

УДК 620.179.14

**Белянков Василий Юрьевич**, магистрант кафедры информационно-измерительной техники Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail:

belyankovvy@sibmail.com

Область научных интересов: электромагнитные и вихре-токовые методы контроля и диагностики.

**Гольдштейн Александр Ефремович**, д-р техн. наук, заведующий кафедрой информационно-измерительной техники Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail:

belyankovvy@sibmail.com

Область научных интересов: электромагнитные и вихре-токовые методы контроля и диагностики.

## ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ ПРУТКОВ И ТРУБ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЗБУЖДЕНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ

В.Ю. Белянков, А.Е. Гольдштейн

Томский политехнический университет

E-mail: belyankovvy@sibmail.com

Исследовано распределение плотности вихревых токов на поверхности объекта контроля при различных соотношениях поперечных размеров обмотки возбуждения и объекта, определено оптимальное соотношение этих размеров при использовании вихре-токового преобразователя для дефектоскопии прутков и труб.

### Ключевые слова:

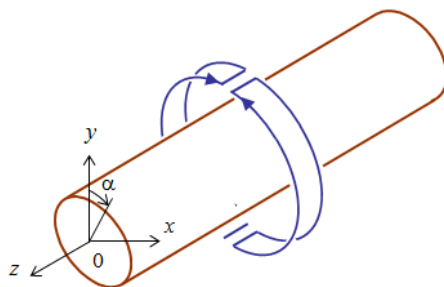
Обмотка возбуждения, продольный вихревой ток, плотность тока, протяженный дефект, численные методы.

Для обнаружения локальных дефектов прутков и труб типа отверстие наилучшим образом по основным техническим параметрам зарекомендовали себя дефектоскопы с проходными вихре-токовыми преобразователями (ВТП) [1, 2]. Однако для обнаружения протяженных дефектов с малым градиентом свойств в продольном на-

правлении более высокую чувствительность обеспечивают дефектоскопы с накладными ВТП. При этом, в случае необходимости проведения контроля в условиях значительных поперечных смещений контролируемого изделия и высоких шероховатостей и неоднородностей его поверхности, наиболее пригодными к таким условиям являются дефектоскопы, в которых используется ВТП с возбуждением разночастотных вихревых токов продольного направления [3, 4].

При разработке ВТП для решения поставленной задачи основными критериями выбора как конструкции в целом, так и отдельных конструктивных параметров являются следующие: обеспечение качественной отстройки от влияния радиальных смещений и перекосов контролируемого изделия от продольной оси ВТП, в том числе и при изменении электромагнитных параметров материала в допустимых пределах, минимизация зависимостей чувствительности к дефекту от азимута последнего. Настоящая работа посвящена выбору геометрических параметров обмотки возбуждения, обеспечивающих требуемый в соответствии с названными критериями характер распределения вихревых токов по поверхности объекта контроля.

На рис. 1 представлена конструкция обмотки, используемой для возбуждения вихревых токов продольного направления [4], показана только одна двухсекционная возбуждающая обмотка и контролируемое изделие – проводящий ферромагнитный прут. Реальный ВТП имеет еще одну двухсекционную обмотку, повернутую на  $90^\circ$  относительно первой обмотки для обеспечения однородного распределения плотности вихревых токов в зависимости от угла местоположения  $\alpha$  на поверхности объекта (отсчитывается в соответствии с рис. 1 от вертикальной плоскости, проходящей через продольную ось объекта контроля). Такая конструкция обмоток возбуждения выбрана потому, что для получения сигналов от продольных дефектов в ВТП дефектоскопа используются главным образом возбуждаемые в контролируемом изделии вихревые токи продольного направления, обусловленные параллельными продольной оси отрезками витков обмоток возбуждения.



**Рис. 1.** Конструкция обмотки для возбуждения продольных вихревых токов: 1 – двухсекционная обмотка возбуждения; 2 – объект контроля

Выполнение требования однородности плотности вихревых токов продольного направления позволяет обеспечить независимость амплитуды сигнала от дефекта и угла его местоположения на поверхности объекта контроля. Вторым требованием к конструкции обмоток возбуждения является одинаковость фазы возбуждаемых продольных вихревых токов независимо от угла местоположения на поверхности объекта контроля, что необходимо для обеспечения возможности эффективной амплитудно-фазовой отстройки от влияния поперечных смещений и перекосов объекта контроля [3].

Оптимальный выбор значений конструктивных параметров ВТП невозможен без разработки математической модели преобразователя. В [4] для аналитического расчета ВТП была предложена упрощенная модель, позволяющая исследовать распределение амплитуды вихревых токов при следующих допущениях. Глубина  $\delta$  проникновения переменного магнитного поля в электропроводящий ферромагнитный прутки считалась пренебрежимо малой по сравнению с радиусом прутка ( $\delta \rightarrow 0$ ). С учетом того, что в рассматриваемом ВТП для получения сигналов от продольного дефекта используются возбуждение и измерение искажений продольных вихревых токов, принималось, что обмотки возбуждения и измерительные обмотки представляют собой тонкие продольные проводники длиной  $l$  и, таким образом, пренебрегалось влиянием на сигналы ВТП вихревых токов циркулярного направления. Кроме того, длина проводников принималась много меньшей расстояния от них до поверхности объекта ( $l \rightarrow 0$ ). Одним из наиболее серьезных недостатков предложенной упрощенной модели являлось то, что она не позволяет оценить фазовые зависимости возбуждаемых вихревых токов от угла местоположения на поверхности объекта контроля. Разработка более корректной аналитической модели, описывающей взаимодействие магнитного поля преобразователя с объектом контроля, в данном случае трудновыполнима из-за сложных граничных условий.

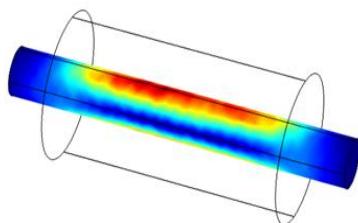
Для решения подобного рода задач могут быть эффективно применены численные методы, позволяющие определить результаты взаимодействия без каких-либо серьезных допущений и с малой погрешностью вычислений, определяемой главным образом плотностью накладываемой сетки.

Для создания математической модели ВТП дефектоскопа прутков и труб с возбуждением продольных вихревых токов был использован пакет моделирования COMSOL Multiphysics, позволяющий решать задачи, в том числе из области электромагнетизма, путем численного решения уравнений в частных производных методом конечных элементов. Построенная трехмерная модель преобразователя позволила в частности осуществить анализ влияния на амплитудно-фазовое распределение возбуждаемые продольных вихревых токов соотношения радиусов обмоток возбуждения  $R_1$  и объекта контроля  $R$ .

Для расчетов использовались стандартные процедуры 3D моделирования магнитного поля обмоток, рис. 1. При этом принималось, что ряд влияющих параметров контроля имеют фиксированные значения. В качестве объекта контроля рассматривался дюралевый прутки с относительной магнитной проницаемостью материала  $\mu_r = 1$ , удельной электрической проводимостью материала  $\sigma = 30 \frac{\text{Мсм}}{\text{м}}$  и радиусом  $R = 10$  мм. Частота тока возбуждения  $f = 5$  кГц.

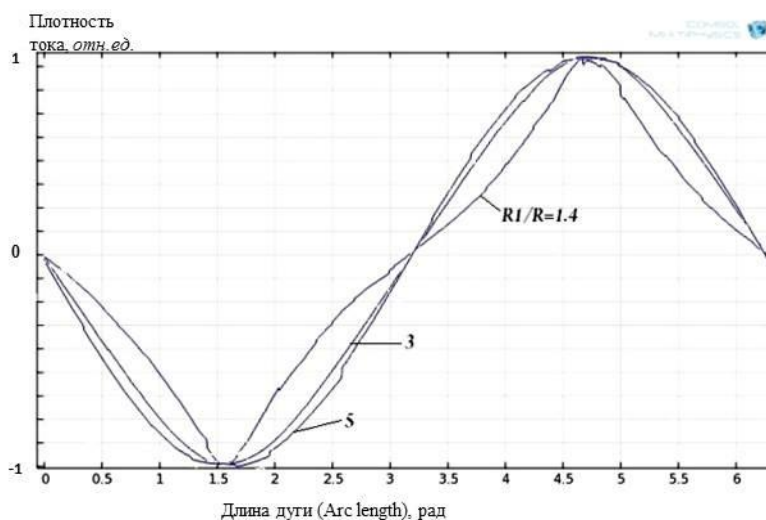
Длина обмотки  $l = 90$  мм. Принималось, что контролируемый пруток расположен соосно с обмоткой. Значения радиуса обмотки возбуждения  $R_1$  варьировались в процессе моделирования.

В качестве примера на рис. 2 показана рассчитанная с помощью COMSOL топография вихревых токов на поверхности прутка при соотношении  $\frac{R_1}{R_2} = 3$ .



**Рис. 2.** Распределение плотности вихревого тока на поверхности объекта контроля

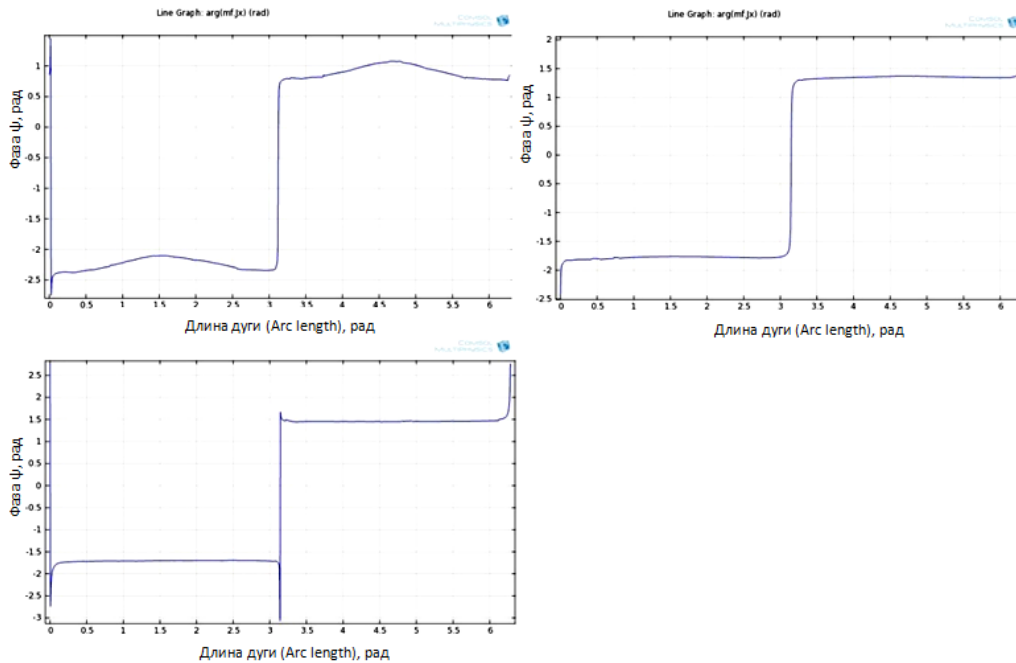
На рис. 3 показаны полученные в результате моделирования зависимости относительного значения амплитуды плотности вихревого тока  $J^*$  на поверхности прутка от угла местоположения  $\alpha$ . Нормирование плотности вихревых токов осуществлялось по значению их плотности при  $\alpha = 0$ . Анализ зависимостей показывает, что при малых значениях отношения  $R_1/R < 2$  имеет место высокая неоднородность вихревых токов. С увеличением отношения  $R_1/R$  однородность вихревых токов повышается. Здесь следует отметить, что при оценке степени однородности возбуждаемых вихревых токов рассматривалась амплитуда результирующих вихревых токов двухсекционной обмотки возбуждения (рис. 1) и еще одной двухсекционной обмотки, повернутой на  $90^\circ$  относительно первой обмотки.



**Рис. 3.** Распределение плотности вихревых токов для различных значений соотношения  $R_1/R$

На рис. 4 приведены зависимости фазы вихревых токов на поверхности прутка от угла местоположения  $\alpha$  для различных значений отношения  $R_1/R$ . Их анализ показывает, что при малых значениях отношения  $R_1/R < 2$  имеет место существенное изменение фазы возбуждаемых продольных вихревых токов при изменении угла местоположения. В этом случае использование амплитудно-фазовой отстройки от влияния на результаты дефектоскопии поперечных смещений контролируемого прутка становится неэффективным, поскольку фаза сигнала ВТП от поперечного смещения аналогичным образом будет зависеть от направления смещения. При значениях соотношения  $R_1/R > 2,5$  фаза вихревых токов остается практически постоянной неза-

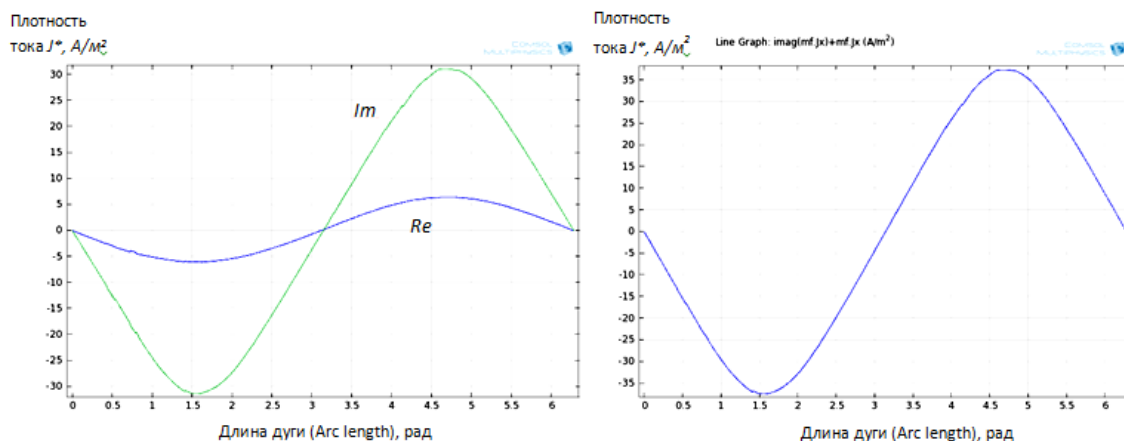
висимо от угла местоположения на поверхности прутка, что позволяет эффективно использовать амплитудно-фазовую отстройку от влияния поперечных смещений прутка.



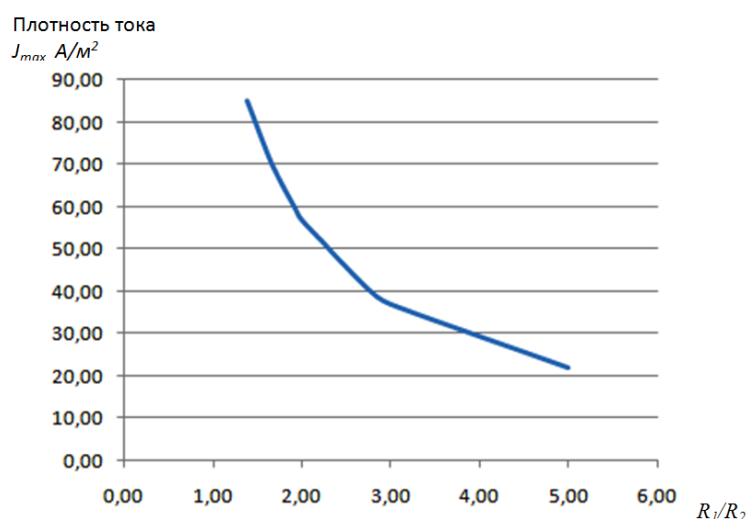
**Рис. 4.** Зависимости фазы вихревых токов на поверхности прутка от угла местоположения  $\alpha$  для различных значений отношения  $R_1/R$

На рис. 5 приведены зависимости комплексных составляющих и суммарной плотности вихревых токов на поверхности прутка от угла местоположения  $\alpha$  для  $\frac{R_1}{R_2} = 3$ .

Сопоставление зависимостей  $J^*(\theta)$  для разных значений радиуса  $R_1$ , и  $\Psi(\theta)$  показывает, что при  $R_1 \rightarrow R$  азимутальное распределение вихревых токов характеризуется высокой неоднородностью. При увеличении  $R_1$  распределение становится более равномерным и форма зависимости близка к синусоидальной при  $R_1/R \approx 3$  (рис. 5), кроме того, суммарный вихревой ток, обусловленный токами проводников и ортогональной им пары проводников другой системы обмоток в реальном ВТП при таком соотношении уже практически не будет зависеть от азимута  $\theta$ . Дальнейшее увеличение  $R$  позволяет получить ещё более линейную характеристику  $\Psi(\theta)$ , но это неэффективно вследствие сильного ослабления поля (рис. 6).



**Рис. 5.** Зависимости комплексных составляющих и суммарной плотности вихревых токов на поверхности прутка от угла местоположения  $\alpha$  для  $R_1/R = 3$



**Рис. 6.** Зависимость модуля максимальной плотности вихревого тока на поверхности объекта контроля от соотношения  $R_1/R$

Также следует отметить, что аналитическое решение с принятыми допущениями полностью соответствует результатам, полученным численными методами, и вполне применимо для подобного рода задач, связанных с нахождением распределения амплитуды вихревых токов. Существенным недостатком является лишь невозможность определения фазы вихревых токов, играющей важную роль в широком диапазоне задач, в частности отстройки от влияния поперечных смещений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полевода А.А., Федосенко И.Ю. О вихретоковой дефектоскопии с проходными преобразователями для поточного контроля труб и проката // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 1998. – Т. 64. – № 1. – С. 31–35.
2. Булгаков В.Ф., Бутенко Е.В., Гольдштейн А.Е., Жуков В.К. Электромагнитные методы и средства неразрушающего контроля // Известия Томского политехнического университета. – 2000. – Т. 303. – Вып. 1. – С. 250–261.
3. Гольдштейн А.Е., Калганов С.А. Вихретоковая дефектоскопия протяженных цилиндрических изделий с использованием возбуждения разночастотных пространственных компонент магнитного поля // Дефектоскопия. – 2000. – № 5. – С. 65–71.
4. Гольдштейн А.Е., Бутенко Е.В. Вихретоковый преобразователь с разночастотными пространственными компонентами магнитного поля // Дефектоскопия. – 2001. – № 5. – С. 32–41.

Поступила 24.05.2013 г.