

# АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОСНОВНЫХ ВЛИЯЮЩИХ ФАКТОРОВ НА СИГНАЛ НАКЛАДНОГО ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ТОЛЩИНЫ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩЕЙ НЕМАГНИТНОЙ ТРУБЫ

*Гольдштейн А.Е., Белянков В.Ю.*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

## Введение

Накладные вихретоковые преобразователи (ВТП) нашли широкое применение при решении различных задач неразрушающего контроля: измерения толщины электропроводящих объектов и непроводящих покрытий на металлическом основании, контроля удельной электрической проводимости металлов и сплавов, дефектоскопии изделий самой разнообразной формы, структуроскопии деталей из немагнитных и ферромагнитных сплавов.

Достоинствами накладных преобразователей являются их универсальность, возможность контроля объектов плоской, цилиндрической, и сложной форм с односторонним доступом к объекту контроля, локальность, позволяющая обеспечить высокую разрешающую способность и точно определить зону дефекта при сканировании поверхности объекта контроля [1, 2].

Одной из важных задач контроля, эффективно решаемой с использованием накладных ВТП, является измерение толщины стенки труб из электропроводящих немагнитных материалов, а также толщины диэлектрических покрытий этих труб либо воздушного зазора между ВТП и поверхностью трубы.

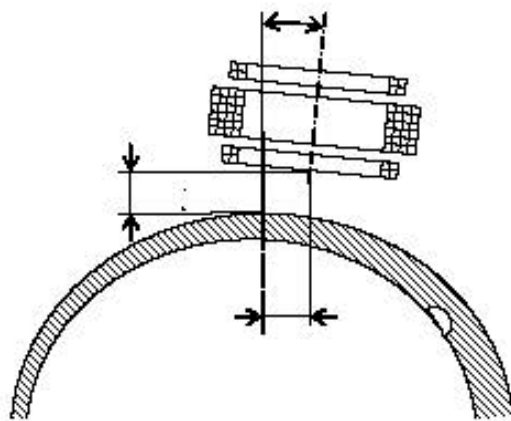


Рис. 1. Накладной ВТП, находящийся во взаимодействии с электропроводящей трубой

Практическим примером такого использования накладного ВТП, является контроль толщины стенки легкосплавных буровых труб (ЛБТ), изготавливаемых из дюрала Д16Т. Преимуществами этих труб по сравнению со стальными являются малый вес, пониженное гидравлическое сопротивление, а также немагнитность материала, что требуется для проведения инклинометрии скважин.

Настоящая работа посвящена анализу взаимодействия магнитного поля накладного ВТП с электропроводящей трубой с учетом основных влияющих факторов применительно к задаче измерения толщины стенки трубы и связанной с ее решением задаче измерения зазора между ВТП и поверхностью трубы.

## Постановка задачи исследований

На рис. 1 схематично показана конструкция накладного трансформаторного ВТП, обычно используемого для контроля толщины стенки труб. ВТП содержит обмотку возбуждения  $w_1$ , измерительную обмотку  $w_{21}$  и компенсационную обмотку  $w_{22}$ . Благодаря встречному включению измерительной и компенсационной обмоток при отсутствии

объекта контроля их начальные ЭДС взаимно компенсируются. При наличии вблизи ВТП электропроводящего объекта контроля на выходе преобразователя возникает сигнал, обусловленный вихревыми токами в объекте. В общем случае амплитуда и фаза (комплексные составляющие) вносимой ЭДС определяются амплитудой и частотой тока возбуждения, конструктивными параметрами ВТП, электромагнитными характеристиками материала и геометрическими параметрами объекта контроля, взаиморасположением ВТП и объекта контроля.

Для расчета результатов взаимодействия магнитного поля ВТП с электропроводящим объектом и нахождения функции преобразования влияющих параметров объекта в параметры сигнала ВТП хорошо себя зарекомендовали аналитические модели, позволяющие исследовать различные варианты взаимодействия при достаточно высокой степени соответствия теоретических и экспериментальных результатов [1, 3, 4].

Однако такие аналитические решения получены для ограниченного класса задач взаимодействия, предполагающих, как правило, осесимметричное взаимное расположение ВТП и объекта контроля, имеющего при этом правильную геометрическую форму (плоскую, сферическую, цилиндрическую и т.п.). Соответственно данные решения не позволяют исследовать влияние на выходной сигнал ВТП таких реально встречающихся при контроле факторов, как линейное и угловое смещение оси симметрии ВТП относительно оси симметрии объекта контроля, отклонение формы объекта контроля от правильной, наличие локальных дефектов типа трещина или локальное утонение, близость края объекта контроля.

От указанного недостатка свободны численные методы моделирования, наибольшее применение из которых для рассматриваемого класса задач имеет метод конечных элементов (МКЭ). Это численный метод решения дифференциальных уравнений с частными производными, а также интегральных уравнений, возникающих при решении задач прикладной физики. Метод широко используется для решения задач механики деформируемого твёрдого тела, теплообмена, гидродинамики и электродинамики. Преимущества МКЭ при решении реальных задач заключаются в универсальности применения, произвольной форме обрабатываемой области, отсутствии необходимости аппроксимации объекта стандартными геометрическими фигурами, возможность решения несимметричных задач с учетом неоднородности параметров материалов и сред [2].

Погрешность МКЭ определяется главным образом плотностью накладываемой сетки. Вычислительные возможности современных компьютеров делают несущественным недостаток численных методов, связанный с большим объемом вычислений при высокой плотности сетки. Кроме того, сетку можно сделать более редкой в отдельных областях с малыми значениями градиента параметров электромагнитного поля. Таким образом, использованием МКЭ может быть обеспечена высокая точность моделирования при отсутствии существенных ограничений по сложности задания граничных условий [5].

Применительно к рассматриваемой задаче взаимодействия магнитного поля накладного ВТП с электропроводящей трубой использование МКЭ позволяет осуществить анализ влияния на выходной сигнал преобразователя не только удельной электрической проводимости материала  $\sigma$ , толщины стенки  $T$  и наружного диаметра трубы  $D$ , а также зазора между ВТП и поверхностью трубы  $y$ , но, в отличие от упомянутых аналитических моделей, осуществить анализ влияния линейной  $x$  и угловой  $\alpha$  несоосностей ВТП и трубы, неодинаковости толщины и наличия локальных утонений стенки трубы (рис. 1).

При моделировании задавались следующие параметры ВТП рис. 1: наружный диаметр обмотки возбуждения – 40 мм; внутренний диаметр обмотки возбуждения – 32 мм; высота обмотки возбуждения – 10 мм; диаметр среднего витка измерительной и компенсационной обмоток – 30 мм; расстояние между расположенными симметрично

относительно обмотки возбуждения плоскостями средних витков измерительной и компенсационной обмоток – 16 мм. Частота тока возбуждения принималась равной 100 Гц.

В качестве объекта контроля рассматривалась труба из немагнитного материала с удельной электрической проводимостью  $\sigma$  в диапазоне (10...25) МСм/м с номинальным наружным диаметром  $D = 147$  мм и толщиной стенки  $T$  в диапазоне (5...15) мм. Расстояние между измерительной обмоткой ВТП и поверхностью трубы варьировалось в диапазоне (3...15) мм.

### **Моделирование взаимодействия магнитного поля ВТП и объекта в среде COMSOL Multiphysics**

Для создания 3D модели использовалась среда COMSOL Multiphysics версии 4.3a и ее модуль AC/DC раздела Magnetic fields с областью исследования Frequency domain. В данной версии предусмотрено создание многовитковых обмоток возбуждения посредством области Multi-turn coil domain. Построение геометрии элементов ВТП и объекта контроля осуществлялось с помощью встроенного графического интерфейса в разделе Geometry. Свойства материалов отдельных элементов выбирались из стандартной библиотеки в разделе Materials с корректировкой стандартных характеристик вручную.

При моделировании принималось, что наружная граница области исследования имеет форму сферы. При наложении сетки, от параметров которой напрямую зависит точность результата вычислений, для областей с более высоким градиентом изменения индукции магнитного поля выбиралась и более мелкая сетка (рис. 2).

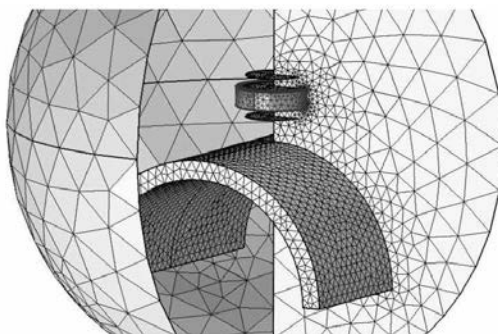


Рис. 2. Расчетная модель в среде COMSOL после наложения сетки

Для проверки адекватности разработанной модели было проведено сравнение результатов компьютерного и физического моделирования взаимодействия ВТП рис. 1 с дюралевой трубой, имеющей наружный диаметр 147 мм и удельную электропроводность материала  $\sigma = 16$  МСм/м. Частота тока возбуждения устанавливалась равной 125 Гц.

Физическое моделирование осуществлялось с использованием разработанного в Институте неразрушающего контроля ТПУ вихретокового толщиномера ВТ-15.01, обеспечивающего измерение толщины стенки труб ЛБТ в диапазоне (6...15) мм с погрешностью не более  $\pm (0,2...0,5)$  мм при изменении зазора в диапазоне (3...12) мм и отклонении электропроводности материала от номинального значения не более  $\pm 10\%$ .

На рис. 3 приведены полученные численным моделированием годографы относительного вносимого напряжения ВТП от изменения толщины стенки трубы (сплошная линия) и зазора (пунктирная линия). Ромбовидными точками показаны результаты эксперимента. Анализ зависимостей рис. 3 показывает, что результаты компьютерного и физического моделирования в данном диапазоне изменений влияющих параметров отличаются не более чем на 3%, что говорит об их достаточно высокой адекватности.

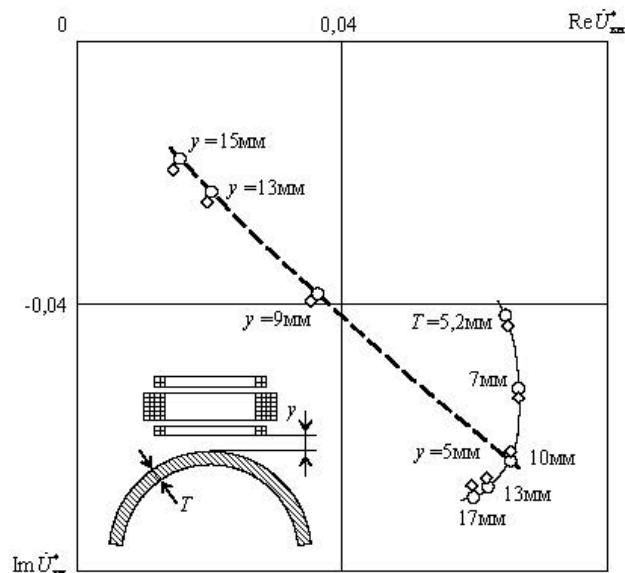


Рис. 3. Расчетные (○) и экспериментальные (◇) зависимости относительного вносимого напряжения ВТП от изменения толщины стенки трубы  $T$  и зазора  $y$

На рис. 4 приведены полученные численным моделированием при других значениях влияющих параметров годографы относительного вносимого напряжения ВТП от изменения толщины стенки трубы  $T$ , зазора  $y$  и удельной электропроводности материала  $\sigma$ . Качественно эти результаты полностью совпадают с результатами, получаемыми при использовании аналитической модели [1]. Количественное расхождение в исследуемом диапазоне изменений влияющих параметров не превышает 7%. Данные выводы в целом согласуются с результатами, полученными в [5].

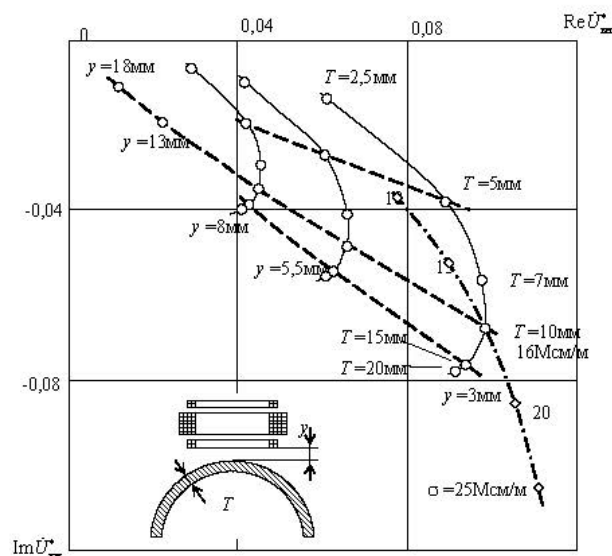


Рис. 4. Годографы относительного вносимого напряжения ВТП от изменения толщины стенки трубы  $T$ , зазора  $y$  и удельной электропроводности материала  $\sigma$

На рис. 5 приведены результаты численного моделирования влияния на сигнал накладного ВТП кривизны поверхности объекта контроля. Пунктирной линией показан годограф от изменения зазора  $y$  для случая плоской поверхности. Сплошными линиями показаны годографы от изменения радиуса кривизны  $R$  в диапазонах  $(50 \dots \infty)$  мм и  $(-\infty \dots -73)$  мм. При этом положительные значения радиуса соответствуют выпуклой

поверхности (наружная поверхность трубы), а отрицательные значения радиуса – вогнутой поверхности (внутренняя поверхность трубы).

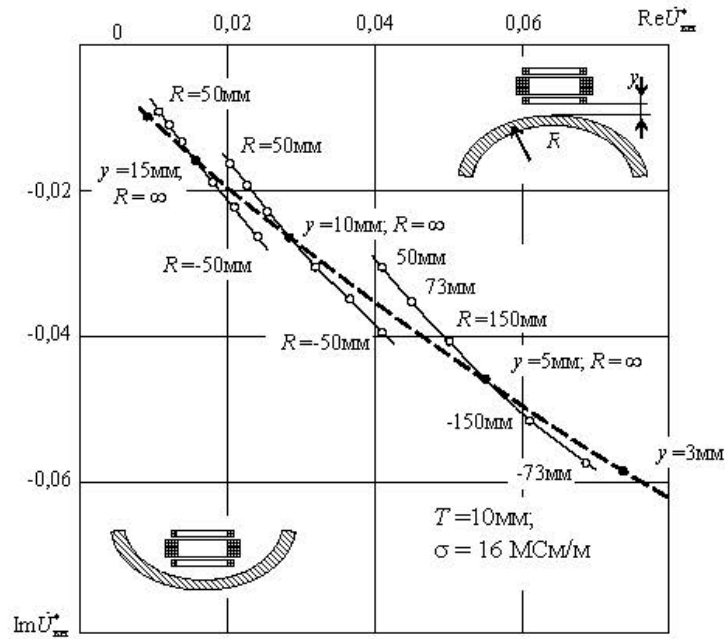


Рис. 5. Годографы относительного вносимого напряжения ВТП от изменения зазора и радиуса кривизны поверхности объекта контроля

Анализ зависимостей рис. 5 показывает, что годографы от изменения кривизны поверхности объекта контроля представляют собой близкие к прямым линии, пересекающиеся с годографом от изменения зазора под углом примерно  $(5...10)^\circ$ .

На рис. 6 приведены результаты численного моделирования влияния на сигнал накладного ВТП смещения  $x$  продольной оси ВТП относительно поперечной оси трубы. Пунктирными линиями показаны годографы от изменения  $x$  для трех значений толщины  $T$  трубы, а сплошными – годографы от изменения зазора  $y$  для этих же значений толщины. Анализ результатов моделирования показывает, что годографы от смещения  $x$  представляют собой близкие к прямым линии, практически совпадающие с годографами от изменения зазора  $y$ .

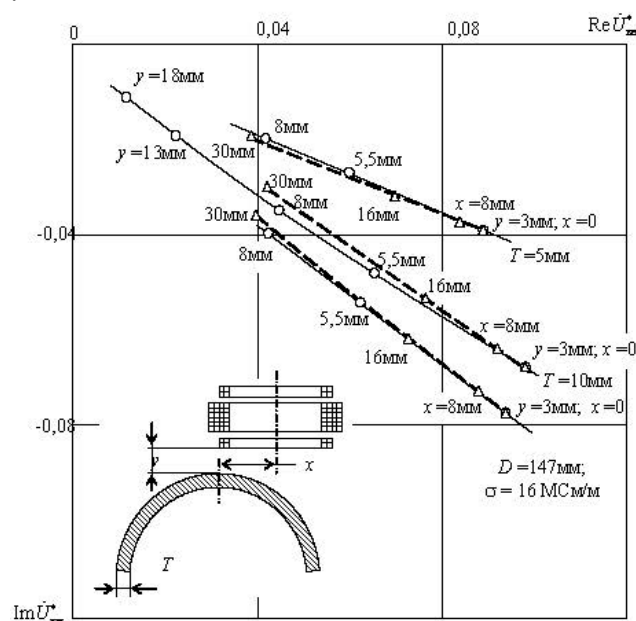


Рис. 6. Годографы относительного вносимого напряжения ВТП от смещения его продольной оси относительно поперечной оси трубы

На рис. 7 показана зависимость относительного изменения амплитуды вносимого напряжения  $\Delta U_{\text{вн}}^*$  от смещения  $x$ . В качестве нормирующего использовано значение амплитуды вносимого напряжения при  $x=0$ . Значение смещения нормировано по отношению к радиусу среднего витка обмотки возбуждения  $R_0=18$  мм. Следует отметить, что данная зависимость одинакова для всех исследованных значений толщины. Существенное изменение сигнала ВТП от смещения имеет место при значениях  $x$ , превышающих половину радиуса витков обмоток ВТП.

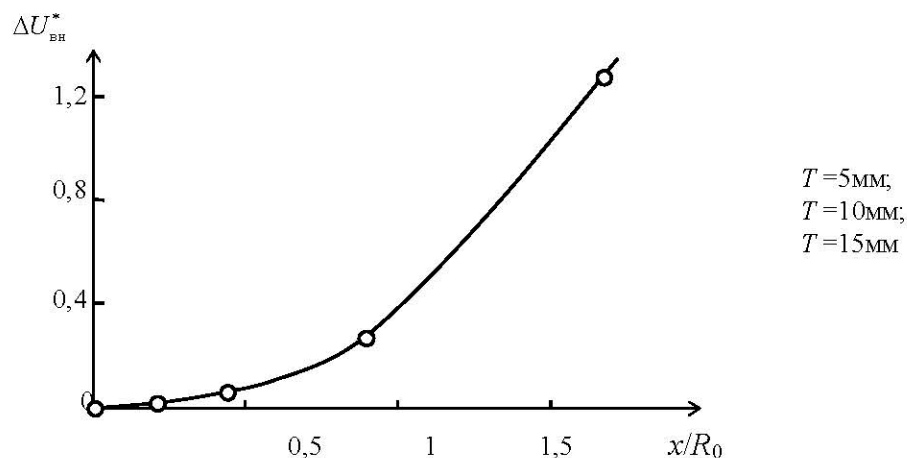


Рис. 7. Зависимость относительного изменения амплитуды вносимого напряжения  $\Delta U_{\text{вн}}^*$  от смещения  $x$

На рис. 8 приведены результаты численного моделирования влияния на сигнал накладного ВТП угла  $\alpha$  между торцевой поверхностью ВТП и поверхностью объекта контроля, в качестве которого в данном случае для наглядности рассматривалась электропроводящая пластина. При этом предполагалось, что перекус ВТП осуществляется относительно общей точки  $O$  поверхности пластины и края цилиндрического корпуса ВТП диаметром 44 мм и высотой 22 мм. Годограф  $\dot{U}_{\text{вн}}^*$  от изменения угла перекуса  $\alpha$  (пунктирная линия) практически совпадает с годографом от изменения зазора  $y$ . Ориентировочно можно считать, что при рассматриваемых размерах ВТП перекус в  $5^\circ$  вызывает такое же изменение амплитуды вносимого напряжения как изменение зазора  $y$  от 3 мм до 5 мм.

При эксплуатации труб и, в частности труб ЛБТ, в результате механического и коррозионного воздействия достаточно часто имеет место неравномерный износ стенки трубы. В связи с этим было исследовано влияние на сигнал накладного ВТП изменений толщины стенки клиновидного и локального характера.

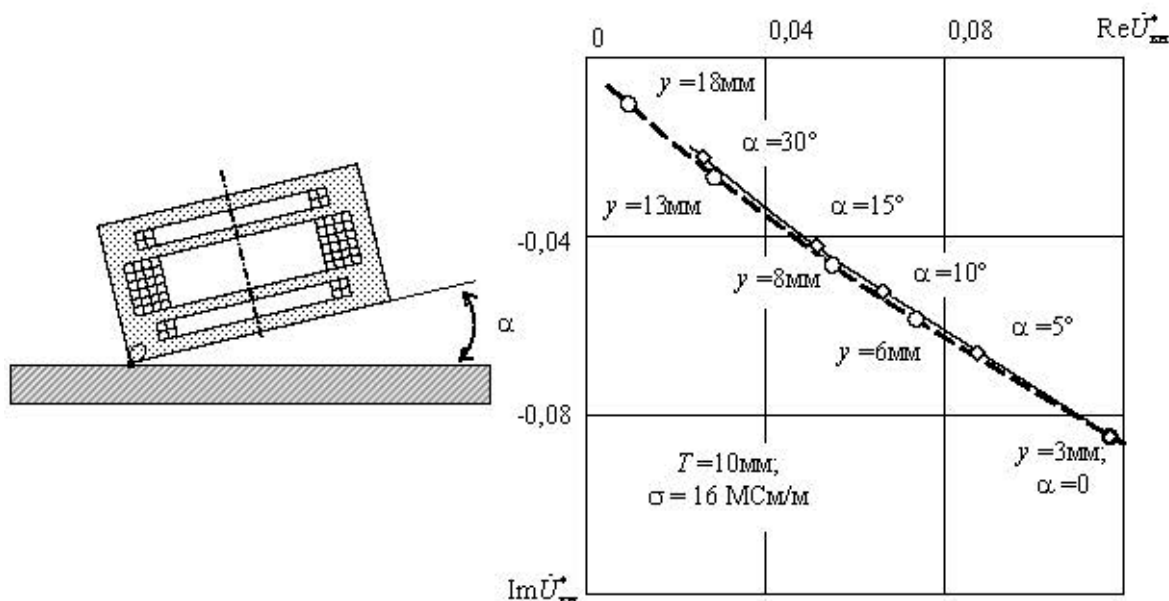


Рис. 8. Годографы относительного вносимого напряжения ВТП от изменения угла перекося преобразователя  $\alpha$

На рис. 9 приведен годограф относительного вносимого напряжения ВТП от изменения толщины объекта клиновидной формы в нормальном сечении (пунктирная линия), практически полностью совпадающий с годографом от изменения толщины плоского объекта (сплошная линия). Отсюда следует, что сигнал ВТП при его расположении над объектом с данным характером изменения толщины и значением толщины стенки  $T_0$  на продольной оси преобразователя, соответствует сигналу ВТП, расположенному над плоским объектом с толщиной стенки  $T_0$ .

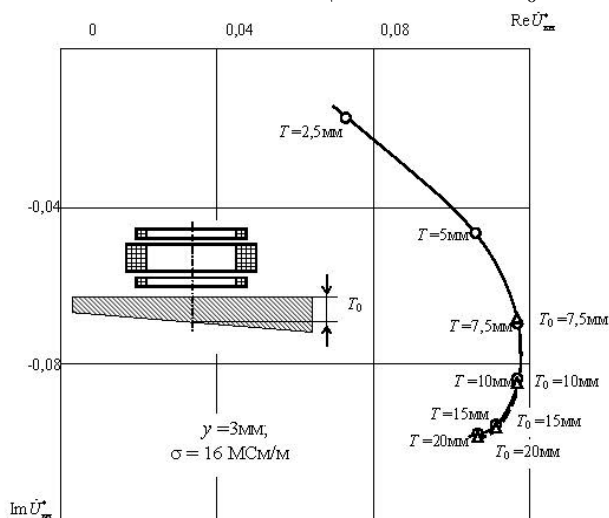


Рис. 9. Годографы относительного вносимого напряжения ВТП от изменения толщины плоского объекта (сплошная линия) и объекта клиновидной формы в нормальном сечении (пунктирная линия)

На рис. 10 приведены результаты численного моделирования влияния на сигнал накладного ВТП наличия локального утонения. Здесь, как и в предыдущем случае для большей наглядности в качестве объекта контроля рассматривалась электропроводящая пластина. Принималось, что локальное утонение имеет характер углубления сферической формы, расположенного на внутренней поверхности пластины. Размеры углубления задавались двумя параметрами: минимальной глубиной расположения относительно наружной поверхности  $T_0$  и диаметром окружности  $d$  на внутренней поверхности. Анализ

представленных результатов показывает, что годографы вносимого напряжения от изменения диаметра утонения  $d$  в диапазоне от 0 до  $\infty$  (показаны сплошными линиями) представляют собой близкие к прямым линии, соединяющие точки на годографе от изменения толщины пластины (показан пунктирной линией), соответствующие толщинам  $T$  и  $T_0$ .

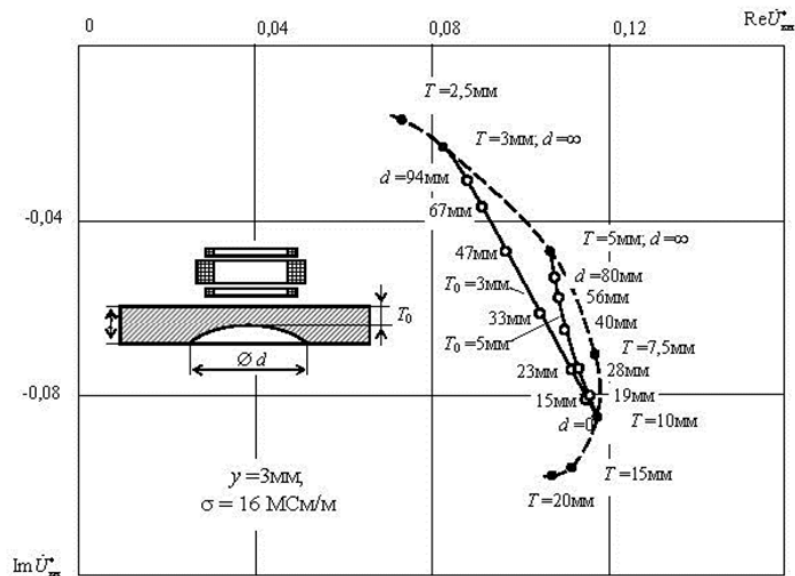


Рис. 10. Годографы относительного вносимого напряжения ВТП от изменения диаметра локального утонения сферической формы

На рис. 11 показана зависимость относительного изменения амплитуды вносимого напряжения  $\Delta U_{\text{вн}}^*$ , обусловленного наличием утонения, от диаметра утонения  $d$ . В качестве нормирующего здесь использовано значение амплитуды вносимого напряжения при  $d = 0$ . Значение диаметра  $d$  нормировано по отношению к диаметру среднего витка обмотки возбуждения  $D_0 = 36 \text{ мм}$ . Зависимость  $\Delta U_{\text{вн}}^*(d)$  имеет ярко выраженный нелинейный характер. Резкое изменение сигнала ВТП, обусловленное наличием локального утонения, наблюдается при значениях  $d$ , соизмеримых с  $D_0$ .

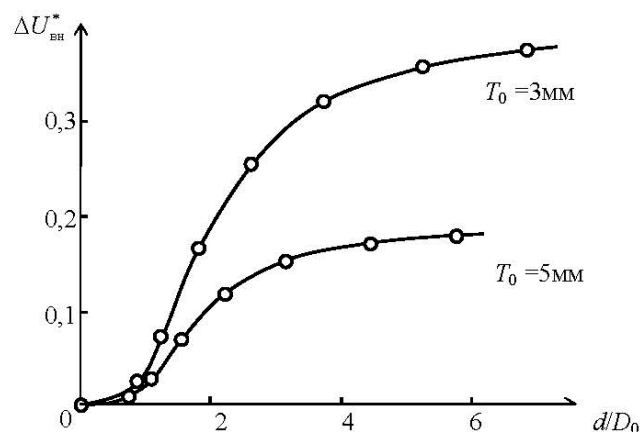


Рис. 11. Зависимость относительного изменения амплитуды вносимого напряжения  $\Delta U_{\text{вн}}^*$  от диаметра локального утонения сферической формы

## Заключение

Для моделирования взаимодействия магнитного поля накладного ВТП с электропроводящим объектом контроля в случаях сложных форм объекта и обмоток



преобразователя либо несимметричном расположении преобразователя относительно объекта эффективными являются методы численного моделирования и, в частности, метод конечных элементов. На примере численного моделирования в среде COMSOL Multiphysics взаимодействия магнитного поля накладного ВТП с электропроводящей трубой применительно к задаче измерения толщины стенки трубы показана высокая степень адекватности результатов компьютерного и физического моделирования этого взаимодействия. Проанализировано влияние на сигнал ВТП основных влияющих факторов: толщины стенки трубы, зазора между преобразователем и поверхностью трубы, электропроводности материала, кривизны стенки трубы, наличия участков с плавным изменением толщины клиновидного характера и с локальным утонением сферической формы, перекоса оси преобразователя относительно поверхности трубы, поперечного смещения оси преобразователя.

#### **Список использованных источников**

1. Неразрушающий контроль. Справочник / 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. Шубочкин А.Е. Развитие и современное состояние вихретокового метода неразрушающего контроля: монография– М.: Издательский дом «Спектр»–2014 – 288 с.
3. Xuefei M., Yinzhao L. Analytical solutions to eddy current field excited by a probe coil near a conductive pipe // NDT&E International– 2013–No. 54– PP. 69 – 74
4. Sandovskii V. Measurements of the thickness and electrical conductivity of nonmagnetic plates by an eddy-current method // Measurement Techniques– 2013– Vol. 55– No. 10–PP. 1201 – 1208
5. Yating Y., Pingan D., Lichuan X. Coil impedance calculation of an eddy current sensor by the finite element method // Russian Journal of Nondestructive Testing–Vol. 44–No. 4– PP. 296 – 302

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АВТОКОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ В КАЧЕСТВЕ ИНДИКАТОРА ФОРМЫ ИМПУЛЬСА АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО СИГНАЛА ПРИ КОНТРОЛЕ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ**

*Попков А. А.*

Сибирский государственный университет путей сообщения

В процессе акустико-эмиссионного контроля литых деталей тележек грузовых вагонов, в конструкции которых имеется значительное количество технологических отверстий, галтелей и элементов с переменной толщиной, сигналы акустической эмиссии представляют собой стохастические сигналы сложной формы. Координаты источников и преобразователей акустической эмиссии оказывают существенное влияние на параметры регистрируемых сигналов. Актуальность работы определяется необходимостью создания и совершенствования алгоритмов и методик обработки акустико-эмиссионных сигналов, оценки их параметров для повышения достоверности результатов контроля литых деталей сложной формы.

Целью работы является оценка достоверности методов корреляционного анализа для обработки акустико-эмиссионных сигналов в боковых рамах грузовых вагонов с целью определения несущей частоты, времени начала и параметров формы акустико-эмиссионных импульсов.

Расчет автокорреляционной функции (АКФ) основывался на коэффициенте корреляции Пирсона: