета тока

$$I(t) = \int_{a-h}^{a+h} \eta_l(\rho, t) d\rho$$

и нормированной амплитудной диаграммы направленности (ДН) ЦСА по полю E показаны на рис.6-8. В результате расчетов установлено, что в зависимости от геометрии спирали в распределении тока можно наблюдать режимы стоячих, смешанных или бегущих волн (рис.6-8,а). Бегущие волны ослабевают при распространении по спирали, и к свободному концу коэффициент стоячей волны увеличивается. Для нормированных амплитудных ДН наблюдаются характерные случаи излучения, описываемые приближенной теорией [Л10] (рис.6-8,б).

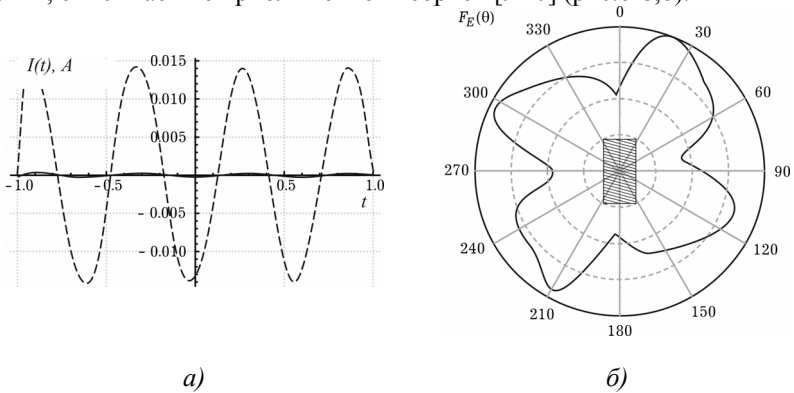


Рис.6. Распределение тока (а) и нормированная амплитудная ДН ЦСА (б), $2a/\lambda = 0.1$; сплошные кривые рис. 6,а - $\text{Re } I$, штриховые - $-\text{Im } I$

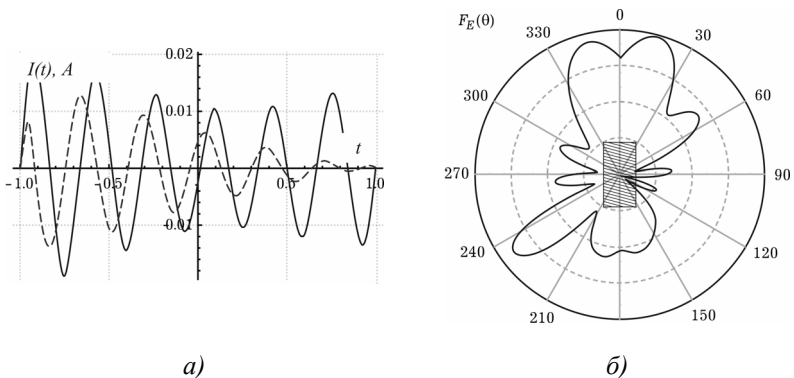
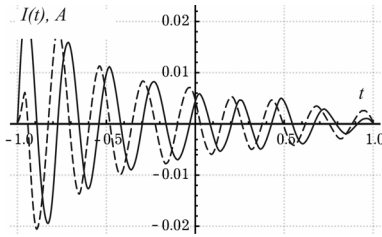
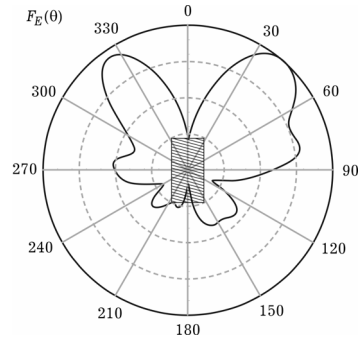


Рис.7. Распределение тока (а) и нормированная амплитудная ДН ЦСА (б), $2a/\lambda = 0.3$; сплошные кривые рис. 7,а - $\text{Re } I$, штриховые - $-\text{Im } I$



а)



б)

Рис.8. Распределение тока (а) и нормированная амплитудная ДН ЦСА (б), $2a/\lambda = 0.6$; сплошные кривые рис. 8,а - $\text{Re } I$, штриховые - $\text{Im } I$

В четвертой главе диссертации изложена методика построения СИУ плоской однозаходной спиральной антенны с постоянным коэффициентом намотки (ПСА) - идеально проводящего бесконечно тонкого проводника шириной $2h \ll \lambda$, свернутого в архимедову спираль, лежащую в плоскости xOy (рис.9).

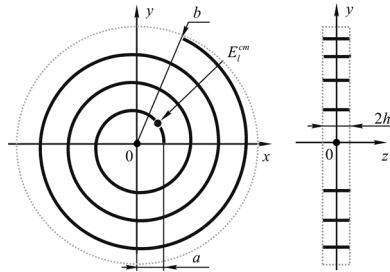


Рис.9. Геометрия плоской спиральной антенны

В зазоре антенны шириной $2a\varphi_3 \ll \lambda$ помещена ЭДС, под действием которой возникает сторонняя продольная напряженность электрического поля E_l^{cm} , создающая на поверхности антенны поверхностную плотность тока η_l , непрерывную в области зазора. При коэффициенте намотки $\gamma \ll a$, выполняются приближенные равенства $E_l \approx E_\varphi$, $\eta_l \approx \eta_\varphi$, существенно упрощающие выводы СИУ, записываемого относительно полного тока $I(t)$ ($t \in [-1; 1]$):

$$\sigma E_{\varphi}^{cm}(t) = \int_{-1}^1 I(t') R(t, t') dt' + \int_{-1}^1 I(t') \left(\text{Lg}(t, t') \ln |t - t'| + \frac{\text{Gc}(t, t')}{(t - t')^2} \right) dt', \quad (6)$$

здесь $R(t, t')$, $\text{Lg}(t, t')$ и $\text{Gc}(t, t')$ - регулярные функции, σ - константа, $t = \varphi / \xi$, $t' = \varphi' / \xi$ - нормированные переменные,

$$I(t) = \int_{-h}^h \eta_{\varphi}(t, z) dz$$

- ток на спирали в предположении квазистатического распределения поверхностной плотности тока по ширине полоски:

$$\eta_{\varphi}(t, z) = \eta_{\varphi}(t) (1 - (z/h)^2)^{-1/2}.$$

На рис.9 показана геометрия, на рис.10 - результаты расчета тока ПСА при внешнем диаметре $2b/\lambda = 1$.

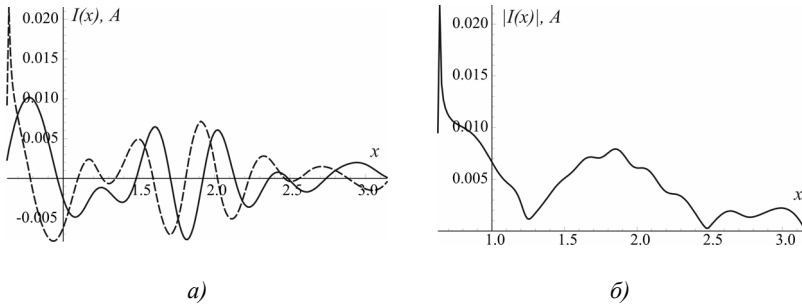


Рис.10. а) – комплексное распределение тока: сплошная кривая - $\text{Re } I$, штриховая кривая - $\text{Im } I$; б) – амплитудное распределение тока, $x = 2\pi\rho/\lambda$

Спираль возбуждается в точке $x = 0.6$. Под x понимается электрическая длина эквивалентного кольца $2\pi\rho/\lambda$. Из рис.10 видно, что в спирали устанавливается режим, близкий к режиму бегущих волн, затухающих при распространении к свободному концу спирали. Характер затухания – осциллирующий. Пики осцилляций расположены вблизи резонансных радиусов спирали.

В **заключении** сделаны соответствующие выводы, сформулированы основные научные и практические результаты диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Построены самосогласованные модели криволинейного вибратора, плоской кольцевой антенны, цилиндрической и плоской спиральных антенн.

2. Для данных структур получены сингулярные и гиперсингулярные интегральные уравнения, записанные относительно продольной составляющей поверхностной плотности тока и ее первой производной.

3. Записаны алгоритмы решения СИУ различными методами (методом ортогонализирующей подстановки и методом дискретных вихрей).

4. Из СИУ плоской кольцевой антенны выведено простое аналитическое выражение для определения ее входного сопротивления.

5. Показано, что при электрической длине кольца плоской кольцевой антенны, кратной длине волны, возникает поперечный резонанс поверхностной плотности тока.

6. Установлены режимы распределения токов в плоской и цилиндрической спиральной антеннах при различных соотношениях между геометрическими параметрами и длиной волны.

7. Выявлено, что на свободном конце спирали наблюдается усиление стоячей волны тока.

ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. *Неганов В.А.* Электродинамический анализ электромагнитного поля в ближней зоне кольцевой полосковой антенны [Текст] / *В.А. Неганов, Н.М. Святкин, Д.П. Табаков* // – Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2006. –Т.9. – №4. – С.38-49.
2. *Неганов В.А.* Расчет входного сопротивления электрического вибратора методом сингулярного интегрального уравнения [Текст] / *В.А. Неганов, М.И. Лемжин, А.А. Сарычев, Д.П. Табаков* // – Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2006. –Т.9. – №4. – С.57-58.
3. *Неганов В.А.* Задача о распределении поверхностной плотности тока по кольцевой полосковой антенне [Текст] / *В.А. Неганов, Д.П. Табаков* // – Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2007. –Т.10. – №4. – С.8-19.

4. *Неганов В.А.* Дифракция плоской электромагнитной волны Н-поляризации на идеально проводящем разомкнутом кольце [Текст] / *В.А. Неганов, Е.И. Пряников, Д.П. Табаков* // – Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2008. –Т.11. – №1. – С.22-29.
5. *Неганов В.А.* Электродинамический анализ криволинейного полоскового вибратора, расположенного на цилиндрической поверхности [Текст] / *В.А. Неганов, Д.П. Табаков, Т.Ю. Чванова, А.А. Шарипова* // – Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2008. –Т.11. – №1. – С.14-21.
6. *Вороной А.А.* Сингулярные интегральные уравнения для анализа диаграммы направленности кольцевой полосковой антенны с учетом распределения тока по проводнику [Текст] / *А.А. Вороной, В.А. Неганов, Д.П. Табаков* // – Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2008. –Т.11. – №2. – С.7-13.
7. *Неганов В.А.* Физическая регуляризация некорректных задач расчета антенн СВЧ [Текст] / *В.А. Неганов, Д.П. Табаков* // – Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2008. –Т.11. – №3. – С.6-14.
8. *Неганов В.А.* Применение сингулярных интегральных уравнений для электродинамического анализа плоской кольцевой антенны [Текст] / *В.А. Неганов, Д.П. Табаков* // – Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2008. –Т.11. – №4. – С.4-16.
9. *Неганов В.А.* Применение сингулярных интегральных уравнений для электродинамического анализа плоской кольцевой антенны [Текст] / *В.А. Неганов, Д.П. Табаков* // – Антенны. –2008. – №4. – С. 25-33.
10. *Неганов В.А.* Применение теории сингулярных интегральных уравнений к электродинамическому анализу цилиндрической спиральной антенны [Текст] / *В.А. Неганов, Д.П. Табаков* // – Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2009. –Т.12. – №2. – С.20-29.
11. *Неганов В.А.* Электромагнитное поле в ближней зоне кольцевой полосковой антенны [Текст] / *В.А. Неганов, Д.П. Табаков* // - Тезисы и доклады XXXII Самарской областной студенческой научной конференции. – Часть I: Общественные, естественные и технические науки, 18-28 апр., 2006 г., г. Самара. – Самара, 2006. – С.202
12. *Неганов В.А.* Теория идентификации электромагнитного поля и его источников по экспериментальным данным при цилиндрическом сканировании [Текст] / *В.А. Неганов, Н.М. Святкин, М.И. Лемжин, Д.П. Табаков* // Физика и техн. приложения волновых процессов:

- тезисы докладов IV МНТК, 3-9 окт., 2005 г., г. Нижний Новгород . - Нижний Новгород, 2005. – С.212-214.
13. *Неганов В.А.* Электродинамическая теория ближнего электромагнитного поля кольцевой полосковой антенны [Текст] / *В.А. Неганов, Н.М. Святкин, Д.П. Табаков* // Физика и техн. приложения волновых процессов: тезисы докладов V МНТК, 11-17 сен., 2006 г., г. Самара . - Самара, 2006. – С.216-221.
 14. *Неганов В.А.* Определение вектора поверхностной плотности тока кольцевой полосковой антенны [Текст] / *В.А. Неганов, Д.П. Табаков* // Физика и техн. приложения волновых процессов: тезисы докладов VI МНТК, 17-21 сен., 2007 г., г. Казань. - Казань, 2007. – С.105-106.
 15. *Неганов В.А.* Применение сингулярных интегральных уравнений для электродинамического анализа плоской кольцевой антенны [Текст] / *В.А. Неганов, Д.П. Табаков* // Физика и техн. приложения волновых процессов: тезисы докладов VII МНТК, 15-21 сен., 2008 г., г. Самара. - Самара, 2008. – С.226-228.
 16. *Градинарь И.М.* Электродинамический анализ криволинейного плоского вибратора, расположенного на цилиндрической поверхности [Текст] / *И.М. Градинарь, Д.П. Табаков, Т.Ю. Чванова* // Физика и техн. приложения волновых процессов: тезисы докладов VII МНТК, 15-21 сен., 2008 г., г. Самара. - Самара, 2008. – С.224-226.
 17. *Неганов В.А.* Самосогласованная теория плоской кольцевой антенны [Текст] / *В.А. Неганов, Д.П. Табаков* // Математическая физика и ее приложения: Тезисы и доклады МКМФ, 8-13 сен., 2008 г., г. Самара. – Самара, 2008. – С.137-138.
 18. *Неганов В.А.* Дифракция плоской электромагнитной волны Н-поляризации на киральном элементе [Текст] / *В.А. Неганов, Е.И. Пряников, Д.П. Табаков* // Проблемы техники и технологий телекоммуникаций: тезисы докладов VI МНТК, 25 – 27 ноября, 2008 г., г. Казань. – Казань, 2008. – С.336.
 19. *Неганов В.А.* Применение сингулярных интегральных уравнений для электродинамического анализа цилиндрической спиральной антенны [Текст] / *В.А. Неганов, Д.П. Табаков* // Проблемы техники и технологий телекоммуникаций: тезисы докладов VI МНТК, 25 – 27 ноября, 2008 г., г. Казань. – Казань, 2008. – С.342-344.

СПИСОК ЦИТИРУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Неганов В.А.* Физическая регуляризация некорректных задач электродинамики [Текст] / *В. А. Неганов.* – М.: Сайнс-Пресс, 2008 – 450 с.
2. *Лиштаев О.Б.* Математическая модель и алгоритм анализа электродинамических характеристик проволочных излучателей сложной геометрии [Текст] / *О.Б. Лиштаев* [и др.] // Радиотехника. – 1992. – № 1-2. – С. 87-88.
3. *Лешеев А.А.* Интегральные уравнения теории тонких вибраторов [Текст] / *А.А. Лешеев* // Радиотехника. – 1995. – № 1-2. – С. 22-25.

4. *Эминов С.И.* Метод собственных функций сингулярных операторов в теории дифракции применительно к электродинамическому анализу вибраторных и щелевых антенн [Текст]: автореф. дис. д-ра физ.-мат. наук / *С.И. Эминов*. – Новгород, 1995. – 43 с.
5. *Неганов В.А.* Сингулярное интегральное уравнение для расчёта тонкого вибратора [Текст] / *В.А. Неганов, И.В. Матвеев* // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 1999. – Т. 2. – № 2. – С. 27-33.
6. *Мухелишвили Н.И.* Сингулярные интегральные уравнения [Текст] / *Н.И. Мухелишвили*. – М.: Наука, 1986. – 512 с.
7. *Тихонов А.Н.* Методы решения некорректных задач [Текст] / *А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин*. – М.: Наука, 1986. – 288с.
8. *Лифанов И.К.* Особые интегральные уравнения и методы их численного решения. Учебное пособие по курсу лекций [Текст]/ *И.К. Лифанов*. – М.: Макс-Пресс, 2006. – 68 с.
9. *Воскресенский Д.И.* Устройства СВЧ и антенны [Текст] / *Д.И. Воскресенский, В.Л. Гостюхин, В.М. Максимов, Л.И. Пономарев*; под ред. *Д.И. Воскресенского*. – Изд. 2-е, доп. и перераб. - М.: Радиотехника, 2006. – 376 с.
10. *Юрцев О.А.* Спиральные антенны [Текст]/ *О.А. Юрцев, А.В. Рунов, А.Н. Казарин* – М.: Сов радио, 1974.
11. *Неганов В.А.* Отражающие, волноведущие и излучающие структуры с киральными элементами [Текст] / *В.А. Неганов, О.В. Осипов* – М.: Радио и связь, 2006. – 280 с.
12. *Неганов В.А.* Современная теория и практические применения антенн [Текст]/ *В.А. Неганов, Д.П. Табаков, Г.П. Яровой*; под ред. *В.А. Неганова*. – М.: Радиотехника, 2009. с. (в печати)
13. *Неганов В.А.* Электродинамика и распространение радиоволн [Текст]: Учебник / *В.А. Неганов, О.В. Осипов, С.Б. Раевский, Г.П. Яровой*; под ред. *В.А. Неганова и С.Б. Раевского*. – Изд. 4-е, доп. и перераб. – М.: Радиотехника, 2009. – 744 с.
14. *Неганов В.А.* Электродинамические методы проектирования устройств СВЧ и антенн [Текст] / *В.А. Неганов, Е.И. Нефедов, Г.П. Яровой*. –М. «Радио и связь» 2002. – 415 с.