

УДК 620.179.1:621.3.087.9

**АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ  
ВАРИАНТОВ НАКЛАДНОГО ВИХРЕТОКОВОГО  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЕФЕКТΟΣКОПА**

В.Ю. Белянков

Томский политехнический университет

E-mail: belyankovvy@sibmail.com

**Белянков Василий Юрьевич**,  
магистрант кафедры информа-  
ционно-измерительной техники  
Института неразрушающего  
контроля ТПУ.  
E-mail: belyankovvy@sibmail.com  
Область научных интересов:  
электромагнитные и вихре-  
токовые методы контроля и ди-  
агностики.

В статье осуществлен краткий анализ планарных вихретоковых преобразователей различного типа, используемых в дефектоскопах для ручного контроля. Выявлены достоинства и недостатки каждого из них, а также оценены возможности дальнейшего применения. Для исследования преобразователи были смоделированы в среде Comsol Multiphysics, позволяющей решать задачи, в том числе из области электромагнетизма, путем численного

решения уравнений в частных производных методом конечных элементов. С помощью данных моделей определены сигналы вихретоковых преобразователей, возникающие в результате взаимодействия магнитного поля преобразователя с электропроводящей немагнитной пластиной, имеющей протяженный поверхностный дефект типа прорезь. Получены зависимости амплитуды сигнала от положения ВТП относительно дефекта, годографы вносимого напряжения от дефекта и изменения зазора и распределение плотности вихревых токов. Проведена оценка результатов взаимодействия для разных конструктивных вариантов накладного планарного преобразователя.

**Ключевые слова:**

Неразрушающий контроль, вихревой ток, накладной вихретоковый преобразователь, протяженный поверхностный дефект.

Из нескольких методов неразрушающего контроля, которые могут быть применены к контролю качества мелких поверхностных дефектов, таких как рентгенография, ультразвуковой и вихретоковый методы, последний показывает лучшие результаты. Вихревые токи концентрируются на поверхности исследуемого материала, увеличивая чувствительность обнаружения в этой зоне [1].

Основными достоинствами вихретоковых дефектоскопов, определяющих их достойное место среди других средств неразрушающего контроля, являются отсутствие необходимости контакта с поверхностью объекта контроля (что особенно актуально при наличии защитных покрытий, механических и коррозионных повреждений поверхности, а также различных загрязнений), безопасность контроля, высокая скорость контроля, высокая чувствительность к разнообразным поверхностным дефектам, возможность регулирования толщины контролируемого слоя и автоматизации процесса контроля. Технические характеристики вихретоковых дефектоскопов в значительной мере определяются конструкцией используемых вихретоковых преобразователей (ВТП). Возможности и особенности применения для дефектоскопии электропроводящих объектов различных конструктивных вариантов ВТП могут быть проанализированы путем компьютерного моделирования с использованием пакета моделирования Comsol Multiphysics, позволяющего решать задачи, в том числе из области электромагнетизма, путем численного решения уравнений в частных производных методом конечных элементов. Ранее возможности данного пакета были исследованы при моделировании магнитных преобразователей [4, 5]. Построенные в среде моделирования трехмерные модели преобразователя позволяют осуществлять анализ влияния на его функцию преобразования как основных конструктивных параметров ВТП, так и основных влияющих факторов даже при значительной сложности конфигурации обмоток и заданных граничных условий.

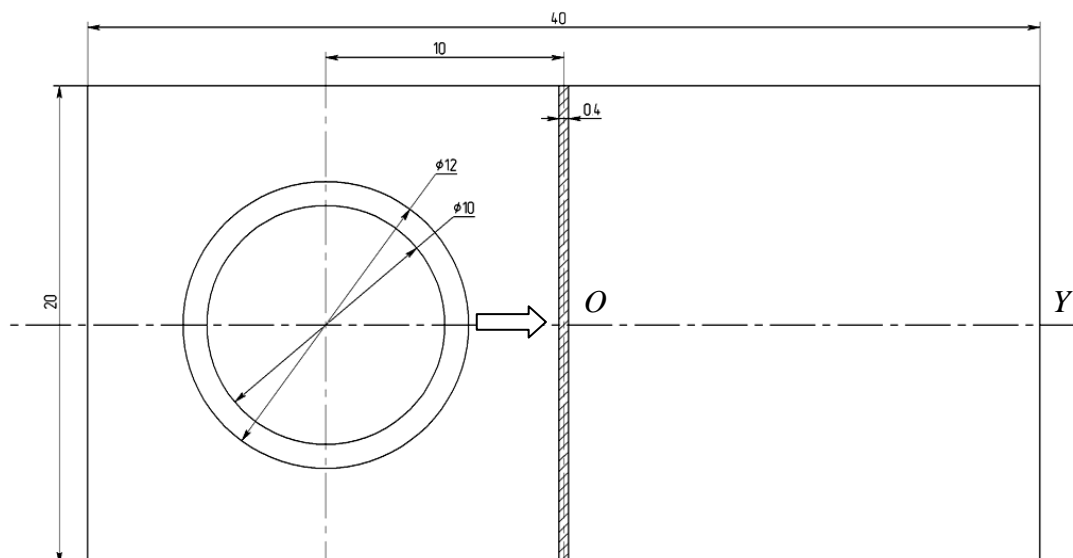
Для анализа использовались четыре типа накладных трансформаторных планарных ВТП с плоскими возбуждающей и измерительной обмотками, лежащими в одной плоскости: два абсолютных различной формы, дифференциальный и мультидифференциальный. В качестве объекта контроля рассматривалась дюралевая пластина с удельной электрической проводимостью материала  $\sigma = 30 \text{ МСм/м}$ , толщиной 4 мм и площадью  $20 \times 40 \text{ мм}^2$  с поперечным поверхностным дефектом по центру в виде прорези глубиной 3 мм и шириной 0,4 мм. Во всех случаях предполагалось, что перемещение ВТП над поверхностью пластины осуществляется с зазором 2 мм вдоль продольной оси симметрии пластины  $OY$  из бездефектной области с пересечением области дефекта в бездефектную область.

С целью сопоставимости результатов моделирования для всех исследуемых ВТП габаритные размеры выбирались примерно одинаковыми. Частота тока возбуждения и произведение силы тока возбуждения на число витков задавались равными 100 кГц и 100 ампер-витков соответственно. Число витков измерительной обмотки было выбрано равным 100.

Для создания 3D-моделей в среде Comsol Multiphysics использовался AC/DC-модуль и его раздел Magnetic fields (mf). Построение геометрии элементов ВТП осуществлялось в разделе Geometry с помощью встроенного графического интерфейса. Необходимо отметить, что имеется возможность импортировать чертежи из других имеющих совместимость систем проектирования и черчения. С помощью библиотеки материалов в разделе Materials выбирались необходимые материалы для каждого из элементов с возможностью корректировки стандартных характеристик вручную. Начальные и граничные условия, область действия поля и ток в обмотке возбуждения задавались в разделе Magnetic fields. При этом принималось, что обмотка возбуждения геометрически выполнена в виде одного витка, построенного кривыми Безье третьего порядка. Сила тока в витке принималась равной ампер-виткам обмотки возбуждения. Частота тока возбуждения задавалась в разделе Study, подразделе Frequency Domain. Последним подготовительным этапом являлось наложение сетки, от параметров которой напрямую зависит точность результата вычисления. Создание исходно мелкой сетки во всем объеме нецелесообразно ввиду колоссального количества операций и, как следствие, большего времени расчета или вообще невозможности выполнения из-за нехватки памяти. Поэтому сетка необходимого размера создавалась градиентом с существенным уменьшением размера в интересующих областях, что снизило время вычисления без увеличения погрешности результата. Частота тока возбуждения задавалась в разделе Study, подразделе Frequency Domain.

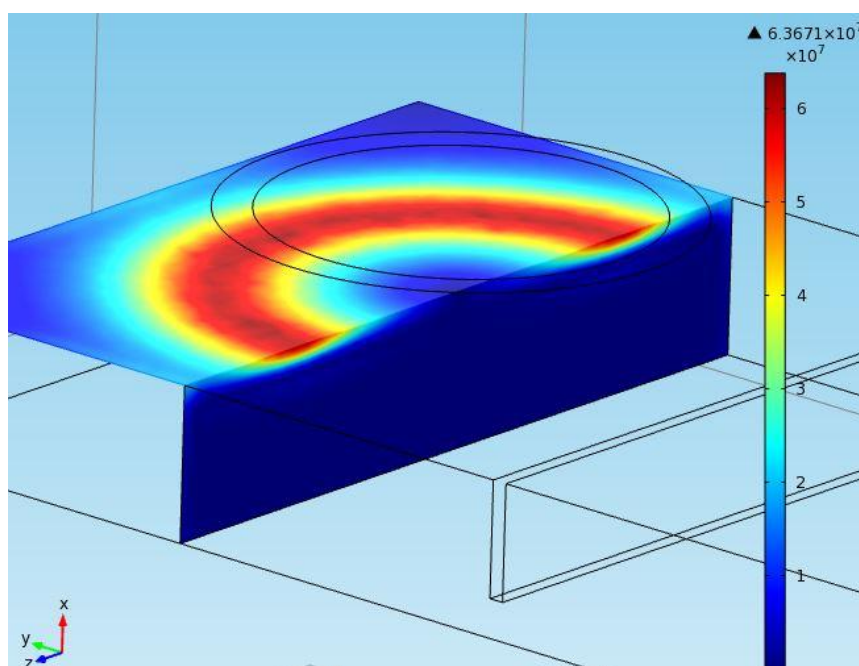
После успешного расчета для извлечения требуемых результатов работа проходила в постпроцессинговом режиме в разделе Results. В подразделе Data Sets выбирались области извлечения данных, Derived Values использовался для проведения различных математических операций, в том числе интегрирования для определения вносимого напряжения измерительной обмотки. Численные результаты расчетов, проведенных в Derived Values, извлекались из таблиц раздела Tables. Для визуализации результатов и просмотра интересующих областей использовались 3D Plot Group с множеством различных функций для построения графиков. Необходимо отметить, что каждый из разделов обладает огромным числом возможностей для реализации широкого круга задач и получения необходимой информации в удобном виде.

На рис. 1 показана геометрия абсолютного ВТП-1 с круглыми обмотками над пластиной с дефектом. Обмотка возбуждения диаметром 12 мм, измерительная обмотка диаметром 10 мм, стрелкой указано направление движения преобразователя (вдоль оси симметрии пластины  $OY$ ).



**Рис. 1.** Абсолютный ВТП с круглыми обмотками над пластиной с дефектом

На рис. 2 цветовым градиентом показано распределение плотности вихревого тока, полученное в среде Comsol Multiphysics, индуцированного обмоткой возбуждения для случая расположения абсолютного ВТП с круглыми обмотками над бездефектным участком, а на рис. 3 – симметрично относительно прорези. По этим изображениям можно судить о пространственном распределении вихревого тока. Для наглядности приведена только часть картины вихревых токов, ограниченная вертикальной плоскостью симметрии ВТП. Следует отметить, что если в случае расположения рассматриваемого ВТП над бездефектным участком максимальная плотность вихревого тока наблюдается на поверхности пластины, то для случая расположения ВТП над дефектом максимальная плотность вихревых токов имеет место на нижних ребрах прорези, а повышенная плотность вихревых токов – на вертикальных и горизонтальных гранях прорези. Необходимо обратить внимание на максимальную величину плотности тока для данного положения, обозначенную в правом углу рис. 2 и 3, относительно которой на картинке получен цветовой градиент.



**Рис. 2.** Распределение плотности вихревого тока на бездефектном участке

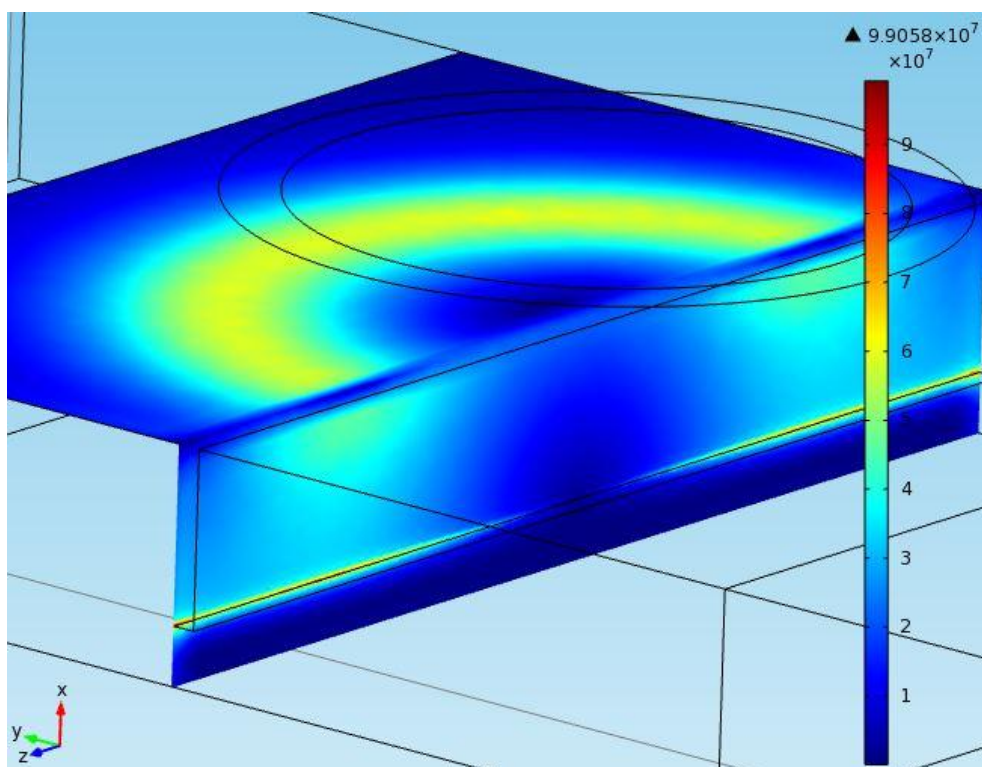


Рис. 3. Распределение плотности вихревого тока на участке с дефектом

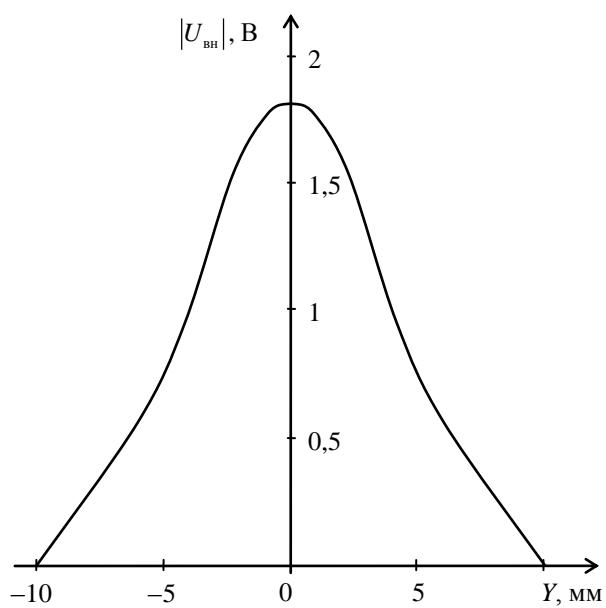
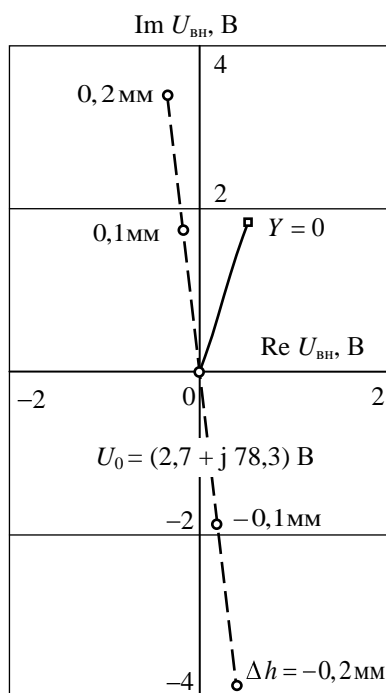


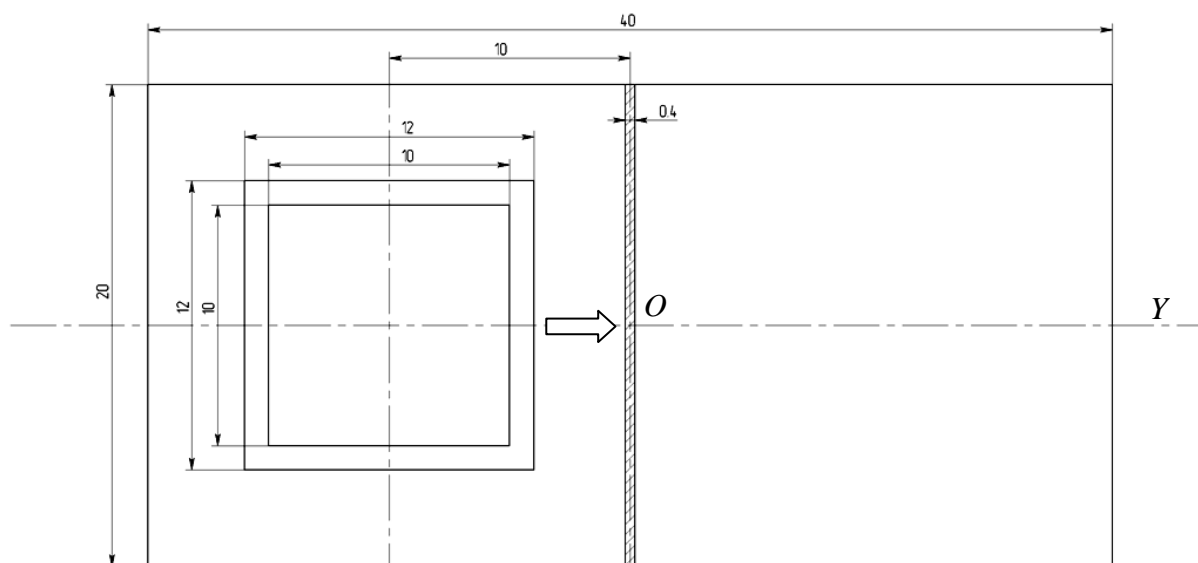
Рис. 4. Зависимость амплитуды сигнала от положения ВТП-1 относительно дефекта



**Рис. 5.** Годографы вносимого напряжения ВТП-1 от дефекта и изменения зазора

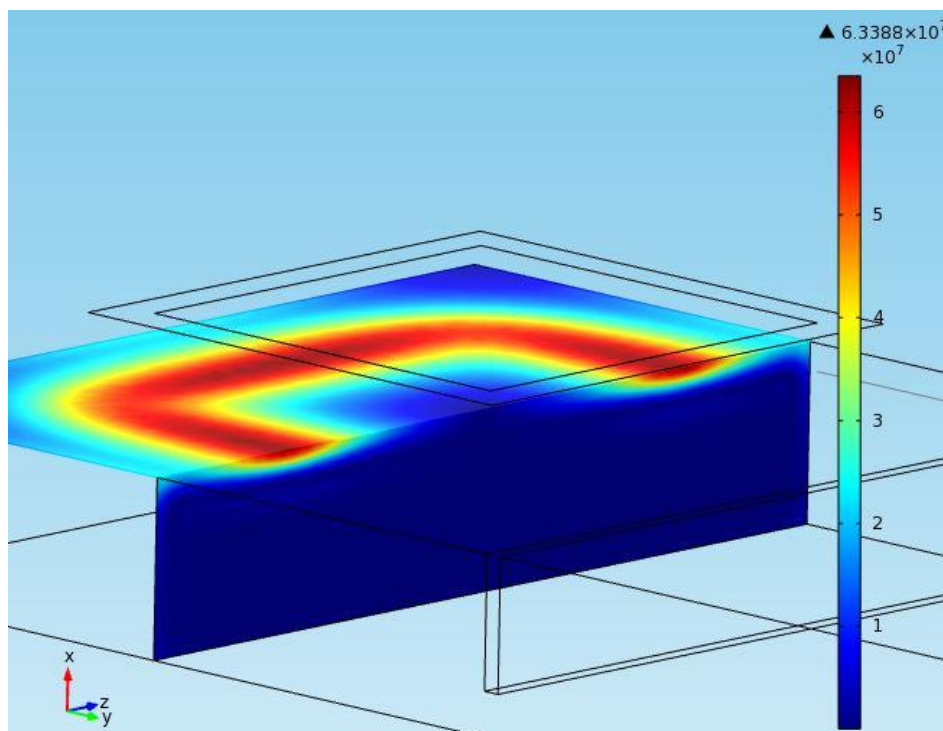
На рис. 4 приведена зависимость амплитуды вносимого напряжения от местоположения преобразователя относительно дефекта. Амплитуда сигнала от дефекта максимальна при центральном положении обмотки относительно дефекта. На рис. 5 показаны годографы вносимого напряжения ВТП-1 от перемещения преобразователя над дефектом (сплошная линия) и от изменения зазора над поверхностью пластины на бездефектном участке от номинального значения  $h = 2$  мм (пунктирная линия) в пределах  $\Delta h = \pm 0,2$  мм. Фаза вносимого напряжения при изменении зазора практически не изменяется и отличается от фазы вносимого напряжения от дефекта (рис. 5), что широко используется в вихретоковой дефектоскопии для амплитудно-фазовой отстройки от влияния изменения зазора. Однако такая отстройка эффективна только в малом диапазоне изменений зазора при высокой однородности электрических и магнитных характеристик материала объекта контроля, да и само наличие у абсолютного преобразователя большого по значению начального напряжения является существенным недостатком. Более эффективны для использования в вихретоковых дефектоскопах дифференциальные ВТП.

На рис. 6 представлена геометрия абсолютного ВТП-2 квадратной формы над пластиной с дефектом. Обмотка возбуждения со стороной 12 мм, измерительная обмотка со стороной 10 мм, стрелкой указано направление движения преобразователя (вдоль оси симметрии пластины  $OY$ ).

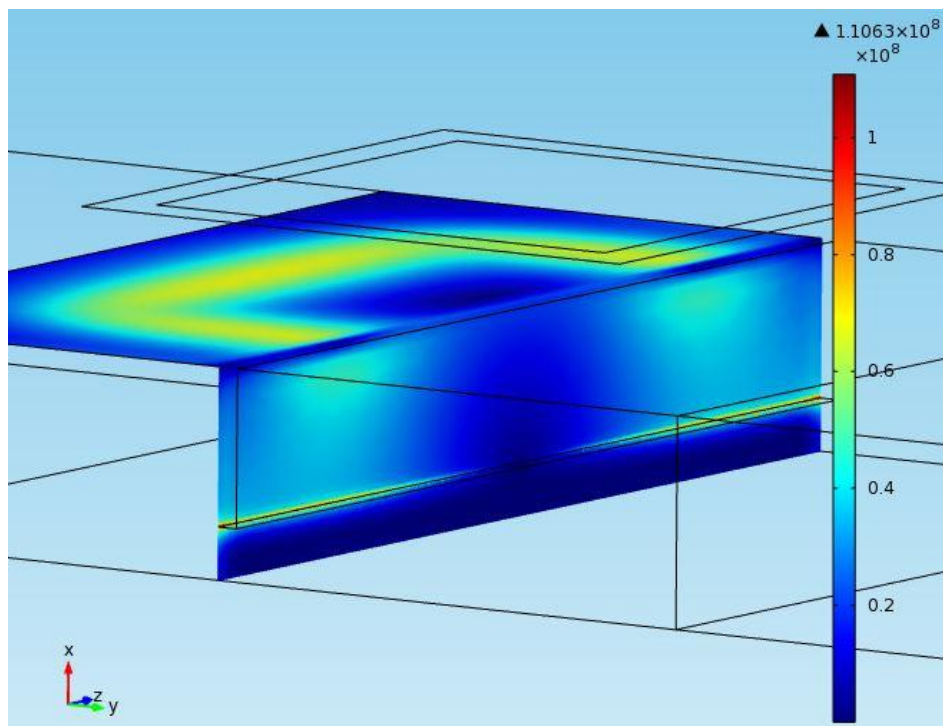


**Рис. 6.** Абсолютный преобразователь квадратной формы над пластиной с дефектом

На рис. 7 цветовым градиентом показано распределение плотности вихревого тока, полученное в среде Comsol Multiphysics, индуцированного обмоткой возбуждения для случая расположения абсолютного ВТП с квадратными обмотками над бездефектным участком, а на рис. 8 – симметрично относительно прорези.

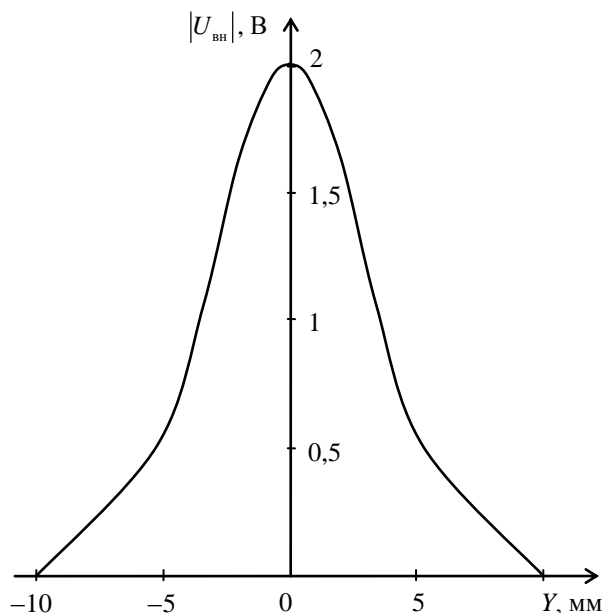


**Рис. 7.** Распределение плотности вихревого тока на бездефектном участке

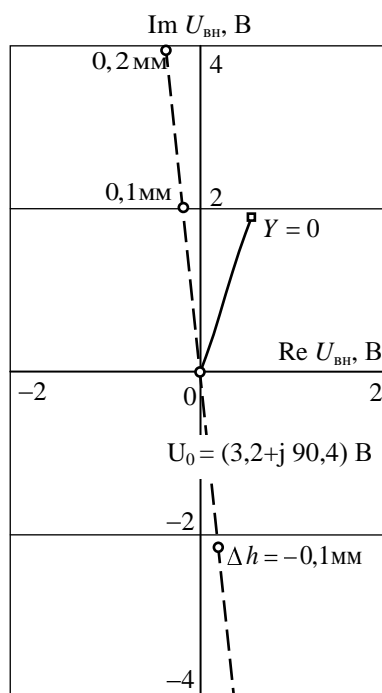


**Рис. 8.** Распределение плотности вихревого тока на участке с дефектом

На рис. 9 приведена зависимость амплитуды вносимого напряжения от местоположения преобразователя относительно дефекта. На рис. 10 показаны годографы вносимого напряжения ВТП-2 от перемещения преобразователя над дефектом (сплошная линия) и от изменения зазора над поверхностью пластины на бездефектном участке от номинального значения  $h = 2$  мм (пунктирная линия) в пределах  $\Delta h = \pm 0,2$  мм.



**Рис. 9.** Зависимость амплитуды сигнала от положения ВТП-2 относительно дефекта



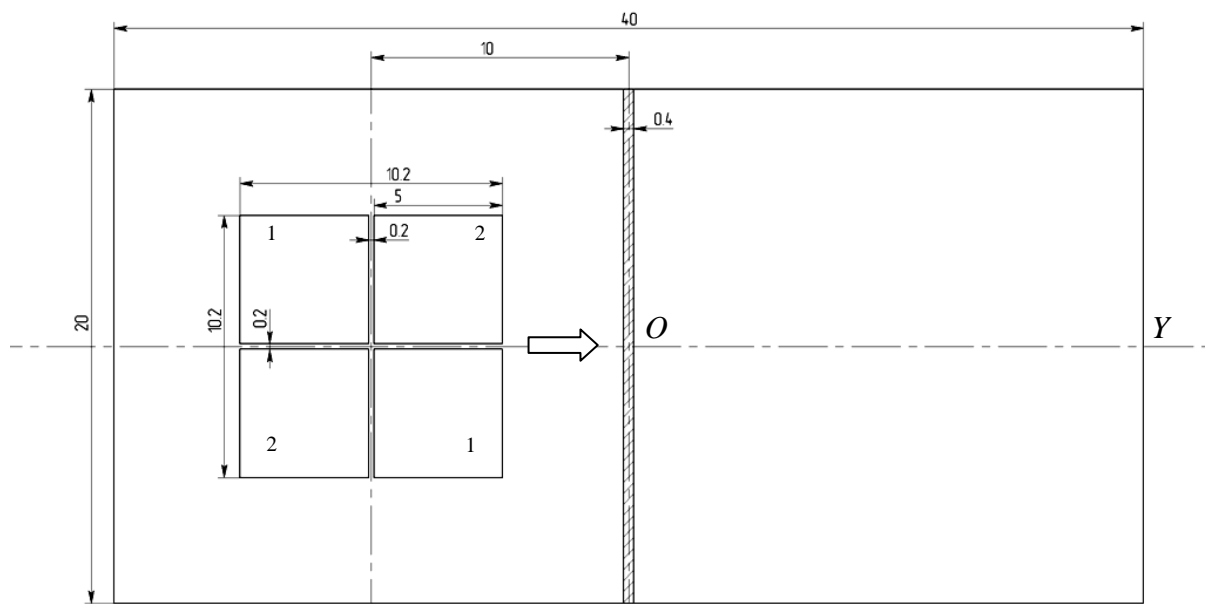
**Рис. 10.** Годографы вносимого напряжения ВТП-2 от дефекта и изменения зазора

По полученным результатам можно сделать вывод о практически идентичных характеристиках ВТП-1 и ВТП-2. Большее значение максимальной амплитуды сигнала ВТП-2 обусловлено большей площадью обмоток преобразователя. Таким образом, применение тех или иных ВТП такого типа показывает одинаковый конечный результат, но может удовлетворить потребности в определенной геометрии преобразователя для решения самых разных задач дефектоскопии.

Высокую эффективность для решения широкого круга задач вихретоковой дефектоскопии показали мультидифференциальные ВТП [2, 3].

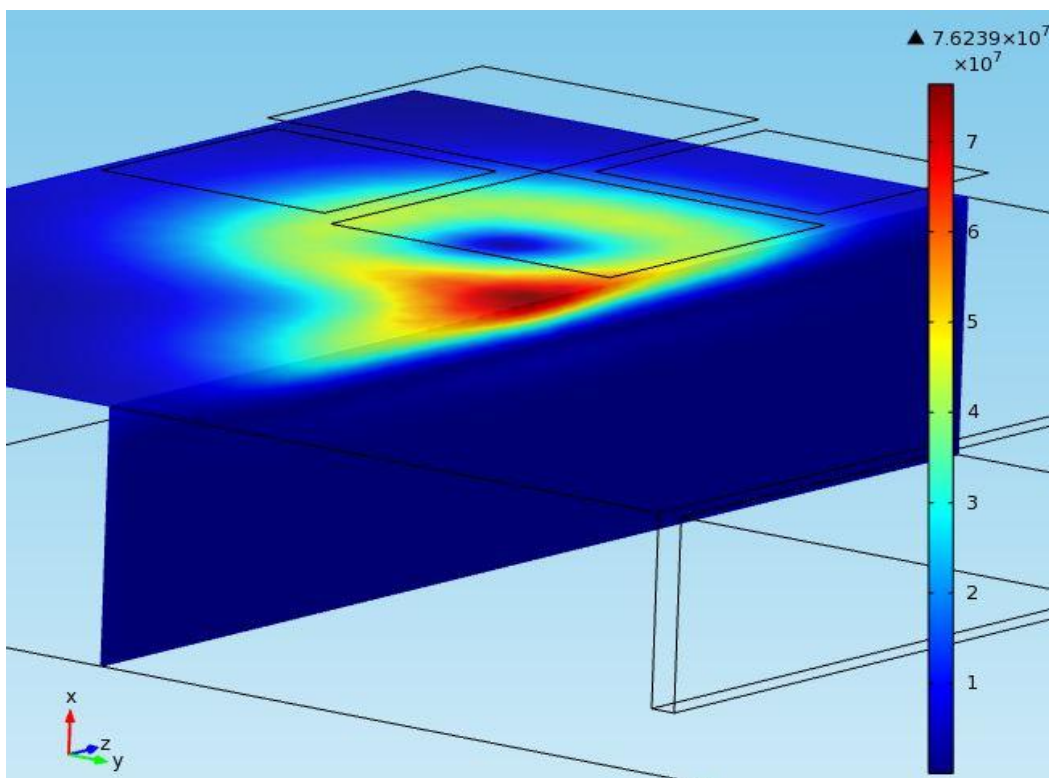
На рис. 11 представлена геометрия планарного мультидифференциального преобразователя (ВТП-3) с квадратными двухсекционными возбуждающей 1 и измерительной 2 обмотками над пластиной с дефектом. Две квадратные обмотки возбуждения со сторонами 5 мм на практике изготавливаются единой обмоткой в виде «восьмерки», что определяет направление тока. Стрелкой указано направление движения преобразователя. Измерительные обмотки включены встречно. Особенностью ВТП такой конструкции является то, что при расположении преобразователя на бездефектном участке в секциях измерительной обмотки отсутствует начальное напряжение; таким образом, можно считать, что двухсекционная обмотка возбуждения в совокупности с отдельной секцией измерительной обмотки составляют дифференциальный ВТП. Поскольку секции измерительной обмотки включены также дифференциально, то в совокупности получается двойное дифференциальное, т. е. мультидифференциальное, включение обмоток ВТП. Достоинством такого ВТП является отсутствие сигнала от изменения зазора между преобразователем и контролируемой поверхностью и небольшое влияние на результаты контроля неоднородности электрических и магнитных свойств материала объекта. При использовании данного преобразователя для обнаружения протяженных дефектов производится сравнение реакций от взаимодействия с контролируемой пластиной вихревых токов двух ортогональных направлений.





**Рис. 11.** Мультидифференциальный преобразователь (2×2) над пластиной с дефектом

На рис. 12 цветовым градиентом показано распределение плотности вихревого тока, полученное в среде Comsol Multiphysics, индуцированного обмоткой возбуждения для случая расположения мультидифференциального ВТП с квадратными обмотками над бездефектным участком, а на рис. 13 – симметрично относительно прорези.



**Рис. 12.** Распределение плотности вихревого тока на бездефектном участке

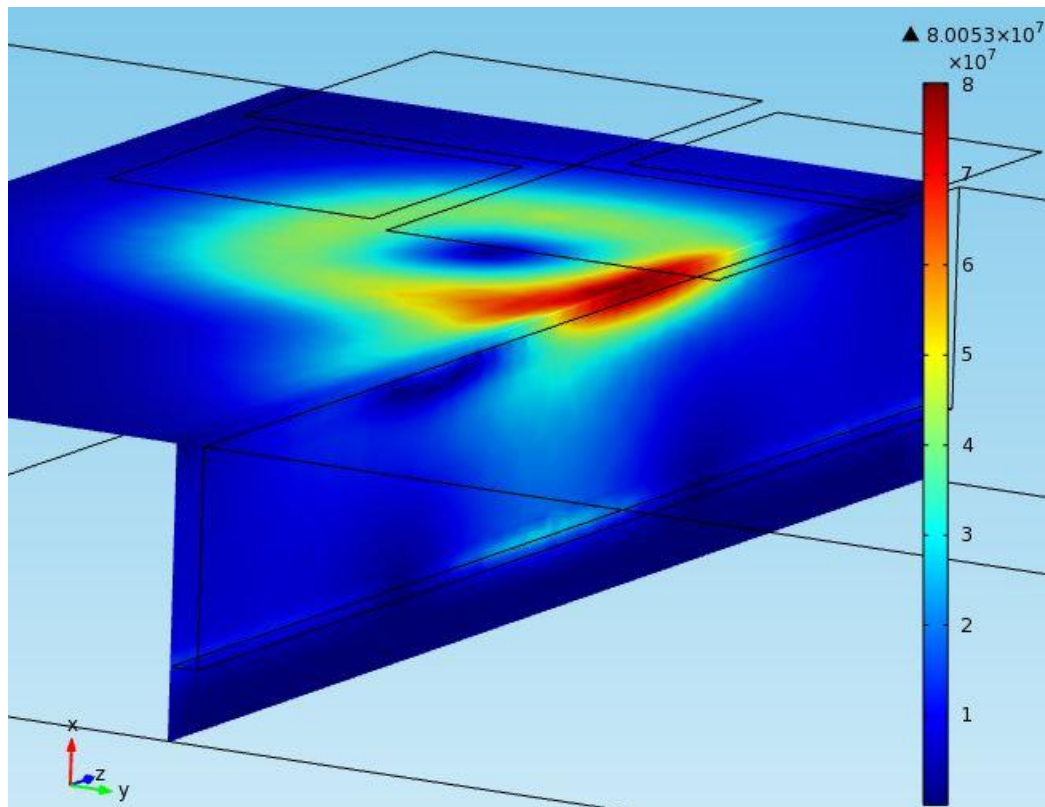


Рис. 13. Распределение плотности вихревого тока на участке с дефектом

На рис. 14 приведена зависимость амплитуды вносимого напряжения от местоположения преобразователя относительно дефекта. На рис. 15 показан годограф вносимого напряжения ВТП-3 от перемещения преобразователя над дефектом. Следует отметить, что амплитуда сигнала от протяженного дефекта, как и в случае абсолютного ВТП-1, максимальна при центральном положении обмотки относительно дефекта. Важным критерием построения таких ВТП является точность геометрии. Большим достоинством также является высокая разрешающая способность.

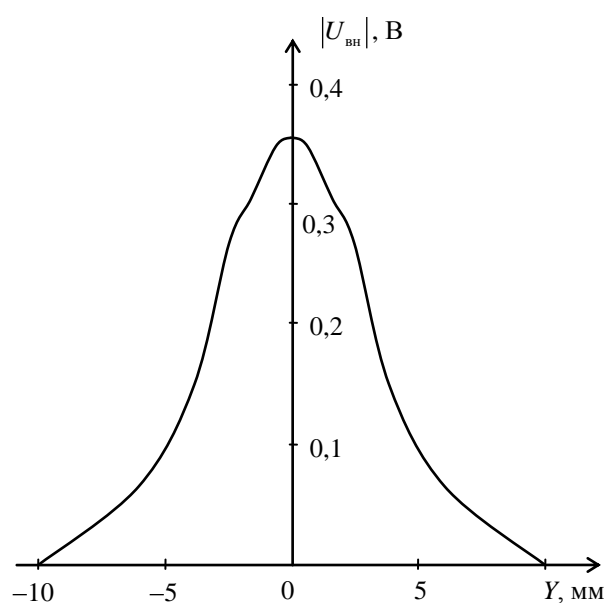
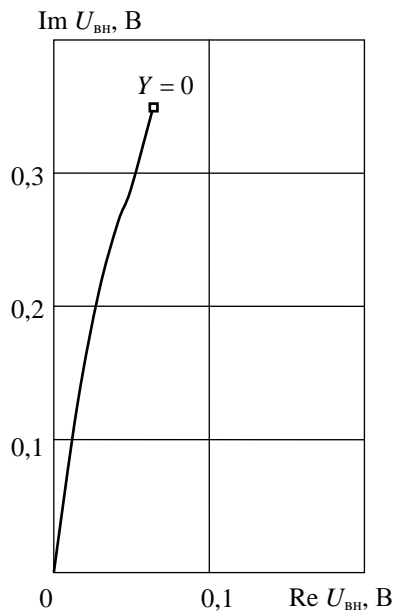
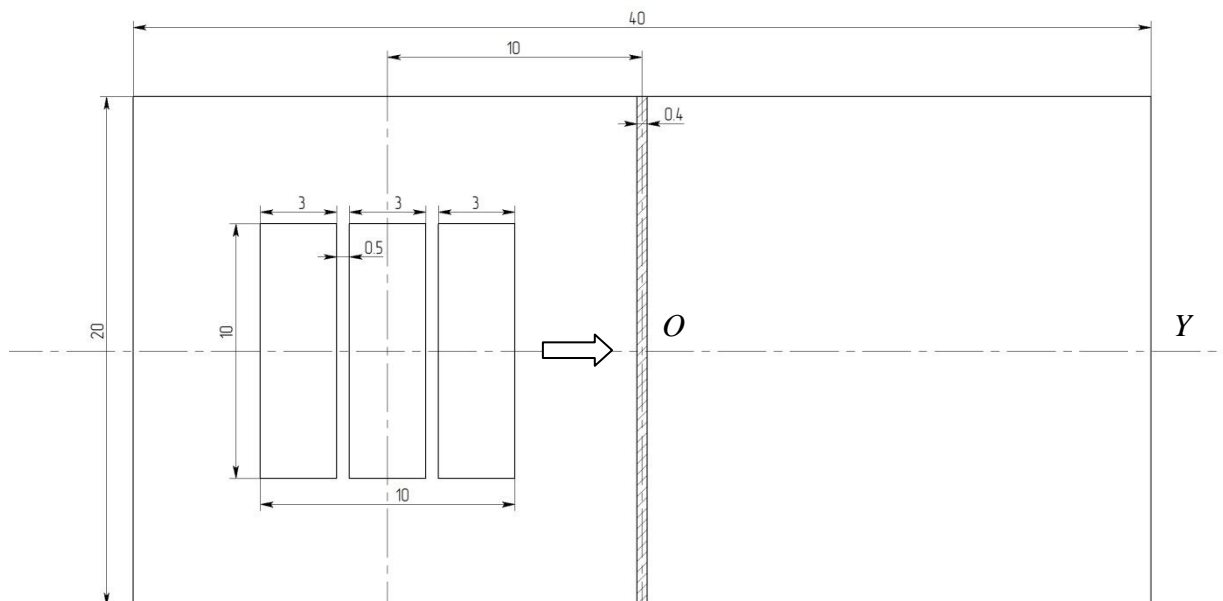


Рис. 14. Зависимость амплитуды сигнала от положения ВТП-3 относительно дефекта



**Рис. 15.** Годограф вносимого напряжения ВТП от дефекта

На рис. 16 представлена геометрия одного из вариантов дифференциального планарного преобразователя ВТП-4 над пластиной с дефектом. При создании 3D-модели две прямоугольные обмотки возбуждения по краям выбирались размерами  $10 \times 3$  мм, ток в которых течет в противоположных направлениях (по и против часовой стрелки соответственно). Между ними располагается измерительная обмотка с аналогичным размером  $10 \times 3$  мм. Стрелкой указано направление движения преобразователя. Особенностью ВТП такой конструкции является использование для обнаружения протяженных дефектов возбуждения вихревых токов того же направления, что и направление дефекта. С этой точки зрения ВТП-4 по своим свойствам близок к так называемому ионическому ВТП, предлагаемому в [1].



**Рис. 16.** Дифференциальный преобразователь ( $2 \times 1$ ) над пластиной с дефектом

На рис. 17 цветовым градиентом показано распределение плотности вихревого тока, полученное в среде Comsol Multiphysics, индуцированного обмотками возбуждения для случая расположения дифференциального ВТП с прямоугольными обмотками над бездефектным участком, а на рис. 18 – при максимальном сигнале измерительной обмотки.

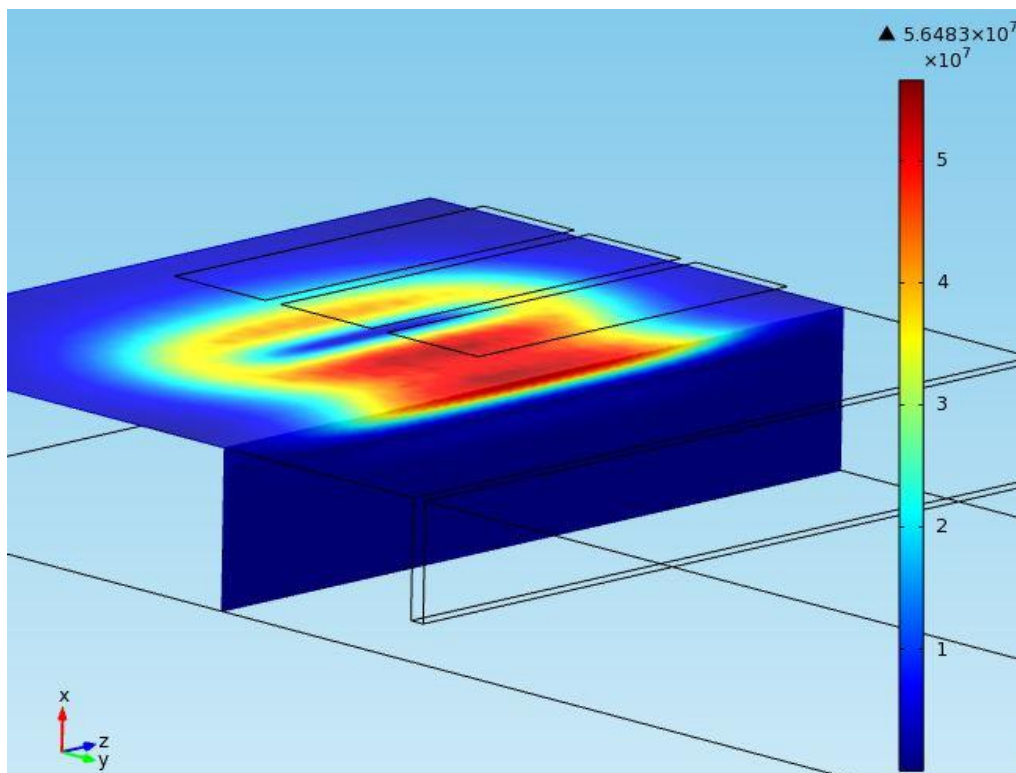


Рис. 17. Распределение плотности вихревого тока на бездефектном участке

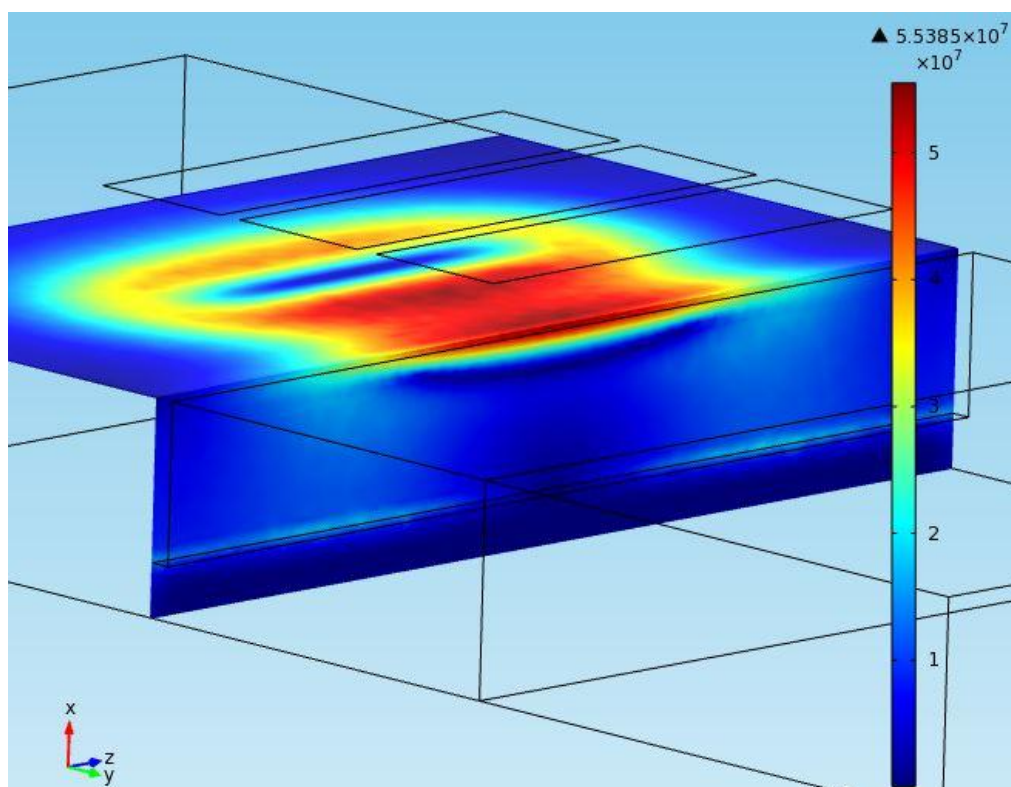
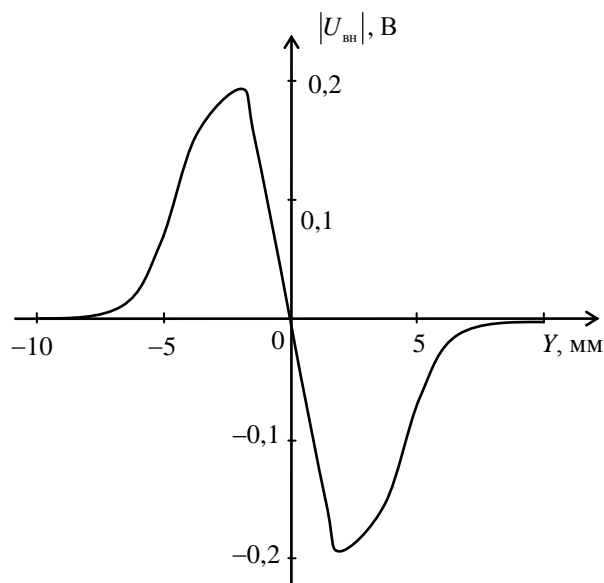
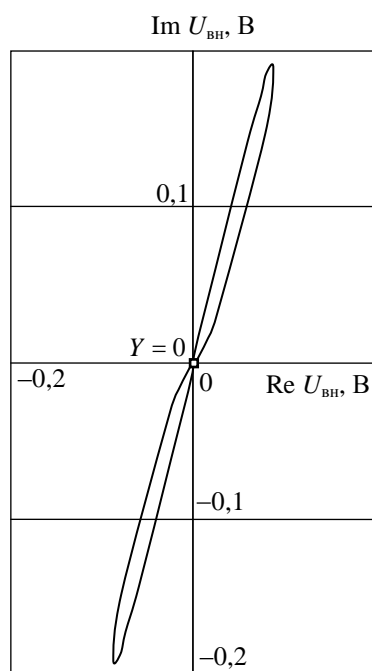


Рис. 18. Распределение плотности вихревого тока на участке с дефектом

На рис. 20 изображен годограф вносимого напряжения измерительной обмотки от перемещения дифференциального преобразователя ВТП-4 относительно дефекта, на рис. 19, соответственно, распределение амплитуды вносимого напряжения.



**Рис. 19.** Зависимость амплитуды сигнала от положения ВТП-4 относительно дефекта



**Рис. 20.** Годограф вносимого напряжения ВТП от дефекта

В отличие от предыдущих ВТП амплитуда сигнала от дефекта в этом случае максимальна при расстоянии между вертикальной плоскостью симметрии преобразователя и прорезью, равном  $\pm 2$  мм, а при центральном положении обмотки относительно дефекта равна нулю. Годограф вносимого напряжения представляет собой вытянутую восьмерку. Максимальное значение сигнала от дефекта для ВТП-4 существенно меньше, чем для ВТП-1, однако этот недостаток компенсируется отсутствием у ВТП-4 начального напряжения при установке преобразователя на поверхность объекта контроля и, соответственно, отсутствием сигнала от измене-

ния зазора между преобразователем и контролируемой поверхностью. Другим достоинством ВТП-4 является небольшое по сравнению с абсолютными ВТП влияние на результаты контроля неоднородности электрических и магнитных характеристик материала объекта контроля. Необходимо отметить, что амплитуда сигнала дифференциального преобразователя ВТП-4 несколько ниже, чем у мультидифференциального ВТП-3, что объясняется особенностью геометрии. Для обнаружения протяженных дефектов ВТП-3 производится сравнение реакций от взаимодействия с контролируемой пластиной вихревых токов двух ортогональных направлений, в отличие от ВТП-4, при использовании которого сравниваются реакции от взаимодействия с контролируемой пластиной вихревых токов параллельных направлений.

Проанализировав три типа различных ВТП, необходимо отметить более высокие характеристики ВТП-3 и ВТП-4 по сравнению с ВТП-1 и ВТП-2, а также универсальность ВТП-3 для поиска дефектов любых направлений. Как отмечалось в [1], с помощью современных технологий преобразователи можно изготавливать печатным способом, существенно повышая точность геометрии и снижая габаритные размеры, что улучшает характеристики ВТП в целом и расширяет возможности реализации.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Luís S. Rosado. Non-Destructive Testing Based on Eddy Currents // Instituto Superior Técnico, UTL, Lisbon, Portugal. – P. 1–10.
2. Учанин В.Н. Вихретоковые мультидифференциальные преобразователи и их применение // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2006. – № 3. – С. 34–41.
3. Учанин В.Н. Применение вихретокового метода для неразрушающего контроля сварных соединений / В.Н. Учанин, В.Г. Тихий, И.И. Кириченко, В.Г. Рыбачук // Вестник двигателестроения. – 2011. – № 1. – С. 89–94.
4. Goldstein A.E., Alimov D.V., Vakhrushev D.V. Magnetic Mutually Inductive Transducer of the Distance to the Surface of a Ferromagnetic Object // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2011. – V. 47. – № 10. – P. 667–671.
5. Гольдштейн А.Е. Бесконтактная система контроля соосности с беспроводным интерфейсом / А.Е. Гольдштейн, Д.В. Алимов, Д.В. Вахрушев, Е.В. Якимов // Ползуновский вестник. – 2011. – № 3/1. – С. 136–140.

Поступила 07.07.2014 г.