

РАЗДЕЛ 3. ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО - ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 620.179.147

ИЗМЕРЕНИЕ ВНУТРЕННЕГО ДИАМЕТРА ПРОВОДЯЩЕЙ ТРУБЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Е.К. Киселёв, А.Е. Гольдштейн

Описан предложенный ранее метод вихретокового контроля внутреннего диаметра проводящих труб и предложено его усовершенствование. Рассмотрены конструкция вихретокового преобразователя, алгоритм преобразования его сигналов, структурная схема системы контроля внутреннего диаметра труб.

Ключевые слова: амплитудно-фазовое преобразование, вихретоковый преобразователь, система вихретокового контроля, эксперимент, математическая модель, измерения.

ВВЕДЕНИЕ

На практике при эксплуатации труб возникает задача контроля внутреннего диаметра труб. Такая задача может быть связана с необходимостью контроля возможного изменения внутреннего диаметра в результате пластической деформации, вызванной механическими воздействиями на наружную или внутреннюю поверхности (сопряженными часто с одновременными термическими воздействиями) либо значительными коррозионными повреждениями внутренней поверхности. В случае если труба изготовлена из электропроводящего материала, может быть обеспечен доступ внутрь трубы, длина трубы не превышает нескольких десятков метров, с успехом может быть применен вихретоковый метод контроля. Конкурентными преимуществами вихретокового метода, по сравнению с альтернативными методами контроля, являются отсутствие необходимости контакта с поверхностью трубы (что особенно актуально

в случае наличия механических и коррозионных повреждений поверхности, а также различных загрязнений), высокая скорость контроля, широкий диапазон измеряемых диаметров труб, простота настройки, малое влияние внешних факторов, отсутствие необходимости доступа к наружной поверхности трубы, возможность автоматизации процесса контроля и протоколирования его результатов. При определенных условиях контроля абсолютная погрешность измерений может не превышать десятых долей миллиметра, что удовлетворяет требованиям широкого круга практических задач.

ПЕРВИЧНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ И ПРИМЕНЯЕМЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ

Для решения данной задачи более всего подходит накладной трансформаторный вихретоковый преобразователь (ВТП), схематичная конструкция которого изображена на рисунке 1.

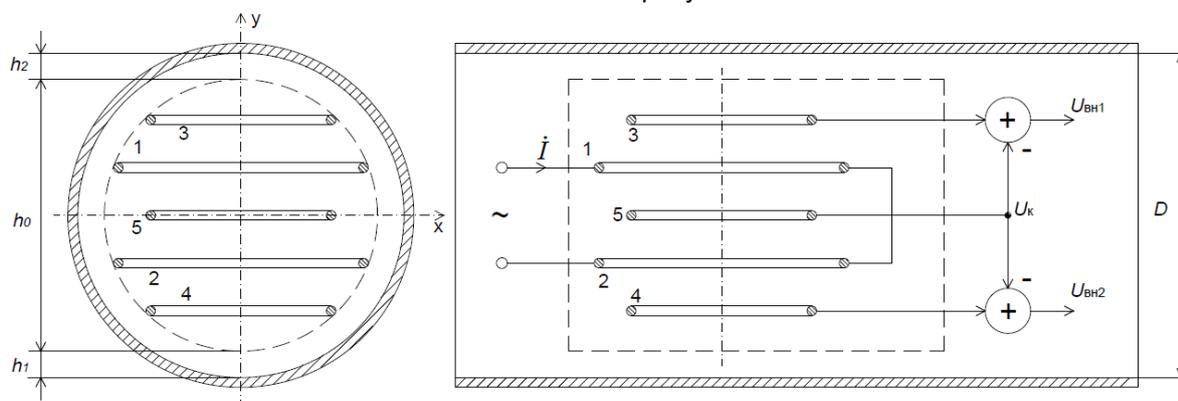


Рисунок 1 - ВТП внутри контролируемой трубы: 1, 2 - обмотки возбуждения; 3, 4 - измерительные обмотки; 5 - компенсационная обмотка.

Переменный ток I , протекающий через последовательно соединённые и согласно включённые обмотки возбуждения 1 и 2, создаёт переменное магнитное поле, которое в свою очередь наводит вихревые токи (токи Фуко) в стенках объекта контроля. При помощи измерительных обмоток 3 и 4 осуществляется измерение индуцированных вихревых токов. Для компенсации начальных напряжений измерительных обмоток используется обмотка 5. Число витков обмотки 1 — w_1 равно числу витков обмотки 2 — w_2 , число витков обмотки 3 — w_3 равно числу витков обмотки 4 — w_4 , а соотношение чисел витков компенсационной и измерительной обмоток должно обеспечивать равенство начальных напряжений этих обмоток.

Для создания модели взаимодействия магнитного поля вихретокового преобразователя с ОК могут быть использованы известные математические выражения, приведенные в частности в [1]. При этом используются допущения, что обмотки имеют бесконечно малое поперечное сечение, а глубина проникновения электромагнитного поля меньше толщины стенки трубы. Однако выражения из [1] применимы только для случая плоских поверхностей и не подходят для объектов цилиндрической формы. Поэтому требуется получить решение без указанных допущений на основе экспериментальных исследований.

Данный метод по своей сути сводится к тому, чтобы измерять зазор между вихретоковым преобразователем и объектом контроля. А значение внутреннего диаметра трубы D находится суммированием трех слагаемых (1): измеренных значений h_1 и h_2 и диаметра измерительного зонда h_0 (рисунок 1).

$$D = h_1 + h_2 + h_0 \quad (1)$$

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ВНУТРЕННЕГО ДИАМЕТРА ТРУБ

Для экспериментального определения функции преобразования данный метод контроля был реализован в системе контроля внутреннего диаметра труб, являющейся по принципу построения компьютерным средством измерения. В качестве ОК выступает труба из немагнитной стали с номинальным диаметром 28,2 мм. На рисунке 2 изображена структурная схема системы контроля, состоящая из генератора 1, измерительного зонда 2, схемы амплитудно-фазовой обработки сигналов 3, вычислительного блока 4.

В состав измерительного зонда входят вихретоковый преобразователь и предвари-

тельные усилители. Гармонические выходные напряжения измерительного зонда, пропорциональные вносимым напряжениям $U_{вн1}$

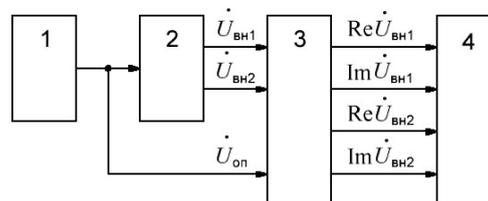


Рисунок 2 - Структурная схема системы измерения внутреннего диаметра труб

и $U_{вн2}$ преобразуются амплитудно-фазовыми детекторами блока 3 в постоянные напряжения, пропорциональные действительным и мнимым составляющим вносимых напряжений. Затем, данные напряжения преобразовываются в цифровую форму и передаются в компьютер при помощи платы сбора данных USB3000. Для разработки программного обеспечения и вычисления h_1 и h_2 используется среда LabView.

Для определения зависимости зазора от вносимого напряжения ($h=f(U_{вн})$) необходимо, в первую очередь, экспериментально получить прямую зависимость вносимого напряжения от величины зазора ($U_{вн}=f(h)$) (рисунок 3). На основе экспериментальных данных была получена обратная характеристика, график которой изображён на рисунке 4.

По имеющимся данным была рассчитана обратная функция, необходимая для определения зазора по измеренному напряжению (2), но данная функция учитывает смещение зонда только вдоль оси y ($x=0$) (рисунок 1).

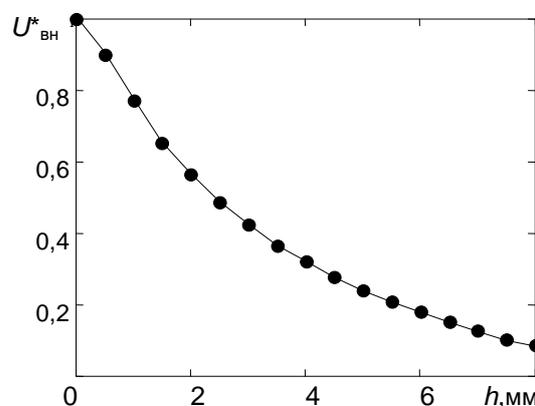


Рисунок 3 - зависимость относительного напряжения сигнала от значения зазора

При этом зависимости $U^*_{вн1}$ и $U^*_{вн2}$ от h_1 и h_x имеют одинаковый характер.

ИЗМЕРЕНИЕ ВНУТРЕННЕГО ДИАМЕТРА ПРОВОДЯЩЕЙ ТРУБЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

$$h = a - b \ln \left(\frac{U_{\text{вн}}}{U_{\text{max}}} + c \right) \quad (2)$$

Где: a, b, c – коэффициенты, зависящие от геометрических параметров преобразователя и внутреннего диаметра трубы; $U_{\text{вн}}$ – вносимое напряжение с ВТП; U_{max} – максимальное значение вносимого напряжения, определяемое при настройке.

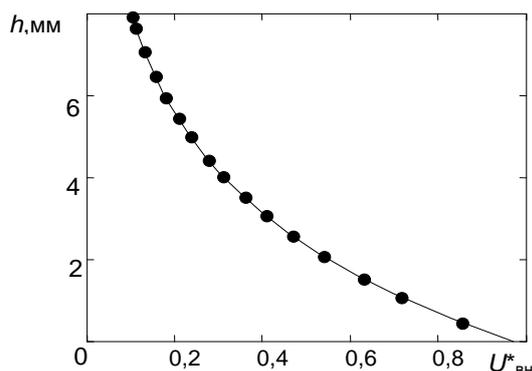
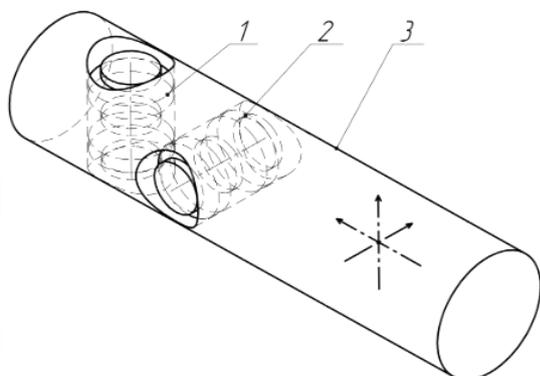


Рисунок 4 – Экспериментальная зависимость значения зазора от относительного напряжения и её аппроксимация аналитической функцией



1 – основной ВТП, 2 – дополнительный ВТП, 3 – корпус

Рисунок 5 - Установка дополнительного вихревого преобразователя

По данной функции уже можно рассчитать расстояние между стенкой объекта контроля и накладными ВТП и зная диаметр измерительного зонда получить внутренний диаметр трубы. При номинальном диаметре в 28,2 мм рассчитанные значения находятся в диапазоне от 28,1 мм до 28,3 мм. При этом погрешность составила $\pm 0,1$ мм.

Основной причиной погрешности измерения является смещение измерительного

зонда вдоль оси x . Необходимая точность достигается при условии, когда зонд смещается вдоль оси y . Однако в реальном контроле смещение происходит по двум осям, в том числе по x , при этом погрешность вырастает до ± 1 мм. Для уменьшения данной погрешности предлагается использовать второй ВТП, установленный ортогонально продольной оси корпуса зонда для отстройки от изменения зазора по оси x при измерении по y (рисунок 5).

Для этого также была экспериментально определена зависимость значения диаметра при смещении зонда вдоль оси x (рисунок 6).

Данную функцию можно аппроксимировать при помощи аналитического выражения:

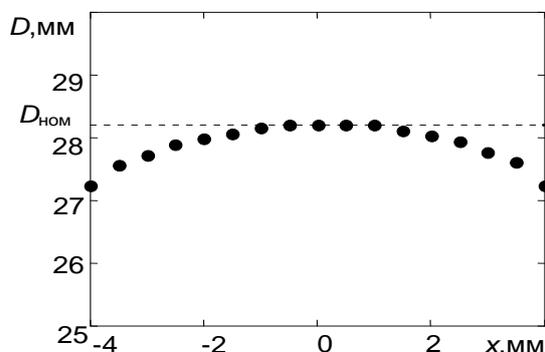


Рисунок 6 – Возникновение погрешности при смещении зонда вдоль оси x

$$\Delta D = k + k_1 \varepsilon + k_2 \varepsilon^2 \quad (3)$$

где: k_n – коэффициенты, зависящие от геометрических параметров преобразователя и внутреннего диаметра трубы; ε – смещение

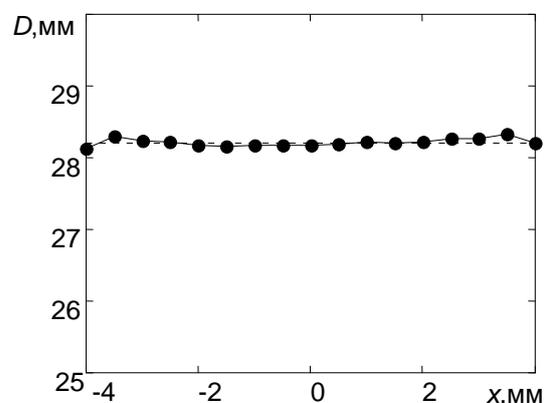


Рисунок 7 – Аппроксимация аналитической функцией зависимости зазора от смещения зонда вдоль оси x

ВТП по оси x определяемое следующим выражением:

$$\varepsilon = \frac{h_{x1} - h_{x2}}{h_{x1} + h_{x2}} \quad (4)$$

Окончательно выражение для расчёта внутреннего диаметра можно переписать в следующем виде:

$$D = h_1 + h_2 + h_0 + \Delta D(\varepsilon) \quad (5)$$

На рисунке 7 изображена зависимость значения зазора от движения ВТП вдоль оси x аппроксимированная выражением 5.

Благодаря внесению дополнительной функции в программу устройства, можно добиться более высокой точности измерения. При этом максимальная относительная погрешность вдоль оси x была уменьшена с 3,22% до 0,7%.

ВЫВОД

В итоге, было исследовано устройство измерения внутреннего диаметра электропроводящих труб, реализующее вихретоковый метод. Была определена функция вычислительного преобразования сигналов

ВТП. Также была предложена модификация первичного преобразования путём установки дополнительного вихретокового преобразователя, для отстройки возникающей ошибки измерения. При этом удалось уменьшить погрешность в 4,5 раза. При измерении диаметра трубы было определено, что при номинальном значении диаметра 28,2 мм может быть обеспечена абсолютная погрешность измерений, не превышающая $\pm 0,2$ мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль. Справочник. [Текст] / под ред. В.В. Клюева: в 7 томах. Т 2: в 2-х кн.: Кн. 1: Контроль герметичности. Кн. 2: Вихретоковый контроль. – М.: Машиностроение, 2003. – 688 с.
2. Вихретоковый контроль внутреннего диаметра труб [Электронный ресурс] / А. Е. Гольдштейн [и др.] // Ползуновский вестник / Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова (АлтГТУ). — 2012. — № 3/2. — [С. 174 - 179].

Гольдштейн А. Е. - д.т.н., профессор НИ ТПУ, e-mail: algol@tpu.ru.

Киселёв Е. К. - аспирант НИ ТПУ, e-mail: ekk1@tpu.ru.