

ИЗМЕРЕНИЕ ВНУТРЕННЕГО ДИАМЕТРА ПРОВОДЯЩЕЙ ТРУБЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Е.К. Киселёв, А.Е. Гольдштейн

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
г. Томск

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

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

Введение

На практике, при эксплуатации труб, возникает задача измерения и контроля внутреннего диаметра трубы. В процессе производства или эксплуатации труб данная процедура может быть связана в первую очередь с контролем вероятного изменения внутреннего диаметра из-за воздействия механических повреждений и как следствие деформации трубы, коррозии или термических воздействий. Если труба включает в себя электропроводящий материал и есть доступ внутрь трубы, при этом её длина не превышает нескольких десятков метров, смело можно использовать метод с применением вихретокового преобразователя. По сравнению с альтернативными методами контроля, преимуществами предложенного метода является отсутствие необходимости непосредственного контакта с поверхностью объекта контроля, высокая скорость, большой диапазон контролируемых диаметров, вихревых токов. Для компенсации начальных

малое влияние внешних факторов (таких как температура, влажность, давление), нет необходимости иметь доступ к внешней поверхности трубы, также есть возможность вести протокол измерений в автоматическом режиме. Абсолютная погрешность измерений не превышает десятых долей миллиметра, что способно удовлетворить широкий спектр практических задач.

Применяемый метод контроля:

Для решения данной задачи более всего подходит накладной трансформаторный вихретоковый преобразователь (ВТП), схематичная конструкция которого изображена на рисунке 1. 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). При помощи измерительных обмоток 3 и 4 осуществляется измерение индуцированных напряжений измерительных обмоток исполь-

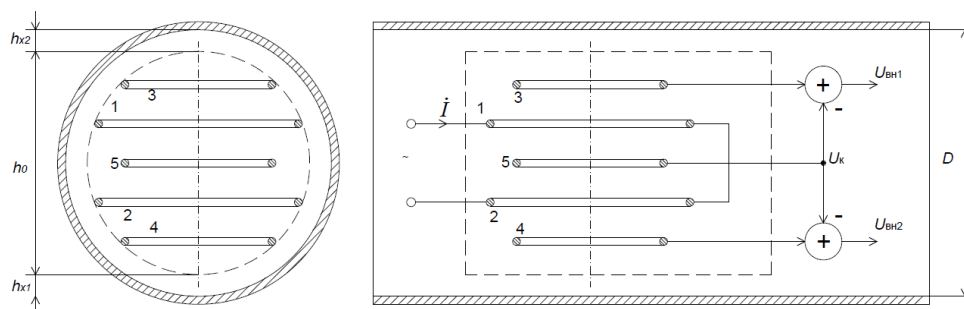


Рисунок 1 – ВТП внутри контролируемой трубы: 1, 2 – обмотки возбуждения; 3, 4 – измерительные обмотки; 5 – компенсационная обмотка

зуется 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 μ должно обеспечивать равенство начальных напряжений этих обмоток.

В результате, измерение внутреннего диаметра сводится к тому, чтобы измерять зазор между вихретоковым преобразователем и объектом контроля. При этом, глубина проникновения электромагнитного поля меньше толщины стенки трубы и обмотки имеют бесконечно малое поперечное сечение.

Начальные напряжения измерительных и компенсационной обмоток определяются взаимоиנדуктивностями M_i между соответствующей обмоткой и обмотками возбуждения (1).

$$U_{0i} = j\omega M_i \dot{I}, \quad (1)$$

где i – номер обмотки в соответствии с рисунком 1; ω – угловая частота тока возбуждения.

Значение взаимоиנדуктивности M_{ij} между двумя коаксиальными обмотками с числами витков w_i и w_j и радиусами R_i и R_j с может быть определено при помощи выражения (2).

$$M_{ij} = \pi \mu w_i w_j \sqrt{R_i R_j} \int_0^\infty \exp\left(-\frac{h_{ij}}{\sqrt{R_i R_j}} x\right) \cdot J_1\left(\sqrt{\frac{R_i}{R_j}} x\right) \cdot J_1\left(\sqrt{\frac{R_j}{R_i}} x\right) dx. \quad (2)$$

где μ_0 – магнитная постоянная; h_{ij} – расстояние между плоскостями витков обмоток; J_1 – функция Бесселя первого рода первого порядка; x – параметр интегрирования.

При помощи (2) могут быть определены значения взаимоиנדуктивностей (3).

$$M_3 = M_{31} + M_{32}; M_4 = M_{41} + M_{42}; M_5 = M_{51} + M_{52}. \quad (3)$$

В соответствии с (2), выражение (3) можно записать как произведения чисел витков измерительных либо компенсационной обмоток и соответствующих функций расстояний между обмотками и радиусов обмоток:

$$M_3 = w_3 Q_3; M_4 = w_4 Q_4; M_5 = w_5 Q_5.$$

Для определения вносимого напряжения вихретокового преобразователя, необходимо воспользоваться выражением (4) для накладного трансформаторного ВТП с двумя

Для определения функции преобразования $U_{вн1}$ и $U_{вн2}$ в h_{x1} и h_{x2} соответственно, был привлечён дополнительный математический пакет OriginPro. Для получения обратной характеристики $h_x \rightarrow U_{вн}$ необходимо сначала

обмотками i и j над полупространством с плоской границей раздела k .

$$\dot{U}_{ij} = j\pi \mu_0 w_i w_j \omega \sqrt{R_i R_j} \int_0^\infty \dot{\phi}_{ок} \exp\left(-\frac{h_{ik} + h_{jk}}{\sqrt{R_i R_j}} x\right) \cdot J_1\left(\sqrt{\frac{R_i}{R_j}} x\right) \cdot J_1\left(\sqrt{\frac{R_j}{R_i}} x\right) dx, \quad (4)$$

где h_{ik} – расстояние между плоскостью витков обмотки i и границей раздела k ; h_{jk} – расстояние между плоскостью j и границей раздела k ; $\dot{\phi}_{ок}$ – функция влияния объекта контроля.

Система контроля внутреннего диаметра труб

Для дальнейшего определения функций преобразования, необходимо реализовать данный метод в системе контроля внутреннего диаметра труб, являющийся по принципу построения компьютерным средством измерения. На рисунке 2 изображена структурная схема контроля состоящая из: 1 – генератора, 2 – измерительного зонда, 3 – схемы амплитудно-фазовой обработки сигналов, 4 – вычислительного блока.

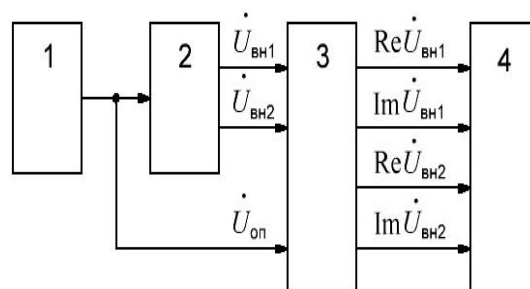


Рисунок 2 – Структурная схема системы измерения внутреннего диаметра труб

В состав измерительного зонда входят вихретоковый преобразователь и усилители. Гармонические выходные напряжения измерительного зонда, пропорциональные вносимым напряжениям $U_{вн1}$ и $U_{вн2}$ преобразуются амплитудно-фазовыми детекторами блока 3 в постоянные напряжения, пропорциональные действительным и мнимым составляющим вносимых напряжений. Затем, данные напряжения оцифровываются и передаются в компьютер при помощи платы сбора данных USB3000. Для разработки программного обеспечения необходимого обрабатывать полученные ранее сигналы и вычисление h_{x1} и h_{x2} , используется пакет LabView. получить прямую зависимость $U_{вн} \rightarrow h_x$. Экспериментальным путём были получены значения зависимости напряжения от расстояния и построена соответствующая характеристика, представленная на рисунке 3.

ИЗМЕРЕНИЕ ВНУТРЕННЕГО ДИАМЕТРА ПРОВОДЯЩЕЙ ТРУБЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

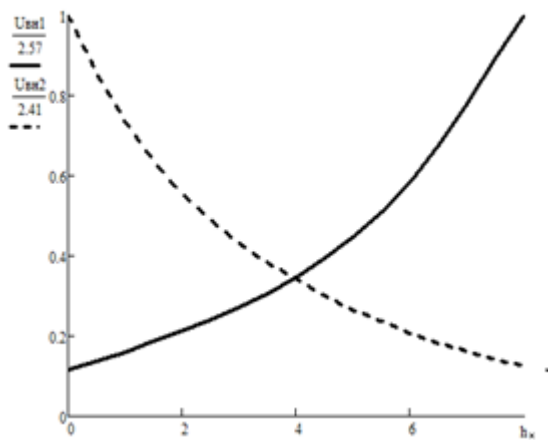


Рисунок 3 – Зависимость $U_{вн} / U_{внМАХ}$ от h_x

На основе зависимостей полученных экспериментальным путём, обратную функцию можно аппроксимировать следующим образом:

$$h_x = a - b \cdot \ln\left(\frac{U_{вн}}{U_{внМАХ}} + c\right), \quad (5)$$

где a , b и c — коэффициенты функции рассчитанные в OriginPro и являются для каждой обмотки своими.

По выражению (5) аналитически были рассчитаны h_1 и h_2 и построены соответствующие графики (рисунок 4).

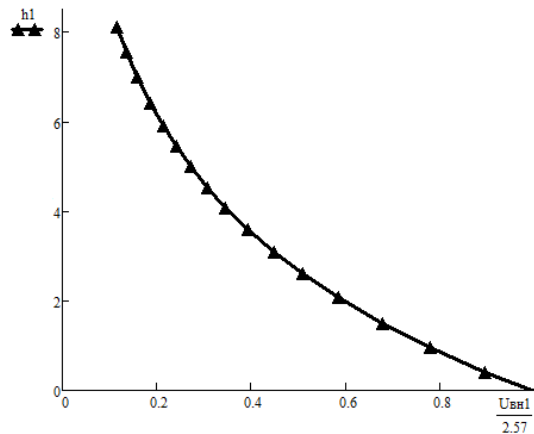


Рисунок 4 – Аппроксимация функции преобразования напряжения в расстояние

По полученной функции уже можно рассчитать расстояние между стенкой объекта контроля и каждым накладным ВТП и зная расстояние между преобразователями получить измеряемый диаметр. При диаметре трубы в 28.2 мм, рассчитанные значения были в диапазоне от 28.15 мм до 28.28 мм. Ос-

новной причиной погрешности является серьёзный недостаток в конструкции измерительного зонда. Заданная точность (± 0.2 мм) достигается только при условии, когда зонд смещается вдоль оси расположения обмоток преобразователя. Данная проблема решается путём модификации первичного преобразователя. Дополнительно, перпендикулярно двум существующим преобразователям включается пара вихретоковых преобразователей для компенсации напряжения возникающего смещения.

Экспериментальным путём была определена зависимость при смещении зонда вдоль оси перпендикулярной первой (рисунок 5а). Данную функцию можно аппроксимировать (рисунок 5б) при помощи выражения 6,

$$x = a + b \cdot U_{вн} + c \cdot U_{вн}^2. \quad (6)$$

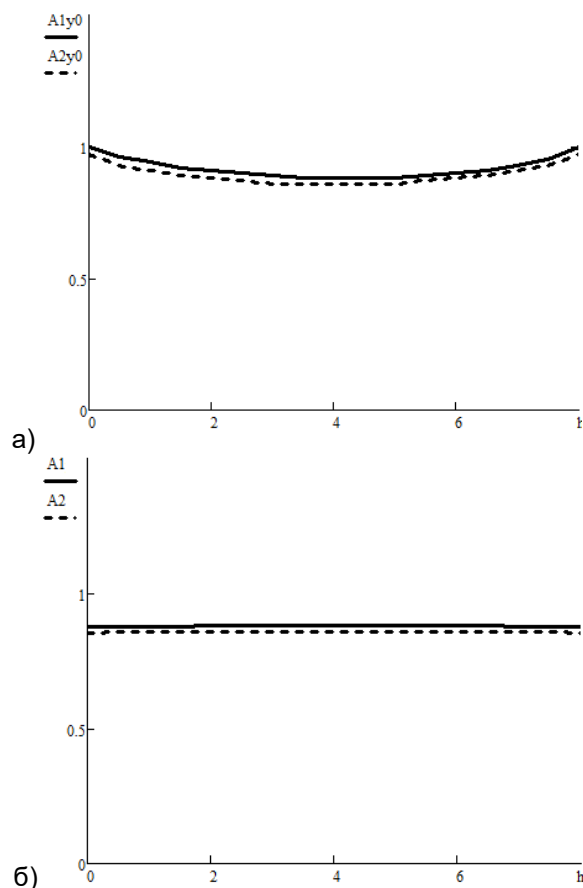


Рисунок 5: а – зависимость напряжения от смещения зонда вдоль перпендикулярной оси; б – аппроксимация

Благодаря внесению дополнительной функции в программу устройства, можно добиться более высокой точности измерения.

Вывод

В итоге проведённого исследования разработано устройство измерения внутреннего диаметра труб, состоящих из проводящего материала, реализующее вихретоковый метод. Была определена функция вычислительного преобразования сигналов ВТП. Также была предложена модификация первичного преобразования путём установки дополнительных вихретоковых преобразователей, перпендикулярно имеющимся для компенсации возникающего напряжения. При измерении диаметра труб из аустенитных и ферромагнитных сталей было определено, что в диапазонах изменений диаметра (22...29) мм может быть обеспечена абсолютная погреш-

ность измерений, не превышающая (0,1...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].

Д.т.н., профессор А.Е. Гольдштейн, e-mail:
algol@tpu.ru;
аспирант Е.К. Киселёв, e-mail: ekk1@tpu.ru.