

# ВИХРЕТОКОВЫЙ МЕТАЛЛОИСКАТЕЛЬ

Н.И. Ермошин, Д.В. Миляев

Рассмотрен новый способ обработки сигнала металлообнаружителя, основанный на измерениях фазы разностного сигнала. Изучена зависимость фазы разностного сигнала от амплитуды входных сигналов и разности их фаз. Проведен анализ чувствительностей к разности амплитуд входных сигналов и разности фаз

**Ключевые слова:** вихретоковый метод, фаза, металлоискатель

### Состояние проблемы

Основные проблемы, возникающие при разработке металлообнаружителя: изготовление прибора, обладающего большей чувствительностью, помехозащищенностью, по сравнению с разработанными. Немаловажно достичь очень низкой вероятности ложных тревог, стабильности параметров во времени. С этой целью разрабатываются и совершенствуются как первичные преобразователи, так и схемы обработки их выходных параметров.

Задача: возникает проблема обнаружения ферромагнитных и неферромагнитных объектов малых размеров, которые находятся сравнительно на небольшом расстоянии. В этом случае, это понятие можно сравнивать с обнаружением больших объектов на значительных расстояниях.

### Существующее решение

Существует три вида модуляции колебаний: амплитудный, частотный, фазовый.

Давно известно, что фазовая модуляция обладает лучшими свойствами помехозащищенности. Поэтому металлообнаружители, имеющие фазометрическую схему, получили сейчас более широкое распространение. Рассмотрим наиболее интересное решение (Рисунок 1).

Металлоискатель работает следующим образом. Микропроцессор 6 формирует прямоугольные импульсы, заполненные несущей частотой излучения, которые усиливаются усилителем мощности 3 и подаются на вход индукционного преобразователя 2. Происходит излучение сигнала излучающей катушкой, отклик регистрируется приемной катушкой, усиливается усилителем 1 и детектируется синхронными детекторами 4, 5, на опорные входы которых подаются синфазный и квадратурный сигналы с микропроцессора 6. Квадратурные составляющие входного сигнала усиливаются усилителями 7, 8 и поступают на входы АЦП 10, затем в цифровом виде подаются на входы микропроцессора 6.

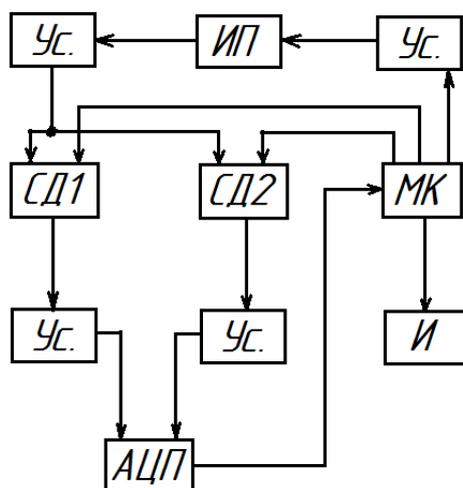


Рисунок 1 – Структурная схема: Ус. – усилитель; ИП – индукционный преобразователь; СД1 – синхронный детектор (синфазен с генератором); СД2 – синхронный детектор (сдвинут по фазе на  $90^\circ$  относительно генератора); АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; МК – микроконтроллер; И – индикатор

Программа построена таким образом, что определяется отношение квадратурных составляющих, по которому идентифицируется объект, за счет сравнения этого отношения с базой данных. Величина отношения не зависит от расстояния до объекта и является характеристикой объекта. По величинам амплитуд квадратурных составляющих для данного объекта определяется расстояние до него. По сравнению с известными техническими решениями детектирование обеих квадратурных составляющих входного сигнала и использование микропроцессорной обработки позволило разделять объекты как минимум на 6 классов и определять расстояние до них с точностью до 3-х см [1].

**Предлагаемое решение**

Предлагается иной метод обработки сигнала, который превосходит все известные вихретоковые металлоискатели по чувствительности.

Имеются два сигнала:

1. Опорный сигнал – напряжение питающего генератора:

$$U_0 = U_m \cdot \sin(\omega t),$$

где  $U_m$  – амплитуда входного сигнала;  $\omega$  – частота входного сигнала;

2. Выходной сигнал – сигнал с выхода преобразователя, отличающегося от опорного по амплитуде и фазе, вследствие начальной настройки преобразователя:

$$U_x = (U_m + \Delta U_m) \cdot \sin(\omega t + \Delta\varphi),$$

где  $\Delta U_m$  – расстройка преобразователя по амплитуде;  $\Delta\varphi$  – расстройка преобразователя по фазе.

Определим фазу разностного  $\varphi_p$  и амплитуду  $U_p$  разности опорного и выходного сигналов.

На рисунке 5 приведена диаграмма векторов опорного, выходного и напряжения разности опорного и выходного напряжений.

$$a = U_x \cdot \sin(\Delta\varphi)$$

$$b = U_x \cdot \cos(\Delta\varphi) - U_0,$$

где  $a$  – мнимая составляющая вектора  $U_p$ ;  $b$  – вещественная составляющая вектора  $U_p$ .

$$U_p = \sqrt{(U_x \cdot \sin(\Delta\varphi))^2 + (U_x \cdot \cos(\Delta\varphi) - U_0)^2} = \sqrt{U_x^2(\sin^2(\Delta\varphi) + \cos^2(\Delta\varphi)) - 2U_x U_0 \cdot \cos(\Delta\varphi) + U_0^2} = \sqrt{U_x^2 - 2U_x U_0 \cdot \cos(\Delta\varphi) + U_0^2}$$

Находим фазу разностного напряжения, считая фазу опорного напряжения равной нулю (Рисунок 2).

$$\varphi_p = \arctg\left(\frac{U_x \cdot \sin(\Delta\varphi)}{U_x \cdot \cos(\Delta\varphi) - U_0}\right) \quad (1)$$

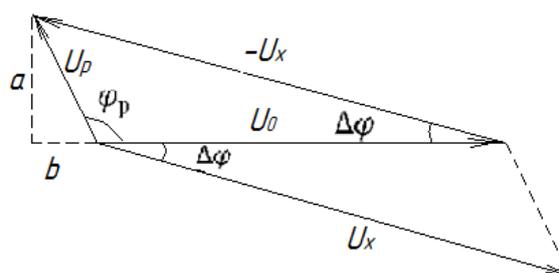


Рисунок 2 – Диаграмма векторов опорного, выходного и напряжения разности опорного и выходного напряжений

Принимая во внимание, что фазовый сдвиг выходного сигнала близок к нулю, имеем:

$$\varphi_p \approx \frac{U_x}{U_x - U_0} \cdot \Delta\varphi$$

Из последнего выражения следует, что если амплитуды опорного и выходного сигналов постоянны, то фаза разностного сигнала прямо пропорциональна фазе выходного сигнала с коэффициентом:

$$n = \frac{U_x}{U_x - U_0}$$

На рисунке 3 приведен график зависимости фазы разностного сигнала от фазы выходного сигнала при различных значениях коэффициента  $n$ . График построен по формуле (1).

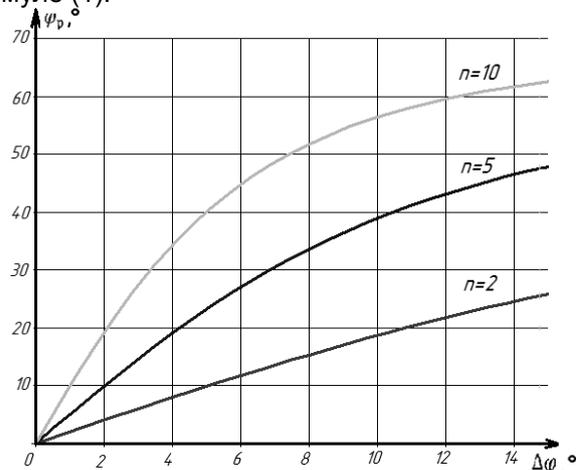


Рисунок 3 – Зависимость фазы разностного сигнала от фазы выходного сигнала при различных значениях коэффициента  $n$

Найдем чувствительность фазы разностного напряжения к фазе выходного сигнала:

$$S_{\Delta\varphi}^{\varphi_p} = \frac{\partial \varphi_p}{\partial \Delta\varphi} = \frac{1}{1 + \left(\frac{U_x \cdot \sin(\Delta\varphi)}{U_0 - U_x \cdot \cos(\Delta\varphi)}\right)^2} \cdot \left(\frac{U_x \cdot \sin(\Delta\varphi)}{U_0 - U_x \cdot \cos(\Delta\varphi)}\right)'$$

Преобразовав выражение, получили:

$$S_{\Delta\varphi}^{\varphi_p} = \frac{1}{1 + \left(\frac{U_x \cdot \sin(\Delta\varphi)}{U_0 - U_x \cdot \cos(\Delta\varphi)}\right)^2} \cdot \left(\frac{U_x \cdot \cos(\Delta\varphi)}{U_0 - U_x \cdot \cos(\Delta\varphi)} - \frac{U_x^2 \cdot \sin^2(\Delta\varphi)}{(U_0 - U_x \cdot \cos(\Delta\varphi))^2}\right)$$

## РАЗДЕЛ II. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Принимая во внимание, что фаза выходного напряжения стремится к нулю, имеем:

$$S_{\Delta\varphi}^{\varphi_p} \approx \frac{U_x}{U_x - U_0} \quad (2)$$

Из (2) следует: чувствительность при малых фазах выходного напряжения стремится к значению коэффициента  $n$ .

График зависимости чувствительности фазы разностного напряжения к фазе выходного сигнала при различных значениях коэффициента  $n$  (Рисунок 4).

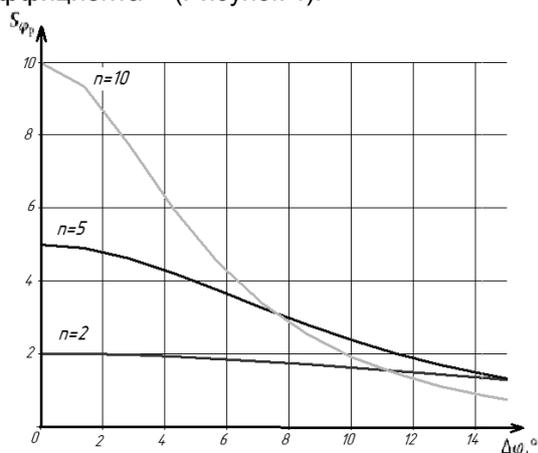


Рисунок 4 – Зависимость чувствительности фазы разностного напряжения к фазе выходного сигнала

Таким образом, максимальная чувствительность обеспечивается при изменении фазы выходного напряжения от нуля до нескольких градусов. Предложенный метод может быть широко применен в металлоискателях, с целью повышения чувствительности к металлическим предметам малых размеров, вызывающие малые фазовые сдвиги выходного напряжения [2].

На рисунке 5 приведена структурная схема разрабатываемого металлоискателя.

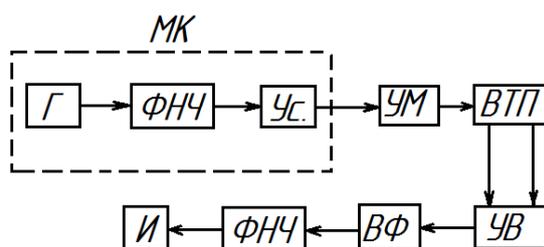


Рисунок 5 – Структурная схема: Г – генератор импульсов; ФНЧ – фильтр низких частот; Ус. – усилитель; УМ – усилитель мощности; ВТП – вихретоковый преобразователь; УВ – устройство вычитания; ВФ – высокочувствительный фазометр; И – индикатор.

Питание первичного вихретокового преобразователя осуществляется от генератора синусоидальных сигналов[3].

Датчик состоит из трех обмоток – возбуждающей и двух измерительных. Измерительные обмотки располагаются по краям каркаса первичного преобразователя. Это позволяет при приближении металлического тела к одной из измерительных обмоток считать напряжение этой обмотки выходным, а напряжение противоположной измерительной обмотки опорным.

Измерительные обмотки включены встречно и напряжение на них находится в противофазе с напряжением генератора.

Микроконтроллер формирует синусоидальный сигнал, который поступает на усилитель мощности, далее, уже усиленный по амплитуде сигнал подается на возбуждающую обмотку. Во время отсутствия металлических предметов в зоне чувствительности первичного преобразователя, сигналы обеих измерительных обмоток равны по амплитуде и синфазны. При появлении металла в окне первичного преобразователя, устройство вычитания формирует сигнал, который описывается фазой разностного  $\varphi_p$  и амплитудой  $U_p$  разности опорного и выходного сигналов. Данную информацию улавливает высокочувствительный фазометр. Фильтр нижних частот выделяет постоянную составляющую с выхода усилителя, которая поступает на индикатор.

Данный метод обеспечивает высокую чувствительность при близких значениях амплитуд выходного и опорного сигналов и чем меньше отличаются эти значения, тем выше чувствительность метода [2].

### Заключение

В рассмотренном материале статьи:

1. Предлагается способ повышения чувствительности фазометрического метода преобразования, основанного на изменении фазового сдвига.
2. Математически и графически показана возможность реализации этого способа. Предложена структурная схема.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент 2366982 Российская Федерация, МПК G01V3/11. Металлоискатель [Текст] / В.П. Лубов, И.Н. Злыгостев, В.М. Грузнов, Б.Г. Титов; заявитель и патентообладатель Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН (ИНГГ СО РАН). – № 2006140973, заявл. 20.11.2006; опубл. 10.09.2009.

2. Ермошин, Н.И. Вихретоковый металлоискатель с повышенной чувствительностью [Текст] / Н.И. Ермошин, Д.В. Миляев // Информационно-измерительная техника и технологии – Томск: Издательство ТПУ, 2013. – С.129-132.
3. Гольдштейн, А. Метод вихретоковой дефектоскопии прутков и труб на основе использования комбинированного преобразователя с возбуждением разночастотных пространственных компонент магнитного поля [Текст] / А.Е. Гольдштейн, В.Ф. Булга-

ков, Х.М. Кренинг // Дефектоскопия. – 2011. № 11. – С. 39–47

Студент **Ермошин Н.И.**, e-mail: [ermoschin.nik@yandex.ru](mailto:ermoschin.nik@yandex.ru), кафедра Информационно-измерительной техника института неразрушающего контроля Томского политехнического университета; к.т.н., доцент **Миляев Д.В.**, e-mail: [mdv@tpu.ru](mailto:mdv@tpu.ru) - кафедра Информационно-измерительной техники Томского политехнического университета

УДК 535.854

## ВЫСОКОТОЧНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ДЛЯ МОБИЛЬНЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

И.П. Мирошниченко

Описаны результаты разработки перспективных бесконтактных средств измерений перемещений поверхностей объектов контроля на основе современных лазерных технологий и новых методов оптической интерферометрии для регистрации информации при диагностике состояния конструкционных материалов и силовых элементов изделий, находящихся в эксплуатации, акустических неразрушающих методов контроля в составе мобильных диагностических комплексов

**Ключевые слова:** лазерный интерферометр, интерференционная картина, измерение перемещений, поверхность объекта контроля, диагностика состояния

### Введение

В настоящее время актуальным для обеспечения безаварийной эксплуатации и предотвращения катастроф транспортных средств, авиационной техники и т.п., находящихся в эксплуатации, является развитие и совершенствование мобильных диагностических комплексов, позволяющих на основе использования неразрушающих методов контроля провести диагностику состояния конструкционных материалов силовых элементов рассматриваемых машин и оборудования непосредственно по месту их эксплуатации (т.е. в «полевых» условиях) с целью принятия решения о возможности их дальнейшей эксплуатации и оценки остаточного ресурса. К одному из приоритетных направлений совершенствования инструментальной базы таких комплексов можно отнести разработку высокоточных бесконтактных средств измерений перемещений поверхностей объектов контроля для регистрации информации о их состоянии, например, при использовании акустических активных и пассивных методов неразрушающего контроля.

Известны из [1-3] высокоточные бесконтактные средства измерений перемещений поверхностей объектов контроля, построенные на базе двухходового лазерного интер-

ферометра с совмещенными ветвями [4,5] и основанные на использовании современных лазерных технологий и новых методов оптической интерферометрии.

Устройства [1-3] научно-обоснованы в процессе проведения расчетно-экспериментальных исследований, результаты которых предложены в [6-11], апробированы и использованы при решении актуальных научных и производственных задач (см., например, [12,13]).

Для расширения функциональных возможностей технических решений [1-3] за счет обеспечения изменения диапазона измеряемых значения перемещений в процессе проведения измерений разработано оптическое интерференционное устройство для измерения перемещений поверхностей объектов контроля, предложенное в [14].

### Описание разработки

Сущность устройства [14] поясняется схемой, представленной на рисунке 1. Устройство [14] содержит оптически связанные и последовательно размещенные источник 1 когерентного оптического излучения, оптическую систему 2, объект контроля 3 с поверхностью 4, общее основание 5, на котором жестко закреплены светоделитель 6, отражатель 7 и фотоприемное устройство 8, а