

Сведения о выполненных работах в 2017 году
по проекту **«Исследование закономерностей фазовых переходов активных и реактивных электромагнитных полей в зоне их формирования излучающими и приемными системами и разработка на этой основе новых методов зондирования неоднородных сред и объектов»**,
поддержанному Российским научным фондом

Соглашение № 16-19-10272

Руководитель д-р физ.-мат. наук Якубов Владимир Петрович

Разработан метод восстановления формы электропроводящих объектов по измерениям плоского распределения компоненты вектора магнитной индукции с повышением разрешения. Для повышения динамического диапазона было предложено использовать плоскую самоскомпенсированную катушку, которую можно отнести к классу дифференциальных магнитоиндукционных датчиков. Рассмотрена схема зондирования, когда измеряется только одна компонента вторичного магнитного поля. Произвольное распределение вихревого тока, наводимого в электропроводящем объекте, представлено в виде суперпозиции полей элементарных вихревых токов (Суханов Д.Я., Завьялова К.В. Представление поля электродинамического объекта в виде суперпозиции полей элементарных вихревых токов и их томографии //Известия высших учебных заведений. Физика. – 2017. – Том 60. – №11. – С. 28-34). В постановке задачи требуется синтезировать такое распределение тока на плоскости, которое обеспечит формирование сконцентрированного магнитного поля на заданном расстоянии от плоскости. Вектор магнитной индукции элементарного вихревого тока вычисляется на основе дифференциального закона Био-Савара-Лапласа. А поле произвольного распределения вихревого тока вычисляется в виде суммы полей множества элементарных токов с весовыми коэффициентами. По сути, эта операция записывается в виде интеграла свёртки между функцией, описывающей поле элементарного вихревого тока, и функцией, описывающей весовые коэффициенты этих токов на плоскости. Следовательно, весовые коэффициенты распределение тока по заданной магнитной индукции можно вычислить с помощью операции обратной свёртки. Для создания сконцентрированного магнитного поля задаём требуемую функцию вектора магнитной индукции в виде пространственно-локализованного вихря на требуемом расстоянии от плоскости источников. При вычислении обратной свёртки желательно применение регуляризации для минимизации артефактов. На результатах численного моделирования показана применимость данного подхода, а достоверность численной модели подтверждена натурными экспериментами. Численное моделирование было проведено для поля трёх разных прямоугольных витков при одинаковых значениях тока. В эксперименте в качестве датчика переменного магнитного поля использовалась плоская квадратная спиральная катушка со стороной 20 мм. Она не является точечным сенсором, однако имеет максимум реакции в своём центре, и в некотором приближении может

рассматриваться как точечный сенсор магнитного поля. Был проведен эксперимент по зондированию объекта ступенчатой формы из латуни толщиной 500 мкм на дальности 35 мм и получено распределение поля, разрешение которого можно оценить в 39 мм. После обработки предложенным методом было восстановлено изображение этого же объекта с улучшением разрешения до в 28 мм.

Разработана численная модель источника сосредоточенного магнитного поля на расстоянии. Численная модель показала, что синтезированное предложенным способом распределение тока обеспечивает концентрацию магнитного поля на расстоянии. По сути, концентрация обеспечивается за счёт концентрических синфазных и противофазных токов, которые взаимно компенсируют амплитуду поля на низких пространственных частотах, и, сохраняют высокие пространственные частоты. При этом, итоговая амплитуда поля не увеличивается, а наоборот уменьшается относительно одиночного витка с током. Компенсация убывания амплитуды может осуществляться за счёт пропорционального увеличения значений тока в источнике.

Сформулированы требования к технологическим возможностям изготовления подобных источников. Точность задания распределения тока для концентрации магнитного поля зависит от расстояния требуемой области локализации поля. Чем больше расстояние, и чем меньше область локализации, тем с меньшим шагом необходимо размещать витки с током, и тем точнее необходимо задавать значения тока в них. По численным оценкам, для создания поля в 7 раз более локализованного, чем у малого витка с током на дальности 10 см, при диаметре области распределения тока 40 см, требуется пространственный шаг между витками тока порядка 0,5 мм и точность задания величины тока до 1/1000 доли. Изготовление подобного источника является сложной технической задачей, поэтому для упрощения технической части была рассмотрена возможность повышения локализации поля всего в 2 раза. Для этого оказалось достаточно применения 3-х витков с током. Уровень тока в каждом витке определяется подбором длины провода, которое влияет на его сопротивление. Для более точной подстройки, каждый виток должен быть подключен к отдельному цифро-аналоговому преобразователю, задающему амплитуду сигнала, через усилители.

Разработан метод трансмиссионной магнитоиндукционной томографии. Проведено численное моделирование получения магнитоиндукционных томографических изображений. Проведены экспериментальные исследования. Проведён сравнительный анализ численной модели и эксперимента. Рассмотрен случай трансмиссионной томографии тонких плоских объектов. На основе решения в запаздывающих потенциалах уравнений Максвелла в квазимагнитостатическом приближении рассчитана реакция системы из передающей и приемной катушек на точечную электропроводящую неоднородность — аппаратная функция системы. При пространственном сканировании в плоскости параллельной исследуемому объекту трансмиссионным способом, когда катушка-источник находится по одну сторону от объекта, а катушка-приёмник находится по другую сторону,

обеспечивается получение трансмиссионного вихретокового изображения объекта. Это изображение размыто аппаратной функцией системы. Для повышения разрешения предлагается применить к изображению обратную свёртку с регуляризацией с аппаратной функцией системы. Для проверки данного метода проведён эксперимент по трансмиссионному зондированию тестового объекта из алюминиевой фольги на различных частотах и показана возможность повышения разрешения вихретокового изображения.

Разработан комбинированный источник электромагнитного поля на низких частотах размерами много меньше длины волны. Проведены аналитические расчёты распределения электромагнитного поля в ближней зоне и его численное моделирование. Определена технология изготовления источника электромагнитного поля на очень низких частотах. Малоразмерный источник электромагнитного поля для согласования со свободным пространством должен обеспечивать баланс электрической и магнитной энергий, а значит, отношение амплитуды электрического поля к амплитуде магнитного должно быть равно волновому сопротивлению свободного пространства. Предлагается рассмотреть комбинированный источник, состоящий из прямоугольного витка с током и двух прямоугольных пластин с разностью потенциалов между ними, что фактически является плоским конденсатором с увеличенным зазором. Поле конденсатора рассчитано в электростатическом приближении, а поле витка с током на основе квазимагнитостатического приближения и закона Био-Савара-Лапласа. Подобраны значения тока в витке и напряжения конденсатора, обеспечивающие необходимый баланс электрической и магнитной энергий.

Проведено теоретическое исследование фазового состояния поля в перекрывающихся эванесцентных полях двух пространственно разнесенных активных зондов. Установлены характерные особенности поведения фазы суммарного эванесцентного поля в окрестности его каузальной поверхности, характеризующиеся очень быстрым изменением фазы. Указанная особенность подчеркивает правомерность отнесения окрестности каузальной поверхности к той части пространства, в которой реализуется своеобразный фазовый переход (второго рода) электромагнитного поля из одного состояния (квазистатического) в другое (распространяющаяся электромагнитная волна). Зонды моделировались элементарными электрическими и магнитными диполями и располагались в свободном пространстве. Основное внимание акцентировалось на скорости изменения фазы суммарного эванесцентного поля в окрестности его каузальной поверхности. Выяснено, что поведение фазы существенно определяется типом используемых зондов. Если зонды моделировались электрическими диполями, то в их ближней зоне доминировал запас электрической энергии, что и проецировалось на характер изменения фазы. При моделировании зондов магнитными диполями имело место доминирование магнитной энергии. А наиболее интересные особенности в поведении фазы отмечены при рассмотрении неидентичных моделей зондов (электрический и магнитный диполи). Проведенное исследование подтвердило целесообразность создания более сложной (по сравнению с уединенным зондом) конфигурации каузальной поверхности и о потенциальной

возможности более гибкого управления пространственным положением указанной поверхности.

Разработаны алгоритмы извлечения из измеренных информационных параметров ближнепольного интерференционного микроскопа (резонансная частота, добротность, коэффициент отражения) возмущений диэлектрической проницаемости исследуемой среды или объекта. Основное внимание было сосредоточено на способах, использующих коэффициент отражения. Осуществлено их первичное тестирование с целью квалификации нескольких видов фантомов биологических тканей и крови. Проведены численные расчеты и тестовые эксперименты, ориентированные на разработку продуктивных способов извлечения информации из поля, измеренного разработанным ближнепольным интерференционным микроскопом. Особенность конструктивного выполнения зондов микроскопа и используемая полоса частот СВЧ колебаний позволяют проводить тестовую диагностику сред и объектов не только перекрывающимися эванесцентными полями зондов, но, и, в условиях, лишь частичного перекрытия таких полей, а также при проведении диагностики в перекрывающихся дальних полях зондов. Подобная диагностика во встречных дальних полях зондов может представлять самостоятельный интерес в случае зондирования хорошо проводящих сред и объектов. В данном случае в области перекрытия образующихся в среде или объекте эванесцентных полей формируется при определенных условиях специфический интерференционный поток энергии, который несет следы взаимодействия полей зондов с неоднородностями среды или объекта. Достигнуто приемлемое качественное согласие полученных тестовых результатов. Что касается количественного согласия, то его улучшение предполагается получить на основе доработки используемых теоретических представлений о процессе ближнепольного взаимодействия перекрывающихся эванесцентных полей двух активных зондов с исследуемыми средой или объектом.

Показано, что в фоновой среде с поглощением образование скин-слоя происходит в волновой зоне за пределами ближней области. Признаком перехода от ближней зоны к дальней зоне помимо уровня поля служит фазовая структура поля. В волновой зоне формируется поле излучения, а фаза этого поля изменяется по линейному закону. Этот эффект наблюдается как с изменением расстояния, так и частоты. На основе анализа физики формирования фазового перехода квазистатического состояния поля в поле бегущей волны для элементарных электрического и магнитного диполей, расположенных в поглощающих средах сделан вывод о том, что в скин-слой формируется именно на границе этого фазового перехода. Все это дает возможность использовать образование скин-слоя для зондирования различных объектов, находящихся в средах с поглощением. Как оказалось, достаточно путем вариации частоты зондирования подвести скин-слой к границе зондируемого объекта и с помощью пространственной фокусировки локализовать его. Важно, что до области образования скин-слоя ослабление поля не носит экспоненциальный характер и энергия не поглощается фоновой средой. Фокусировка информационного поля осуществляется путем суммирования дифракционных гиперболических скин-слоя в

пространстве частота-координата (Якубов В.П., Вайман Е.В., Шипилов С.Э., Прасатх А. Дифракционная гипербола скин-слоя //Известия высших учебных заведений. Физика. – 2017г. – Том 60. – №11. – С. 51-55). Предлагаемый подход формулируется впервые и позволит существенно увеличить глубину зондирования сред с поглощением.