

УДК 621.3.014

**ВИХРЕТОКОВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВНУТРЕННЕГО
ДИАМЕТРА ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ТРУБ
(EDDY CURRENT TRANSDUCER FOR MEASURING THE INTERNAL DIAMETER OF
ELECTRICALLY CONDUCTIVE PIPES)**

Чжун Ян
Zhong Yang

Научный руководитель: А.Е. Гольдштейн
scientific supervisor: A.E. Goldstein

Томский политехнический университет
E-mail: yan.tchzhun@yandex.ru

В данной работе рассмотрена актуальность разработки вихретокового преобразователя измерения внутреннего диаметра электропроводящих труб. Приведены конструкция накладного трансформаторного вихретокового преобразователя и его принцип действия. В соответствии с выбранной конструкцией накладного трансформаторного вихретокового преобразователя представлены расчет вносимого напряжения измерительной обмотки, расчет функции преобразования вносимого напряжения во внутренний диаметр трубы. Приведены результаты математического моделирования и экспериментов. Показано, что результаты расчета и эксперимента близки. Сделан вывод, что вихретоковый преобразователь работает с высокой точностью, его можно применять на практике и следует продолжать работать под данной темой в будущем.

(In this paper we considered the relevance of research the eddy current transducer for measuring the internal diameter of electrically conductive pipes. Show the construction of overhead transforming eddy current transducer with five windings and its measuring principle. According to the selected construction of the overhead transforming eddy current transducer, the functions by calculating the output voltage of the measuring windings and the function by calculating internal diameter of the pipes are presented. We showed the results of mathematical modeling and experiments. It is shown that the calculated and experimental results are close. It is concluded that the eddy current transducer operates with high accuracy and it can be applied in practice, and should continue study under this topic in the future.)

Ключевые слова:

Вихретоковый преобразователь, математическое моделирование, внутренний диаметр, электропроводящая труба, зазор, измерение, точность.

(Eddy current transducer, mathematical modeling, internal diameter, electrically conductive pipe, measurement, accuracy.)

Для обеспечения надежности при эксплуатации различных электропроводящих труб необходимо контролировать в процессе производства и эксплуатации различные параметры. При широком использовании электропроводящих труб в промышленности и в бытовой сфере возникает задача контроля внутреннего диаметра труб. Конкурентными преимуществами вихретокового метода по сравнению с альтернативными методами контроля являются отсутствие необходимости контакта с поверхностью трубы, высокая скорость контроля, широкий диапазон измеряемых диаметров труб, простота калибровки, малое влияние внешних факторов, отсутствие необходимости доступа к наружной поверхности трубы, возможность автоматизации процесса контроля и протоколирования его результатов [1]. Отсюда вытекает актуальность разработки вихретокового преобразователя для измерения внутреннего диаметра электропроводящих труб.

Для измерения внутреннего диаметра электропроводящих труб используется накладной трансформаторный вихретоковый преобразователь (НТВТП) (рис.1). Измерительное преобразование в полях вихревых токов основано на возбуждении в электропроводящих объектах переменным магнитным полем вихревых токов и зависимости параметров этих токов

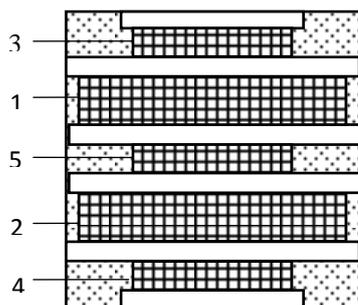


Рис.1. Конструкция накладного трансформаторного вихретокового преобразователя

от свойств объекта и, в частности, от расстояния (зазора) между поверхностью объекта контроля и НТВТП.

Переменным током, протекающим через последовательно соединенные и согласно включенные обмотки возбуждения 1 и 2, создается переменное магнитное поле, наводящее вихревые токи в поверхностном слое контролируемой трубы. Измерение индуцированных вихревых токов осуществляется с помощью измерительных обмоток 3 и 4. Обмотка 5 используется для компенсации начальных напряжений измерительных обмоток. 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 измерительных обмоток η должно обеспечивать равенство начальных напряжений этих обмоток [1].

Задача измерения внутреннего диаметра трубы, по сути, сводится к классической для вихретокового метода контроле задаче измерения зазоров между накладным ВТП и поверхностью электропроводящего объекта. Поэтому для создания модели взаимодействия магнитного поля ВТП с объектом контроля могут быть использованы известные математические выражения, приведенные в частности в [2]. При этом полагаем, что обмотки имеют бесконечно малое поперечное сечение, а глубина проникновения электромагнитного поля меньше толщины стенки трубы.

В данном случае измерение диаметра заключается в том, что измерительная обмотка 3 измеряет зазор h_1 между поверхностью трубы и одним торцом преобразователя, измерительная обмотка 4 измеряет зазор h_2 между поверхностью трубы и другим торцом преобразователя. В

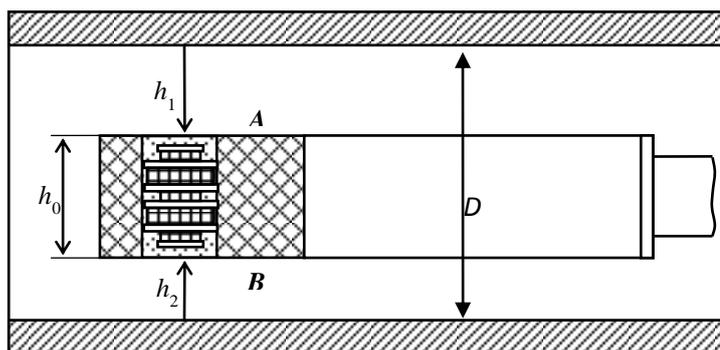


Рис. 2. Принцип измерения внутреннего диаметра трубы накладным трансформаторным вихретоковым преобразователем

конце суммируются измеряемые значения двух зазора и диаметр НТВТП h_0 для определения внутреннего диаметра трубы D . Принцип измерения НТВТП показан на рис. 2.

При математическом моделировании использованы НТВТП с диаметром 16мм и трубы с внутренними диаметрами 17мм, 18мм, 19мм, 20мм. Известно что комплексное вносимое напряжение двухобмоточного ВТП определяется выражением[2]:

$$\dot{U}_{ВН} = j\mu_0 W_B W_H \omega I R \pi \int_0^\infty \varphi_{OK} \cdot \exp(-xh^*) \cdot J_1(x \frac{R_B}{R_H}) \cdot J_1(x \frac{R_H}{R_B}) dx, \quad (1)$$

где $j = \sqrt{-1}$ – мнимая единица; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнитная постоянная; $w_{\text{И}}, w_{\text{В}}$ – количество витков возбуждающей и измерительной обмоток; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота; f – частота возбуждающей обмотки; $R = \sqrt{R_{\text{В}}R_{\text{И}}}$ – эквивалентный радиус двух обмоток ВТП; $R_{\text{В}}, R_{\text{И}}$ – средние радиусы возбуждающей и измерительной обмоток; $h^* = (h_{\text{В}} + h_{\text{И}})/R$ – обобщенный параметр, характеризующее расстояние между центрами обмоток ВТП и поверхностью объекта контроля; $h_{\text{И}}, h_{\text{В}}$ – 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, $\Phi_{\text{ок}}=1$, теоретически рассчитали для каждой измерительной обмотки вносимое напряжение от изменения зазора между НТВТП и внутренней поверхностью трубы выражениями [1]:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\text{ВН1}} &= \dot{U}_{\text{ВН31A}} + \dot{U}_{\text{ВН31B}} + \dot{U}_{\text{ВН32A}} + \dot{U}_{\text{ВН32B}} - \dot{U}_{\text{ВН51A}} - \dot{U}_{\text{ВН51B}} - \dot{U}_{\text{ВН52A}} - \dot{U}_{\text{ВН52B}}, \\ \dot{U}_{\text{ВН2}} &= \dot{U}_{\text{ВН41A}} + \dot{U}_{\text{ВН41B}} + \dot{U}_{\text{ВН42A}} + \dot{U}_{\text{ВН42B}} - \dot{U}_{\text{ВН51A}} - \dot{U}_{\text{ВН51B}} - \dot{U}_{\text{ВН52A}} - \dot{U}_{\text{ВН52B}}, \end{aligned} \quad (2)$$

При использовании выражений (2), получены результаты расчета вносимого напряжения в измерительных обмотках от изменения зазора при внутренних диаметрах труб равных 17мм, 18мм, 19мм, 20мм (рис.3).

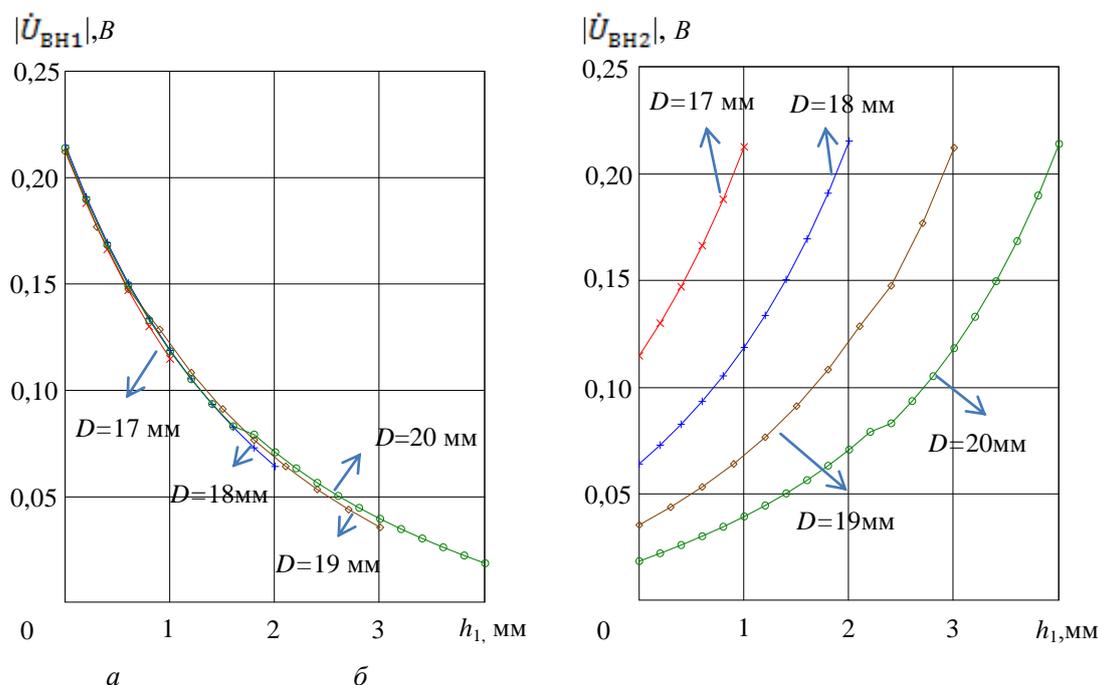


Рис. 3. Вносимые напряжения в:
 а – измерительной обмотке 3 от изменения зазора h_1
 б – измерительной обмотке 4 от изменения зазора h_1 .

Рис. 3а показывает результаты расчета вносимого напряжения в измерительной обмотке 3 от изменения зазора при диаметрах труб равных 17мм, 18мм, 19мм, 20мм. Рис. 3б показывает результаты расчета вносимого напряжения в измерительной обмотке 4 от изменения зазора при диаметрах труб равных 17мм, 18мм, 19мм, 20мм. Расчетные результаты были получены при допущении что изменение зазора начинается с торцом измерительной обмотки 3.

Нарис. 3а видно, что при измерении разных диаметров труб расчетные начальные вносимые напряжения в измерительной обмотке 3 от изменения зазора имеют одни и те же значения. Такие расчетные результаты получены при допущении, что кривизна внутренней поверхности трубы не является фактором влияния. На рис. 3б заметно, что зависимости результатов расчета от изменения зазора отличаются от зависимостей рис. 3а. На самом деле, из-за симметричности размещения измерительных обмоток, нетрудно заметить, что конечные результаты расчета в измерительной обмотке 4 от изменения зазора равны начальным результатам расчета от изменения зазора в измерительной обмотке 3.

Для расчета внутреннего диаметра труб осуществляется нормирование значений комплексных составляющих $\dot{U}_{ВН}$ по отношению к максимальному значению вносимого напряжения \dot{U}_m , соответствующему значениям расстояния $h_1 = 0$ и $h_2 = 0$ и функции влияния $|\varphi_{ОК}|=1$, что имеет место $\beta \rightarrow \infty$. Тогда относительное вносимое напряжение в измерительной обмотке определяется формулой:

$$\dot{U}_{ВН}^* = \dot{U}_{ВН} / \dot{U}_m \quad (3)$$

После нормировки, внутренние диаметры труб определяются с помощью выражения:

$$D = h_0 + K \cdot (\ln A_1 + \ln A_2) \quad (4)$$

где K – коэффициент, зависящий от свойств трубы; A_1, A_2 – соответствующие амплитуды относительного вносимого напряжения в измерительной обмотке $3\dot{U}_{ВН1}^*$ и в измерительной обмотке $4\dot{U}_{ВН2}^*$. Расчетные значения внутренних диаметров труб показаны на рис. 4. Результаты анализа приведены в таб. 1.

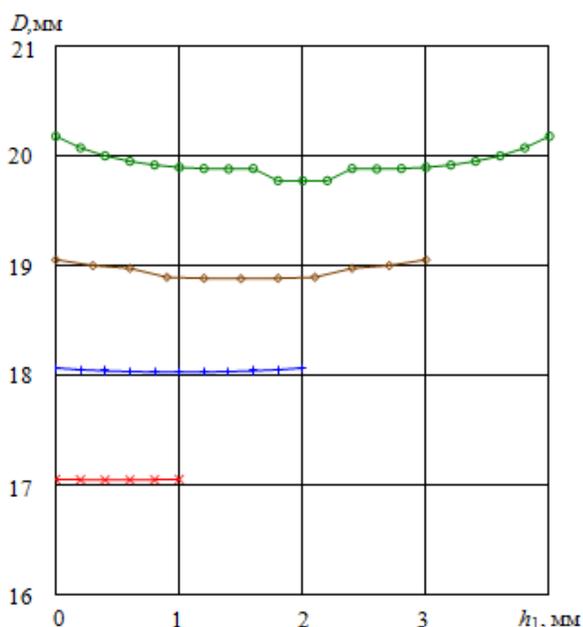


Рис. 4. Расчетные внутренних диаметров труб от изменения зазора h_1

Таблица 1. Результаты анализа моделированных значений внутренних диаметров труб.

Истинные значения D_x , мм	Общий зазор $(h_1 + h_2)$, мм	Расчетные значения D_x , мм	Максимальная абсолютная погрешность Δ , мм	Максимальная относительная погрешность, %
17	1	17,05	0,05	0,29
18	2	18,03...18,07	0,07	0,39
19	3	18,88...19,05	0,12	0,63
20	4	19,77...20,18	0,23	1,15

На рис. 4 видно, что расчетные значения внутренних диаметров труб отличаются от истинных. Это говорит о том, что использованные функции преобразования не могут идеально воспроизводить требуемую функцию преобразования. При анализе расчётных результатов в таб. 1, получается, что погрешность определения диаметра трубы с использованием выражений (1), (2), (3) и (4) увеличивается при возрастании внутреннего диаметра трубы при сохранении наружного диаметра НТВТП. Погрешность меньше при приближении диаметра преобразователя к внутреннему диаметру трубы.

В случае, если разность между диаметром трубы и диаметром НТВТП не превышает 3 мм, максимальная относительная погрешность не превышает 1%. Такие результаты показывают, что использованные выражения (1), (2), (3) и (4) обеспечивают достаточную точность определения внутреннего диаметра трубы и могут быть использованы для решения реальной задачи.

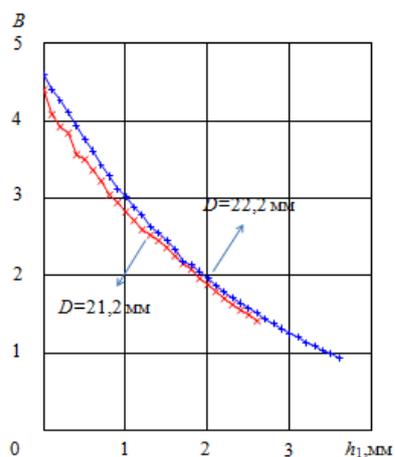


Рис. 5. Измеренные значения вносимых напряжений: в измерительной обмотке 3 от изменения зазора h_1

Далее была осуществлена экспериментальная проверка эффективности вихретокового метода измерения внутреннего диаметра труб с использованием описанного НТВТП.

В экспериментах проводились измерения внутреннего диаметра труб из нержавеющей аустенитной стали с номинальными внутренними диаметрами 21,2 мм и 22,2 мм и из ферромагнитной стали с номинальным внутренним диаметром 27,6 мм. Диаметр использованного НТВТП составлял 18,6 мм. Результаты экспериментов получены при использовании программного обеспечения LabView, а графики зависимостей были построены с помощью программы Mathcad.

В связи с тем, что результаты измерения вносимого напряжения в измерительной обмотке 4 имеют одни и те же значения в измерительной обмотке 3. На рис. 5 приведены только результаты измерения вносимого напряжения в измерительной обмотке 3 от изменения зазора для труб из нержавеющей аустенитной стали с номинальными внутренними диаметрами 21,2 мм и 22,2 мм. Видно, что результаты эксперимента близки результатам математического моделирования рис. 3. Но вносимые напряжения, соответствующие нулевым зазорам, по результатам эксперимента и математического моделирования отличаются. Это говорит о том, что кривизна внутренней поверхности трубы влияет на результаты измерения, и это следует учитывать при математическом моделировании.

После нормировки вносимого напряжения с помощью выражения (3), для определения внутренних диаметров труб, использовали выражение (4) и получили значения внутренних диаметров, показанные на рис. 6. Результаты анализа измерений приведены в таб. 2.

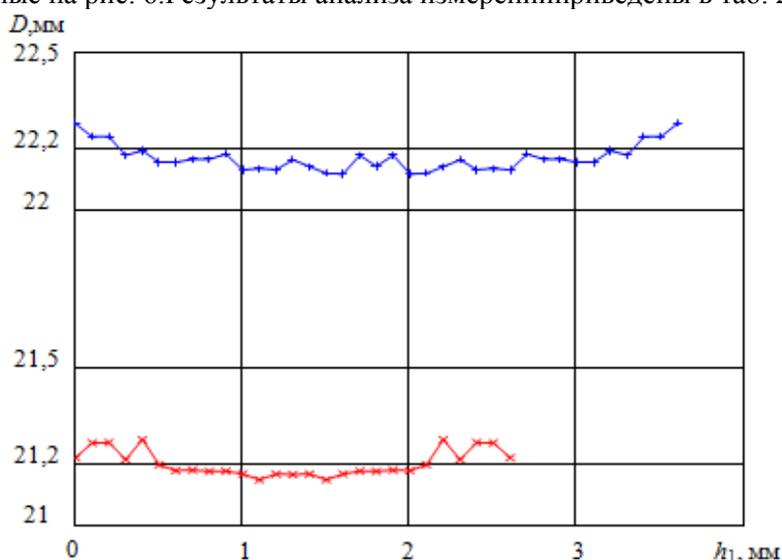


Рис. 6. Измеренные внутренние диаметры труб от изменения зазора h_1

Таблица 2. Результаты измерений внутренних диаметров труб из нержавеющей аустенитной стали.

Номинальные значения D , мм	Общий зазор $(h_1 + h_2)$, мм	Измеренные значения D_x , мм	Максимальная абсолютная погрешность Δ , мм	Максимальная относительная погрешность, %
21,2	2,6	21,15...21,27	0,07	0,33
22,2	3,6	22,12...22,28	0,08	0,36

На рис. 6 видно, что результаты измерения внутренних диаметров труб отличаются от номинальных значений. При анализе результатов измерения в таб. 2 видно, что измеренные трубы с внутренним диаметром 21,2мм, максимальная абсолютная погрешность составляет 0,07мм и максимальная относительная погрешность 0,33%. При измерении трубы с внутренним диаметром 22,2мм, максимальная абсолютная погрешность составляет 0,08мм и максимальная относительная погрешность 0,36%. Получается, что погрешности измерения имеют приемлемые значения при возрастании внутреннего диаметра труб и сохранении наружного диаметра НТВТП увеличиваются.

Аналогичные результаты измерения получили для трубы из ферромагнитной стали с номинальным внутренним диаметром 27,6мм. Результаты измерения вносимого напряжения в измерительной обмотке 3 от изменения зазора показаны на рис. 7. В соответствии, измеренное значение внутреннего диаметра трубы показано на рис. 8. Диаметр использованного НТВТП также составлял 18,6мм.

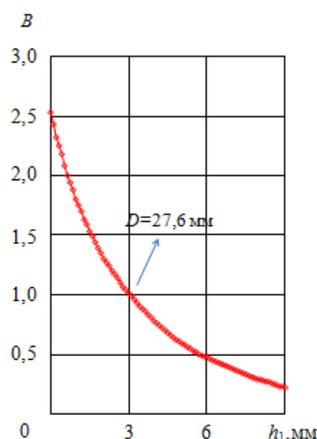


Рис. 7. Вносимые напряжения в измерительной обмотке 3 от изменения зазора h_1

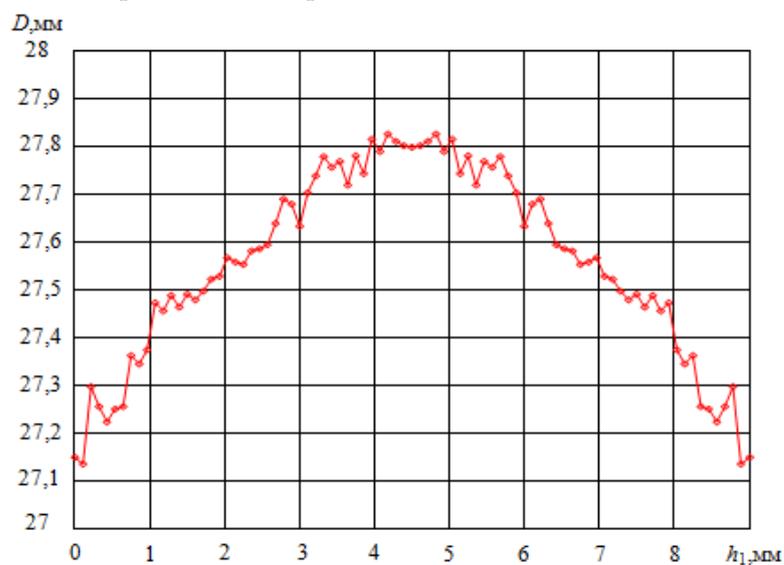


Рис. 8. Измеренный внутренний диаметр трубы от изменения зазора h_1

На рис. 8 видно, что результат измерения внутреннего диаметра трубы отличается от номинального значения. Максимальная абсолютная погрешность измерения составляет 0,47мм

максимальная относительная погрешность 1,7%. Получается, что при общем зазоре 9 мм, погрешность измерения уже большая. Поэтому в таком случае не следует применять НТВТПс диаметром меньше 18,6мм, а надо применять НТВТП с диаметром больше, чем 18,6мм.

Таким образом, сравнение экспериментальных результатов с результатами математического моделирования показывает их малое расхождение. При зазоре между внутренним диаметром трубы и диаметром НТВТП не более 4мм, относительная погрешность измерения не превышает 1%. Следовательно исследованный НТВТП может быть эффективно использован для решения задачи измерения внутреннего диаметра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

Сведения о авторах:

Чжун Ян: магистр 2-ого курса, Гр. 1БМ32; учится в Томском политехническом университете, институт неразрушающего контроля по специальности “Приборостроение”. Сферой научных интересов является неразрушающий контроль методами вихревого тока.

Гольдштейн А. Е.: заведующий кафедрой информационно - измерительной техники Института неразрушающего контроля Национального исследовательского Томского политехнического университета, профессор, доктор технических наук, аттестован на III уровень квалификации по магнитному, электрическому и вихревому контролю. Основным научным направлением является разработка методов и средств измерительных преобразований в низкочастотных электромагнитных полях.