

На правах рукописи

Марков Сергей Александрович

**Повышение пространственного разрешения внутритрубных
вихретоковых дефектоскопов на основе математической модели
цилиндрического запредельного волновода**

Специальность 01.04.03 - радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Санкт-Петербург

2008

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет”

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор Черепанов Андрей Сергеевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор Павлов Валерий Андреевич.

кандидат технических наук, Федотов Анатолий Николаевич

Ведущая организация:

Санкт-Петербургский Государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"

Защита состоится _____ 2008 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д212.229.01 в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, 2-ой учебный корпус, ауд.470.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет”.

Автореферат разослан _____ 2008 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д212.229.01

доктор технических наук, профессор

Коротков А.С.

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы

В ходе эксплуатации объектов нефтегазовой сферы возникает необходимость проведения неразрушающего контроля, в первую очередь - трубопроводов и обсадных колонн на скважинах. Поскольку, как правило, доступ к объекту контроля возможен только с внутренней стороны (объект может находиться под землей), возникает необходимость в т.н. внутритрубных методах контроля, которые осуществляются с использованием специализированных устройств – внутритрубных дефектоскопов.

Можно выделить четыре основных типа внутритрубных дефектоскопов: ультразвуковые, механические, магнитные и вихретоковые, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. В диссертации рассматриваются вопросы, относящиеся к внутритрубному вихретоковому контролю (ВВК).

Одной из актуальных проблем, относящихся к технологии ВВК, является проблема повышения пространственного разрешения при контроле. Низкое пространственное разрешение может привести к тому, что дефект небольшой площади может быть либо вообще не распознан, либо распознан как дефект меньшей глубины, т.е. менее опасный. Ограниченность пространственного разрешения связана, в первую очередь, с конечностью размеров датчиков магнитного поля, а также конечностью расстояния от дефекта до датчика (дефект может находиться на внешней стороне трубы, кроме того, минимальное расстояние от датчика поля до внутренней стенки трубы может быть ограничено с технической точки зрения). Необходимость учета данных факторов при разработке алгоритма восстановления формы локальных дефектов, приводит к некорректно поставленной обратной задаче электромагнетизма. Однако на настоящий момент даже соответствующая прямая задача не имеет удовлетворительного решения. Имеется лишь возможность численно смоделировать отклик поля на некоторый дефект, при заданных электромагнитных и геометрических характеристиках трубы, а также расположении и размерах датчика, причем моделирование сопряжено с большими вычислительными трудностями. Для решения же обратной задачи. в настоящее время используются полуэмпирические алгоритмы, не позволяющие, к тому же, легко учитывать размеры и расположение датчиков поля.

Таким образом, существует необходимость в эффективном и универсальном алгоритме решения обратной задачи внутритрубного вихретокового контроля, который с физической точки зрения представлял бы собой алгоритм восстановления формы локальных дефектов в цилиндрических запердельных волноводах.

Цель и задачи работы

Основной целью работы является улучшение чувствительности внутритрубных вихретоковых дефектоскопов к локальным дефектам в металлических (в частности, стальных) трубах.

Для достижения указанной цели требуется решить следующие задачи:

- Рассмотреть основные трудности в интерпретации данных внутритрубного вихретокового контроля, а также существующие методы их решения.
- Построить математическую модель цилиндрического запердельного волновода в форме, удобной для разработки эффективного алгоритма обработки данных внутритрубного вихретокового контроля.
- Разработать быстродействующий алгоритм численного расчета полей возмущения дефектов в металлических трубах.

- На основе математической модели цилиндрического запердельного волновода и с использованием численного расчета полей возмущения дефектов разработать эффективный алгоритм восстановления формы локальных дефектов в трубах.
- Проверить эффективность предложенного алгоритма с использованием численных и реальных экспериментов.
- Рассмотреть вопрос выбора оптимальных характеристик внутритрубных дефектоскопов (в плане чувствительности к локальным дефектам в трубах).

Научная новизна

Построена математическая модель цилиндрического запердельного волновода с ферромагнитными неидеально проводящими стенками, в форме удобной для применения пространственно-частотного анализа.

Предложена концепция пространственно-частотного анализа для обработки данных электромагнитных измерений. На основе построенной математической модели цилиндрического запердельного волновода и с применением методов решения некорректных задач разработан эффективный алгоритм восстановления формы локальных дефектов в металлических трубах.

Предложен способ учета конечности размеров датчиков поля при обработке данных внутритрубного вихретокового контроля. Выведены формулы, позволяющие учесть размеры, расположение и ориентацию датчиков цилиндрической и прямоугольной формы.

Предложен принцип "суммирования пространственных спектров", позволяющий максимально эффективно использовать данные с любого количества датчиков поля, в том числе и с различным размером и пространственной ориентацией. Показано, что использование данных с датчиков радиальной составляющей магнитного поля при обработке данных ВВК, позволяет существенно увеличить чувствительность к дефектам, особенно продольно-ориентированным.

Предложен принцип "сокращения" расчетной области при решении низкочастотной электромагнитной задачи методом конечных элементов. Показано, что применение "сокращенной" постановки задачи в сочетании с итерационным методом сопряженных градиентов позволяет получить очень высокую скорость расчета практически без потери точности.

Практическая ценность

Практическая ценность работы заключается в возможности улучшения характеристик внутритрубных вихретоковых дефектоскопов. Возможность улучшения характеристик связана с реализацией эффективного алгоритма обработки данных, получаемых в ходе внутритрубного контроля. Эффективность обработки данных подразумевает, что из получаемых данных появляется возможность извлечь практически максимум полезной информации, и в то же время, насколько возможно, нейтрализовать действие мешающих факторов. Кроме того, появляется возможность еще на этапе разработки внутритрубного дефектоскопа оценить верность различения того или иного типа дефекта в трубе при заданных параметрах дефектоскопа, что позволит разработать дефектоскоп с высокими характеристиками по обнаружению дефектов без необходимости большого объема натурных испытаний.

Положения, выносимые на защиту

- Предложенная математическая модель цилиндрического запердельного волновода позволяет применить концепцию пространственно-частотного анализа.

- Предложенная концепция пространственно-частотного анализа позволяет реализовать близкий к оптимальному алгоритм восстановления формы локальных дефектов при внутритрубном вихретоковом контроле.
- Предложенная концепция пространственно-частотного анализа позволяет предсказать отклик поля от того или иного дефекта при любой форме, размере, расположении и ориентации датчика поля. Появляется возможность использовать одновременно и наилучшим образом данные с любого количества датчиков, в том числе детектирующих различные составляющие магнитного поля. Использование данных с датчиков радиальной составляющей поля позволяет существенно увеличить точность восстановления узких продольно-ориентированных дефектов.
- Разработанный алгоритм решения электромагнитной задачи методом конечных элементов с "сокращенной" расчетной областью позволяет существенно увеличить скорость расчета без потери точности.

Вклад автора в разработку проблемы

Оригинальные подходы к решению поставленных задач предложены автором. Математические выкладки и расчеты проведены автором самостоятельно. Программы, реализующие предложенный алгоритм решения низкочастотной электромагнитной задачи методом конечных элементов с "сокращенной" расчетной областью, а также алгоритм восстановления формы локальных дефектов написаны автором. Автором также был проведен ряд экспериментов на реальных образцах трубы.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов обеспечивается применением хорошо изученных методов анализа и соответствием результатов, полученных аналитическими, численными методами, а также в ходе натурных экспериментов. Кроме того, полученные результаты находятся в хорошем соответствии с данными других исследователей, известными по публикациям.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Текст диссертации содержит 223 машинописных страниц (189 страниц основного текста, 5 страниц – список литературы, 29 страниц в двух приложениях), 107 рисунков и 9 таблиц. Список литературы включает 40 наименований.

Краткое содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель, определен объект и предмет, а также поставлены задачи исследования, перечислены основные научные результаты, дана краткая характеристика содержания работы.

В **первой главе** сделан обзор литературы, относящейся к методам внутритрубного вихретокового контроля. В рамках проведенного обзора рассмотрены физические основы технологии ВВК, которые основаны на существовании т.н. "зоны непрямо́й связи" при возбуждении полого волновода низкочастотным источником электромагнитного поля, располагающимся внутри волновода. Применительно к технологии ВВК, роль волновода, работающего в запердельном режиме (частота поля много меньше критической), играет нефтяная или газовая труба (или труба водоснабжения). Электромагнитное поле возбуждается катушкой с током относительно низкой частоты (десятки и сотни Герц), расположенной соосно с трубой. Датчики поля (массив датчиков, распределенных равномерно по азимутальной координате)

располагаются на достаточно большом расстоянии от возбуждающей катушки (порядка 3-х диаметров трубы). На таком расстоянии основной вклад в напряженность магнитного поля, детектируемую датчиками, вносит не прямая мода, затухающая экспоненциально в направлении оси трубы, а наружное поле, дважды прошедшее через стенку трубы. Соответственно, амплитуда и фаза магнитного поля, детектируемые некоторым датчиком, зависят от толщины трубы в области источника и датчика поля, причем, в первом приближении фаза линейно зависит от толщины трубы, а амплитуда – экспоненциально.

Обзор литературы позволяет сделать вывод, что на данный момент значительная часть работ, посвященных технологии ВВК, касается проблем численного расчета полей возмущения дефектов. Предлагаются разнообразные подходы к решению задачи численного расчета, однако проблема повышения скорости расчета остается крайне актуальной. Часть работ посвящена результатам натуральных испытаний технологии ВВК. Ряд работ также посвящен проблемам интерпретации данных ВВК, например, проблеме устранения эффекта "двойной индикации" дефекта, заключающейся в том, что отклик поля на дефект наблюдается при прохождении около дефекта не только датчиков поля, но и возбуждающей катушки, что нежелательно.

Проведенный обзор литературы, однако, не выявил примеров решения обратной задачи электромагнетизма, применимых для создания эффективного (обеспечивающего высокое пространственное разрешение) алгоритма обработки данных ВВК.

Во **второй главе** дается аналитическое решение электромагнитных задач, необходимое для достижения целей работы. Для этого построена математическая модель цилиндрического запердельного волновода в форме, удобной для применения пространственно-частотного анализа. При построении модели использовалось статическое приближение (эффекты движения не учитывались).

Особенности модели заключаются в том, что решение ищется для Фурье-образов радиальной и аксиальной составляющих комплексных амплитуд электрического и магнитного поля в цилиндрической системе координат, и выражается через модифицированные функции Бесселя, что позволяет свести исходную систему дифференциальных уравнений к алгебраической системе. В частности, Фурье-образ аксиальной составляющей магнитного поля определяется следующим образом:

$$\bar{\bar{H}}_z(\rho, \gamma, m) = \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H_z(\rho, z, \phi) \cdot \exp(-i(\gamma z + m\phi)) dz d\phi \quad (1)$$

Точки над комплексными амплитудами опускаются. Здесь ρ, z, ϕ - координаты цилиндрической системы координат (ось z совпадает с осью трубы), а пару чисел (γ, m) , где m - целое, можно понимать как пространственную частоту.

Общие решения для аксиальной и радиальной составляющих магнитного и электрического поля в некотором диапазоне значений ρ , где отсутствуют сторонние токи, а электромагнитные характеристики среды не зависят от координат, запишутся в следующем виде:

$$\bar{\bar{H}}_z(\rho, \gamma, m) = P_h(\gamma, m) \cdot I_m(\alpha\rho) + S_h(\gamma, m) \cdot K_m(\alpha\rho), \quad (2)$$

$$\bar{\bar{E}}_z(\rho, \gamma, m) = P_e(\gamma, m) \cdot I_m(\alpha\rho) + S_e(\gamma, m) \cdot K_m(\alpha\rho), \quad (3)$$

где $I_m(x), K_m(x)$ - соответственно, модифицированные функции Бесселя 1-го и 2-го рода порядка m от аргумента x , $\alpha = \sqrt{\gamma^2 - k^2}$, $k = \sqrt{i\omega\mu\mu_0\sigma}$ - волновое число. Коэффициенты P и S должны быть найдены из граничных условий, для чего

необходимо иметь общее решение также для радиальных составляющих поля. В частности, для магнитного поля оно было получено в следующем виде:

$$\bar{H}_\rho = -\frac{i\gamma}{\alpha^2 \rho} (P_h I_{m+1}(\alpha\rho)\alpha\rho + P_h I_m(\alpha\rho)m - S_h I_{m+1}(\alpha\rho)\alpha\rho + S_h I_m(\alpha\rho)m) + \frac{\omega \dot{\epsilon} \cdot m}{\alpha^2 \rho} [P_e I_m(\alpha\rho) + S_e K_m(\alpha\rho)] \quad (4)$$

где $\dot{\epsilon} = \epsilon \epsilon_0 - (i\sigma / \omega) \approx -i\sigma / \omega$ - комплексная диэлектрическая проницаемость.

Частота поля настолько мала, что вещественной частью $\dot{\epsilon}$ можно пренебречь. Это, в частности, позволяет использовать масштабное моделирование: при одновременном уменьшении всех размеров в n раз и увеличении частоты поля в n^2 раз, все результаты будут соответствовать исходной задаче.

Используя полученное решение для Фурье-образов, можно решить задачу расчета поля в "невозмущенном" случае, т.е. при отсутствии в трубе дефектов. Решение этой задачи имеет самостоятельную ценность, в частности, оно позволило автору разработать методику одновременного определения магнитной проницаемости и удельной электропроводности трубы при внутритрубных измерениях. Однако более интересным представляется решение сходной задачи:

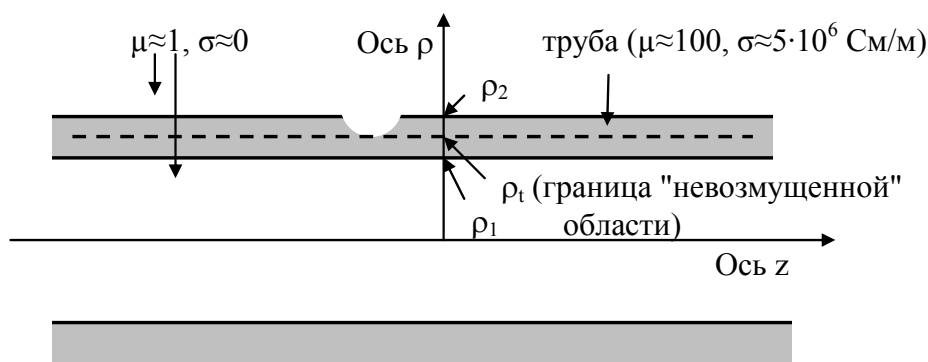


Рис. 1 Чертеж трубы с трехмерными внешними дефектами

Для любых двух радиальных координат, отвечающих условию $\rho_a < \rho_i; \rho_b < \rho_i$, Фурье-образы $\bar{H}_z(\rho_a, \gamma, m)$ и $\bar{H}_z(\rho_b, \gamma, m)$ можно связать аналитически. Для этого необходимо решить алгебраическую систему, вытекающую из граничных условий для радиальной и аксиальной составляющих магнитного поля (в неосесимметричном случае необходимо также учитывать граничные условия для электрического поля). Аналитическое решение данной системы было получено с использованием математического пакета Matlab. Полученное решение дает принципиальную возможность восстановления распределения напряженности магнитного поля на границе "невозмущенной" области, которая, очевидно, наиболее информативна в плане восстановления формы дефектов. Однако требуется, во-первых, доказать применимость рассмотренной модели для моделирования процесса внутритрубного вихретокового контроля, а во вторых, найти связь распределения поля на границе невозмущенной области и собственно формы дефекта. Обе эти задачи могут быть решены с использованием численного расчета полей, в частности, методом конечных элементов (МКЭ).

В третьей главе решается задача численного расчета полей отклика от дефектов. Для этого были рассмотрены характерные особенности задачи и возможные методы ее решения. На основе проведенного анализа, для расчета был выбран пакет моделирования Ansys, реализующий метод конечных элементов. Задача решалась как в двухмерной (для осесимметричных дефектов), так и в трехмерной постановке. Был проведен анализ точности решения в зависимости от условий проведения численных

экспериментов, в первую очередь - от параметров элементной сетки. Высокая точность достигнута при времени расчета порядка нескольких секунд. Проведено сравнение конечно-элементного и аналитического решения для "невозмущенного" случая и получено очень хорошее соответствие.

При решении трехмерной задачи (расчет полей отклика неосесимметричных дефектов) потребовались специальные меры, позволившие достичь приемлемой скорости расчета. В частности, были применены следующие меры:

- Использовалась плоскостная симметрия задачи.
- Плотность элементной сетки по всем осям – неравномерная.
- Применение специальной нормировки устранило необходимость проводить серию экспериментов с изменяющимся положением возбуждающей катушки.
- Проводилась серия экспериментов за один запуск, с ранжированием параметров и автоматическим выводом данных, при этом устраняется необходимость многократного повторения некоторых однотипных операций.

Указанные меры позволяют добиться значительного увеличения скорости расчетов, однако их оказывается недостаточно. Для дальнейшего увеличения скорости расчетов используется идея перехода к "сокращенной" постановке задачи. Ее суть заключается в следующем: сперва решается невозмущенная осесимметричная задача (без дефекта) при заданной частоте поля, электромагнитных характеристиках и геометрических размерах трубы. Далее строится трехмерная модель, включающая в себя дефект (он моделируется путем изменения электромагнитных свойств элементов, занимающих его объем). Элементная сетка трехмерной модели покрывает только относительно небольшую часть пространства ("сокращенную" расчетную область), в центре которой находится дефект. Далее, на границе "сокращенной" области в качестве граничных условий применяются значения векторного потенциала, соответствующие "невозмущенной" задаче, и рассчитывается поле внутри данной области.

Проведенные численные эксперименты показали, что при соблюдении некоторых условий (в частности, при отсутствии дефектов вблизи от границы "сокращенной" расчетной области), такая постановка задачи дает точность, практически аналогичную исходной (полной) модели. При этом скорость расчета значительно повышается (на 1-2 порядка, в зависимости от размера модели), что связано не столько с уменьшением количества элементов, сколько с улучшением обусловленности глобальной матрицы системы, к чему чувствительны итерационные методы решения СЛУ. Соответственно, даже при равном количестве элементов в модели, "сокращенная" постановка дает заметный выигрыш во времени расчета, кроме того, увеличивается максимальное количество элементов в модели, при котором удается получить решение.

В **четвертой главе** рассмотрен вопрос восстановления формы локальных дефектов при некоторых упрощающих предположениях, в том числе осесимметричности дефектов (двухмерный случай). Для этого, в первую очередь, был обоснован переход к эквивалентной задаче (Рис. 2). Основание для такого перехода в том, что при одновременном движении датчика и источника поля, снаружи трубы напротив датчика поле всегда одинаково (если не учитывать возмущения от дефектов). Это приводит к идее совершить переход от источника поля, движущегося одновременно с датчиком, к неподвижному источнику, создающему однородное поле.

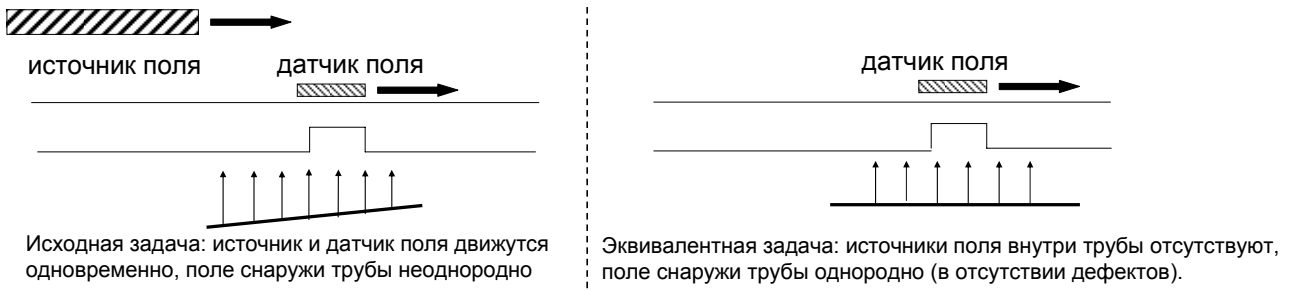


Рис. 2 Иллюстрация идеи перехода к эквивалентной задаче

Корректность такого перехода при некоторых дополнительных условиях, была доказана в численных экспериментах. Таким образом, появляется возможность применить модель, рассмотренную во второй главе (Рис. 1) и, соответственно, восстановить распределение поля на границе невозмущенной области, наиболее информативное в плане восстановления формы дефектов.

При этом оказывается необходимым учитывать геометрические размеры, расположение и ориентацию датчиков поля. Был рассмотрен частный случай датчиков прямоугольного профиля (что практически соответствует твердотельным, например – магниторезистивным датчикам).

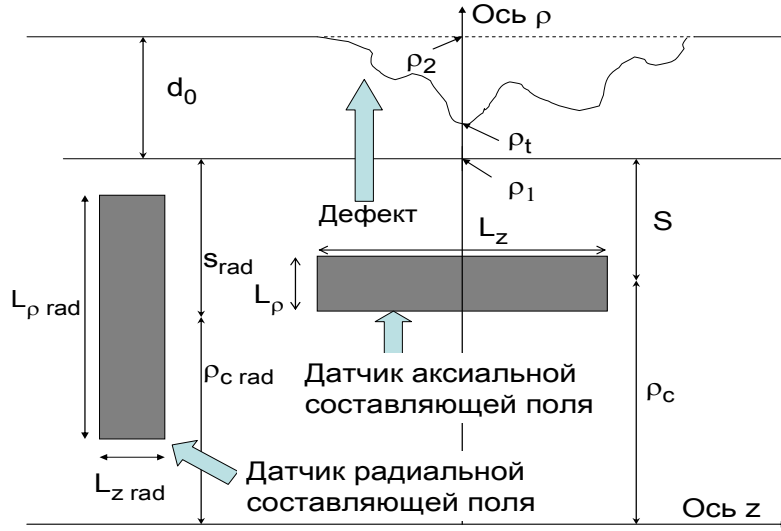


Рис. 3 Чертеж трубы и датчиков поля с указанием обозначений

В данном случае связь Фурье-образа напряженности поля, детектируемой датчиками, с Фурье-образом распределения аксиальной составляющей поля на внутренней стенке трубы хорошо аппроксимируется следующими выражениями:

$$\frac{\bar{H}_{z \text{ exp}}(\gamma)}{\bar{H}_{zn}(\rho_1, \gamma)} = \bar{f}_0(\gamma) \approx \exp(-S \cdot |\gamma|) \cdot \frac{\sinh(0.5|\gamma| \cdot L_\rho)}{0.5|\gamma| \cdot L_\rho} \cdot \text{sinc}(0.5 \cdot L_z \cdot \gamma); \quad (5)$$

$$\frac{\bar{H}_{\rho \text{ exp}}(\gamma)}{\bar{H}_{zn}(\rho_1, \gamma)} = \bar{f}_{0 \text{ rad}}(\gamma) \approx \exp(-S_{\text{rad}} \cdot |\gamma|) \cdot \frac{-i I_1(\gamma \rho_{\text{crad}})}{I_0(|\gamma| \rho_{\text{crad}})} \cdot \frac{\sinh(0.5|\gamma| \cdot L_{\rho \text{ rad}})}{0.5|\gamma| \cdot L_{\rho \text{ rad}}} \cdot \text{sinc}(0.5 \cdot L_{z \text{ rad}} \cdot \gamma). \quad (6)$$

В (5) и (6) присутствуют Фурье-образы нормированных величин, определяемых следующим образом: $H_{zn} = H_z / H_{z0}$; $H_{\rho n} = (H_\rho - H_{\rho 0}) / H_{z0}$. Под $H_{z \text{ exp}}$ понимается напряженность поля, детектируемая датчиком:

$$H_{z \text{ exp}}(z) = \left(\int_{-\infty}^{\infty} \int_{\rho_c - L_\rho \cdot 0.5}^{\rho_c + L_\rho \cdot 0.5} H_z(\rho, z) \cdot \text{rect}(\tau / L_z) d\rho d\tau \right) / (L_z \cdot L_\rho). \quad (7)$$

$H_{z\text{exp}}$, как и H_{zn} и $H_{\rho n}$ есть безразмерная комплексная величина. Пока рассматривается случай осевой симметрии, все функции, зависящие от пространственной частоты, обозначаются одинарной чертой (и термин "Фурье-образ" подразумевает ПФ лишь по аксиальной координате).

Функции $\bar{f}_0(\gamma)$, $\bar{f}_{0rad}(\gamma)$ будем называть пространственно-частотными характеристиками (ПЧХ) датчиков, соответственно, аксиальной и радиальной составляющих поля. Они, подобно АЧХ радиотехнического фильтра, обуславливают степень "сглаживания" быстрых изменений сигнала (комплексной амплитуды напряженности магнитного поля), различие заключается в том, что ПЧХ обуславливает "сглаживание" в пространственной области, а не временной.

Спад ПЧХ датчика радиальной составляющей поля на высоких пространственных частотах будет меньше, чем у ПЧХ датчика аксиальной составляющей, если датчик радиальной составляющей имеет меньшую протяженность ($L_{zrad} < L_z$). В таком случае, радиальный датчик будет более чувствителен к узким дефектам. С другой стороны, радиальный датчик оказывается нечувствительным к протяженным осесимметричным дефектам. Поэтому имеет смысл использовать одновременно данные с датчиков различных составляющих поля. Для этого предлагается суммировать пространственные спектры с весовыми коэффициентами:

$$\bar{H}_{s\text{exp}}(\gamma) = \bar{H}_{z\text{exp}}(\gamma) \cdot \alpha_z(\gamma) + \bar{H}_{\rho\text{exp}}(\gamma) \cdot \alpha_\rho(\gamma) \quad (8)$$

Коэффициенты α_z , α_ρ зависят от соотношения ПЧХ датчиков поля, а также уровня шума в данных с датчиков на заданной пространственной частоте. В частности, если шумовые составляющие в данных с обоих датчиков имеют равный уровень: $\alpha_\rho(\gamma) = \bar{f}_{0rad}(\gamma) / [|\bar{f}_{0rad}(\gamma)| + |\bar{f}_0(\gamma)|]$, $\alpha_z(\gamma) = \bar{f}_0(\gamma) / [|\bar{f}_{0rad}(\gamma)| + |\bar{f}_0(\gamma)|]$.

Принцип суммирования пространственных спектров, естественно, можно обобщить на любое количество датчиков любой ориентации и размеров.

Можно также ввести понятие ПЧХ стенки трубы (точнее, ее невозмущенной части): $\bar{g}(\gamma) = \bar{H}_{zn}(\gamma, \rho_t) / \bar{H}_{zn}(\gamma, \rho_l)$, здесь $\bar{H}_{zn}(\gamma, \rho_t) = \bar{H}_z(\gamma, \rho_t) / H_{z0}(\rho_t)$, соответственно, $\bar{g}(0) \equiv 1$. Эта функция также была получена аналитически.

Имея пространственный спектр (Фурье-образ) данных с датчиков, ПЧХ датчиков, и ПЧХ стенки трубы, можно решить задачу восстановления поля на границе невозмущенной области. Эта задача сводится к решению интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода типа свертки, она является некорректной по Адамару. Устойчивые методы приближенного решения подобных уравнений хорошо изучены, одним из наиболее прогрессивных методов является метод регуляризации Тихонова. Применительно к нашей задаче, выражение для регуляризованного решения запишется в виде:

$$H_{zn}(\rho_t, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\bar{f}_{0s}(-\gamma) \cdot \bar{g}(-\gamma) \cdot \bar{H}_{s\text{exp}}(\gamma)}{|\bar{f}_{0s}(\gamma)|^2 \cdot |\bar{g}(\gamma)|^2 + a\gamma^{2p}} \cdot e^{-i\gamma z} d\gamma, \quad (9)$$

где a - параметр регуляризации, p - порядок регуляризации, $\bar{f}_{0s}(\gamma) = \alpha_z(\gamma) \cdot \bar{f}_0(\gamma) + \alpha_\rho(\gamma) \cdot \bar{f}_{0rad}(\gamma)$. Для определения оптимального регуляризующего множителя в диссертации использовался метод невязки.

Для окончательного решения задачи восстановления формы локальных дефектов, остается связать распределение поля на границе невозмущенной области собственно с

формой дефекта. Численные эксперименты, проведенные с применением МКЭ, показали, что с высокой степенью точности (но при некоторых оговорках) выполняется:

$$H_{zn}(\rho_t, z) = \exp(k^* h(z)), \quad (10)$$

где $k^* = k' + ik''$; $k' = \sqrt{\omega \mu \mu_0 \sigma}$, h - глубина дефекта в некоторой точке.

Повысить точность восстановления формы дефекта можно за счет одновременного учета модуля и аргумента $H_{zn}(\rho_t, z)$. Было установлено, что для этого вполне допустимо использовать простую формулу:

$$h(z) = (\ln(H_{zn}(\rho_t, z)) + \arg(H_{zn}(\rho_t, z))) / 2k', \quad (11)$$

в случае если $k'h < \pi$, что на практике обычно выполняется.

Ключевыми элементами предлагаемого ("регуляризующего") алгоритма восстановления формы дефектов являются формулы (8), (9) и (11). Алгоритм включает в себя также предварительную оценку границы невозмущенной области в каждом пространственном "окне", оценку уровня шумовой составляющей и оптимального регуляризующего множителя, а также оценку погрешности вычисления глубины дефекта.

Были рассмотрены также результаты численных экспериментов, проведенных с использованием МКЭ и результаты эксперимента на реальном образце трубы, проведенного на специально сконструированной установке.

В частности, представлены результаты численных экспериментов, подтверждающих правильность расчета ПЧХ датчиков поля и стенки трубы (функции $\bar{f}_0(\gamma)$, $\bar{f}_{0rad}(\gamma)$, $\bar{g}(\gamma)$), а также результаты, подтверждающие корректность выбранного подхода к оценке оптимального регуляризующего множителя. Показано, что точность восстановления формы дефектов относительно слабо зависит от параметра регуляризации, что связано с четкой дифференциацией областей "полезного сигнала" и "помехи" в пространственном спектре сигналов с датчиков. Проведены численные эксперименты по восстановлению формы осесимметричного дефекта сложной формы при искусственном внесении "шума" в данные, полученные результаты свидетельствуют о возможности радикального увеличения пространственного разрешения при применении предложенного алгоритма. Наибольшая точность восстановления наблюдается в тех областях, где глубина дефекта максимальна, т.е. где и требуется максимальная точность.

На Рис. 4 представлены результаты одного из численных экспериментов. Исходными данными для восстановления формы дефекта были результаты расчета отклика поля на осесимметричный дефект "случайной" формы, смоделированный с помощью МКЭ. Данные дополнительно усреднялись по нескольким точкам конечно-элементной модели (что позволило учесть конечность размеров датчиков). Условия проведенных численных и реальных экспериментов: внутренний радиус трубы: $\rho_1 = 18.5$ мм, "номинальная" толщина ее стенки: $d = 1.5$ мм, ее электромагнитные характеристики: $\mu = 115$, $\sigma = 0.6E7$ См/м.

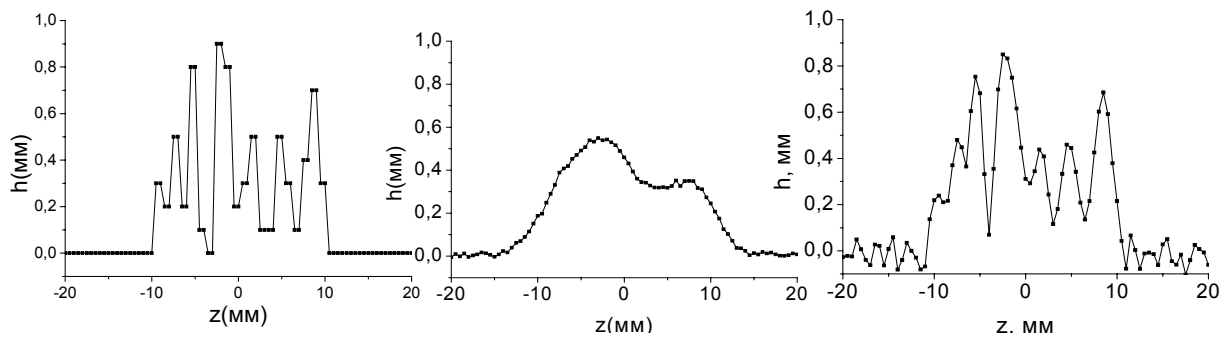


Рис. 4 Пример восстановления формы дефекта. Слева – смоделированный профиль дефекта (заложенный в конечно-элементную модель), в центре – результат восстановления без регуляризации, справа – результат восстановления с использованием предлагаемого (регуляризирующего) алгоритма. $f=600$ Гц.

Для сравнения с предлагаемым алгоритмом приведены результаты восстановления без регуляризации, по простейшей формуле $h = \ln(H_{z \text{ exp}}) / k'$.

В пятой главе алгоритм восстановления формы локальных дефектов обобщен на трехмерный случай (неосесимметричные дефекты). В неосесимметричном случае появляется необходимость работы с двумерными массивами данных, т.е. функции зависят либо от продольной и угловой координаты - (z, ϕ) , либо от "продольной" и "угловой" составляющей пространственной частоты - (γ, m) . Формально задача получения регуляризованного решения сводится к решению двумерного интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода. Однако при решении задачи в целом проявляется ряд особенностей, связанных не только с увеличением размерности задачи.

Появляется необходимость определения двумерной ПЧХ датчиков поля. В общем случае, для этого необходимо проводить многократное интегрирование по объему датчика поля:

$$\bar{f}_0(\gamma, m) = \frac{\bar{H}_{z \text{ exp}}(\gamma, m)}{\bar{H}_{zn}(\rho_1, \gamma, m)} = \frac{\int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left(\iiint_{V_{ax}} H_{zn}(\rho, z, \phi) dV_{ax} \right) \exp(-i(\gamma z + \phi m)) dz d\phi}{\int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H_{zn}(\rho_1, z, \phi) \exp(-i(\gamma z + \phi m)) dz d\phi}, \quad (12)$$

здесь V_{ax} – "внутренняя область" датчика поля. Для практически важного случая аксиально- и радиально-ориентированных датчиков цилиндрической формы (соответствует катушке индуктивности), формулу удалось упростить таким образом, что требуется лишь одно численное интегрирование, что позволило получать численное решение за небольшое время (несколько секунд для сетки из ~ 1000 пространственных частот).

Приняв некоторые допущения, справедливые для низкочастотных полей, двумерную ПЧХ стенки трубы (по определению $\bar{g}(\gamma, m) = \bar{H}_{zn}(\rho_1, \gamma, m) / \bar{H}_{zn}(\rho_1, \gamma, m)$) можно выразить аналитически. Соответственно, для восстановления формы дефектов в общем случае можно использовать двумерные аналоги (8), (9) и (11) (аргументами будут не только γ или z , но и m или ϕ).

Характерной особенностью трехмерной задачи является стремление к нулю функции $\bar{g}(\gamma, m)$ при $m \neq 0$ и $\gamma \rightarrow 0$. Это приводит к тому, что отклик поля на дефекты, особенно в виде продольной щели, оказывается "размыт" по азимутальной координате. Иначе говоря, узкие, продольно ориентированные дефекты при отсутствии специальной обработки данных будут распознаны как более широкие, чем в реальности, но и гораздо менее глубокие. Для правильного распознавания таких дефектов необходимо

применение регуляризующего алгоритма, однако, ввиду наличия "шума" в области пространственных частот, составляющие пространственного спектра (функции $\bar{H}_z(\rho, \gamma, m)$) с $m \neq 0$ и $\gamma \approx 0$ восстановлены быть не могут, равно как и "высокочастотные" составляющие ($\gamma \rightarrow \infty$ или $m \rightarrow \infty$). Существенно улучшить различимость неосесимметричных дефектов можно, используя данные с датчиков радиальной составляющей поля, что обусловлено наличием слагаемого $|m| / (\rho \cdot |\gamma|)$ в выражении для ПЧХ датчика радиальной составляющей поля. Ниже представлен результат численного эксперимента по восстановлению формы продольно-ориентированного дефекта. Размеры датчиков (цилиндрических) обоих составляющих поля, а также зазор между стенкой трубы и "ближним" к ней краем датчиков одинаковые. В исходные данные была искусственно внесена шумовая составляющая. Глубина моделируемого дефекта была принята равной 0.5 мм.

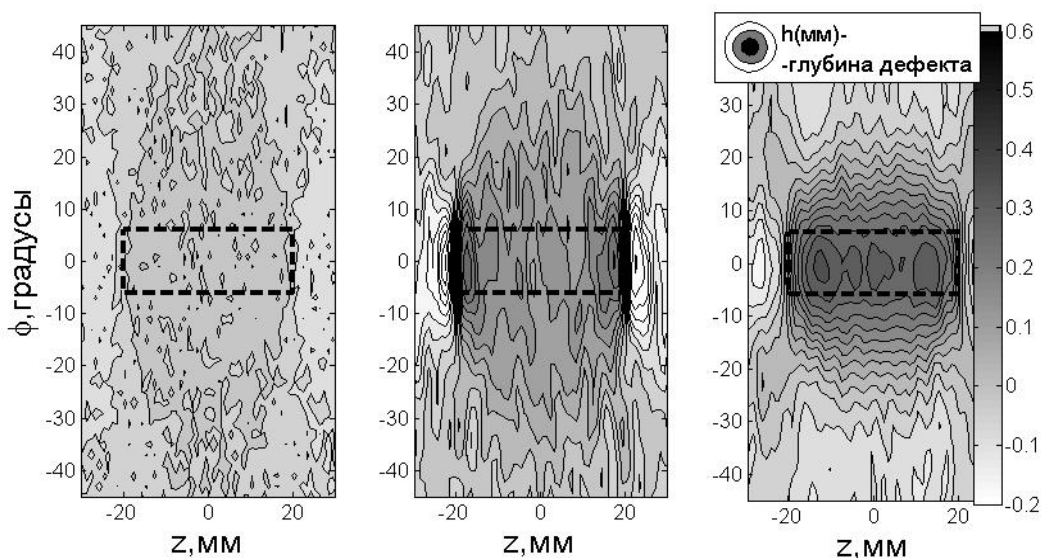


Рис. 5 Результаты численного эксперимента по восстановлению формы дефекта, дефект типа «продольная канавка». Слева – восстановление без применения регуляризации, по центру и справа – с применением регуляризации, соответственно без учета и с учетом данных о радиальной составляющей поля. $f=600$ Гц.

Как видно из Рис. 5, без применения регуляризации восстановленная глубина дефекта менее 10% от истинной, с применением ее – около 25%, а при использовании также данных с датчика радиальной составляющей – порядка 60%.

Заметим, что приведенный на Рис. 5, слева пример восстановления формы дефекта, практически соответствует разрешающей способности существующих на данный момент дефектоскопов: продольные дефекты для них невидимы. Проведенные численные эксперименты с дефектами другой формы также показали существенное увеличение пространственного разрешения.

Были также проведены эксперименты на реальном образце трубы с искусственными дефектами. На трубе были сделаны 4 локальных дефекта разного размера (расположенные с внешней стороны). Условия эксперимента аналогичны Рис. 4.

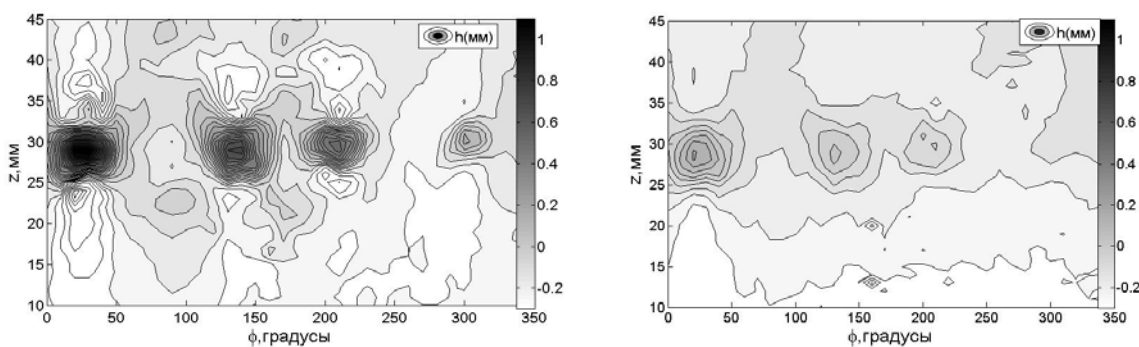


Рис. 6 Результаты восстановления формы неосесимметричных дефектов (реальный эксперимент). Слева – восстановление с использованием предлагаемого алгоритма, справа – без применения регуляризации (восстановление по данным непосредственно с датчиков). $f=300$ Гц.

Результаты обработки экспериментальных данных свидетельствуют о высокой эффективности предложенного алгоритма. Восстановленное значение глубины дефекта составляет порядка 80% от истинного, а при использовании простейших методов обработки данных - 20-40% от истинного. При использовании данных только с аксиального датчика точность восстановления ниже, но применение регуляризации и в этом случае дает существенный результат.

Было проведено исследование влияния размеров датчиков на их чувствительность. Приведен пример выбора оптимальных (в плане пространственного разрешения) размеров датчика. Приведен пример оценки требуемого углового интервала дискретизации при заданных размерах и расположении датчиков.

Рассмотрены особенности восстановления формы дефектов, расположенных на внутренней стенке трубы. Показано, что точность восстановления формы таких дефектов несколько выше, чем точность восстановления "внешних" дефектов, причем для корректного ее восстановления можно положить ПЧХ стенки трубы $\bar{g}(\gamma, m) = 1$. Также предложен новый способ устранения эффекта "двойной индикации" дефекта с применением пространственно-частотного анализа.

В заключении рассмотрены основные научные и практические результаты проделанной работы, которые состоят в следующем:

1) Предложен новый подход к решению обратных низкочастотных электромагнитных задач, основанный на спектральном анализе в области пространственных частот. В рамках предложенного подхода, исходная электромагнитная задача частично сводится к интегральному уравнению Фредгольма 1-го рода, методы решения которого хорошо изучены. В диссертации была рассмотрена задача в цилиндрической геометрии, однако те же подходы можно использовать и для задач в декартовой или сферической системе координат, что выводит возможности пространственно-частотного анализа далеко за рамки рассмотренных в работе применений.

2) Показана возможность существенного увеличения скорости расчета низкочастотных электромагнитных полей методом конечных элементов при применении принципа "сокращения" расчетной области. Применение данного принципа позволило написать программу, позволяющую быстро и точно рассчитывать отклик поля от любых дефектов в стальных трубах, что, в свою очередь, дало возможность реализовать и протестировать алгоритм обработки данных внутритрубного вихретокового контроля.

3) На основе предложенного подхода к решению обратных задач был разработан эффективный алгоритм обработки данных внутритрубного вихретокового контроля.

Разработанный алгоритм позволяет существенно увеличить пространственное разрешение при внутритрубном вихретоковом контроле по отношению к методам обработки данных, применяемым в существующих дефектоскопах, что было подтверждено в численных и натурных экспериментах. Быстродействие алгоритма обеспечивается применением быстрого преобразования Фурье. Универсальность алгоритма обеспечивается возможностью строгого аналитического учета не только частоты поля, геометрических и электромагнитных характеристик объекта контроля, а также и параметров чувствительной части дефектоскопа: размеров, формы, расположения и пространственной ориентации всех датчиков поля (при любом их количестве).

Таким образом, появляется возможность радикально увеличить пространственное разрешение любого существующего внутритрубного вихретокового дефектоскопа только за счет применения предложенного алгоритма обработки данных, причем при этом не потребуются значительные вычислительные ресурсы.

Степень повышения пространственного разрешения будет определяться техническими характеристиками конкретного дефектоскопа. В частности, в проведенных экспериментах на реальном образце трубы, точность оценки максимальной глубины дефекта малой площади повысилась с ~30% (при применении стандартного способа обработки данных) до ~80% от истинной.

4) На основе предложенных подходов появляется возможность не только улучшить характеристики существующих дефектоскопов, но и создать новый дефектоскоп, с крайне высокими характеристиками по обнаружению дефектов. Это связано с тем, что еще на этапе разработки дефектоскопа появляется возможность анализа влияния тех или иных параметров чувствительной части дефектоскопа на его пространственное разрешение. Особенно важно, что появляется возможность одновременного учета данных о различных составляющих магнитного поля, которая принципиально отсутствует у существующих дефектоскопов. Эта возможность позволяет существенно повысить информативность данных об объекте контроля, что было показано в диссертации. Оснащение дефектоскопа датчиками, детектирующими разные составляющие магнитного поля, позволит получить характеристики обнаружения дефектов, принципиально недостижимые на существующих на данный момент устройствах.

В приложениях приведены примеры расчетных программ, использованных при проведении численных экспериментов.

Публикации по теме диссертации

1. **Марков С.А., Каратыгин В.А.** Определение магнитной проницаемости стальной трубы на постоянном токе // XXXII Неделя науки СПбГПУ. Ч.VI: мат. межвузовской научной конф-и, СПб: изд-во СПбГПУ, 2004.- с 7-9.
2. **Марков С.А.** Определение параметров стальных труб по результатам измерения индуцированного постоянного магнитного поля. // VII Всероссийская научная конф-я студентов-радиофизиков: тез. докл. СПб: изд-во СПбГПУ, 2003. - С. 42-44.
3. **Марков С.А.** Измерение характеристик ферромагнитных сплавов с использованием переменного магнитного поля // VIII Всероссийская научная конф-я студентов-радиофизиков: тез. докл. СПб.: изд-во СПбГПУ, 2004. - С. 51-53.
4. **Марков С.А.** Применение программного комплекса Ansys в электромагнитных расчетах для целей неразрушающего контроля // Научные исследования на радиофизическом факультете: Труды СПбГПУ. – 2006. – № 500. – С. 61–69.

5. **Марков С.А.** Компьютерное моделирование при расчете полей возмущения локальных дефектов в стальных трубах // Научно-технические ведомости СПбГПУ, 2006 №6-1, С.89-93 (**Список ВАК**)
6. **Марков С.А.** Итерационный алгоритм восстановления формы локальных дефектов при вихретоковом контроле // Научные исследования и инновационная деятельность: мат. научно-практической конференции, СПб, издательство СПбГПУ, 2007.
7. **Марков С.А.** Решение обратной задачи неразрушающего контроля на основе математической модели запердельного цилиндрического волновода // Деп. в ВИНТИ, 10.01.08, №7- В2008