

УДК 621.315.3:681.586

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ВНУТРЕННЕГО ДИАМЕТРА ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ТРУБ

Чжун Ян

Томский политехнический университет

E-mail: yan.tchzhun@yandex.ru

**Чжун Ян**, магистр кафедры информационно-измерительной техники Института неразрушающего контроля ТПУ.  
E-mail: yan.tchzhun@yandex.ru  
**Область научных интересов:** неразрушающий контроль методами вихревых токов.

В данной работе рассмотрена актуальность разработки системы контроля внутреннего диаметра электропроводящих труб и её состав. Приведены конструкция накладного трансформаторного вихретокового преобразователя с пятью обмотками и принцип его действия. Получена функция преобразования накладного трансформаторного вихретокового преобразователя. Приведены

результаты математического моделирования и экспериментов. Представлены графики расчетного и экспериментального результатов. Сделан вывод о том, что система контроля внутреннего диаметра работает с высокой точностью. Показано, что система контроля внутреннего диаметра может применяться на практике и следует продолжать работать по данной теме в будущем.

### Ключевые слова:

Система контроля внутреннего диаметра, накладный трансформаторный вихретоковый преобразователь, математическое моделирование, внутренний диаметр, контроль, измерение, точность.

Для обеспечения надежности при эксплуатации различных электропроводящих труб необходимо контролировать в процессе производства и эксплуатации различные параметры, наиболее важным которых является внутренний диаметр трубы. Отсюда вытекает актуальность разработки системы контроля внутреннего диаметра электропроводящих труб.

Система контроля внутреннего диаметра (СКВД) состоит из генератора, измерительного зонда, схемы амплитудно-фазовой обработки сигналов (САФОС), платы сбора данных (ПСД), персонального компьютера (ПК) и блока питания (БП) (рис. 1) [1].

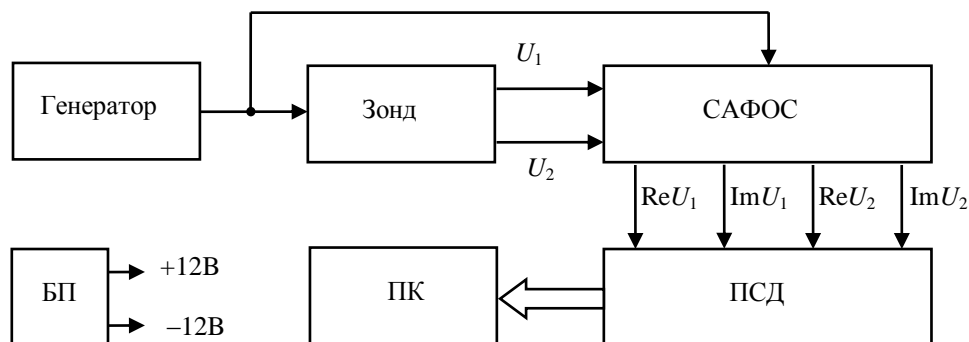


Рис. 1. Структурная схема системы контроля внутреннего диаметра трубы

Для измерения внутреннего диаметра электропроводящих труб используется накладной трансформаторный вихретоковый преобразователь (НТВТП) (рис. 2), принцип действия которого основан на измерительном преобразовании в полях вихревых токов. Измерительное преобразование в полях вихревых токов основано на возбуждении в электропроводящих объектах переменным магнитным полем вихревых токов и зависимости параметров этих токов от свойств объекта и, в частности, от расстояния (зазора) между поверхностью объекта контроля и НТВТП.

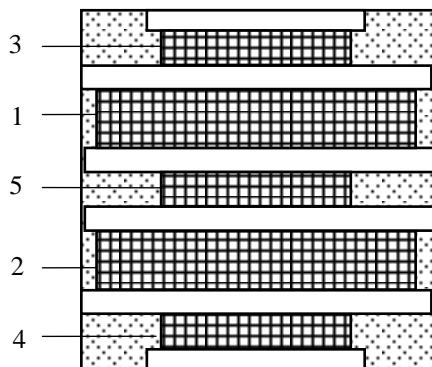


Рис. 2. Конструкция накладного трансформаторного вихретокового преобразователя

По технической сущности НТВТП системы контроля состоит из двух вихретоковых преобразователей (ВТП). Первый из них содержит обмотку возбуждения 1 и измерительную обмотку 3, а второй – обмотку возбуждения 2 и измерительную обмотку 4, обмотка 5 – компенсационная.

Суть измерения диаметра заключается в том, что первый ВТП измеряет зазор  $h_1$  между поверхностью трубы и одним торцом преобразователя, а второй ВТП – зазор  $h_2$  между поверхностью трубы и другим торцом преобразователя. Далее суммируются оба зазора и длина НТВТП  $h_0$  для определения внутреннего диаметра трубы. Принцип измерения НТВТП показан на рис. 3.

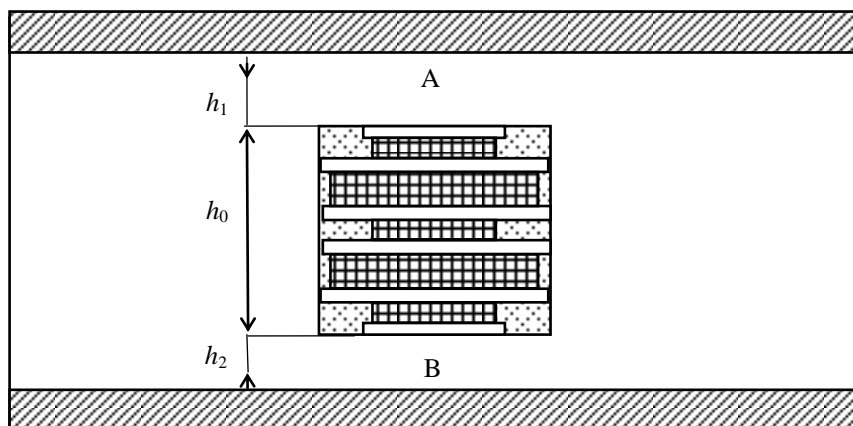


Рис. 3. Принцип измерения внутреннего диаметра трубы накладным трансформаторным вихретоковым преобразователем

При математическом моделировании использован НТВТП длиной 18 мм и труба с внутренним диаметром 21 мм.

Известно, что комплексное вносимое напряжение двухобмоточного ВТП определяется выражением [2]

$$\dot{U}_{\text{ВН}} = j\mu_0 W_{\text{В}} W_{\text{И}} \omega I R \pi \int_0^{\infty} \varphi_{\text{ОК}} \cdot \exp(-xh^*) \cdot J_1\left(x \frac{R_{\text{В}}}{R_{\text{И}}}\right) \cdot J_1\left(x \frac{R_{\text{И}}}{R_{\text{В}}}\right) dx, \quad (1)$$

где  $j = \sqrt{-1}$  – мнимая единица;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная;  $w_{\text{И}}$ ,  $w_{\text{В}}$  – количество витков возбуждающей и измерительной обмоток;  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота;  $f$  – частота

возбуждающей обмотки;  $R = \sqrt{R_B R_{II}}$  – эквивалентный радиус двух обмоток ВТП;  $R_B, R_{II}$  – средние радиусы возбуждающей и измерительной обмоток;  $h^* = (h_B + h_{II})/R$  – обобщенный параметр, характеризующее расстояние между центрами обмоток ВТП и поверхностью объекта контроля;  $h_{II}, h_B$  – расстояния от центра соответствующих обмоток ВТП до внешней поверхности объекта контроля;  $J_1$  – функция Бесселя первого рода первого порядка.

С использованием преобразованного выражения (1) при высокой частоте  $f = 150$  кГц ( $\Phi_{ок}=1$ ) теоретически рассчитали относительное выходное напряжение НТВТП от изменения зазора между НТВТП и внутренней поверхностью трубы выражениями [1]

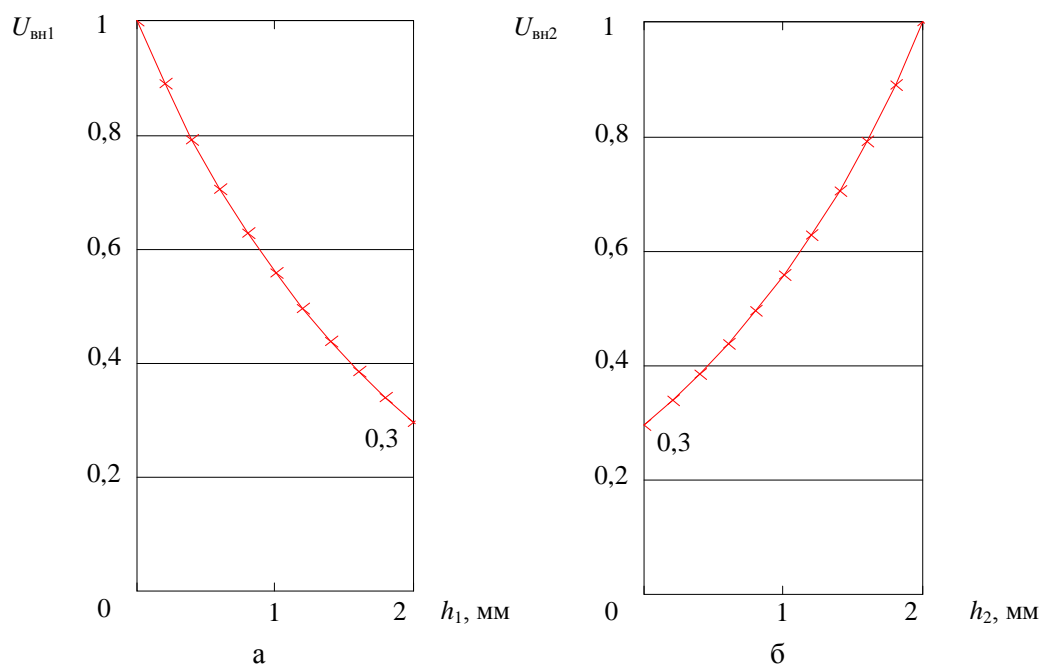
$$\begin{aligned} U_{вн1} &= U_{вн31A} + U_{вн31B} + U_{вн32A} + U_{вн32B} - U_{вн51A} - U_{вн51B} - U_{вн52A} - U_{вн52B}, \\ U_{вн2} &= U_{вн41A} + U_{вн41B} + U_{вн42A} + U_{вн42B} - U_{вн51A} - U_{вн51B} - U_{вн52A} - U_{вн52B}. \end{aligned} \quad (2)$$

Используемое для вычисления диаметра по результатам измерения вносимых напряжений уравнение обратного преобразования имеет вид

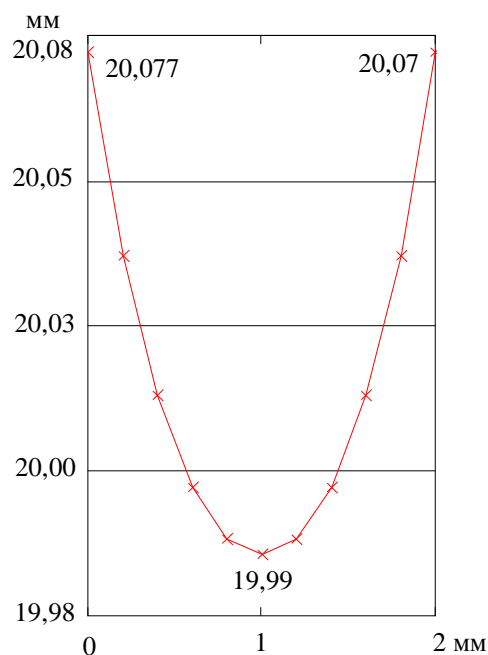
$$D = h_0 + K \cdot (\ln A_1 + \ln A_2), \quad (3)$$

где  $K$  – коэффициент, зависящий от свойств трубы;  $A_1, A_2$  – соответствующие амплитуды относительного выходного напряжения НТВТП  $U_{вн1}, U_{вн2}$ .

Результаты расчёта относительного вносимого напряжения НТВТП от изменения зазора  $h$  показаны на рис. 4. На графиках видно, что зависимость относительного вносимого напряжения НТВТП от изменения зазора первой измерительной обмотки зеркально аналогичной зависимости для второй измерительной обмотки. Это объясняется тем, что обмотки в ВТП расположены симметрично. На графиках также показано, что относительное вносимое напряжение НТВТП от зазора  $h$  изменяется по экспоненциальной зависимости. Отсюда вытекает целесообразность использования логарифмической функции (3) для расчета внутреннего диаметра труб.



**Рис. 4.** Относительное вносимое напряжение первой измерительной обмотке от изменения зазора  $h_1$  (а) и второй измерительной обмотке от изменения зазора  $h_2$  (б)

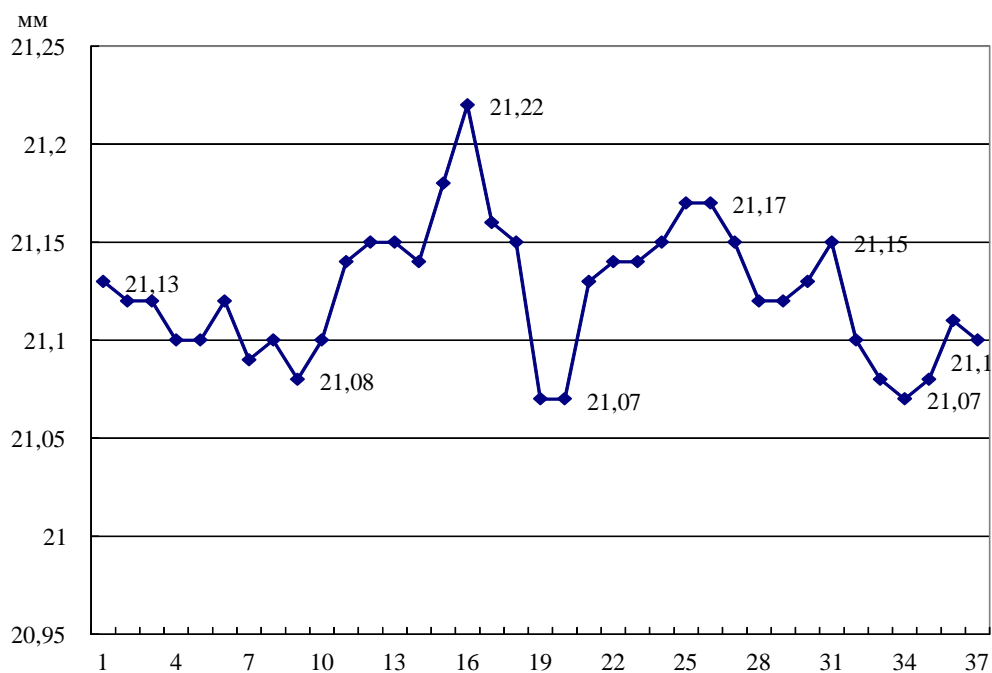


**Рис. 5.** Расчетный внутренний диаметр трубы от изменения зазора  $h$

На рис. 5 показаны результаты численного моделирования измерительного преобразования относительных вносимых напряжений НТВТП по полученным уравнениям в значения внутреннего диаметра труб. Из рисунка видно, что при изменении зазора до  $h_{\max} = 2$  мм максимальный расчетный внутренний диаметр равен 20,077 мм, а минимальный – равен 19,99 мм.

Отсюда получили абсолютную погрешность измерения диаметра 0,087 мм и относительную погрешность 0,435 %. С такими расчетными результатами можно сказать, что использованные выражения (1), (2) и (3) позволяют с высокой точностью рассчитывать внутренние диаметры трубы.

В эксперименте проводились измерения для трубы из нержавеющей стали с внутренним диаметром 21 мм (рис. 6). Из рисунка видно, что максимальное отклонение от действительного значения составляет 0,22 мм. При этом максимальная относительная погрешность составляет 1,05 %. С такими результатами в целом можно сказать, что СКВД работает с высокой точностью и может применяться на практике.



**Рис. 6.** Экспериментальным путем измерения внутреннего диаметра трубы 21 мм

В дальнейшей работе, чтобы улучшить точность измерения СКВД, в функции расчёта вносимого напряжения (1) будем учитывать электропроводимость, относительную магнитную проницаемость материала труб, температуру и т. д. А для расчета внутреннего диаметра труб скорректируем функцию (3) чтобы уменьшить систематическую погрешность.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольдштейн А.Е., Булгаков В.Ф. Контроль внутреннего диаметра труб вихретоковым методом. – Дефектоскопия. – 2013. – № 11. – С. 51–58.
2. Неразрушающий контроль. Справочник / под ред. В.В. Клюева: в 7 т. Т 2: в 2 кн. Кн. 1: Контроль герметичности. Кн. 2: Вихретоковый контроль. – М.: Машиностроение, 2003. – 688 с.

Поступила 06.10.2014