

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

## УДК 620.179.147

А. В. Грабовский Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

# Обработка сигналов многоканальных сканеров вихретокового контроля

Рассматриваются принципы обработки сигналов многоканальных сканеров вихретокового неразрушающего контроля, в основе которых лежат дифференциальные преобразователи. Рассмотрен принцип устранения тренда, обусловленного изменениями зазора. Рассмотрена медианная фильтрация и фильтрация методом накопления. Рассмотрен принцип фильтрации сигналов от конструктивных элементов объекта контроля. Обозначены недостатки сканеров.

## Вихретоковый контроль, многоканальные сканирующие устройства, ЦОС, фильтрация, оптимальный обнаружитель в дефектоскопии

В основе вихретокового метода неразрушающего контроля лежит анализ взаимодействия внешнего электромагнитного поля катушки (первичное поле) с полем вихревых токов (вторичным), которые наводятся в объекте контроля внешним (первичным) полем. Какие-либо изменения электромагнитных свойств объекта контроля (электрическая проводимость, магнитная проницаемость, намагниченность) приводят к изменениям параметров измерительной цепи. К подобным изменениям электромагнитных свойств объекта контроля также можно отнести и нарушение сплошности (трещина, плена, закат металла, забоина и т. д.), так как нарушение сплошности условно можно рассматривать с точки зрения локального изменения проводимости объекта. Получается, что показания измерительной цепи зависят от целого ряда условий и параметров объекта контроля, поэтому информация носит многопараметровый характер. Этим фактом обусловлены как преимущества, так и недостатки метода. То, что в одном случае является мешающим параметром, в другом случае является контролируемым. Основной задачей в обработке сигналов при вихретоковой дефектоскопии является разделение информации на полезную и мешающую с целью вывода данных только о контролируемом параметре. Так, например, при сортировке стальных объектов по значению электрической проводимости изменения шероховатости и магнитные аномалии необходимо исключить из контролируемых параметров. Сделать это удается далеко не всегда, так как вид сигналов от контролируемого параметра очень часто совпадает с видом сигнала от мешающего параметра.

Взаимодействие катушки индуктивности с объектом контроля можно представить схемой воздушного трансформатора (рис. 1, *a*) [1]. Здесь  $Z_{\rm BT}$  – параметры цепи вторичной обмотки, кото-





рые определяются эквивалентным контуром вихревых токов в объекте. В свою очередь, воздушный трансформатор можно представить схемой замещения (рис. 1,  $\delta$ ), в которой  $R_{\rm BH}$  – вносимое в катушку активное сопротивление, обусловленное потерями энергии на нагрев объекта вихревыми токами;  $L_{\rm BH}$  – вносимая индуктивность, обусловленная изменением потокосцепления  $\Psi$  катушки за счет действия вихревых токов. Действие вихревых токов изменяет потокосцепление  $\Psi$ , поэтому индуктивность катушки  $L = \Psi/i$  изменяется, если вблизи нее появляется проводник.

В описанном примере был представлен параметрический преобразователь, состоящий только из одной катушки индуктивности. Данный тип преобразователей позволяет оценить только приращение индуктивности L и активного сопротивления *R* катушки в процессе контроля. Чаще всего этого бывает не достаточно для успешного решения задачи разделения информации на полезную и мешающую. Для решения этой проблемы используют трансформаторные преобразователи, которые содержат две и более катушки. Такие преобразователи состоят из катушки возбуждения, по которой протекает ток возбуждения, и измерительных катушек, с которых снимается сигнал, несущий информацию об объекте контроля. Помимо индуктивности и активного сопротивления измерительной цепи, к выходным величинам данного типа преобразователей относится еще и взаимоиндуктивность М между возбуждающей и измерительной катушками. Взаимоиндуктивность М (сопротивление взаимоиндуктивности вычисляется по формуле  $X_M = \omega M$ ) содержит реальную и мнимую части, поэтому сигнал измерительной цепи может быть представлен на комплексной плоскости. Для того чтобы разделить сигнал на реальную и мнимую части, можно воспользоваться классической схемой, представленной на рис. 2. Знание фазовых приращений в процессе контроля позволяет расширить возможности по разделению информации на полезную и мешающую.

.....

Чтобы в трансформаторном преобразователе скомпенсировать влияние возбуждающей обмотки на измерительную, измерительную цепь выполняют из двух одинаковых катушек, включенных по дифференциальной схеме. Если дифференциальную схему измерительного канала сориентировать параллельно поверхности объекта контроля (рис. 3) [2], то это позволит скомпенсировать влияние возбуждающей обмотки не только на измерительные, но также и на низкочастотные (относительно размеров преобразователя) изменения параметров объекта контроля, например изменения проводимости, магнитной проницаемости, температуры, шероховатости, геометрии. Регулируя значение базы дифференциального преобразователя, можно изменять разрешающую способность контроля. Такие преобразователи ориентированы на выявление резких изменений параметров объекта, к которым в первую очередь относятся трещины, зоны термических ожогов, резкие изменения доменной структуры.



Матричные вихретоковые преобразователи. Особенностью вихретоковой дефектоскопии в классическом ее представлении является локальность контроля. С одной стороны, это преимущество, так как позволяет локализовать зону контроля, с другой – недостаток, так как контроль крупногабаритных объектов является очень трудоемким процессом. Для решения этой проблемы разработано несколько концепций построения

.....

матричных вихретоковых преобразователей [3]. С учетом особенностей преобразователей разного типа (которые были описаны ранее), был опробован синтез концепций ОВ-ЛЗ (общее возбуждение - локальное зондирование) и ЛВ-ЛЗ (локальное возбуждение – локальное зондирование) для датчиков трансформаторного типа с дифференциальной измерительной цепью, расположенной параллельно контролируемой поверхности. Известной особенностью данных преобразователей является то, что они не чувствительны к плавным изменениям зазора между преобразователями и поверхностью контроля. Но, учитывая тот факт, что значение зазора очень сильно сказывается на чувствительности преобразователя, этот параметр необходимо контролировать и с учетом его значений определять чувствительность дифференциальных преобразователей по некоторым эмпирически полученным функциям. Поэтому в рамках работы по созданию матричного вихретокового преобразователя заложен еще и принцип толщинометрии диэлектрических покрытий (в том числе и воздушного зазора) на проводящих основаниях.

На рис. 4, *а* представлена группа из четырех вихретоковых преобразователей, составляющих одну зону контроля матричного вихретокового преобразователя. В зависимости от ресурсов блока обработки информации таких зон может быть несколько. В рамках работы по созданию многоканальных вихретоковых сканеров для автоматизированного комплекса контроля колесных пар железнодорожных вагонов был создан блок обработки, позволяющий подключать до 8 зон контроля, т. е. до 32 преобразователей.

На рис. 4, б представлены графики собранных данных (за 2 цикла контроля) без обработки. Здесь и далее представленные осциллограммы отображают значение напряжения измерительной цепи преобразователя от времени, выраженные в отсчетах аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Для каждого преобразователя выведены реальная и мнимая части сигналов. Предварительный визуальный анализ данных позволяет говорить, что в процессе контроля выявлен дефект поперечной ориентации (так как он выявлен датчиком, чувствительным к поперечным дефектам), что подтверждается данными второго цикла контроля (далее в осциллограммах будут также представлены данные за 2 цикла измерений для демонстрации стабильности детектирования дефектов). Но для того чтобы принять окончательное решение о годности контролируемого объекта, необходимо произвести оценку зазора, при котором был выявлен дефект. После внесения поправки «на зазор», амплитуда выявленного сигнала сопоставляется с амплитудой сигнала от недопустимого дефекта.

Перед процессом контроля каждый сканер должен пройти калибровку на воздух, что задаст начальное значение для вычисления действующе-





## Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» № 10/2016

го зазора непосредственно в процессе контроля датчиком зазора. Датчик зазора чувствителен также и к крупным дефектам нарушения сплошности (крупные трещины). Во избежание маскирования таких дефектов для дифференциальных датчиков необходимо отфильтровывать их признаки. Фильтрация данных датчика зазора позволяет получить функцию, которая входит в расчет поправки коэффициента усиления дифференциальных датчиков, отвечающих за дефектоскопию. Чтобы отличить срабатывание датчика зазора на крупный дефект от скачкообразного изменения зазора, вводится дополнительный анализ каждого отдельного случая резкого изменения показаний датчика зазора на комплексной плоскости. Экспериментально определено, что крупный дефект на комплексной плоскости смещает вектор комплексного напряжения датчика зазора в I или III четверть, а изменение зазора смещает вектор в IV или II четверть. С учетом данной особенности алгоритм обработки разделяет эти два события. При этом величина зазора оценивается исключительно по показаниям реальной составляющей комплексного сигнала. На рис. 5, а представлены осциллограммы случая, при котором ролик сканера наехал на эксплуатационный дефект объекта контроля (задир металла). Это привело к тому, что зазор скачкообразно изменился (реальная и мнимая части сигнала отклонились в разные стороны), при этом дифференциальный датчик обнаружил данный дефект. Для оценки допустимости данного дефекта требуется ввести поправку «на зазор» в момент обнаружения данного дефекта (т. е. в момент скачка), которая вычисляется по показаниям реальной составляющей данных датчика зазора. На рис. 5, б представлен случай, когда датчик зазора сработал на крупную трещину (реальная и мнимая части сигнала отклонились в одну сторону) на фоне плавно изменяющегося зазора (реальная и мнимая части отклоняются в разные стороны). В этом случае скачкообразное изменение датчика зазора должно игнорироваться, а поправка «на зазор» должна производиться только с учетом низкочастотных изменений сигнала.

Помимо задачи определения зазора существует еще ряд важных задач в области фильтрации данных дифференциальных преобразователей. Одной из таких задач является исключение одиночных выбросов, которые периодически проявляются по какому-либо датчику и никак не привязаны к условиям контроля. Для решения этой задачи предложено использование медианного фильтра. Для выбора оптимальных настроек фильтра необходимо отталкиваться от конкретных условий контроля. На рис. 6, *а* представлен сигнал датчика продольных дефектов (реальная часть сигнала), полученный от сканера гребня колеса колесной пары железнодорожного вагона по зоне, находящейся на вершине гребня колеса. Данные содержат очень сильные помехи, которые маскируют сигнал дефекта. Диаметр колеса по гребню составляет примерно 980 мм, т. е. протяженность линии контроля равна 3080 мм. При условии, что период оборота колеса  $\tau = 40$  с, получается, что преобразователь перемещается относительно объекта со скоростью 77 мм/с. Диаметр возбуждающей обмотки преобразователя, данные с которого представлены на рис. 6, а, равен 10 мм. При условии, что размер предполагаемого дефекта стремится к нулю, дефект будет находиться под преобразователем в течение времени t = 0.13 с. С учетом того, что период опроса всех датчиков в сканере равен  $\tau_{\text{OID}}=10$  мс, получается, что за время t от одного датчика поступает 13 отсчетов АЦП, характеризующих состояние объекта контроля. Имея в виду, что эти 13 отсчетов АЦП приходятся на всю дифференциальную связь, можно сделать заключение, что на одну катушку дифференциальной измерительной схемы приходится 6 отсчетов АЦП. Опыт подсказывает, что для выбора интервала, предназначенного для поиска медианного значения, лучше еще уменьшить количество отсчетов. На рис. 6, б представлен результат медианной фильтрации, в которой учтены условия контроля и форма сигнала возможного дефекта.

Учитывая выборку в размере 5–6 отсчетов АЩП для медианного фильтра, можно дополнительно произвести оконную фильтрацию с целью увеличения фронта сигнала дефекта для последующего дифференцирования. Результат подобных манипуляций представлен на рис. 6, *в*. Последующая обработка результатов медианной фильтрации позволяет добиться увеличения в несколько раз отношения «сигнал/шум».

Знание особенностей формы сигнала дефекта позволяет в той или иной степени отфильтровать

сигналы, полученные от конструктивных элементов (клейм, отверстий, пазов и т. д.). На рис. 7, *а* представлена осциллограмма с датчика, который контролирует зону обода колеса, на которой набивается клеймо. Учитывая все параметры контроля и возможного дефекта описанному по принципу, подбираем параметры фильтра. На рис. 7, *б* представлен результат фильтрации сигналов от клейма. Стоит отметить, что если трещина будет располагаться в зоне клейма, то алгоритм выделит ее на фоне общего потока данных. На рис. 7, *в* представлен результат финальной фильтрации.

Проблемы использования матричных вихретоковых преобразователей. Ключевой проблемой в анализе данных матричных вихретоковых преобразователей при концепции ОВ-ЛЗ является влияние соседних генераторных обмоток друг на друга и на соседние измерительные цепи. Из-за этой проблемы не удается добиться стабильности в поведении фазы сигналов. На комплексной плоскости реакция однотипных преобразователей в разных зонах на один и тот же дефект разная. Так, например, датчик зазора в крайних зонах реагирует на изменение зазора смещением вектора вносимого напряжения на угол 40...50° на комплексной плоскости, в то время как центральные зоны реагируют смещением на 10...15° ввиду ослабления мнимой составляющей результирующего вектора. Существуют некоторые закономерности изменения формы сигнала для дефекта определенной ориентации, однако эти закономерности не совпадают, если форма дефекта изменится, т. е. использование метода комплексной плоскости для обнаружения дефектов не целесообразно. Однако стоит заметить. что поведение реальной составляющей сигнала стабильно и повторяется от преобразователя к преобразователю.





*Puc.* 7

В практике дефектоскопии чаще всего приходится иметь дело именно со случайным процессом появления признаков дефекта. Обнаружение дефекта в этом случае называют бинарным (да/нет), а процесса обычно сигнал недетерминирован. В этом случае возникает задача создания оптимального обнаружителя. Многоканальные сканеры вихретокового контроля справляются с решением этой задачи, хотя и не позволяют произвести классификацию обнаруженных дефектов по типу ввиду нестабильности фазы сигнала от одного датчика к другому. Тем не менее, технические решения, используемые в описанном сканере, позволяют оценить ориентацию обнаруженного дефекта (продольный, поперечный или расположенный под углом), а процесс фильтрации позволяет учесть свойственные для объекта конструктивные особенности или допустимые дефекты.

Многоканальные сканеры вихретокового контроля обеспечивают высокую производительность обнаружения дефектов на крупногабаритных объектах. Задачей подобных устройств является локализация зоны с признаком дефекта для последующего детального изучения одноэлементным преобразователем либо другим методом неразрушающего контроля, т. е. данные сканеры позиционируются как оптимальный обнаружитель и не подразумевают классификацию дефектов по типу и точное измерение их характеристик.

Наличие датчика зазора позволяет осуществить поправку коэффициентов усиления, что является необходимым условием при автоматизированном контроле объектов сложной формы, а знание особенностей формы сигналов, условий контроля и конструктивных особенностей объекта позволяет обеспечить достаточную для оптимального обнаружителя фильтрацию.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасимов В. Г., Покровский А. Д., Сухоруков В. В. Неразрушающий контроль / под ред. В. В. Сухорукова. Кн. 3: Электромагнитный контроль. М.: Высш. шк., 1992.

2. Неразрушающий контроль. Т. 2: в 2 кн. Кн. 2: Вихретоковый контроль / Ю. К. Федосенко, В. Г. Гера-

симов, А. Д. Покровский, Ю. Я. Останин; под ред. В. В. Клюева. М.: Машиностроение, 2006.

3. Филист С. А. Визуализация дефектов при вихретоковой дефектоскопии // Дефектоскопия. 1987. № 8. С. 50–56.

#### A. V. Grabovskiy Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

#### SIGNAL PROCESSING OF MULTI-CHANNEL EDDY CURRENT SCANNERS

Presents the principles of signal processing with multi-channel eddy current scanners, which are based on differential probes. Presents the principle of elimination of the trend due to the air gap variation. Considered median filtering and filtering by the accumulation. Presents the principle of filtering of the signals from the constructive elements of the controlled object. Marked disadvantages of scanners.

Eddy current testing, multi-channel scanners, digital signal processing, filtering, the optimum detector in defectoscopy

### УДК 681.7.069.24:620.193.82:069.44

О. Н. Болдина ФГБУН Ботанический институт им. В. Л. Комарова РАН (БИН РАН)

А. Н. Геращенко Тель-Авивский университет (г. Тель-Авив, Израиль)

В. А. Парфенов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Удаление биологических загрязнений с поверхности памятников из камня при помощи лазерной обработки (лазерное удаление микроскопических водорослей)<sup>1</sup>

Приводятся результаты экспериментальных исследований по разработке лазерной технологии удаления микроскопических водорослей с каменных поверхностей. В работе использовался импульсный твердотельный Nd:YAG-лазер с длиной волны 1.064 мкм и образцы из мрамора и известняка. Проведена оптимизация выходных параметров данного лазера для определения доз облучения, при которых происходит механическое удаление и инактивация этих микроорганизмов.

#### Биологические поражения памятников, микроскопические водоросли, лазерная очистка, реставрация

Одной из главных причин разрушения исторических памятников из камня является появление на их поверхности биологических загрязнений [1]. Как было показано в [2], [3], лазерная очистка может рассматриваться как перспективный метод борьбы с микроорганизмами-биодеструкторами.

Авторами статьи ранее были проведены эксперименты по обработке спор микроскопических грибов при помощи импульсного Nd:YAG-лазера с длиной волны 1064 нм. Описанные в [2], [3] результаты этих исследований показали возможность полного удаления и/или инактивации микромицетов под действием лазерного излучения. В данной статье рассматривается возможность использования лазерной обработки для удаления еще одного вида биологических поражений памятников – микроскопических водорослей. Далее приведены результаты этих исследований.

Подготовка образцов мрамора и известняка с водорослями на поверхности и методика цитологического анализа. Экспериментальные исследования по лазерной обработке водорослей, так же как и в случае микромицетов [2], [3], проводились на образцах мрамора и известняка. Образцы мрамора представляли собой небольшие (размером около  $2 \times 2 \times 2$  см) кубики из белого

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Продолжение. Начало в № 6, 9 за 2016 г.