

## Обнаружение и исправление ошибок в измерительных данных магнитной дефектоскопии

Д.А.Слесарев

Отличительной особенностью современных приборов неразрушающего контроля является применение матриц и линеек датчиков, осуществляющих сканирование объекта контроля с целью получения рельефа распределения измеряемой величины вдоль его поверхности. В магнитной дефектоскопии в качестве измеряемой величины как правило выступает напряженность магнитного поля. С увеличением числа датчиков и числа отсчетов, в которых считывается измеряемая величина, возрастает и вероятность возникновения ошибок в измерительных данных. Как правило, ошибки связаны с отказом (сбоем) одного или нескольких датчиков, а также с пропуском отдельных отсчетов из-за нарушения условий сканирования (например, из-за превышения допустимой скорости). Проведение повторного измерения влечет за собой зачастую большие временные и материальные затраты, например, повторный прогон внутритрубного дефектоскопа может стоить сотни тысяч рублей. В этой связи возрастает актуальность решения задачи обнаружения и исправления ошибок в измерительных данных, причем с учетом больших объемов данных эта задача должна решаться системой обработки данных автоматически. Рассмотрим задачу обнаружения и исправления (коррекции) данных применительно к магнитной дефектоскопии на основе потоков рассеяния.

Для обнаружения отказов отдельных датчиков используются различные критерии, которые базируются на предположении о правильной калибровке измерительной системы относительно регистрируемой величины. При этом допустимое изменение измеряемой величины не выходит за пределы динамического диапазона измерительной системы при фиксированном минимально обнаруживаемом отклонении. В таком случае в качестве первого критерия отказа датчика может служить длительное нахождение сигнала датчика в предельном состоянии (в насыщении). Второй посылкой для обнаружения отказов выступает предположение о равном влиянии случайных факторов на все датчики. Таким образом, вторым критерием может служить значительное отличие дисперсии отдельного датчика от среднего значения дисперсии всей линейки или матрицы:

$$\sigma_i^2 < \sigma_{cp}^2 / k_2,$$

где  $\sigma_i^2$  - дисперсия  $i$ -ого датчика,  $\sigma_{cp}^2$  - средняя дисперсия линейки датчиков,  $k_2$  - некоторый коэффициент ( $k_2 > 1$ ). Коэффициент  $k_2$  выбирается с учетом характеристик

измерительной системы и измеряемой величины. Часто используются и более сложные критерии. Для обнаружения пропуска отсчетов используется их нумерация.

В основе решения задачи исправления ошибок в измерительных данных лежит модель ожидаемого измерительного сигнала, характеризуемая некоторыми параметрами, например, модель сигнала от типового дефекта, размеры которого лежат в известных пределах. На рис. 1 показан типичный сигнал от дефекта типа точечной коррозии, полученный при магнитной дефектоскопии стенки ферромагнитной трубы или листа ( $B_z$  - осевая составляющая магнитного поля). Параметры этого сигнала, такие как амплитуда, размах, протяженность вдоль оси и поперек и другие, несут информацию о размерах дефектов, что используется для оценки размеров дефектов [1]. Наличие сбоя в измерительных данных приводит к ошибке оценки параметров дефектов. Например, оценка глубины точечной коррозии диаметром 24 мм по методу регрессионных уравнений [2] в отсутствии сбоя измерительных данных дает величину 1,8 мм при толщине стенки 8 мм (истинная глубина 1,6), а при наличии сбоя 4 соседних датчиков (в области монотонного изменения уровня сигнала) — 2,6 мм. Измерительный сигнал со сбоем блока датчиков показан на рисунке 2. Ошибка оценки при наличии сбоя возрастает в 4 раза с 0,03Т до 0,13Т (здесь и далее Т — толщина стенки). Сбой в области экстремума сигнала увеличивает величину ошибки.

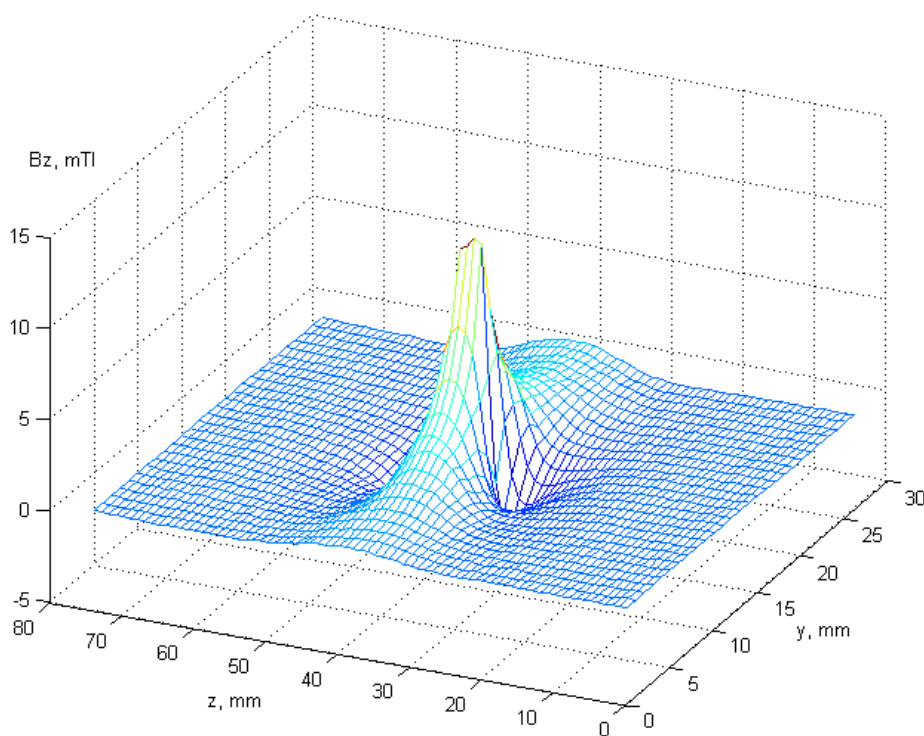


Рис. 1

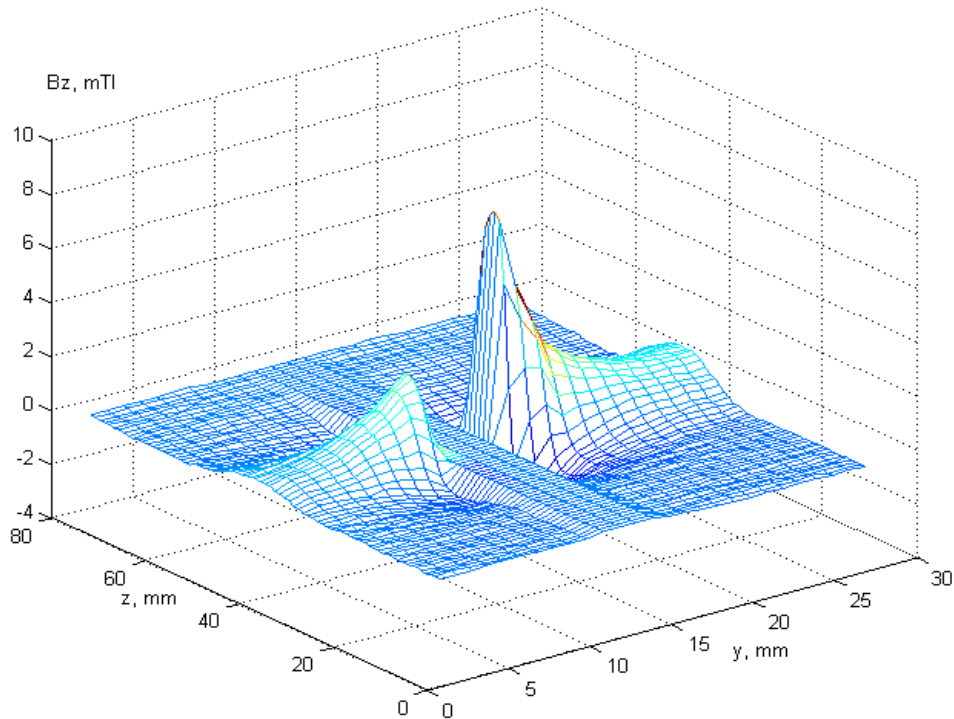


Рис. 2

При решении задачи исправления ошибок предполагается избыточность измерительных данных в рамках конкретной задачи дефектоскопии (достаточный запас по чувствительности и разрешающей способности по отношению к минимальному обнаруживаемому дефекту), что служит основой для восстановления утерянных данных. При обнаружении сбоя отдельного датчика или блока датчиков проводится коррекция данных, заключающаяся в замене показаний этих датчиков значениями, полученными на основании учета показаний соседних исправных датчиков. При проведении такой коррекции осуществляется интерполяция значений неисправных датчиков. Наиболее распространенными методами интерполяции являются: кусочно-постоянная, кусочно-линейная и сплайн-интерполяция. Рассмотрим и сравним между собой указанные методы коррекции сбоев в измерительных данных.

Кусочно-постоянная интерполяция наиболее проста в реализации и заключается в замене значений неисправных датчиков значением последнего перед ним исправного. Алгоритм не требует предварительного анализа вида сигнала, его реализация требует 1 операции присвоения и 0 операций умножения на одно ошибочное значение. На рисунке 3а в виде профиля вдоль линейки датчиков показан результат кусочно-постоянной интерполяции для сигнала дефекта типа точечной коррозии, приведенного на рис. 2.

Кусочно-линейная интерполяция заключается в замене значений неисправных датчиков значениями, рассчитанными путем их линейного приближения на основе показаний

последнего перед сбоем и первого после сбоя исправных датчиков. На рисунке 3б показан результат кусочно-линейной интерполяции для сигнала дефекта типа точечной коррозии, приведенного на рис. 2. Корректная реализация этого типа интерполяции предполагает дополнительно анализ положения сбоя на сигнале от дефекта — в области экстремума или в области монотонного изменения. При интерполяции сбоя в области экстремума необходимо эту область разбивать на две части, в каждой из которых проводить интерполяция по ближайшим исправным датчикам. Реализация алгоритма требует максимум 2 операции умножения на одно ошибочное значение.

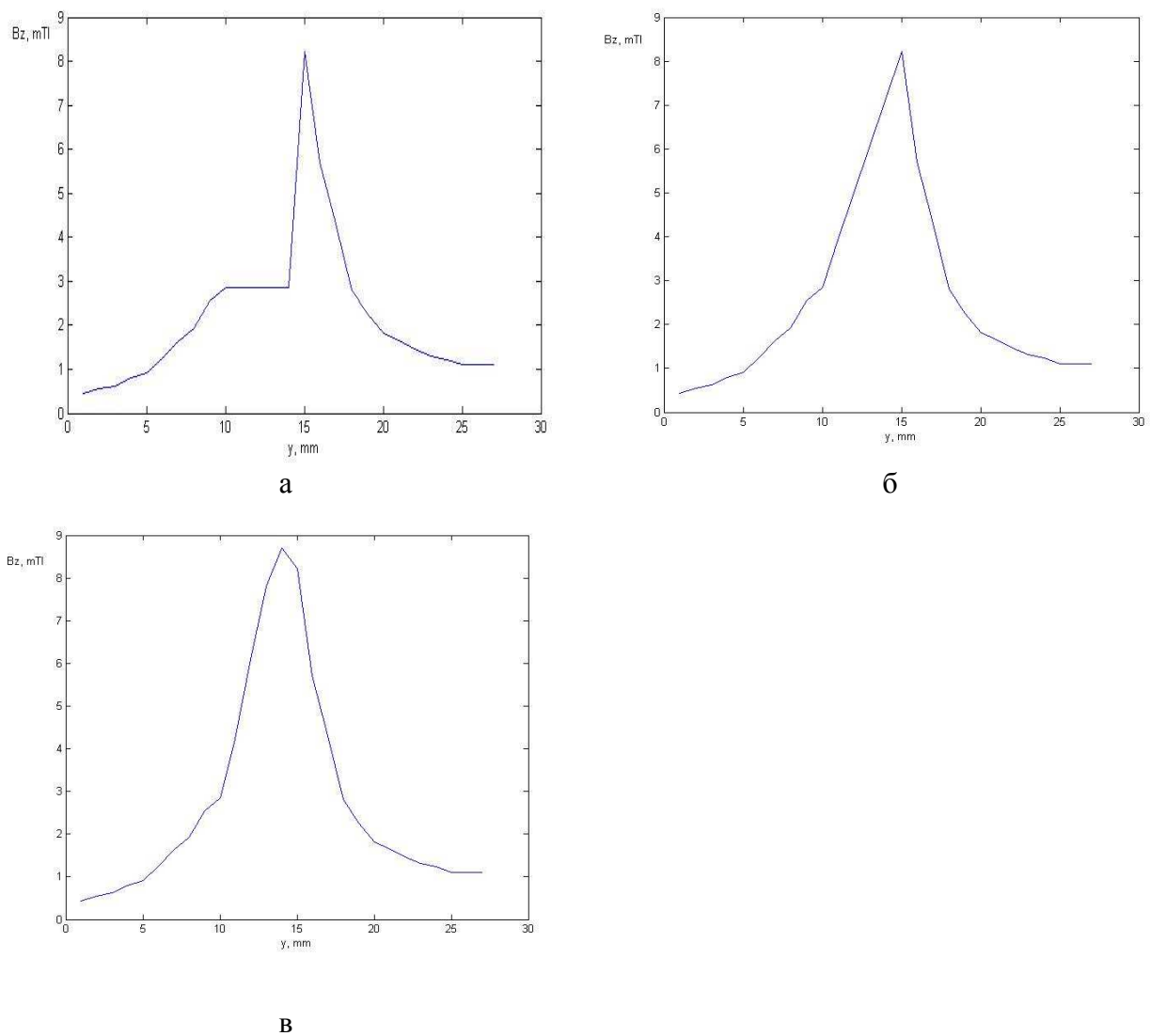


Рис. 3

Сплайн-интерполяция состоит в расчете значений неисправных датчиков на основе сплайнов (обычно кубических), построенных по показаниям соседних исправных (опорным) датчиков до и после сбоя. При этом число используемых опорных датчиков зависит от степени сплайна, необходимо как минимум по 2 опорных значения с каждой стороны от сбоя. На рисунке 3в показан результат сплайн-интерполяции для сигнала дефекта типа точечной коррозии, приведенного на рис. 2. Этот метод интерполяции наиболее ресурсоемок и сложен

в реализации. Соответствующий алгоритм требует минимум 12 операций умножения на одно ошибочное значение в рамках нескольких последовательных циклов.

Было проведено сравнение указанных выше методов интерполяции на выборке дефектов типа точечной коррозии различных размеров. Выборка дефектов состояла из имитаций точечной коррозии квадратной и круглой формы линейным размером от 12 мм до 36 мм и глубиной от 1,5 мм до 6 мм при толщине стенки 8 мм. На сигналах от этих дефектов был смоделирован сбой блока датчиков в двух положениях — в области максимума и на краю сигнала. Показания датчиков в области сбоя приняты равными 0. Расчет параметров дефектов проводился с использованием метода регрессионных уравнений<sup>1</sup> [2]. Средняя погрешность оценки глубины дефекта при использовании разных типов интерполяции представлена в таблице 1. Средняя погрешность оценки продольной протяженности дефекта — в таблице 2. Как видно из таблиц, для сбоя датчиков с краю сигнала даже кусочно-постоянная интерполяция позволяет снизить среднюю погрешность оценки глубины дефекта до 0,03Т. Для сбоя по центру сигнала погрешность оценки глубины дефекта при использовании кусочно-постоянной интерполяции остается достаточно большой — 0,14Т, сплайн-интерполяция позволяет сократить ее до 0,08Т. Усредненная погрешность оценки продольной протяженности дефекта на использованной выборке составляет при кусочно-постоянной интерполяции порядка 1,2Т, при кусочно-линейной — 0,8Т, а при сплайн-интерполяции — 0,5Т, из чего следует, что даже кусочно-линейная интерполяция в данном случае показывает хороший результат.

Таблица 1. Погрешность оценки глубины дефекта

	тип интерполяции		
	кусочно-постоянная	кусочно-линейная	сплайн
сбой с краю	0,2 мм	0,16 мм	0,15 мм
сбой по центру	1,1 мм	1,0 мм	0,69 мм

Таблица 2. Погрешность оценки продольной протяженности дефекта

	тип интерполяции		
	кусочно-постоянная	кусочно-линейная	сплайн
сбой с краю	8,5 мм	4,0 мм	2,3 мм
сбой по центру	10,5 мм	8,5 мм	5,0 мм

Таким образом, для исправления ошибок в измерительных данных наилучший

<sup>1</sup> Использование метода регрессионных уравнений для расчета параметров дефектов не ограничивает общности полученных результатов, поскольку коррекция ошибок исправляет исходный вид сигнала, по которому рассчитываются параметры дефекта. Для других методов, например, на основе искусственных нейронных сетей, результаты будут отличаться количественно, но не качественно.

результат дает сплайн-интерполяция и позволяет снизить погрешность оценки глубины дефекта до 0,08Т, а погрешность оценки длины — до 0,5Т. Однако этот метод является значительно более ресурсоемким, чем кусочно-постоянная и кусочно-линейная интерполяция. Во многих случаях оказывается достаточно использовать кусочно-линейную интерполяцию.

#### Литература

1. J.H.Hwang and W.Lord, Defect characterization from magnetic leakage fields, Br.J.Non-Destructive Testing, Vol 19, No. 1, 1977, pp.14-18.
2. Slesarev D.A., Barat V.A. Statistical diagnostic model for Defect parameters reconstruction in MFL nondestructive testing (тезисы доклада) – Материалы 10-ой европейской конференции по неразрушающему контролю - Москва, 2010, стр. 50.