

УДК 620.179.14

РОЛЬ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В РЕШЕНИИ АКТУАЛЬНЫХ ЗАДАЧ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ***В. П. ЛУНИН***

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Москва, Россия

UDC 621.179.14

THE ROLE OF MATHEMATICAL MODELING IN SOLVING OF ACTUAL TASKS OF NON-DESTRUCTIVE CONTROL***V. P. LUNIN***

Аннотация. Анализ проблем с обеспечением эксплуатационной безопасности объектов энергетики, трубопроводного транспорта, авиации приводит к выводу о необходимости совершенствования методологии проектирования диагностических систем. Методология должна опираться на современные технологии, предусматривающие, в первую очередь, использование адекватных математических моделей процедур электромагнитного, ультразвукового, теплового, рентгеновского контроля, а также эффективных алгоритмов анализа эксплуатационных данных. Компьютерное численное моделирование дает возможность инженеру детально исследовать характер взаимодействия поля/излучения с контролируемым изделием, судить о достоинствах конкретного метода контроля и его ограничениях, выбрать наилучшие условия организации диагностической процедуры, грамотно спроектировать конструкцию преобразователя в конкретной задаче, а также обоснованно задать программу анализа сигналов и принятия решения. Роль математического моделирования продемонстрирована на решении трех актуальных задач неразрушающего контроля. Первая задача относится к использованию строгой математической модели при проектировании системы обработки данных внутритрубного магнитного дефектоскопа для контроля магистральных трубопроводов. Вторая актуальная задача – проектирование системы обнаружения и классификации дефектов теплообменных труб парогенераторов по результатам многочастотного вихретокового контроля. Третья задача – определение кривой вероятности обнаружения дефектов в сварных швах при ультразвуковом контроле с помощью фазированной решетки.

Ключевые слова: математическая модель, магнитный контроль трубопроводов, вихретоковый контроль теплообменных трубок, ультразвуковой контроль сварных швов.

Abstract. Analysis of problems with ensuring the operational safety of energy facilities, pipeline transport, and aviation leads to the conclusion that it is necessary to improve the methodology for designing diagnostic systems. The methodology should be based on modern technologies, providing, first of all, the use of adequate mathematical models of electromagnetic, ultrasonic, thermal, x-ray testing procedures, as well as effective algorithms for analyzing operational data. Computer numerical simulation enables the engineer to study in detail the nature of field/radiation interaction with the controlled product, judge the merits of a particular method of testing and its limitations, choose the best conditions for organizing diagnostic procedure, competently design of transducer in a particular task, and also reasonably set a program for analyzing signals and decision making. The role of mathematical modeling is demonstrated by solving three topical problems of nondestructive testing. The first task relates to the use of rigorous mathematical model in the design of data processing system for in-line magnetic flaw detector for monitoring main pipelines. The second urgent task is the design of a system for detecting and classifying defects in heat exchange tubes of steam generators based on the results of multifrequency eddy current testing. The third task

is to determine the probability curve for detecting defects in welds during ultrasonic testing using a phased array.

Keywords: mathematical model, magnetic testing of pipelines, eddy current testing of heat exchange tubes, ultrasonic testing of welds.

Анализ статистических данных об аварийных ситуациях на эксплуатируемых объектах повышенной опасности (нефте- и газопроводах, атомных станциях, в авиации) за последние десятилетия выявляет тенденцию к их росту, что, учитывая все возрастающее количество таких объектов, не может не вызывать обоснованного беспокойства. Поэтому существенно возросли потребности в надежных средствах определения технического состояния этих сооружений с целью оценки их надежности и оценки остаточного ресурса, что обусловлено потребностями в их более рациональном использовании и безопасности.

Противостоять тенденции роста аварийных ситуаций можно с помощью создания надежных систем неразрушающего контроля и диагностики, предназначенных для оценки технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса оборудования путем мониторинга опасных зон и отслеживания динамики изменения параметров, свидетельствующих о происходящих изменениях в состоянии конструкционных материалов.

Усовершенствованная методология проектирования диагностических систем [1] опирается на новейшие технологии, предусматривающие, в первую очередь, использование адекватных строгих математических трехмерных моделей соответствующих процедур электромагнитного [2], ультразвукового, теплового и/или рентгеновского контроля, а также наиболее эффективных алгоритмов анализа эксплуатационных данных [3]. Компьютерное численное моделирование дает возможность инженеру детально исследовать характер взаимодействия поля/излучения с контролируемым изделием, судить о достоинствах конкретного метода контроля и его ограничениях, выбрать наилучшие условия организации диагностической процедуры, грамотно спроектировать конструкцию преобразователя в конкретной задаче, а также обоснованно задать программу анализа сигналов и принятия решения.

В задачу математического моделирования входит прогноз выходных данных исследуемой системы контроля для конкретных эксплуатационных условий. Помимо этого, математическая модель – инструмент для изучения физики взаимодействия поля (или излучения) с контролируемым изделием и помощи в обучении студентов через наглядное представление перераспределения температуры, силовых и/или эквипотенциальных линий поля, изменения амплитуды отраженного сигнала в результате изменения геометрии, свойств, появления (развития) дефекта. Модель может быть использована для проверки возможности проведения контроля тем или иным способом, прогнозирования уровня сигналов, размещения датчиков и оптимизации процедуры контроля (выбор рабочих параметров, программы сканирования объекта и т. д.). Значительна роль моделирования при исследовании влияния геометрии (размеров, формы, ориентации дефектов), характера свойств (нелинейности, анизотропии, гистерезиса) на прогнозируемые сигналы датчиков.

Пример 1 – Математическое моделирование в решении задачи проектирования системы обработки данных внутритрубного магнитного дефектоскопа [1].

Одной из актуальных проблем трубопроводного транспорта является задача обеспечения высокой эксплуатационной надежности и безопасности труб для перекачки нефти и газа. Ввиду того, что эти трубы эксплуатируются в условиях значительных механических нагрузок, нередко в контакте с агрессивными средами, выход из строя отдельных труб может привести к большим экономическим потерям от остановки эксплуатации и заражению окружающей среды. Поэтому необходимо систематически контролировать трубопроводы во время эксплуатации и вовремя принимать меры для предотвращения аварийных ситуаций.

Характерной особенностью принятой методологии проектирования, ориентированной на нейросетевые алгоритмы классификации и распознавания образа [1], является то, что она использует заранее сформированную базу данных, которая должна содержать сигналы от наиболее часто встречаемых на практике дефектов, параметры которых должны варьироваться в широких пределах. Такая база данных и была создана при помощи математического моделирования путем накопления рассчитанных сигналов от возможных на практике дефектов с известными параметрами. На рис. 1 и 2 приведены рассчитанные на 3D-модели характерные сигналы – распределение осевой (см. рис. 1) и азимутальной (см. рис. 2) составляющих магнитной индукции поля над дефектом от внешней трещины, а на рис. 3 реальные сигналы дефектоскопа как от трещины, так и от коррозии.

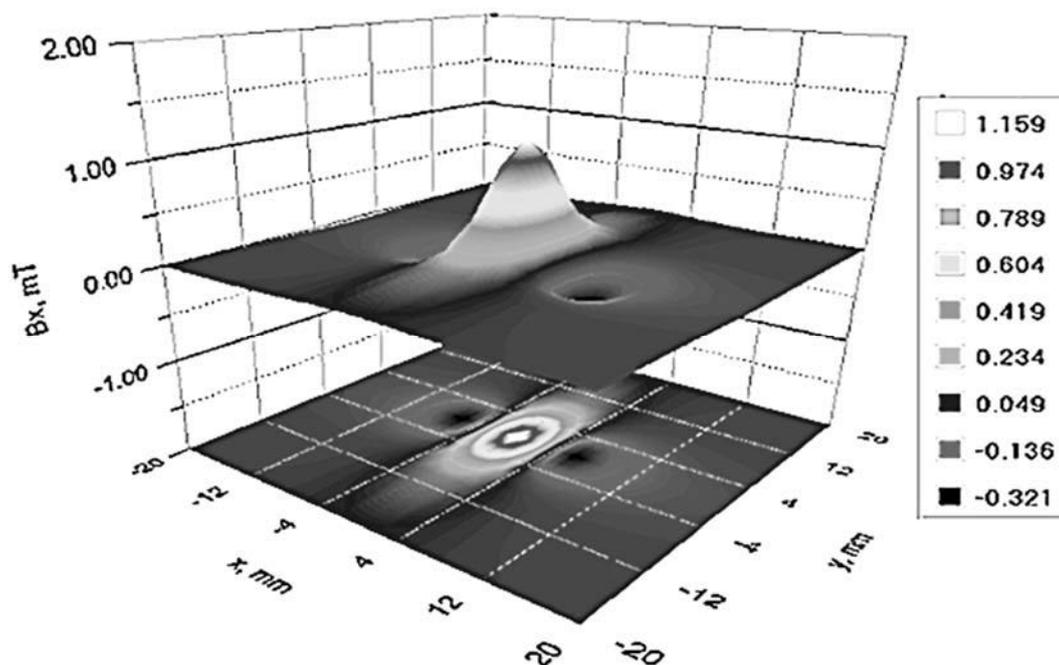


Рис. 1. Модельный сигнал от дефекта – распределение осевой составляющей магнитной индукции поля рассеяния трещины

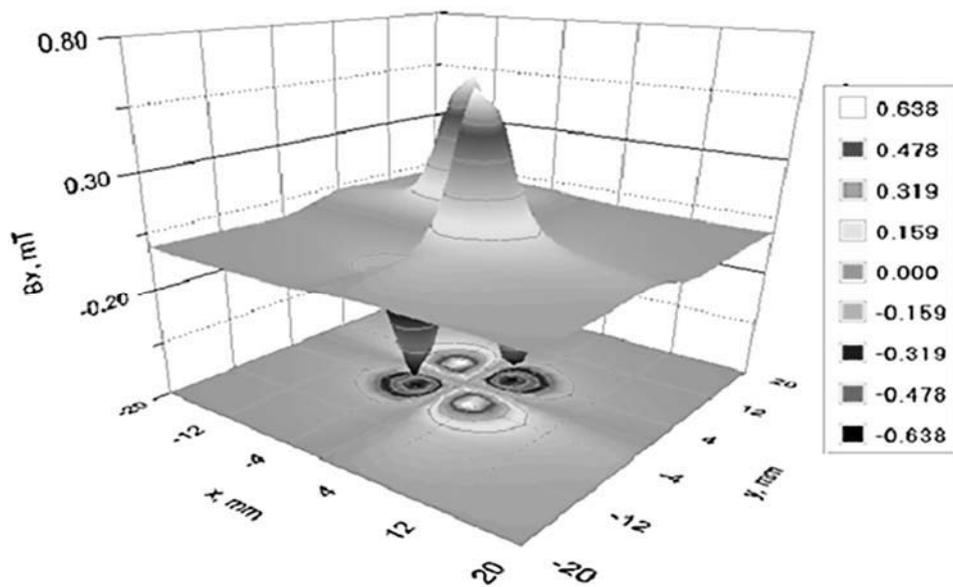


Рис. 2. Модельный сигнал от дефекта – распределение азимутальной составляющей магнитной индукции поля рассеяния трещины

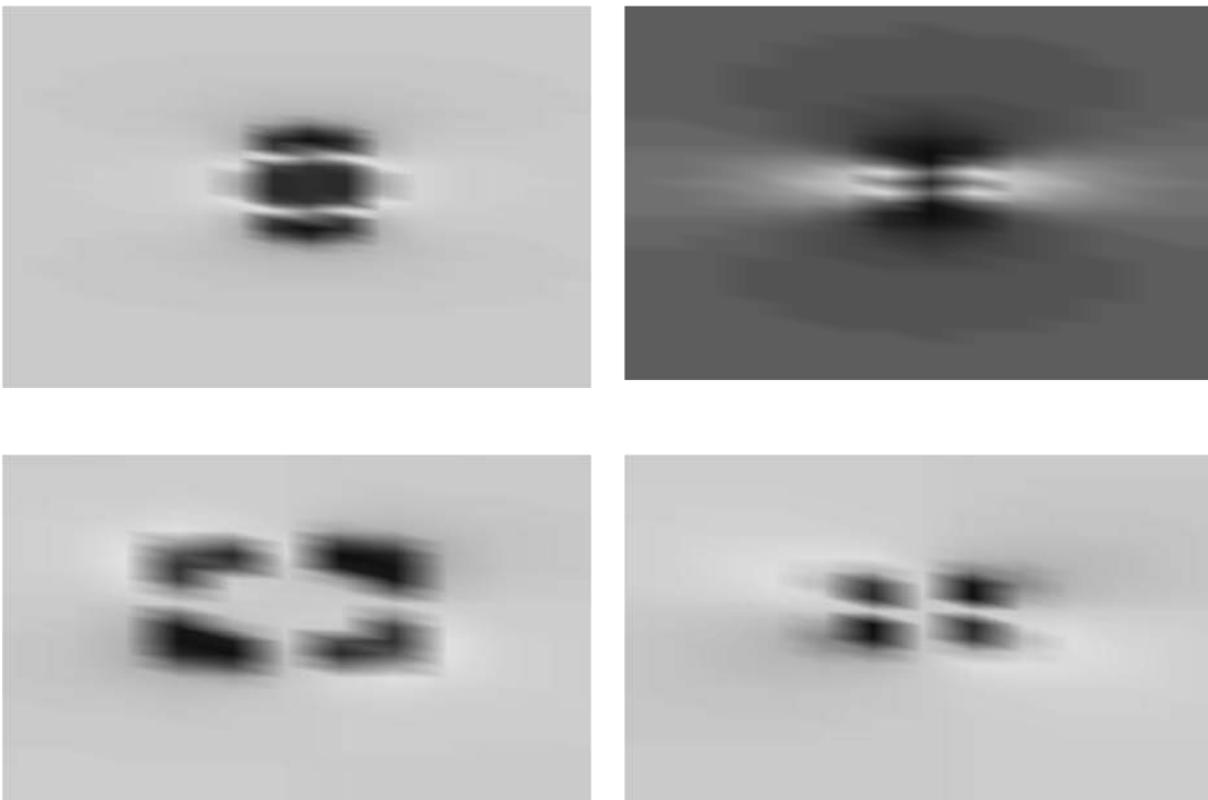


Рис. 3. Типичные реальные сигналы: осевая (вверху) и угловая (внизу) составляющие поля от дефектов типа коррозия (слева) и трещина (справа)

Подробность базы данных, т. е. шаг изменения параметров дефекта, определялась необходимой точностью оценки параметров исследуемого дефекта, а также предполагаемым уровнем погрешности измерения поля рассеяния. Вследствие того, что спектр различных конфигураций дефектов, параметры которых необходимо определять на практике, достаточно велик, а параметры этих дефектов могут изменяться, в общем случае, в очень широких диапазонах, база данных имела значительные размеры (порядка тысячи). Также следует заметить, что топография поля рассеяния зависит не только от параметров дефекта, но и от таких неинформативных влияющих (мешающих) факторов, как зазор между измерительным преобразователем и поверхностью объекта контроля (ОК), магнитные свойства материала, геометрические параметры ОК, скорости сканирования первичного преобразователя и т. д.

Обеспечить высокую достоверность результатов контроля, обусловленную значительной стоимостью самого контроля и ответственностью объекта контроля (магистрального трубопровода), а также заданные нормы точности и разрешающей способности можно лишь с помощью строгого согласования алгоритмов анализа данных с конструктивными особенностями измерительной системы, а также предусмотрев в них возможность варьирования условий эксплуатации.

В качестве (неконтролируемых) эксплуатационных факторов, сопровождающих процедуру контроля внутритрубным магнитным дефектоскопом, могут рассматриваться: изменение рабочего зазора между датчиками и внутренней поверхностью трубы в процессе движения (2...7 мм); изменение толщины стенки отдельных труб на различных участках магистрального трубопровода (толщина стенки трубы может варьироваться от 6 до 16 мм); поля намагничивания; изменение магнитных свойств ферромагнитного материала трубы в процессе длительной эксплуатации (характеристика $B(H)$ за десятки лет эксплуатации может отличаться от исходной на 20 %...40 %); влияние локальной остаточной намагниченности ферромагнитного материала в областях напряженного состояния металла; изменение скорости движения снаряда внутри трубы (от 0,5 до 4 м/с).

Для отстройки от мешающих факторов реализован один из вариантов инвариантного преобразования с использованием амплитудных признаков осевой и азимутальной составляющих магнитной индукции, измеряемых в процессе контроля трубопровода магнитным дефектоскопом, при этом вид функции преобразования одного из признаков и целевой функции подбирается, и функция преобразования другого признака строится как интерполяционная по узловым значениям с вариацией контролируемых параметров и эксплуатационного фактора в выбранном диапазоне. Показано [1], что применение разработанного метода к отстройке от изменения намагниченности и толщины трубы обеспечило уменьшение погрешности оценки глубины и эквивалентного диаметра дефектов типа коррозии в 2–2,5 раза.

Пример 2 – Проектирование системы обнаружения и классификации дефектов теплообменных труб парогенераторов по результатам много-частотного вихретокового контроля.

Этапы проектирования алгоритмического обеспечения системы много-частотного вихретокового контроля теплообменных труб парогенераторов АЭС с ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 с помощью проходного дифференциального преобразователя, помимо создания математической (конечно-элементной) модели объектов контроля с учетом реальных электрофизических свойств элементов конструкции, включали этапы модельных исследований влияния на сигнал мешающих факторов (конструктивных элементов, помех), а также формирования банка сигналов от широкого спектра дефектов, в том числе тех, которые были реализованы в модели. Заключительные этапы предполагают разработку алгоритмов предварительной обработки сигналов (фильтрация помех, отстройка от влияния мешающих факторов), формирование набора признаков для обнаружения и параметрической оценки дефектов и, наконец, разработку автоматизированного классификатора дефектов и его настройку [1, 3, 4, 6].

К настоящему времени для решения этой важнейшей задачи атомной энергетики необходимо найти эффективный алгоритм отстройки сигнала дифференциального преобразователя от одновременного влияния совокупности эксплуатационных факторов при контроле, которыми являются:

- нередко неконтролируемая неровность (волнистость) внутренней поверхности трубки, что связано с особенностью производства теплообменных труб в России (так называемая *pilger*-проблема);

- наличие конструктивных элементов – металлических дистанционирующих решеток, причем конструкции этих решеток могут отличаться от станции к станции, стенки «горячего» и «холодного» коллекторов, а также антивибрационных решеток в районе гибов;

- наличие электропроводящих отложений, в первую очередь, на основании меди, очаги которых могут быть случайным образом расположены на внешней поверхности трубки [5];

- наличие очагов с отложениями магнетита, которые также могут образовываться в разных местах на внешней поверхности трубки.

В случае образования трещины в области конструктивного элемента (например, под краем дистанционирующей решетки) и наличия в этой же области магнетита и/или медного отложения, да еще неровность внутренней поверхности трубки, приводят к тому, что сигнал от дефекта маскируется сигналами от этих мешающих факторов и выделить информативную часть сигнала становится чрезвычайно сложно.

Кроме того, задача усложняется тем, что электрофизические характеристики как электропроводящих отложений (электропроводность), так и магнетита (магнитная проницаемость), в общем случае, неизвестны и их значения могут находиться в очень широком диапазоне.

На рис. 4 представлены полученные на 3D-математической модели действительная (вверху) и мнимая (внизу) составляющие комплексного сигнала для наиболее сложной ситуации – трещина в центре (глубина 80 % от толщины

трубки, длина 10 мм, раскрытие 20 мк) находится под краем дистанционирующей решетки (слева) в окружении медного слоя (толщиной 50 мк) и магнетита (над медью толщиной 0,5 мм), отложения расположены справа от центра.

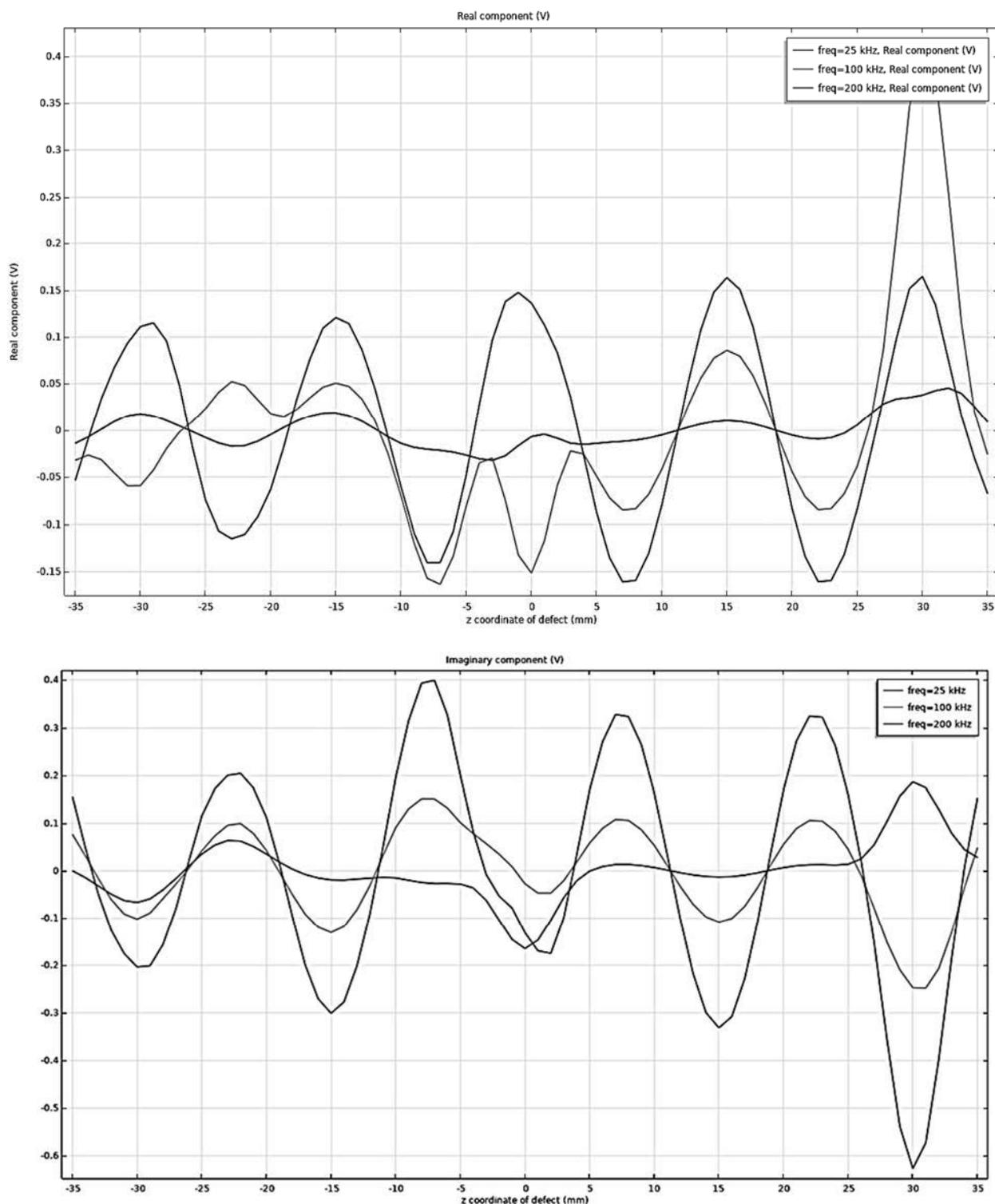


Рис. 4. Действительная (вверху) и мнимая (внизу) составляющие рассчитанного на модели комплексного сигнала от трещины (в центре), дистанционирующей решетки (слева от центра), отложений меди и магнетита (справа от центра) при наличии максимального pilger-шума

Влияние *rilger*-шума смоделировано изменением формы внутренней поверхности по всей длине синусоидой с амплитудой 100 мк (наибольшая волнистость, встречающаяся на практике) и периодом 15 мм (половина длины решетки).

Пример 3 – Расчет кривой вероятности обнаружения дефектов с помощью численного моделирования процедуры ультразвукового контроля сварных соединений в авиационной и космической отрасли с применением фазированной акустической решетки (ФАР) и с учетом мешающих факторов [7]. Рассмотрен случай контроля плоских дефектов типа непровара и трещины в корне шва с помощью секторного сканирования. По результатам моделирования найдена условная высота трещин по уровню в 10 % от опорного сигнала. По результатам численных экспериментов рассчитаны кривые вероятности обнаружения дефектов.

Для контроля плоских дефектов в сварных швах малой толщины используют наклонные преобразователя ФАР частотой от 5 до 10 МГц с количеством элементов от 8 до 16. Для моделирования был выбран преобразователь 10L32-A1 с призмой SA1-N60S-IHC фирмы R/D Tech, входящий в комплект поставки дефектоскопа на ФАР OmniScan MX.

В качестве дефектов рассмотрены трещины различного размера (глубины) – от 0,125 до 5 мм с шагом 0,125 мм, направленные под углом 90° относительно плоскости донной поверхности. Путем деления на разнонаправленные секции геометрия трещины была приближена к реальной и создавалась случайным образом.

Решалась задача во временной области, геометрия модели приведена на рис. 5.

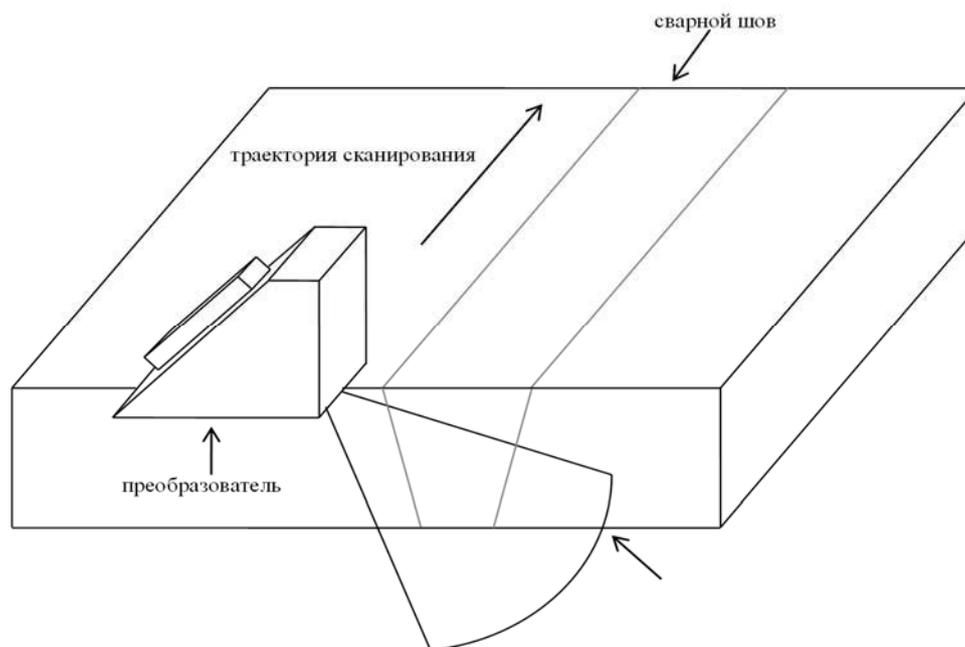


Рис. 5. Перемещение преобразователя ФАР при сканировании объекта при контроле сварного шва

Преобразователь расположен таким образом, чтобы при секторе сканирования от 30° до 60° трещина оказалась полностью «прозвучена».

Для получения выходного сигнала в каждый момент времени расчета производилось интегрирование значения давления по площади пьезопластины. Полученные сигналы складывались со сдвигом, имитируя фокусировку и изменение угла ввода, формируются А-сканы для различных углов ввода. Таким образом, было реализовано секторное сканирование от 30° до 60° с шагом в 1° , фокусировка производилась на глубину 10 мм.

На рис. 6 представлены примеры модельных акустических изображений трещин, полученные в ходе расчетов на модели.

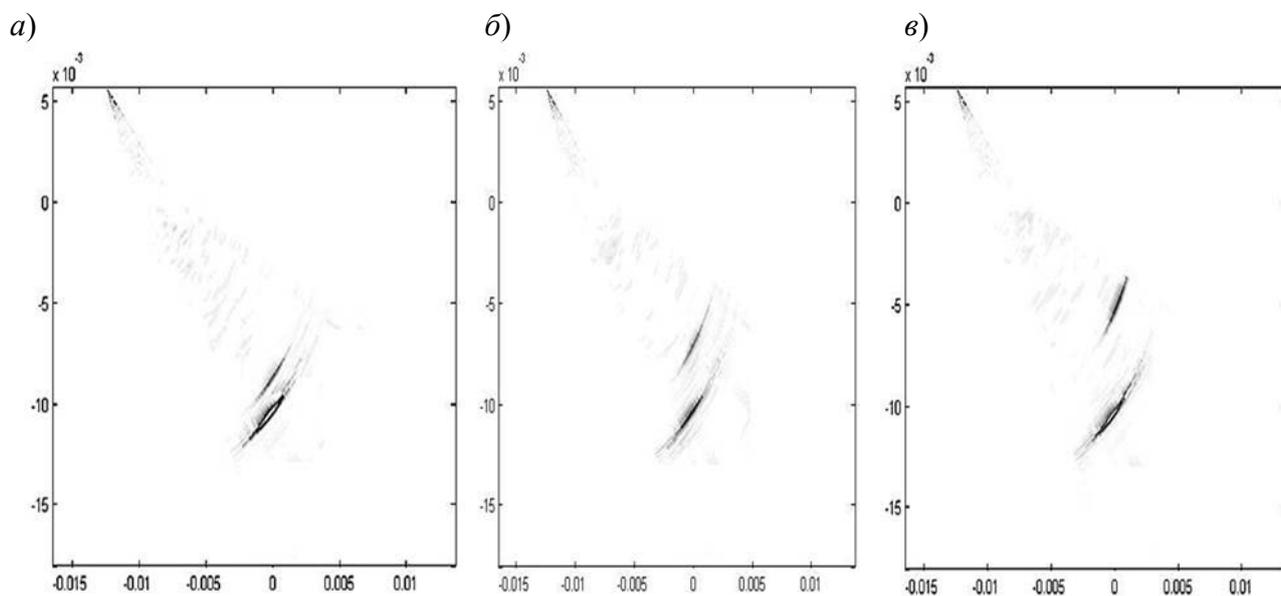


Рис. 6. Примеры акустических изображений трещин глубиной 1,625 мм (а), 3,250 мм (б) и 5,000 мм (в)

Заключение. Роль математического моделирования продемонстрирована на решении трех актуальных задач неразрушающего контроля. Первый пример относится к использованию строгой математической модели при проектировании системы обработки данных внутритрубного магнитного дефектоскопа для контроля магистральных трубопроводов. Второй пример продемонстрировал возможности математического моделирования при проектировании системы обнаружения и классификации дефектов теплообменных труб парогенераторов по результатам многочастотного вихретокового контроля. Третий пример использования численного моделирования – при реализации способа расчета кривой вероятности обнаружения дефектов для случая ультразвукового контроля с применением фазированной решетки в сварных швах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лунин, В. П.** Проектирование программно-алгоритмических средств для систем электромагнитного контроля энергетического оборудования / В. П. Лунин. – Москва: МЭИ, 2016. – 196 с.

2. Программа конечно-элементного моделирования MagNum3D: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ / В. П. Лунин, А. Г. Жданов. – № 2007611345. – Оpubл. 28.03.2007.

3. **Лунин, В. П.** Алгоритмическое обеспечение для надежного выявления дефектов теплообменных труб / В. П. Лунин, А. Г. Жданов // Вестн. МЭИ. – 2015. – № 2. – С. 114–122.

4. Предэксплуатационные испытания программы PIRATE на выявление и оценку глубины дефектов теплообменных труб парогенераторов АЭС / А. Г. Жданов [и др.] // Теплоэнергетика. – 2020. – № 8. – С. 29–36.

5. Выявление и оценка объема отложений на теплообменных трубках парогенераторов АЭС по эксплуатационным данным штатного вихретокового контроля / А. А. Столяров [и др.] // Теплоэнергетика. – 2020. – № 2. – С. 62–71.

6. **Лунин, В. П.** Перспективы использования цифровых моделей для решения актуальных задач в атомной энергетике / В. П. Лунин, А. Г. Жданов // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: материалы 7 Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 24–25 сент. 2020 г. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2020. – С. 106–113.

7. **Пилюгин, С. О.** Определение кривой вероятности обнаружения дефектов в сварных швах при ультразвуковом контроле фазированной решеткой / С. О. Пилюгин, В. П. Лунин // Дефектоскопия. – 2016. – № 6. – С. 35–41.

E-mail: LuninVP@mpei.ru.