

СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ВИХРЕТОКОВЫХ ДАТЧИКОВ

А. Г. Дмитриенко¹, К. А. Семкина², Н. С. Ульянин³, Б. В. Цыпин⁴

^{1, 2, 3} Научно-исследовательский институт физических измерений, Пенза, Россия

^{1, 2, 4} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ info@niifi.ru, ² po444t@mail.ru, ³ kolianul@mail.ru, ⁴ cypin@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность темы обусловлена разнообразием областей применения и конструкций вихретоковых датчиков. Представленная информация соответствует современному состоянию методов и средств технических измерений и отражает последние достижения науки и техники в рассматриваемой области. Целью работы является аналитический обзор современных видов, описание областей применения и рассмотрение тенденций развития вихретоковых датчиков. *Материалы и методы.* С помощью вихретокового метода неразрушающего контроля можно оценивать состояние и механические свойства материалов, определять толщину слоя, выявлять дефекты в виде несплошностей, измерять расстояние между быстро движущимися объектами и т.д. *Результаты и выводы.* Вихретоковый метод неразрушающего контроля по сравнению с другими методами обладает ощутимыми преимуществами, а именно: точностью полученных результатов, многопараметровостью, бесконтактностью, слабым влиянием факторов внешней среды, автоматизацией.

Ключевые слова: контроль, объект, вихретоковые датчики, вид, катушка индуктивности, сигнал, пробник, электромагнитный, объекты контроля, индуктивность

Для цитирования: Дмитриенко А. Г., Семкина К. А., Ульянин Н. С., Цыпин Б. В. Состояние и тенденции развития вихретоковых датчиков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 1. С. 59–69. doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-8

THE STATE AND DEVELOPMENT TRENDS OF EDDY CURRENT SENSORS

A.G. Dmitrienko¹, K.A. Semkina², N.S. Ulyanin³, B.V. Tsypin⁴

^{1, 2, 3} Scientific Research Institute of Physical Measurements, Penza, Russia

^{1, 2, 4} Penza State University, Penza, Russia

¹ info@niifi.ru, ² po444t@mail.ru, ³ kolianul@mail.ru, ⁴ cypin@yandex.ru

Abstract. *Background.* The relevance of the topic is due to the variety of applications and designs of eddy current sensors. The information contained in the article corresponds to the current state of methods and means of technical measurements and reflects the latest achievements of science and technology in the field under consideration. The purpose of the work is an analytical review of modern types, description of applications and consideration of trends in the development of eddy current sensors. *Materials and methods.* Using the eddy current method of non-destructive testing, it is possible to assess the condition and mechanical properties of materials, determine the thickness of the layer, identify defects in the form of discontinuities, measure the distance between fast-moving objects, etc. *Results and conclusions.* The eddy current method of non-destructive testing has tangible advantages over other methods, namely: accuracy of the results obtained, multiparameterization, non-contact, weak influence of environmental factors, automation.

Keywords: control, object, eddy current sensors, type, inductor, signal, probe, electromagnetic, control objects, inductance

For citation: Dmitrienko A.G., Semkina K.A., Ulyanin N.S., Tsypin B.V. The state and development trends of eddy current sensors. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(1): 59–69. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-8

Введение

Современный уровень развития промышленной индустрии подразумевает высокие требования к качеству выпускаемой продукции.

Одним из способов повышения качества продукции является применение объективных физических методов неразрушающего контроля [1]. К ним относится метод бесконтактного вихретокового контроля, который реализуется с помощью вихретоковых датчиков перемещения.

Принцип работы данного типа датчиков основывается на электромагнитной теории. Вихревые токи, или токи Фуко, возникают в изделиях, которые обладают электропроводимостью и находятся под воздействием переменного магнитного поля [2].

У вихретоковых датчиков перемещения обширная область применения, объектами для их измерения могут быть любые электропроводящие изделия.

Существует несколько типов датчиков, конкретизация выбора определенного будет зависеть от задач неразрушающего контроля и особенностей аппаратуры [3].

Учитывая постоянное развитие промышленности, возрастают требования к конструкционным особенностям и функционалу самих датчиков, которые успешно решаются [4]. Тенденции развития вихретоковых датчиков определяются необходимостью их совершенствования ввиду постоянного развития технологий во всех областях [5, 6].

Актуальность данной темы требует более подробного ее раскрытия.

В данной работе будет проведен анализ использования вихретоковых датчиков и принцип их работы [7].

История вихретокового метода контроля

Обнаруженное А. Гамбеем явление затухания колебаний подвешенного на нити магнита вблизи медной пластины является началом истории возникновения вихретокового метода контроля [1].

Ф. Араго обнаружил, что подвешенная намагниченная игла смещается над вращающимся медным диском. Когда М. Фарадеем был открыт закон электромагнитной индукции, это наблюдаемое явление получило объяснение.

Значительный вклад в изучение вихревых токов был внесен французским ученым Л. Фуко. Явление поверхностного эффекта, описанное Дж. К. Максвеллом в 1873 г., позволило более подробно объяснить природу вихревых токов [8].

Понятие глубины проникновения токов внутрь контролируемого объекта [9] тесно связано с именем Ч. Штейнметца. Именно им было получено математическое выражение, с помощью которого можно описать распределение магнитной индукции в сечении цилиндрического стержня, который поместили в электрическую катушку, при условии, что она запитана переменным током.

Впервые на практике вихретоковый контроль применился в 1879 г. англичанином А. Хьюзом, который являлся разработчиком устройства для сортировки объектов. При этом объекты могли быть выполнены из различных материалов [9, 10].

Немецкий ученый Ф. Ферстер был первым, кто стал оперировать термином «дефектоскоп». Именно его можно считать основоположателем вихретокового метода контроля [11]. В 1937 г. он начал работу над электромагнитными методами контроля. Ф. Ферстером было введено понятие эффективной магнитной проницаемости среды, комплексной плоскости ЭДС. Им был обширно рассмотрен вопрос взаимодействия вихретокового преобразователя с объектом. Ввиду возможного возникновения различного рода помех именно он предложил ряд алгоритмов, которые позволяют произвести отстройку от помех при вихретоковом контроле [1].

Устройство вихретокового датчика

Измерительная система вихретокового датчика содержит четыре преобразующих блока. На рис. 1 представлена схема измерительной системы, которая может быть реализована в виде аналогового или цифрового прибора.

Вихретоковый датчик, или вихретоковая система, состоит из вихретокового пробника, удлинительного кабеля и драйвера.

Катушка индуктивности, элемент, на котором базируется работа датчика, заключена в диэлектрическом наконечнике металлического зонда. Для локализации электромагнитного поля

в зоне магнитопровода и увеличения абсолютной чувствительности, обеспечения тем самым точечного воздействия преобразователя на объект контроля, катушки мотают на магнитопроводах (на ферритовых стержнях) [4]. Диаметр катушки будет влиять на величину измеряемого зазора [5].

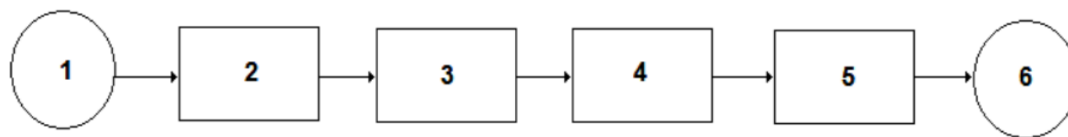


Рис. 1. Схема измерительной системы:

1 – объект контроля; 2 – чувствительный элемент; 3 – первичный преобразователь; 4 – измерительный преобразователь; 5 – передающий преобразователь; 6 – оператор, производящий измерения [1]

Вихретоковый пробник представляет собой зонд с отрезком коаксиального кабеля на одном конце, заканчивающимся разъемом и с катушкой индуктивности, заключенной в диэлектрическом наконечнике на другом. Пробник соединяется с драйвером с помощью коаксиального удлинительного кабеля или напрямую.

Драйвер выглядит как герметичная металлическая коробка с разъемом для подключения пробника и разъемом для получения выходного сигнала и подачи питания. Основные функции драйвера – вырабатывать сигнал возбуждения пробника и осуществлять выделение информативного параметра.

Электрический сигнал, прямо пропорциональный расстоянию от торца вихревого пробника до контролируемого объекта, будет являться выходным сигналом драйвера [3].

Принцип работы

Вследствие электромагнитной индукции в электропроводящей среде при изменении электромагнитного поля будут возникать вихревые токи индукционной природы [2].

Принцип работы вихретокового датчика основан на анализе взаимодействия двух электромагнитных полей – внешнего источника (обмотка возбуждения датчика) и тех, которые возбуждаются в объекте контроля переменным электромагнитным полем датчика [10, 11].

На рис. 2 представлено графическое изображение вихревых токов, генерируемых на металлической пластине цилиндрической катушкой индуктивности (пробником), и представлены электромагнитные поля, формируемые пробником и объектом контроля.

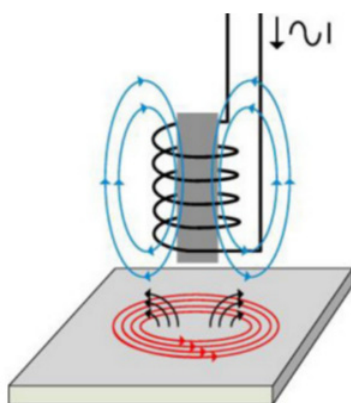


Рис. 2. Визуализация вихревых токов и связанных с ними магнитных полей [9]

Драйвер вырабатывает сигнал возбуждения пробника. При подведении торца диэлектрического наконечника с катушкой индуктивности вихретокового пробника к объекту контроля, при условии обладания им электропроводимости, на его поверхности наводятся вихревые токи. Электромагнитное поле вихревых токов взаимодействует с электромагнитным полем индуктивной катушки пробника, изменяя ее активное и индуктивное сопротивление [5, 10].

С помощью драйвера происходит преобразование изменения зазора между контролируемым объектом и торцом датчика в электрический сигнал [3]. Драйвер осуществляет линеаризацию и масштабирование полученного электрического сигнала.

Тип системы наблюдения будет определять, в каком виде будет представлен выходной сигнал. Он может быть в виде тока, напряжения или представлен в виде цифрового формата.

Виды вихрековых датчиков

Конфигурации вихрековых датчиков могут отличаться между собой: диаметром катушки пробника, длиной кабеля, параметрами выходного сигнала и характером измеряемой величины.

Наиболее оптимальным является использование катушки с ферромагнитным сердечником, так как магнитная проницаемость последнего ощутимо влияет на повышение индуктивности самой катушки. Существует возможность влияния на формирование требуемой конфигурации магнитного потока путем придания сердечнику определенной формы. На рис. 3 наглядно показан магнитный поток формируемый катушками различных конфигураций.

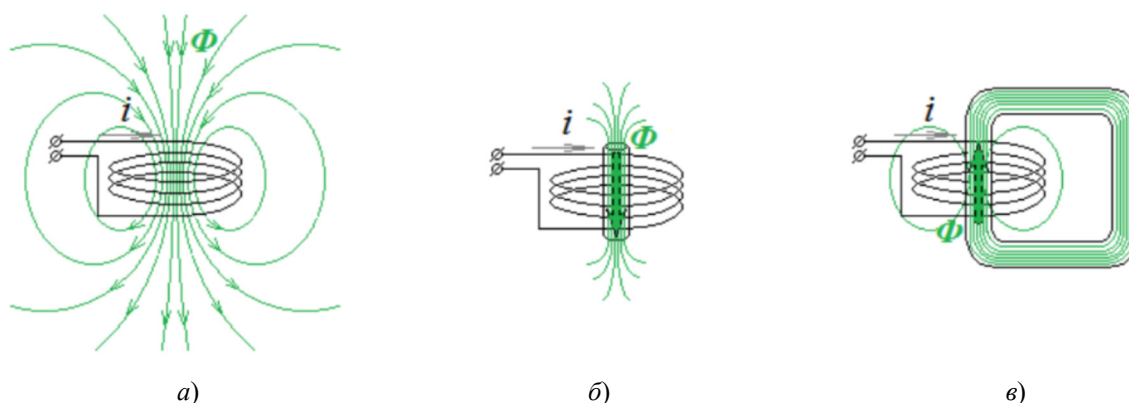


Рис. 3. Магнитный поток, формируемый катушкой:
а – без сердечника; б – с сердечником; в – с замкнутым сердечником [11]

Рабочая частота катушки индуктивности будет влиять на глубину проникновения вихревых токов в проводящие изделия [9].

Взаимосвязь рабочей частоты и глубины проникновения показана на рис. 4.

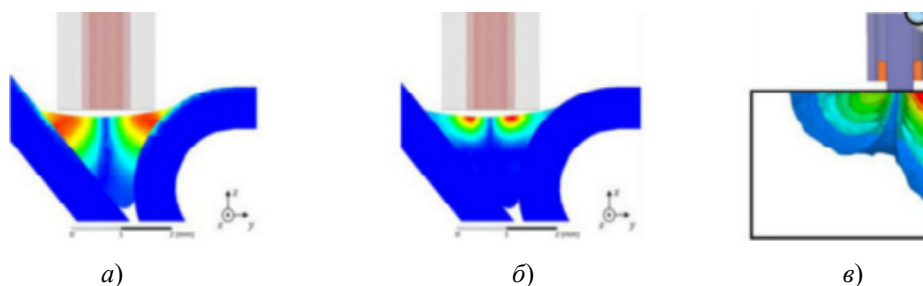


Рис. 4. Численное моделирование распределения плотности вихревых токов:
а – низкая частота, обеспечивающая увеличенную глубину проникновения; б – высокая частота, вызывающая выраженный скин-эффект; в – искажение потока вихревых токов у кромки [9]

Чем меньше радиус катушки индуктивности, тем больше чувствительность датчика к микродефектам. Самыми распространенными датчиками для контроля микродефектов на поверхности деталей являются датчики с диаметром катушки индуктивности 1 и 0,5 мм, обеспечивающие сканирование деталей с шагом 1 и 0,5 мм соответственно [4].

Драйвер должен калиброваться для каждой комбинации катушки и кабеля или пробника [3].

Виды вихрековых датчиков: параметрические, трансформаторные, абсолютные, дифференциальные, проходные, наружные, внутренние, экранные, погружные, щелевые, накладные, экранные накладные, комбинированные.

Принадлежность к трансформаторным или параметрическим датчикам будет зависеть от особенностей преобразования параметров исследуемого объекта в выходные сигналы. У трансформаторных датчиков одна возбуждающая обмотка. Их значительный минус будет заключаться в том, что их выходной сигнал будет зависеть от температуры исследуемого объекта и

внешней среды. Параметрические имеют возбуждающую и измерительную обмотки. Их выходной сигнал не будет так зависеть от температурных воздействий, как у предыдущих датчиков.

На рис. 5, 6 изображены параметрические и трансформаторные датчики соответственно.

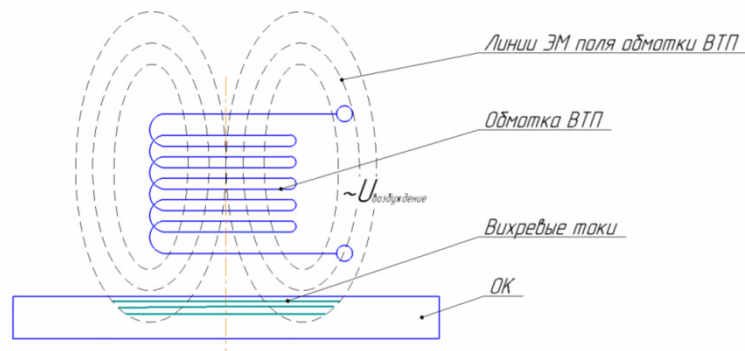


Рис. 5. Изображение параметрических вихретоковых датчиков [11]

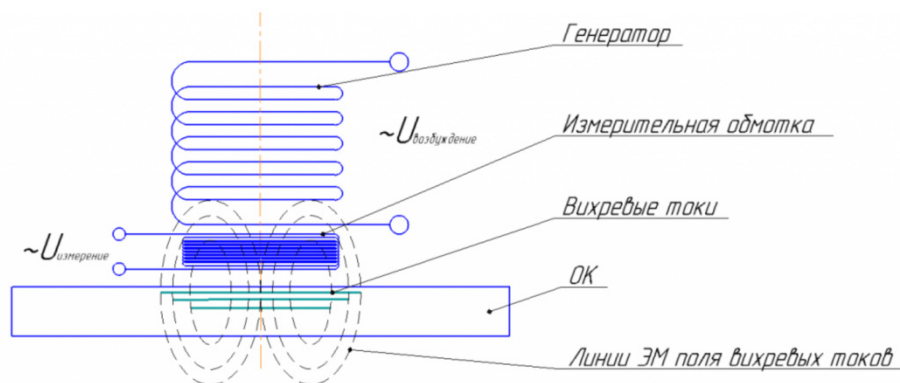


Рис. 6. Изображение трансформаторных вихретоковых датчиков [11]

На принадлежность к абсолютным или дифференциальным вихретоковым датчикам будет влиять способ соединений катушек индуктивности.

У абсолютных датчиков абсолютные значения параметров объектов контроля определяют выходной сигнал. Дифференциальные датчики представляют собой сочетание двух абсолютных датчиков. При этом обмотки возбуждения у них соединены последовательно согласнo, измерительные – встречно. Выходной сигнал этого вида датчиков будет зависеть от разности значений параметров объекта в интересующей зоне.

На рис. 7 представлен дифференциальный вихретоковый датчик.

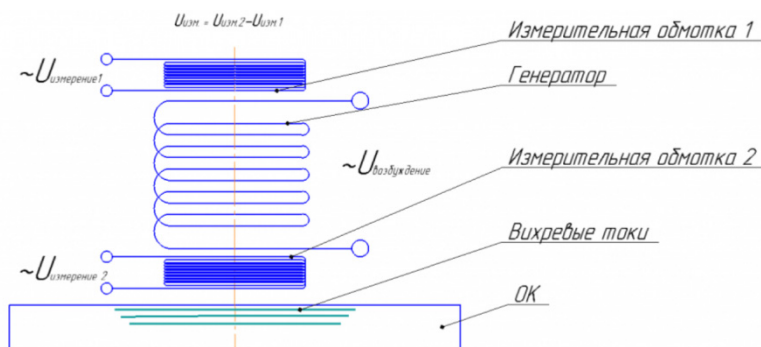


Рис. 7. Один из вариантов дифференциального вихретокового датчика [11]

В зависимости от того, каким образом датчик расположен в пространстве относительно объекта исследования, выделяют следующие типы датчиков:

1. Проходные (рис. 8, 9). В свою очередь, они могут быть наружными, внутренними, погружными, экранными, щелевыми. У этого вида датчика катушка может охватывать объект

из-за особой конструктивной специфики магнитопровода [2]. Изображение проходных вихревых датчиков представлено на рис. 8.

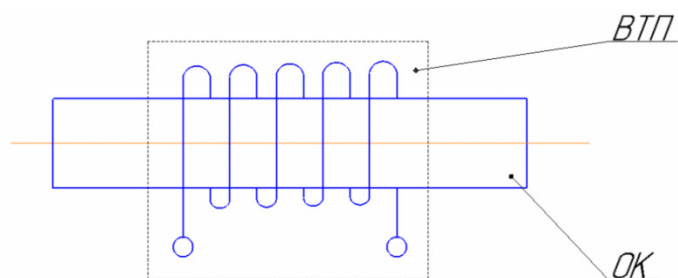


Рис. 8. Проходной вихревой датчик [11]

На рис. 9 изображен проходной наружный вихревой датчик.

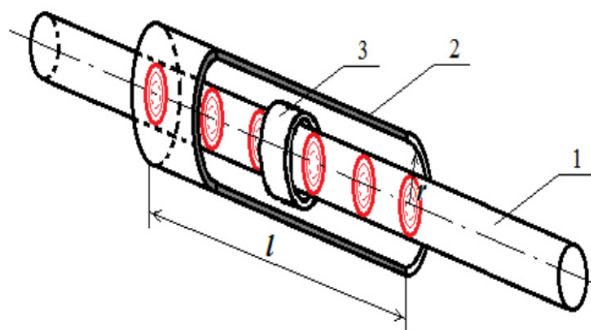


Рис. 9. Контроль цилиндрического стержня наружным проходным вихревым преобразователем:
1 – объект контроля; 2 – обмотка возбуждения; 3 – измерительная обмотка;
 l – длина; r – радиус обмотки возбуждения [2]

2. Накладные. Обмотки катушки индуктивности у этого вида датчиков бывают различные: прямоугольные, круглые, крестообразные, с взаимно перпендикулярными осями. Накладные датчики превосходят проходные по уровню контроля геометрических и электромагнитных параметров объектов, которые имеют сложную форму.

Изображение накладных датчиков представлено на рис. 10.

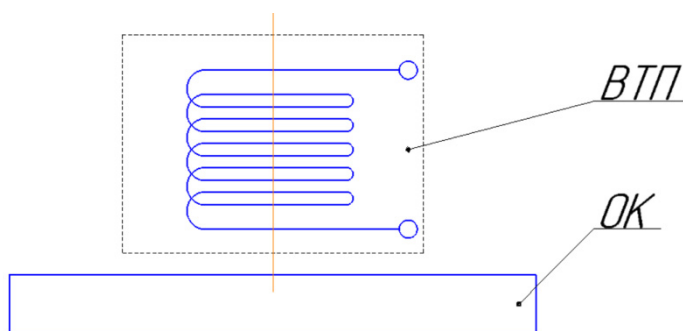


Рис. 10. Накладные вихревые датчики [8]

3. Комбинированные. Совмещают свойства проходных и накладных датчиков. Имеют проходные возбуждающие и накладные измерительные катушки. Из-за этого возможно применение датчика для расширенного ряда объектов, однако есть вероятность неверных результатов контроля ввиду смещения осей катушки.

Наружные проходные датчики применяются в случае необходимости контроля линейно-протяженных объектов мелких изделий.

Катушки индуктивности внутренних проходных видов датчиков вводят внутрь объекта контроля.

Катушки индуктивности погружных видов проходных датчиков помещают в контролируемую среду (жидкую электропроводящую).

Экранные виды проходных датчиков отличаются тем, что возбуждающие и измерительные катушки индуктивности располагают по разные стороны объекта контроля.

Щелевые виды проходных датчиков сконструированы с магнитопроводом, который будет охватывать объект контроля. Используют для контроля проволоки.

Особенность накладных видов датчиков заключается в том, что их размещают непосредственно вблизи поверхности объекта контроля, что позволяет им контролировать электромагнитные параметры объектов сложных форм.

В экранных накладных видах возбуждающие и измерительные катушки индуктивности располагают по разные стороны объекта контроля.

Встречаются линейные специальные типы датчиков, выполненные в виде рамок или линейно-протяжных витков.

Широкие возможности бесконтактного вихревого контроля не могут полностью характеризоваться указанной классификацией ввиду постоянного создания современных датчиков с более совершенным и расширенным функционалом для удовлетворения потребностей различных сфер промышленности [3, 4].

В зависимости от вида электромагнитного поля, которое возбуждает электротоки, встречаются одночастотные, многочастотные и импульсные вихретоковые преобразователи [9].

Недостатки и преимущества вихретоковых датчиков

Несмотря на незначительность, влияние факторов окружающей среды на результат измерений нельзя полностью игнорировать. Например, воздействие экстремальной температуры окружающей среды на датчик может приводить к дополнительной погрешности измерения, для компенсации воздействия температуры окружающей среды был разработан специальный импульсный метод возбуждения вихретокового пробника [3].

Ввиду того, что датчики маленького размера являются более чувствительными к дефектам, но обладают небольшими шагом сканирования и скоростью исследования, были изобретены многоканальные вихретоковые сканеры. Эти сканеры компактны, но способны охватывать большую подконтрольную плоскость [4].

Новые конструктивные решения помогают совершенствовать функционал датчиков, учитывая возникающие требования различных сфер промышленности.

Созданию датчиков с более совершенной конструкцией и расширенным функционалом будет также способствовать быстрое развитие цифровых технологий и микроэлектроники. Новый функционал может включать: правильную интерпретацию результатов контроля, обнаружение дефектов разных типов, применение сетевых ресурсов для обработки, хранения и использования информации об объектах контроля, применение искусственного интеллекта для создания базы данных дефектов и автоматического выявления определенного вида дефектов.

Преимущества вихретокового бесконтактного неразрушающего контроля заключаются в следующем:

1. Бесконтактность. Отсутствует необходимость подготавливать контролируемую поверхность. Взаимодействие пробника датчика и объекта обычно происходит на расстоянии (долей миллиметра или нескольких миллиметров), благодаря этому можно делать замеры при высоких скоростях движения контролируемого объекта [1, 11].

2. Точность полученных результатов. При вихретоковом методе контроля выходной сигнал имеет прямую корреляцию с величиной зазора между торцом пробника и поверхностью контролируемого объекта, поэтому при этом методе не требуется математическая обработка результатов измерения. Вихретоковый метод контроля не имеет нижнего предела по частоте.

3. Многопараметровость. Именно она позволяет отойти от тех факторов, которые негативно влияют на полученный результат. Проекция амплитудного или фазового значения сигнала или их приращение на разных частотах регистрации может выступать в качестве измеряемых величин.

4. Слабое влияние внешних факторов. Незначительность влияния таких факторов внешней среды, как: влажность, давление, загрязненность воздуха, радиоактивные излучения, загрязнение поверхности контроля [9].

5. Высокий уровень автоматизации. Возможность хранения результатов контроля в электронном виде.

Преимущества и недостатки вихретокового бесконтактного контроля взаимосвязаны между собой. Недостатки, как и преимущества, имеют своей основой особенности конструкции датчиков и теорию электромагнитного поля.

Можно выделить следующие основные недостатки:

- невозможно обнаружить дефекты, которые находятся ниже глубины проникновения вихревых токов. Ограниченная глубина проникновения является существенной проблемой вихревых токов. Скин-эффект, который заключается в том, что генерируемые зондом вихревые токи ограничены поверхностью или приповерхностными областями материала, будет сводиться к экспоненциальному уменьшению плотности вихревых токов с глубиной [9];
- только электропроводящие объекты могут подвергаться контролю;
- сканировать поверхности, которые скрыты для доступа преобразователя, невозможно;
- затруднения при проведении вихретокового контроля при отсутствии однородных электромагнитных свойств объекта. В этом случае используют дифференциальные датчики и сложные алгоритмы обработки сигналов [4].

Несмотря на наличие недостатков, вихретоковые датчики перемещений отличаются надежностью, долговечностью и результативностью измерений. Именно наличие недостатков стимулирует дальнейшее развитие более совершенных конструкции и функционала этого вида датчиков [12–15].

Тенденции развития вихретоковых датчиков

Направления развития конструктивного функционала вихретоковых датчиков связаны с возрастающими требованиями к характеристикам датчиков в связи с особенностями спроса на современном техническом рынке.

К основным тенденциям развития приборов бесконтактного вихретокового контроля можно отнести:

- использование датчиков в автомобильной промышленности, авиастроении, космической отрасли;
- миниатюризация и интеграция в различные сложные системы модулей вихретокового контроля;
- использование датчиков в сфере промышленной автоматизации;
- использование вихретоковых датчиков при экстремальных внешних воздействующих факторах (температуры, радиации, механических воздействиях);
- появление интеллектуальных датчиков с возможностью самодиагностики неисправности отдельных узлов и отключения дефектных модулей, накопления статистической информации о измеряемом параметре и автоматической фиксации требуемых параметров контроля;
- повышение энергоэффективности, перевод в пассивный режим в отсутствие необходимости использования датчика [5].

Наблюдаются следующие тенденции в улучшении характеристик датчиков:

- преобладание целенаправленной цифровизации при обработке сигналов с пробника;
- уход от аналоговых решений, в частности переход от измерения амплитуды полезного сигнала к измерению времени или частоты этого сигнала из-за высокой точности современных источников опорной частоты, по сравнению с источниками опорного напряжения [6];
- применение алгоритмов искусственных нейронных сетей для анализа и коррекции информации [16];
- упрощение конструкции преобразователя при переходе к цифровой обработке сигнала;
- повышение точности преобразования физических величин при использовании изменения частоты в зависимости от измеряемого параметра и перехода от аналогового сигнала к цифровому;
- автоматическая регулировка параметров прибора за счет обратных связей [6].

Заключение

В данной работе проведен аналитический обзор вихретоковых датчиков.

Принцип работы вихретокового датчика основывается на действии вихревых токов, электромагнитной индукции и опирается на теорию электродинамики [2].

Вихретоковый метод неразрушающего контроля по сравнению с другими методами обладает ощутимыми преимуществами, а именно: точностью полученных результатов, многопараметровостью, бесконтактностью, слабым влиянием факторов внешней среды, автоматизацией.

С помощью вихретокового метода неразрушающего контроля можно оценивать состояние и механические свойства материалов, определять толщину слоя, выявлять дефекты в виде несплошностей, измерять расстояние между быстро движущимися объектами и т.д.

Главенствующей областью применения датчиков является радиальная вибрация вала ротора относительно корпуса и осевое смещение.

Виды вихретоковых датчиков перемещения зависят от конструктивных и функциональных особенностей вихретоковых датчиков систем. Вихретоковые датчики бывают параметрические, трансформаторные, абсолютные, дифференциальные, проходные, накладные, комбинированные, наружные, внутренние, экранные, погружные, щелевые.

Несмотря на то, что история появления метода начинается с конца XIX в., конструктивно и функционально вихретоковые датчики совершенствуются до сих пор, в соответствии с изменяющимися требованиями.

Список литературы

1. Грошков Е. П., Ключев А. В., Кирпичев А. А., Редюшев А. А. Интеллектуальные вихретоковые датчиковые системы // Компоненты и технологии. 2009. № 1. С. 22–24.
2. Бобров А. Л., Власов К. В., Бехер С. А. Основы вихретокового неразрушающего контроля. Новосибирск : СГУПС, 2019. 98 с.
3. Маркелов М. К. Разработка вихретокового преобразователя для измерения зазора // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2011. Т. 2. С. 270–273.
4. Грабовский А. В., Петров Г. А. Многоканальные сканеры вихретокового контроля // СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2016. № 9. С. 42–48.
5. verifiedmarketreports.com. URL: <https://www.verifiedmarketreports.com/ru/blog/top-7-emerging-trends-shaping-the-future-of-the-inductive-position-sensors-market> (дата обращения: 18.10.2024).
6. Новиков В. Н., Ульянин Н. С., Цыпин Б. В. Модель стабилизации вихретоковых датчиков перемещения // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2018. № 3. С. 58–68. doi: 10.21685/2307-5538-2018-3-8
7. Семкина К. А. Вихретоковые датчики. Устройство, преимущества и недостатки, аналитический обзор современных видов датчиков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2024. Т. 2. С. 269–271.
8. Бакли Д. М. Введение в теорию и технологию вихретокового тестирования. URL: <http://joe.buckley.net/papers/eddys.pdf> (дата обращения 18.10.2024).
9. Мигель А. Конструкция вихретокового датчика для неразрушающего контроля: обзор // Датчики. 2024. № 17. С. 42. doi: 10.3390/s24175819 ISSN 1424-8220
10. SURAGUS. URL: <https://www.suragus.com/en/technology/> (дата обращения 18.10.2024).
11. ets-ndt.ru. URL: <https://ets-ndt.ru/azbuka/metod-vikhretok/?ysclid=m2hqpvn36o840410814> (дата обращения 18.10.2024).
12. Проскуряков М. В., Силин А. М., Нижегородов В. В. Вихревые токи (Токи Фуко) // Новые технологии науки, техники, педагогики высшей школы : материалы Междунар. науч.-практ. конф. М., 2017. С. 425–428.
13. Малащук А. М., Сычик А. В. Вихревые токи Фуко // Актуальные проблемы энергетики. 2016. № 1. С. 487–488.
14. Маликов В. Н. Контроль неоднородностей, примесей и дефектов проводящих сплавов и композиционных материалов с помощью сверхминиатюрных вихретоковых преобразователей : дис. ... канд. техн. наук. Барнаул, 2019. 151 с.
15. Федосенко Ю. К., Шкатов П. Н., Ефимов А. Г. Вихретоковый контроль. М. : Спектр, 2011. 223 с.
16. Ульянин Н. С., Тужилкин О. В. Применение нейронных сетей для повышения метрологических характеристик датчиков при измерении динамических процессов // Датчики и системы. 2012. № 9. С. 41–44.

References

1. Groshkov E.P., Klyushev A.V., Kirpichev A.A., Redyushev A.A. Intelligent eddy current sensor systems. *Komponenty i tekhnologii = Components and technologies*. 2009;(1):22–24. (In Russ.)
2. Bobrov A.L., Vlasov K.V., Bekher S.A. *Osnovy vikhretokovogo nerazrushayushchego kontrolya = Fundamentals of eddy current non-destructive testing*. Novosibirsk: SGUPSa, 2019:98. (In Russ.)

3. Markelov M.K. Development of an eddy current transducer for gap measurement. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2011;2:270–273. (In Russ.)
4. Grabovskiy A.V., Petrov G.A. Multichannel eddy current control scanners. *SPbGETU «LETI» = SPbSETU "LETI"*. 2016;(9):42–48. (In Russ.)
5. *verifiedmarketreports.com*. Available at: <https://www.verifiedmarketreports.com/ru/blog/top-7-emerging-trends-shaping-the-future-of-the-inductive-position-sensors-market> (accessed 18.10.2024).
6. Novikov V.N., Ul'yanin N.S., Tsylin B.V. Model of stabilization of eddy current displacement sensors. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2018;(3):58–68. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2018-3-8
7. Semkina K.A. Eddy current sensors. Device, advantages and disadvantages, analytical review of modern types of sensors. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2024;2:269–271. (In Russ.)
8. Bakli D.M. *Vvedenie v teoriyu i tekhnologiyu vikhretokovogo testirovaniya = Introduction to the theory and technology of eddy current testing*. (In Russ.). Available at: <http://joe.buckley.net/papers/eddy.pdf> (accessed 18.10.2024).
9. Migel' A. Eddy current sensor design for non-destructive testing: an overview. *Datchiki = Sensors*. 2024;(17):42. (In Russ.). doi: 10.3390/s24175819 ISSN 1424-8220
10. *SURAGUS*. Available at: <https://www.suragus.com/en/technology/> (accessed 18.10.2024).
11. *ets-ndt.ru*. (In Russ.). Available at: <https://ets-ndt.ru/azbuka/metod-vikhretok/?ysclid=m2hqpvn36o840410814> (accessed 18.10.2024).
12. Proskuryakov M.V., Silin A.M., Nizhegorodov V.V. Eddy currents (Foucault currents). *Novye tekhnologii nauki, tekhniki, pedagogiki vysshey shkoly: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = New technologies of science, technology, pedagogy of higher education : materials of the International scientific and practical conference*. Moscow, 2017:425–428. (In Russ.)
13. Malashchuk A.M., Sychik A.V. Foucault's eddy currents. *Aktual'nye problemy energetiki = Actual problems of energy*. 2016;(1):487–488. (In Russ.)
14. Malikov V.N. *Control of inhomogeneities, impurities and defects of conductive alloys and composite materials using superminiature eddy current converters*. PhD dissertation. Barnaul, 2019:151. (In Russ.)
15. Fedosenko Yu.K., Shkatov P.N., Efimov A.G. *Vikhretokovyy kontrol' = Eddy current control*. Moscow: Spektr, 2011:223. (In Russ.)
16. Ul'yanin N.S., Tuzhilkin O.V. The use of neural networks to improve the metrological characteristics of sensors when measuring dynamic processes. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2012;(9):41–44. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Алексей Геннадиевич Дмитриенко

доктор технических наук, доцент,
генеральный директор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10);
заведующий кафедрой ракетно-космического
и авиационного приборостроения
на базе Научно-исследовательского института
физических измерений,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: info@niifi.ru

Aleksei G. Dmitrienko

Doctor of technical sciences,
associate professor, general manager,
Scientific Research Institute of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia);
head of the sub-department of space-rocket
and aviation instrument making
on the base of Scientific Research
Institute of Physical Measurements,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Кристина Александровна Семкина

специалист,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10);
магистрант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: po444t@mail.ru

Kristina A. Semkina

Specialist,
Scientific Research Institute of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia);
master degree student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Николай Сергеевич Ульянов

начальник центра проектирования систем № 1,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: kolianul@mail.ru

Nikolai S. Ulyanin

Head of the system design center № 1,
Scientific Research Institute of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Борис Вульфович Цыпин

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры ракетно-космического
и авиационного приборостроения на базе
Научно-исследовательского института
физических измерений,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: cypin@yandex.ru

Boris V. Tsypin

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department of space-rocket
and aviation instrument making
on the base of Scientific Research
Institute of Physical Measurements,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 05.11.2024

Поступила после рецензирования / Revised 02.12.2024

Принята к публикации / Accepted 13.01.2025