

Обработка и представление информации в MFL методе неразрушающего контроля

Д.А.Слесарев, А.А.Абакумов (мл.)

Метод неразрушающего контроля, основанный на магнитных потоках рассеяния (MFL), находит в настоящее время все более широкое применение в различных отраслях промышленности, где возникает задача контроля изделий и элементов из ферромагнитных материалов. Характерными примерами являются магнитная внутритрубная дефектоскопия, дефектоскопия стальных канатов, дефектоскопия стальных резервуаров, дефектоскопия бурительных труб. Приборы, реализующие этот метод, выпускаются различными мировыми производителями, в числе которых Rosen, Silverwing, NDT Technologies, ИНТРОН ПЛЮС и пр. Основное преимущества этого метода заключаются в том, что он позволяет обнаруживать дефекты сплошности материала, как на поверхности, так и по всей толщине изделия (стенки трубы, листа или сечению каната) при наличии достаточного зазора между датчиком и изделием (несколько мм), что обеспечивает высокую производительность контроля. Еще одним важным преимуществом является возможность оценки размеров обнаруженных дефектов по измерительным данным. При этом существенно, что процесс обнаружения дефектов и оценки их параметров по получаемым измерительным данным хорошо поддается автоматизации [1]. В настоящей статье рассматриваются типовые методы обработки и представления информации при MFL контроле.

Опишем кратко физический принцип метода регистрации магнитных потоков рассеяния. Намагничивающая система, состоящая из магнитов и магнитопровода, создает магнитный поток в объекте контроля (основной поток), при этом величина магнитной индукции такова, что расположенный в области намагничивающей системы материал объекта контроля находится в состоянии магнитного насыщения. Намагничивание объекта контроля до насыщения обуславливает наличие потока рассеяния над объектом контроля, величина потока рассеяния для протяженной области обратно пропорциональна сечению контролируемого материала. Таким образом, измерение магнитной индукции над объектом контроля позволяет при некоторых условиях¹ оценивать площадь его сечения.

В результате локального изменения сечения материала, например, вследствие наличия дефекта сплошности, появляется дополнительный поток рассеяния над поверхностью объекта контроля, который регистрируется датчиком при сканировании вдоль поверхности, как показано на Рис. 1.

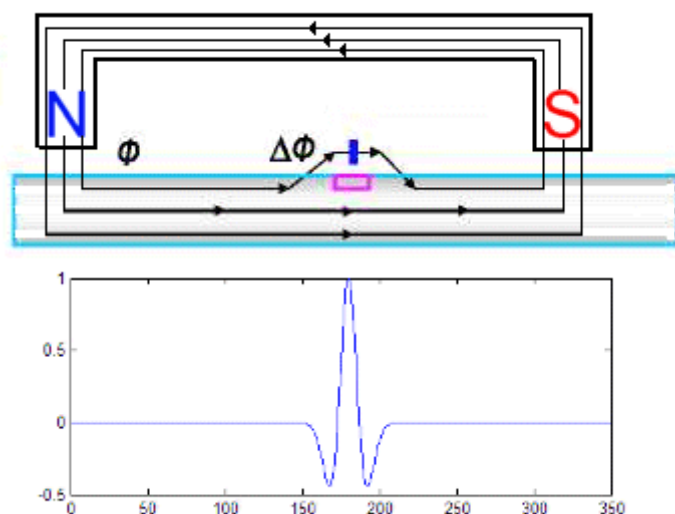


Рис. 1

¹ В первую очередь неизменной величиной зазоров между намагничивающей системой и объектом контроля и между датчиком и объектом контроля

На рисунке показано распределение осевой составляющей вектора магнитной индукции поля. При этом величина локального изменения потока рассеяния зависит от размера несплошности – площади ее сечения и протяженности. При контроле объекта осуществляется перемещение магнитной системы вместе с датчиком вдоль контролируемой поверхности — сканирование, получаемый в результате сигнал показан под изображением магнитной системы.

Таким образом, метод регистрации магнитных потоков рассеяния позволяет с одной стороны оценивать сечение или толщину материала контролируемого объекта (например, стенки трубы или сечение стального каната), с другой стороны – обнаруживать и оценивать размеры локальных дефектов (например, различных типов коррозии).

Для регистрации магнитного поля могут использоваться различные типы датчиков, наиболее распространенные из которых – датчики Холла и индуктивные катушки. Датчики Холла выдают на своем выходе электрический сигнал, пропорциональный величине индукции магнитного поля, индуктивные катушки – электрический сигнал, пропорциональный скорости изменения магнитного потока, проходящего через катушку [2]. Таким образом, при использовании индуктивных катушек для измерения величины магнитного потока необходимо дополнительно интегрирование выходного сигнала.

Измерительные системы, основанные на датчиках Холла, при пространственном сканировании позволяют непосредственно получить распределение величины потока рассеяния по пространственной координате. При использовании индуктивных катушек измеряемая величина оказывается зависимой от скорости сканирования, и требует применения специальных схем отстройки от изменения скорости, в связи с чем измерительные системы на индуктивных датчиках оказываются чувствительными к резким изменениям скорости, что приводит к появлению помех в измерительном сигнале. Это является недостатком индуктивных датчиков. Их преимущество заключается в высокой стабильности показаний и отсутствия собственного шума, в отличие от датчиков Холла, выходной сигнал которых содержит некоторый собственный шум.

Для регистрации распределения потока рассеяния над всей контролируемой поверхностью объекта используются линейки датчиков, осуществляющие синхронное измерение магнитной индукции в ряде точек, расположенных на определенном расстоянии друг от друга. Моменты измерения, как правило, также обеспечивают равное расстояние между точками измерения вдоль направления сканирования — шаг дискретизации Δx . Важным является вопрос выбора шага дискретизации в продольном и поперечном направлении. Одним из основных критериев выбора этого шага выступает погрешность восстановления сигнала минимально обнаруживаемого дефекта, размеры которого в свою очередь определяется условиями контроля и характеристиками магнитной системы.

На рис. 2а показан типовой сигнал поля рассеяния точечной коррозии стенки трубы при сканировании ее внутритрубным дефектоскопом. Размер этого дефекта составляет $T \times T$, где T – толщина стенки (в приведенном примере $T = 8$ мм). Если рассмотреть протяженность сигнала по уровню 0.2 от максимума, то видно, что по x протяженность составляет примерно 30 мм, а по y — 60 мм. Если не предполагать дополнительной обработки, то в качестве ошибки восстановления сигнала дефекта можно рассмотреть ошибку оценки амплитуды сигнала, и посчитать ее как:

$$\Delta A \leq F'_{xmax} \Delta x / 2, \quad (1)$$

где F'_{xmax} — максимальное значение производной по x сигнала от минимального дефекта, предполагая наихудший случай — попадание максимума между двумя соседними отсчетами. Тогда для выбранной допустимой величины ошибки можно определить максимально допустимый шаг дискретизации. Для приведенного примера, если задаться допустимой ошибкой 25%, требуемый шаг дискретизации получится примерно 3 мм. Применение дополнительной обработки сигнала от дефекта позволяет уменьшить ошибку оценки его параметров и/или снизить требования к шагу дискретизации. Наилучший результат позволяет получить кусочная сплай-интерполяция. На рис. 3 показан срез рассматриваемого сигнала по линии одного датчика, причем звездочками отмечены дискретные измеренные значения и непрерывной линией — сплай-интерполяция, построенная по этим точкам. Этот

тип интерполяции требует наличия как минимум 3 точек с каждой стороны от максимума (между максимумом и соседним минимумом). В данном случае это 15 мм, поэтому шаг дискретизации должен быть не более 5 мм. При этом погрешность интерполяции составит менее 5 % от амплитуды сигнала. Таким образом, в результате достигается значительное снижение ошибки оценки амплитуды при увеличении шага дискретизации. В поперечном направлении сигнал спадает значительно более плавно и поэтому шаг дискретизации, то есть шаг между датчиками, может быть выбран больший — в данном случае до 15 мм. В результате сигнал на дискретной сетке имеет размер примерно 6x6. Недостатком интерполяции является высокая чувствительность результирующего значения амплитуды сигнала от дефекта к погрешности измерения (по сути, к шуму измерительного сигнала). В этой связи такой подход может использоваться только в случае слабого уровня помехи при необходимости оценки в первую очередь максимального значения или размаха сигнала от дефекта. При высоком уровне помехи необходимо уменьшать шаг дискретизации с целью возможного осреднения между соседними отсчетами.

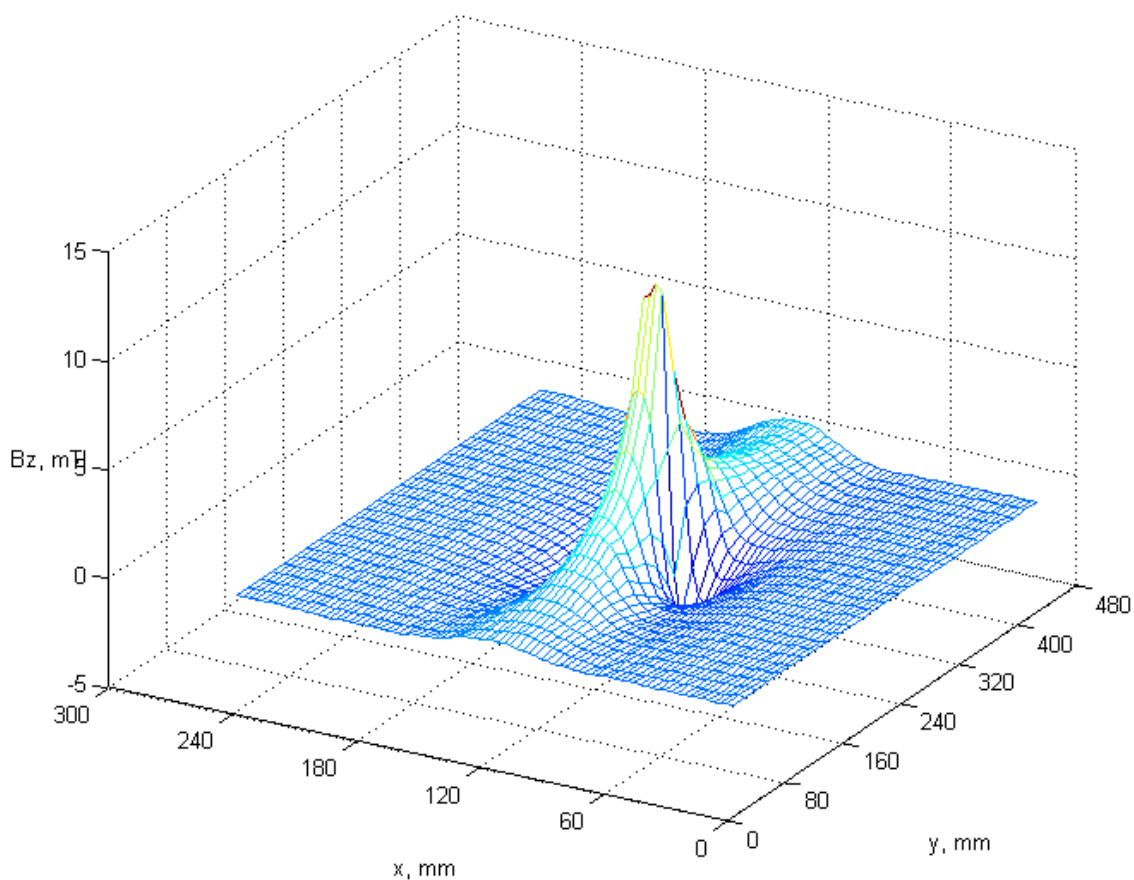


Рис. 2а

Если ставится задача оценки размеров дефекта по его сигналу, то полученная матрица отсчетов используется для решения обратной задачи [3]. Точность оценки зависит от точности расчета этих параметров и устойчивости решения обратной задачи. Для повышения точности оценки следует увеличивать размерность матрицы сигнала от дефекта, что также требует сокращения шага дискретизации. В приведенном примере матрица центральной части сигнала от дефекта имеет размер примерно 10x10 отсчетов.

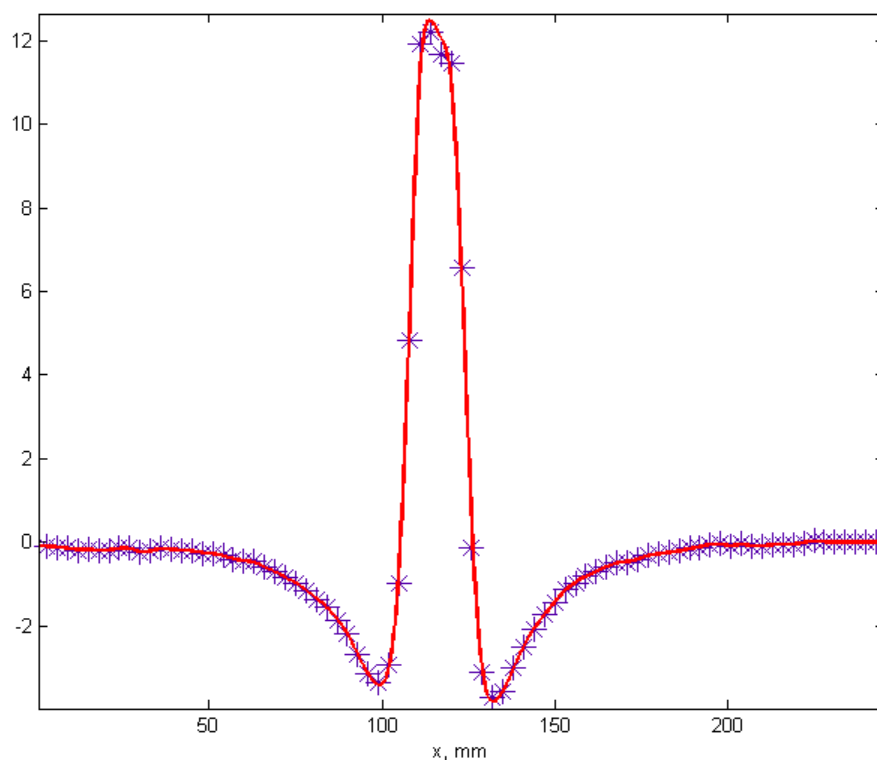


Рис. 3

Получаемые с магнито-измерительной системы сигналы подвергаются типовым операциям обработки, цель которых извлечь полезную информацию и ослабить влияние помех. Как было отмечено выше, полезная информация может быть разделена на две составляющие — информацию о площади сечения (или толщине) контролируемого металла, и информацию о локальных дефектах. Площадь сечения влияет на абсолютное значение магнитной индукции, усредненное по области объекта, находящейся под магнитной системой. Поэтому для оценки площади сечения используют низкочастотную фильтрацию, подавляющую высокочастотные шумы и локальную флуктуацию свойств объекта, выступающую зачастую в роли помехи, и обусловленную, например, «накаткой» горячекатаной трубы при внутритрубной дефектоскопии [4], или шагом свивки при дефектоскопии стальных канатов. При выборе параметров НЧ-фильтра учитывают как характерные локальные свойства объекта контроля (например, период «накатки»), так и характеристики магнитной системы. Частота среза должна быть ниже величины, обратной межполюсному расстоянию, чтобы подавить проявление переходных процессов для участков объекта контроля с резким изменением эффективной площади сечения. На рисунке 4 в качестве примера показана исходная (синий график) и сглаженная (красный график, искусственно смещенный вниз) дефектограммы потери сечения каната, полученные с помощью дефектоскопа Интрос. На исходной дефектограмме присутствует характерная регулярная помеха от свивки прядей каната.

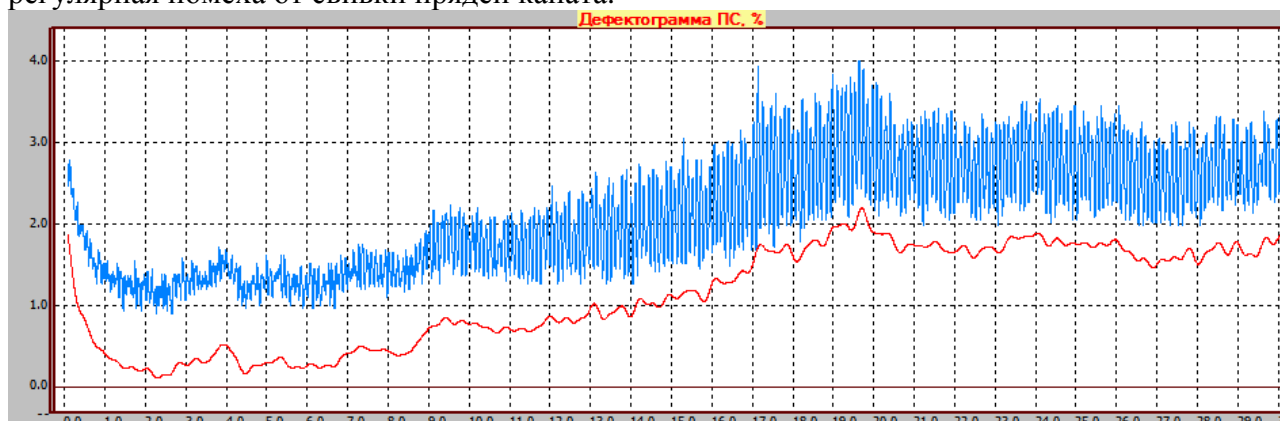


Рис. 4

Локальные дефекты вносят возмущения магнитного потока, которые особенно хорошо заметны на дифференциальной дефектограмме. Эта дефектограмма может быть получена либо с помощью дифференциального датчика, либо путем дифференцирования сигнала абсолютного датчика. Последнее реализуется с помощью высокочастотного фильтра при соответствующем выборе его частоты среза. Частоту среза и порядок фильтра выбирают таким образом, чтобы сигнал типового дефекта (в частности, при дефектоскопии канатов это обрыв одной проволоки) подвергался минимальному искажению или ослаблению. В качестве допустимого можно выбрать, например, ослабление не более чем на 5%. Следует отметить, что при использовании индуктивных катушек дифференциальная дефектограмма оказывается очень чувствительной к неравномерности скорости движения датчика вдоль объекта контроля.

Полученные измерительные данные после описанной выше предварительной обработки предоставляются графически для анализа оператору, либо подвергаются дальнейшей автоматической обработке. Основными способами графического представления данных в MFL контроле служат: одномерная дефектограмма, В-скан и С-скан. Типичный пример одномерной дефектограммы показан на рис. 4; она дает, как правило, распределение некоторого интегрального показателя (потери сечения каната или толщины стенки) вдоль координаты объекта [5]. Другой пример приведен на рис. 5 – дефектограмма участка эксплуатационной колонны скважины [6]. С-скан представляет собой продифференцированное по времени распределение величины индукции магнитного поля вдоль внутренней поверхности эксплуатационной колонны. Под С-сканом показана интегральная диаграмма, характеризующая среднюю по сечению толщину стенки, позволяющая эффективно выявлять стыки трубных секций. Распределение подобного интегрального показателя вдоль объекта контроля позволяет автоматизировать процесс обработки данных, в частности, осуществлять автоматическое разбиение на трубные секции, автоматическое выявление сварных швов и пр.

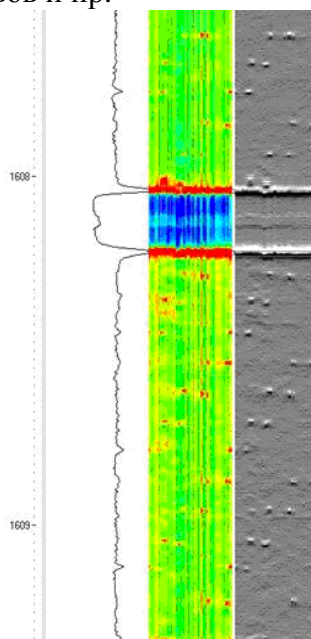


Рис. 5

В-скан и С-скан позволяют анализировать распределение дифференциальных или абсолютных характеристик поля рассеяния как вдоль направления движения измерительной системы, так и вдоль линейки датчиков. На рис. 6 показаны рядом С-скан (а) и В-скан (б) участка днища стального резервуара с дефектами типа точечной коррозии. В-скан позволяет проследить сигнал отдельных датчиков, сопоставить их с соседними и численно оценить максимальное значение сигнала, что важно для интерпретации данных. Однако это возможно только при относительно небольшом диапазоне изменения величины сигнала. В случае большого изменения абсолютного значения сигналы датчиков начинают друг на друга накладываться и их разделить становится невозможно. В то же время С-скан позволяет

хорошо разделить сигналы отдельных датчиков, но характеризует текущее значение сигнала некоторым цветом в соответствии с цветовой шкалой, которая носит в целом качественный характер. Определение численного значения и количественное сравнение амплитуды сигналов в разных точках при этом непосредственно по диаграмме невозможно, хотя соответствующие программные продукты, предоставляющие такой вид дефектограмм (например, ПО Wintrosog для дефектоскопа Интрокор), обеспечивают возможность с помощью курсора определить точное значение сигнала в произвольной точке. Анализ С-скана заметно производительнее анализа В-скана, однако следует отметить, что результат существенно зависит от правильности настройки цветовой шкалы.

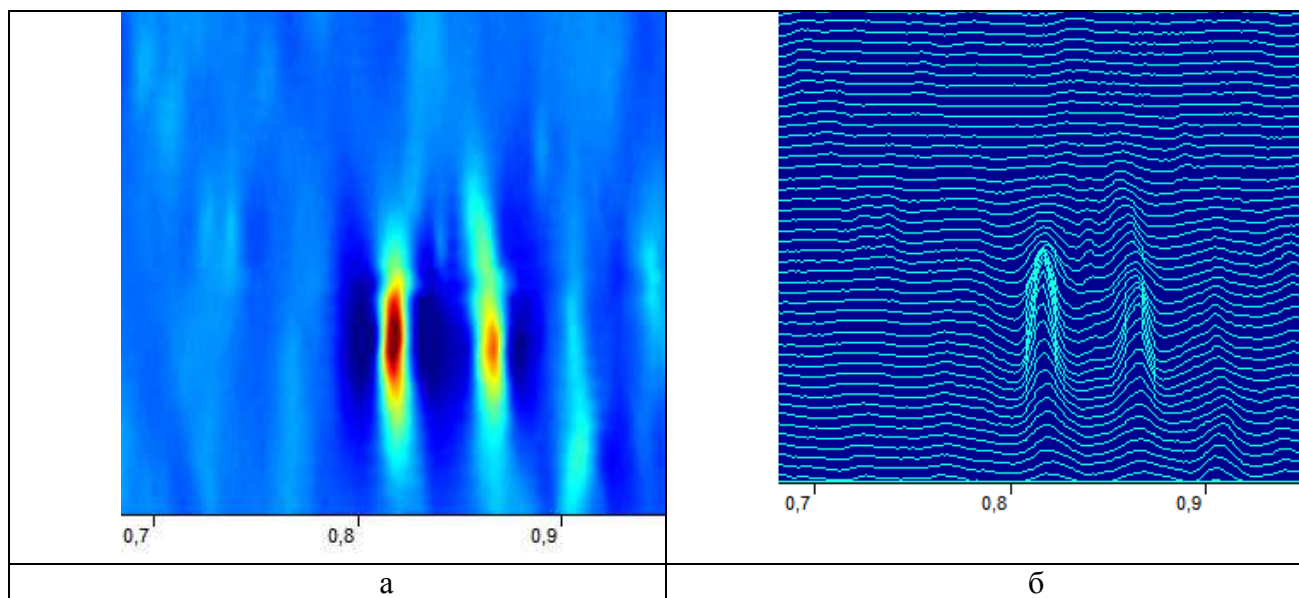


Рис. 6

Высокая производительность магнитного контроля и единообразие получаемых данных создают предпосылки для автоматизированной обработки инспекционных данных. Современное программное обеспечение дефектоскопических систем позволяет выполнять автоматизированные операции обработки, например, ПО Wintros для дефектограмм канатов, ПО Wintrosog для дефектограмм стальных листов. Наиболее востребованной операцией является автоматизированное обнаружение дефектов. Она включает в себя две составляющие: поиск областей дефектов и локализацию отдельных дефектов. Эффективность этой операции определяется двумя показателями – вероятностью пропуска дефекта и вероятностью ложного обнаружения. Снижение вероятности пропуска всегда влечет за собой повышение вероятности ложного обнаружения. Качество локализации дефекта характеризует, насколько хорошо могут быть разделены между собой близко расположенные дефекты и, по сути, определяет пространственное разрешение системы в целом. Возможность выделить отдельные дефекты особенно актуальна при решении задачи оценки глубины дефекта по его сигналу. Результат операции автоматического обнаружения дефектов должен контролироваться оператором, поскольку нулевой вероятности пропуска дефекта и нулевой вероятности ложного обнаружения добиться для реальных объектов контроля невозможно.

В заключении следует отметить, что MFL-метод неразрушающего контроля обладает достаточно большой информативностью и обеспечивает высокую производительность, но его эффективное использование для конкретных объектов предполагает проектирование оптимальной, отвечающей конкретной задаче измерительной системы, применение специальных методов обработки сигналов и адекватного представления инспекционных данных.

Литература

1. Слесарев Д.А., Комплексный подход к обработке данных магнитной внутритрубной дефектоскопии – Тезисы докладов XVIII всероссийской конференции «Неразрушающий контроль и техническая диагностика» - Нижний Новгород, 2008, стр. 146-147.
2. Неразрушающий контроль: справочник: в 8 т. Т. 6. Кн. 1. / под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2006.
3. L.Udpa and W.Lord, A discussion of the inverse problem in electromagnetic NDT, in Review of Progress in QNDE, vol.5A, eds. D.O.Thompson and D.E.Chimenti, Plenum, 1986, pp. 375-382
4. Слесарев Д.А., Чобану П.М. Адаптивное обнаружение диагностических сигналов на фоне неоднородной структурной помехи – Вестник МЭИ, 2007, № 1, С.131-134.
5. О.Гронау, А.Руссолд, С.Белицкий, В.Сухоруков Неразрушающий контроль стальных канатов магнитными дефектоскопами: документирование и интерпретация результатов – В мире НК, 2006, №2, стр. 25
6. Абакумов А.А. Оценка технического состояния нефтяных и газовых скважин с применением технологии скважинной магнитной интроскопии - VI КИТАЙСКО-РОССИЙСКИЙ СИМПОЗИУМ ПО ПРОМЫСЛОВОЙ ГЕОФИЗИКЕ Материалы симпозиума, 2010, стр. 88-95